

Avaliação do Atrito na Interface de Contacto entre a Apara e a Ferramenta de Corte

Fábio André dos Santos Baptista

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Mecânica

Orientadores: Prof. Pedro Alexandre Rodrigues Carvalho Rosa

Prof. Pedro Miguel de Almeida Areias

Júri

Presidente: Prof. Rui Manuel dos Santos Oliveira Baptista

Orientador: Prof. Pedro Alexandre Rodrigues Carvalho Rosa

Vogais: Prof. Jorge Manuel da Conceição Rodrigues

Prof. Luís Manuel Guerra da Silva Rosa

Setembro 2021

Agradecimentos

Gostaria de começar por agradecer a todos os que de uma forma ou outra contribuíram para a realização da presente dissertação.

Aos meus orientadores, Prof. Pedro Rosa e Prof. Pedro Areias, pela oportunidade de desenvolver os meus conhecimentos científicos no Laboratório de Maquinagem e Micro-Fabrico, durante um estágio inicial e posteriormente no desenvolvimento da presente dissertação. Assim como por todo o apoio e lições transmitidas durante este período.

À empresa Palbit S.A. pelas ferramentas de corte fornecidas e aplicação dos revestimentos das mesmas que foram essenciais para os ensaios realizados.

Ao Eng. Pedro Santos, Eng. Miguel Saragoça e ao Fábio Garcia por toda a ajuda e aprendizagem que tive com eles, assim como todo o companheirismo. A todos os colegas com quem me cruzei no Laboratório de Maquinagem e Micro-Fabrico e ao corpo técnico do Núcleo de Oficinas (NOF) que foram também relevantes no desenvolvimento do meu trabalho e que contribuíram de forma importante para o seu sucesso.

Gostaria também de expressar o meu agradecimento ao Laboratório de Tecnologia Mecânica e ao técnico de laboratório Carlos Farinha.

Agradeço ainda à Matilde Silva e ao Eng. Paulo Farinha relativamente aos projetos realizados pelos mesmos anteriormente e que ajudaram no desenvolvimento experimental do meu trabalho.

Por fim, quero agradecer aos meus pais e ao meu irmão, por me terem apoiado incondicionalmente durante todo o meu percurso académico, motivando-me sempre a lutar pelos meus objetivos e a encarar todos os obstáculos nesse percurso com esforço e determinação.

Institutional Acknowledgments

This work was supported by FCT, through IDMEC, under LAETA, project UIDB/50022/2020.

The project MAMTool entitled “Machinability of Additive Manufactured Parts for Tooling Industry” funded by the Programa Operacional Competitividade e Internacionalização, and Programa Operacional Regional de Lisboa funded by FEDER and National Funds (FCT) is acknowledged (Reference PTDC/EME-EME/31895/2017).

Laboratory of Machining and Micro Manufacturing (LabM3), Instituto Superior Técnico, for proposing the theme of this dissertation and for performing the laboratorial experiments analysed in this work.

ENSAM (École Nationale Supérieure D’Arts Et Métiers) and CIRP for the materials provided for this work.

Co-financed by:



Laboratory of Machining
& Micro-Manufacturing

Resumo

Os processos de corte por arranque de apara envolvem mecanismos de atrito que ainda não estão perfeitamente compreendidos. A presente investigação procura contribuir para melhorar a compreensão da tribologia no corte por arranque de apara através de uma investigação experimental. O desenvolvimento experimental consistiu na instalação de uma bancada de ensaios para a realização de ensaios tribológicos em condições laboratoriais controladas e representativas dos processos de maquinagem. O plano de ensaios envolveu a avaliação do coeficiente de atrito para diferentes condições de corte numa gama alargada de materiais em condições de atmosfera controlada. A utilização de ferramentas de contacto restrito permitiu avaliar a contribuição física da adesão na interface de contacto e revelar o papel da oxidação metálica no valor do coeficiente de atrito.

Palavras-chave: Maquinagem, corte ortogonal, tribologia, atrito, adesão, oxidação

Abstract

Metal cutting processes involve friction mechanisms which are not fully understood. The present work seeks to contribute to a better understanding of the metal cutting tribology throughout experimental research. The experimental development consisted of setting up an experimental apparatus in order to perform tribological tests under controlled laboratory conditions and representative of machining processes. The research plan involved the evaluation of the friction coefficient for different cutting conditions on a large variety of materials under controlled atmosphere conditions. The use of restricted contact cutting tools (RT tools) allowed to assess the physical contribution of adhesion at the contact interface and to reveal the role of metallic oxidation regarding the value of the friction coefficient.

Keywords: Machining, orthogonal cutting, tribology, friction, adhesion, oxidation

Índice

Agradecimentos	ii
Institutional Acknowledgments	iii
Resumo	iv
Abstract	v
Índice	vi
Lista de Figuras	vii
Lista de Tabelas	xv
Lista de Símbolos	xvi
Abreviaturas	xviii
1. Introdução	1
2. Fundamentos Teóricos	2
2.1. Fundamentos da Tribologia	2
2.2. Tribologia do Corte Ortogonal	8
3. Desenvolvimento Experimental.....	13
3.1. Montagem Experimental	13
3.2. Calibração da Célula de Carga.....	16
4. Materiais e Métodos.....	20
4.1. Preparação das Ferramentas	20
4.2. Materiais Ensaçados.....	29
4.3. Definição dos Parâmetros de Corte.....	31
4.4. Plano de Ensaios	35
5. Análise dos Resultados	37
5.1. Ensaios de Corte Ortogonal Unidirecional	37
5.2. Ensaios de Corte Ortogonal Bidirecional	48
5.3. Estimativa do Coeficiente de Atrito.....	55
5. Conclusões	60
Perspetiva de Trabalho Futuro	61
Referências	62
Anexos	65

Lista de Figuras

2.1 – Representação esquemática do aspeto real de uma superfície quando analisada ao nível microscópico (CENAM - División Metrología Dimensional)	3
2.2 – Representação esquemática da distribuição de tensões normal e de corte friccional ao longo da face de ataque da ferramenta (Özel e Altan, 2000).....	5
2.3 – Representação esquemática das principais variáveis do processo de corte ortogonal.....	9
2.4 – Representação dos mecanismos de formação da apara, em que a ferramenta se move da direita para a esquerda; (a) observação do equilíbrio da apara na ação das forças transmitidas através da interface apara-ferramenta e através do plano de corte; (b) modelo de Ernst-Merchant que descreve o comportamento da apara como um corpo rígido (Pereira, 2009).....	10
2.5 – Representação esquemática das forças tangencial e normal na interação entre a ferramenta de corte com $\alpha=0^\circ$ e a apara dum provete ensaiado com uma célula de carga (CC).....	11
2.6 – Figura 2.6 – Representação esquemática de diferentes ensaios e do tipo de ferramentas utilizadas. (a) Ensaio tradicional de corte ortogonal com ferramenta de faces planas; (b) Ensaio de corte ortogonal mas com ferramenta de contacto restrito, ou seja, o comprimento de contacto está limitado a uma faixa da face de ataque original; (c) Ensaio bidirecional utilizando uma ferramenta de contacto restrito, envolvendo o movimento da ferramenta em duas direções ao longo do corte.....	12
3.1 – Dispositivo de fixação do provete. (a) Vista isométrica com maior detalhe da região para colocação de um provete circular e das guias; (b) Fotografia do dispositivo final obtido (grenalhado para evitar escorregamento).....	13
3.2 – Acessórios de retificação dos provetes ensaiados. (a) Dispositivo de fixação da mó retificadora; (b) Dispositivo de fixação do disco para colagem de um abrasivo; (c) Disco de material abrasivo.....	14
3.3 – Acessórios do trabalho experimental realizado. (a) Câmara e lente utilizadas na filmagem dos ensaios montadas num suporte de movimento cruzados; (b) Comparador Mitutoyo com uma resolução de 1 μm	15
3.4 – Equipamentos constituintes do aparato experimental. (a) Câmara de controlo da atmosfera; (b) Reservatórios de Argon e Oxigénio com redutores de pressão instalados.....	15
3.5 – Equipamentos utilizados na aquisição de dados experimentais. (a) Extensómetros constituintes da célula de carga; (b) Placa de aquisição de dados National Instruments USB-9162; (c) Aparato experimental no interior da câmara atmosférica.....	16
3.6 – Acessórios de calibração da célula de carga. (a) Imagem esquemática dos pesos e componentes que transmitem as forças à célula de carga: 1 – Massas calibradas, 2 – Elemento de calibração do eixo vertical, 3 – Elementos de contacto pontual com a CC (semi-esferas soldadas nas extremidades das peças 2 e 4); 4 – Elemento de calibração do eixo horizontal (Farinha, 2016); (b) Varão de calibração do	

eixo vertical; (c) Dispositivo para calibração do eixo horizontal; (d) Semiesfera para contacto pontual colocada na extremidade do aplicador de força para calibração do eixo horizontal.....	17
3.7 – Dinamómetro digital utilizado para medição de forças. (a) Esquema explicativo das forças envolvidas; (b) Operação de medição real com dispositivo de calibração do eixo horizontal.....	18
3.8 – Representação gráfica da calibração dos eixos: (a) Vertical; (b) Horizontal.....	19
4.1 – Ferramentas de corte com e sem entalhe. (a) Figura esquemática do perfil duma ferramenta de referência; (b) Figura esquemática do perfil duma ferramenta de contacto restrito (onde l_{ct} corresponde ao comprimento de contacto, l_{caixa} ao comprimento da caixa e p_{caixa} à profundidade da caixa); (c) Comparação entre duas ferramentas.....	20
4.2 – Técnicas e elementos de polimento. (a) Pasta abrasivas utilizadas; (b) Pano de polimento com tamanho de grão abrasivo de 5 μm ; (c) Máquina de limpeza por ultrassons.....	21
4.3 – (a) Direção das passagens de polimento da face de saída paralelas à aresta de corte; (b) Direção das passagens de polimento da face de ataque a 45° com aresta de corte.....	21
4.4 – Superfície virgem da face de saída com ampliação de: (a) 50X; (b) 2X.....	22
4.5 – Superfície da face de ataque após passagem do abrasivo de 7 μm . Observação com ampliação de: (a) 50X; (b) 2X.....	22
4.6 – Superfície da face de ataque após passagem do abrasivo de 5 μm . Observação com ampliação de: (a) 50X; (b) 2X.....	22
4.7 – Superfície da face de ataque após passagem do abrasivo de 3.5 μm . Observação com ampliação de: (a) 50X; (b) 2X.....	23
4.8 – Superfície da face de ataque após passagem do abrasivo de 2.5 μm . Observação com ampliação de: (a) 50X; (b) 2X.....	23
4.9 – Superfície da face de ataque após passagem do abrasivo de 1.5 μm . Observação com ampliação de: (a) 50X; (b) 2X.....	23
4.10 – Superfície da face de ataque após passagem do abrasivo de 0.5 μm . Observação com ampliação de: (a) 50X; (b) 2X.....	23
4.11 – Superfície virgem da face de saída. Observação com ampliação de: (a) 50X; (b) 1X.....	24
4.12 – Superfície da face de saída após passagem do abrasivo de 7 μm . Observação com ampliação de: (a) 50X; (b) 1X.....	24
4.13 – Superfície da face de saída após passagem do abrasivo de 5 μm . Observação com ampliação de: (a) 50X; (b) 1X.....	24
4.14 – Superfície da face de saída após passagem do abrasivo de 3.5 μm . Observação com ampliação de: (a) 50X; (b) 1X.....	24

4.15 – Superfície da face de saída após passagem do abrasivo de 2.5 μm . Observação com ampliação de: (a) 50X; (b) 1X.....	25
4.16 – Superfície da face de saída após passagem do abrasivo de 1.5 μm . Observação com ampliação de: (a) 50X; (b) 1X.....	25
4.17 – Superfície da face de saída após passagem do abrasivo de 0.5 μm . Observação com ampliação de: (a) 50X; (b) 1X.....	25
4.18 – Pedras de polir e direção das passagens efetuadas com as ferramentas. (a) Pedra de polir de 6000; (b) Pedra de polir de 2000.....	26
4.19 – Comparação da rugosidade na face de ataque de duas ferramentas, sendo a inferior sempre polida. (a) Superfície polida da face de ataque em ambas as ferramentas; Superfície da face de ataque de uma ferramenta (superior) após passagem na pedra de polir de: (b) 6000; (c) 2000; (d) 600.....	26
4.20 – Conjunto de ferramentas que serão revestidas (caixas à esquerda) e as não revestidas (caixa à direita).....	27
4.21 – Diagrama esquemático do processo de High-Power Impulse Magnetron Sputtering (Cortesia Semicore Equipment, Inc).....	27
4.22 – Comparação visual entre as diferentes fases da preparação de uma ferramenta de corte, isto é, uma ferramenta Palbit original (1), uma ferramenta polida (2) e uma ferramenta polida e revestida (3). (a) Fotografia de microscopia com ampliação de 2X; (b) Panorama geral dos três tipos de ferramenta.....	28
4.23 – Análise de uma ferramenta de corte RT120. (a) Visualização 3D da face de ataque da ferramenta com ampliação de 10X (1 – Face de ataque com um comprimento de contacto controlado; 2 – Face de saída); (b) Diagrama da secção perpendicular à aresta de corte da ferramenta.....	28
4.24 – Diferentes tipos de ferramentas de corte utilizadas (vista lateral) com comprimento de contacto restrito de: (a) Ferramenta de referência (sem comprimento de contacto restrito, RT00); (b) 30 μm (RT30); (c) 60 μm (RT60); (d) 120 μm (RT120); (e) 240 μm (RT240); (f) 480 μm (RT480).....	29
4.25 – Aspeto de alguns dos materiais ensaiados: liga de Alumínio AA1085; cobre puro (proвете encruado); Cobre puro (proвете recozido); Aço maraging 18Ni 300 grade por fabrico aditivo (ordem da esquerda para a direita).....	31
4.26 – Formação de diferentes aparas num ensaio de corte ortogonal. (a) Aparas com geometria indesejável (AA1085, encruado, $V_c = 45 \text{ mm/min}$, $w_a = 1.4 \text{ mm}$, árgon, Wc-Co, $R_a \approx 0.01 \mu\text{m}$); (b) Aparas com a geometria desejada (<i>zinco puro</i> , encruado, $V_c = 45 \text{ mm/min}$, $w_a = 1.03 \text{ mm}$, árgon, Wc-Co, $R_a \approx 0.01 \mu\text{m}$)	31
4.27 – Formação da apara utilizando a ferramenta RT30 (AA1085, $V_c = 45 \text{ mm/min}$, $w_a = 1.4 \text{ mm}$, Wc-Co, $R_a \approx 0.01 \mu\text{m}$) para diferentes profundidades de corte, e: (a) 13 μm (apara aceitável); (b) 14 μm (apara	

aceitável); (c) 16 μ m (apara excede comprimento da face de ataque); (d) 20 μ m (apara excede comprimento da face de ataque); (e) 25 μ m (apara excede comprimento da face de ataque).....	32
4.28 – Formação da apara utilizando a ferramenta RT60 (AA1085, $V_c = 45$ mm/min, $w_a = 1.4$ mm, Wc-Co, $R_a \approx 0.01$ μ m) para diferentes profundidades de corte, e: (a) 22 μ m (apara inaceitável); (b) 30 μ m (apara aceitável); (c) 33 μ m (apara inaceitável); (d) 35 μ m (apara excede comprimento da face de ataque); (e) 36 μ m (apara excede comprimento da face de ataque); (f) 39 μ m (apara excede comprimento da face de ataque); (g) 40 μ m (apara excede comprimento da face de ataque); (h) 45 μ m (apara excede comprimento da face de ataque).....	32
4.29 – Formação da apara utilizando a ferramenta RT120 (AA1085, $V_c = 45$ mm/min, $w_a = 1.4$ mm, Wc-Co, $R_a \approx 0.01$ μ m) para diferentes profundidades de corte, e: (a) 30 μ m (apara inaceitável); (b) 36 μ m (apara inaceitável); (c) 40 μ m (apara aceitável); (d) 50 μ m (apara aceitável); (e) 56 μ m (apara aceitável).....	33
4.30 – Formação da apara utilizando a ferramenta RT240 (AA1085, $V_c = 45$ mm/min, $w_a = 1.4$ mm, Wc-Co, $R_a \approx 0.01$ μ m) para diferentes profundidades de corte, e: (a) 83 μ m (apara inaceitável); (b) 89 μ m (apara inaceitável); (c) 95 μ m (apara aceitável); (d) 97 μ m (apara aceitável); (e) 99 μ m (apara aceitável); (f) 101 μ m (apara excede comprimento da face de ataque); (g) 102 μ m (apara excede comprimento da face de ataque); (h) 106 μ m (apara excede comprimento da face de ataque).....	34
4.31 – Formação da apara utilizando a ferramenta RT480 (AA1085, $V_c = 45$ mm/min, $w_a = 1.4$ mm, Wc-Co, $R_a \approx 0.01$ μ m) para diferentes profundidades de corte, e: (a) 71 μ m (apara aceitável); (b) 73 μ m (apara aceitável); (c) 78 μ m (apara aceitável); (d) 90 μ m (apara aceitável); (e) 100 μ m (apara aceitável); (f) 101 μ m (apara aceitável); (g) 114 μ m (apara excede comprimento da face de ataque); (h) 118 μ m (apara excede comprimento da face de ataque).....	34
5.1 – Ensaio de referência. (a) Formação da apara num ensaio unidirecional; (b) Evolução das forças de corte e de penetração assim como do coeficiente de atrito durante um ensaio de corte ortogonal de referência (Cobre, recozido, $V_c = 45$ mm/min, $w_a = 1.36$ mm, $t_0 = 0.018$ mm, árgon, Wc-Co, $R_a \approx 0.01$ μ m).....	37
5.2 – Acumulação de material na extremidade do provete devido aos sucessivos ensaios e interação com a apara formada. (AA1085, $V_c = 45$ mm/min, $w_a = 1.4$ mm, árgon, Wc-Co, $R_a \approx 0.01$ μ m). (a)-(e): Instantes finais de um ensaio de corte ortogonal.....	38
5.3 – Ensaio em condições de corte ortogonal (AA1085, $V_c = 45$ mm/min, $w_a = 1.42$ mm, árgon, Wc-Co, $R_a \approx 0.01$ μ m). (a) Evolução da força de corte com a espessura de corte; (b) Evolução da força de penetração com a espessura de corte; (c) Evolução da pressão específica de corte com a espessura de corte; (d) Relação entre as forças de corte e de penetração; (e) Evolução da tensão normal na face de ataque com a espessura de corte; (f) Evolução da tensão de corte na face de ataque com a espessura de corte; (g) Relação entre as tensões normal e de corte; (h) Relação entre os ângulos de atrito obtidos a partir dos gráficos de força e de tensões.....	39

5.4 – Ensaios em condições de corte ortogonal (Cobre (encruado), $V_c = 45$ mm/min, $w_a = 1.05$ mm, árgon, Wc-Co, $R_a \approx 0.01$ μ m). (a) Evolução da força de corte com a espessura de corte; (b) Evolução da força de penetração com a espessura de corte.....	41
5.5 – Ensaios em condições de corte ortogonal (Cobre (recozido), $V_c = 45$ mm/min, $w_a = 1.36$ mm, árgon, Wc-Co, $R_a \approx 0.01$ μ m). (a) Evolução da força de corte com a espessura de corte; (b) Evolução da força de penetração com a espessura de corte; (c) Evolução da pressão específica de corte com a espessura de corte; (d) Relação entre as forças de corte e de penetração; (e) Evolução da tensão normal na face de ataque com a espessura de corte; (f) Evolução da tensão de corte na face de ataque com a espessura de corte; (g) Relação entre as tensões normal e de corte; (h) Relação entre os ângulos de atrito obtidos a partir dos gráficos de força e de tensões.....	42
5.6 – Observação microscópica de duas ferramentas, RT ∞ polida e RT480 polida e revestida, colocadas paralelamente. (a) Ampliação de 3X; (b) Ampliação de 50X.....	43
5.7 – Evolução das forças de corte e de penetração com a espessura de corte em condições de corte ortogonal (Cobre (recozido), $V_c = 45$ mm/min, $w_a = 1.36$ mm, árgon, Wc-Co, $R_a \approx 0.01$ μ m). (a)/(b) – Hipótese de análise através dum modelo de atrito linear para cada ferramenta individual.....	44
5.8 – Apara obtida nos ensaios de corte ortogonal realizados com ferramenta e profundidade de corte, respetivamente: (a) RT30 e $e = 25$ μ m ; (b) RT120 e $e = 50$ μ m; (c) RT480 e $e = 78$ μ m (AA1085, $V_c = 45$ mm/min, $w_a = 1.42$ mm, árgon, Wc-Co, $R_a \approx 0.01$ μ m).....	45
5.9 – Apara obtida nos ensaios de corte ortogonal realizados com ferramenta e profundidade de corte, respetivamente: (a) RT30 e $e = 11$ μ m; (b) RT120 e $e = 52$ μ m; (c) RT480 e $e = 89$ μ m (Cobre (recozido), $V_c = 45$ mm/min, $w_a = 1.36$ mm, árgon, Wc-Co, $R_a \approx 0.01$ μ m).....	45
5.10 – Evolução das forças de corte e de penetração ao longo de um ensaio de corte ortogonal acompanhada da apara formada em quatro fases do ensaio. 1 – Apara obtida no contacto inicial da ferramenta com o provete; 2 – Apara começa a desenvolver-se e ocupa por completo o comprimento de contacto restrito; 3 – Apara inicia o enrolamento; 4 – Apara adquire um comportamento estacionário tendo os parâmetros associados valores constantes (fase estacionária demarcada pelas duas linhas verticais).....	46
5.11 – Análise do gráfico força de penetração vs espessura de corte. (a) Deslocamento dos resultados referentes às ferramentas RT120 e RT480 se seguirem a linha de tendência definida pelos resultados da ferramenta RT30 no gráfico força de penetração correspondente à força tangencial na face de ataque; (b) Linha de tendência definida pelos três conjuntos de resultados das ferramentas revestidas e comprimento de contacto restrito (Cobre (recozido), $V_c = 45$ mm/min, $w_a = 1.36$ mm, árgon, Wc-Co, $R_a \approx 0.01$ μ m).....	46
5.12 – Percurso percorrido por um elemento de volume no corte ortogonal com duas ferramentas de corte com comprimentos de contacto restrito diferentes.....	47

5.13 – Análise das diferentes fases dos ensaios uni e bidirecionais. (a) Resposta gráfica dum ensaio unidirecional; (b) Assinatura gráfica dum ensaio bidirecional onde a força tangencial é sempre positiva; (c) Ensaio bidirecional com inversão do sentido da força tangencial.....	49
5.14 – Valores experimentais da força de corte, F_c , força de penetração, F_p , e coeficiente de atrito, μ , para um ensaio unidirecional coma ferramenta RT00.....	50
5.15 – Valores experimentais da força de corte, F_c , força de penetração, F_p , e coeficiente de atrito, μ , para o ensaio unidirecional com ferramenta polida, revestida e comprimento de contacto restrito de $480\mu\text{m}$	50
5.16 – Valores experimentais da força de corte, F_c , força de penetração, F_p , e coeficiente de atrito, μ , para o ensaio bidirecional com ferramenta não revestida RT00.....	51
5.17 – Valores experimentais do coeficiente de atrito μ na fase final do ensaio bidirecional com ferramenta não revestida RT00.....	51
5.18 – Valores experimentais da força de corte, F_c , força de penetração, F_p , e coeficiente de atrito, μ , para o ensaio bidirecional com ferramenta RT480.....	51
5.19 – Valores experimentais do coeficiente de atrito μ na fase final do ensaio bidirecional com ferramenta RT480.....	52
5.20 – Interação da ferramenta com a apara em quatro instantes diferentes num ensaio bidirecional e medição das forças pela célula de carga (CC). (a) Movimento horizontal da ferramenta correspondente ao corte ortogonal; (b) Paragem da ferramenta e mudança da direção de movimento da ferramenta. Este instante corresponde ao patamar de força registado a meio dos dois tipos de gráficos obtidos em ensaios bidirecionais; (c) Recuperação elástica do material do provete que deixa de estar em compressão (observar inversão do sentido da força tangencial); (d) Saída da ferramenta com as forças a diminuírem à medida que varia a área de contacto.....	53
5.21 – Ensaio bidirecional sem inversão do sinal da força tangencial (RT00, cobre (recozido), árgon, $t_0 = 150\ \mu\text{m}$, $V_c = 45\ \text{mm/min}$, $w_a = 1.36\ \text{mm}$, Wc-Co, $R_a \approx 0.01\ \mu\text{m}$). (a) Gráfico de forças e coeficiente de atrito; (b) Registo fotográfico dos vários instantes do ensaio referidos na Fig. 5.13(b)....	54
5.22 – Ensaio bidirecional com inversão do sinal da força tangencial (RT480, cobre (recozido), árgon, $t_0 = 100\ \mu\text{m}$, $V_c = 45\ \text{mm/min}$, $w_a = 1.36\ \text{mm}$, Wc-Co, $R_a \approx 0.01\ \mu\text{m}$). (a) Gráfico de forças e coeficiente de atrito; (b) Registo fotográfico dos vários instantes do ensaio referidos na Fig. 5.13(c)....	54
5.23 – Exemplo de ensaios bidirecionais sem inversão do sentido da força tangencial (AISI1045 (encruado), $V_c = 45\ \text{mm/min}$, atmosfera ambiente, Wc-Co, $R_a \approx 0.01\ \mu\text{m}$).....	55
5.24 – Observação microscópica duma ferramenta RT480 polida e revestida com defeitos ao longo da sua largura devido aos sucessivos ensaios experimentais realizados (ampliação de 4X). A aresta inferior corresponde à aresta de corte.....	57

5.25 – Formação da apara serrilhada/lamelar em ensaios de corte ortogonal de provetes de aço maraging por fabrico aditivo. (Aço maraging 18Ni 300 grade por fabrico aditivo, $V_c = 45$ mm/min, $w_a = 2$ mm, árgon, Wc-Co, $R_a \approx 0.01$ μ m). (a) $t_0 = 100\mu$ m; (b) $t_0 = 100\mu$ m; (c) $t_0 = 100\mu$ m; (d) $t_0 = 50\mu$ m; (e) $t_0 = 60\mu$ m; (f) Imagem esquemática da formação da apara lamelar (Bergander e Salmen, 2000).....	58
5.26 – Formação da apara num ensaio de corte ortogonal e evolução do plano de corte (variação do comprimento e do ângulo do plano de corte, ϕ). (a)-(c) – Diferentes instantes do ensaio (Cobre (recozido), $e = 98$ μ m, $V_c = 45$ mm/min, $w_a = 1.36$ mm, árgon, Wc-Co, $R_a \approx 0.01$ μ m).....	59
A1 – Painel de controlo da máquina de ensaios.....	65
A2 – Componente de calibração vertical. (a) Componente inserido no spindle da fresadora com o prato das massas calibradas vazio; (b) Posicionamento correto do componente para aplicação da carga vertical no centro da célula de carga; (c) Estrutura de calibração horizontal do tipo alavanca. As massas calibradas são colocadas num prato que se fixa na extremidade superior da alavanca e o peso das massas é convertido numa força horizontal na extremidade inferior da mesma.....	66
A3 – Conjunto de instrumentos e utensílios necessários no interior da câmara para a realização dos ensaios de corte ortogonal.....	67
A4 – Preparação/recondicionamento da ferramenta de corte. (a) Caixa de armazenamento das ferramentas de corte. (b) Acessórios de limpeza da ferramenta de corte (papel de lixa com granulometria de 180, cotonete e acetona). (c) Direção correta das passagens com a lixa na face de ataque da ferramenta. (d) Direção correta das passagens com a lixa na face de ataque vista do lado da face de saída.....	68
A5 – Método de registo do offset entre a ferramenta de corte e a mó de retificação utilizadas num ensaio. (a) Ferramenta de corte em contacto com o suporte do provete; (b) Mó de retificação em contacto com o suporte do provete; (c) Indicador de coordenadas.....	69
A6 – Esvaziamento da câmara atmosférica. (a) Fecho do invólucro da câmara e orifício para extração da atmosfera interior; (b) Operação de extração do ar interior da câmara.....	69
A7 – Garrafa com gás árgon e acessórios. (a) Válvulas de emergência e de controlo de fluxo da botija; (b) Válvula de esfera e conector quick-release.....	70
A8 – Ensaio de corte ortogonal dum provete de zinco. (a) Formação de apara durante o ensaio de corte ortogonal; (b) Verificação da cota no final do ensaio com o comparador; (c) Operação de retificação de um provete após um ensaio de corte ortogonal.....	71
B1 – Formação da apara resultante de um ensaio de corte ortogonal. (a) Contacto inicial da ferramenta com o material do provete; (b) Início da formação da apara (regime transiente); (c) Formação de uma apara contínua, sendo esta formação um processo em si já estacionário com estabilização do valor das forças de corte e penetração, do atrito (dinâmico), do comprimento de contacto na face de ataque e da	

curvatura da apara; (d) Instantes finais do corte em que o valor das forças envolvidos no ensaio registam uma queda acentuada.....	74
D1 – Diagrama da secção transversal à aresta de corte de uma segunda ferramenta RT120.....	75
D2 – Análise da ferramenta RT120. (a) Representação da trajetória efetuada em cada uma das 50 medições feitas entre as faces de ataque e de saída de uma ferramenta; (b) Evolução do valor do raio de bico ao longo das medições efetuadas para a segunda ferramenta analisada.....	75
D3 – Análise de uma ferramenta de referência RT00. (a) Visualização 3D das faces de ataque e saída de uma ferramenta com ampliação de 10X; (b) Diagrama da secção perpendicular à aresta de corte; (c) Representação da trajetória efetuada em cada uma das 50 medições feitas entre as faces de ataque e de saída; (d) Evolução do valor do raio de bico ao longo das medições efetuadas para a terceira ferramenta analisada.....	76

Lista de Tabelas

2.1 – Modelos de atrito.....	5
4.1 – Parâmetros geométricos medidos na preparação de uma ferramenta de corte RT120.....	29
4.2 – Propriedades metalúrgicas da liga de Alumínio AA1085.....	30
4.3 – Propriedades metalúrgicas do Cobre puro.....	30
4.4 – Propriedades metalúrgicas do Aço Maraging 18Ni 300 <i>grade</i>	30
4.5 – Propriedades metalúrgicas do Zinco puro.....	30
4.6 – Propriedades metalúrgicas do AISI1045.....	30
4.7 – Propriedades metalúrgicas do Titânio.....	30
4.8 – Plano de ensaios.....	36
5.1 – Resultados do coeficiente de atrito médio obtido em ensaios unidirecionais com atmosfera de árgon.....	56
5.2 – Resultados do coeficiente de atrito médio obtido em ensaios bidirecionais com atmosfera de árgon.....	56
5.3 – Resultados do coeficiente de atrito médio obtido em ensaios bidirecionais com atmosfera ambiente.....	56
C – Tabela das especificações técnicas da fresadora Denford TRIAC.....	74
D1 – Resumo estatístico dos parâmetros geométricos medidos na preparação de uma ferramenta de corte.....	76
D2 – Resumo estatístico dos parâmetros geométricos medidos na preparação de uma ferramenta de corte.....	77

Lista de Símbolos

- α – Ângulo da face de ataque
- σ – Ângulo da face de saída
- ϕ – Ângulo do plano de corte
- Rc – Grau de encalque
- e – Espessura/profundidade da secção de corte
- t_0 – Espessura/profundidade da secção de corte
- e' – Espessura da apara
- \overline{AB} – Comprimento do plano de corte
- G – Esbeltez da apara
- V_c – Velocidade de corte
- V_s – Velocidade de saída da apara
- F_R – Força resultante na aresta de corte
- F_C – Força de corte
- F_p – Força de penetração
- F_T – Força tangencial
- F_N – Força normal
- K_s – Pressão específica de corte
- P_C – Potência de corte
- A_0 – Área da secção transversal da apara antes do corte
- b – Largura da apara
- T_f – Temperatura de fusão de um material
- β – Ângulo de atrito
- F_{apl} – Força aplicada devido ao peso próprio
- F_{din} – Força realizada através do dinamómetro
- F_V – Força vertical medida pela célula de carga
- F_H – Força horizontal medida pela célula de carga
- V_V – Tensão vertical devolvida pela célula de carga
- V_H – Tensão horizontal devolvida pela célula de carga

l_{ct} – Comprimento de contacto
 l_{caixa} – Comprimento da caixa
 p_{caixa} – Profundidade da caixa
 w_a – Largura do provete ensaiado
 σ_y – Tensão de cedência do material
 μ – Coeficiente de atrito adimensional
 m_f – Fator de atrito
 k – Tensão de corte máxima admissível (ou crítica)
 l_c – Comprimento de contacto da avara com a face de ataque da ferramenta de corte
 l_p – Comprimento em que existe adesão da avara na face de ataque
 τ_f – Tensão de corte friccional resultante
 σ_n – Tensão normal à superfície de contacto entre dois corpos
 HV – Dureza de Vickers
 n – Parâmetro de endurecimento do material
 α – Parâmetro da lei de endurecimento Swift-Voce
 K – Parâmetro do material
 v_f – Velocidade de escorregamento relativa entre a avara e a ferramenta de corte
 p – Sensibilidade do material à velocidade de escorregamento
 β_F – Ângulo de atrito obtido a partir do gráfico das forças de corte e de penetração
 β_σ – Ângulo de atrito obtido a partir do gráfico das tensões normal e de corte
 $m_{F_p F_c}$ – Inclinação das retas no gráfico das forças
 $m_{\tau\sigma}$ – Inclinação das retas no gráfico das tensões
 w_{atrito} – Trabalho realizado pelo acréscimo da força de atrito
 E_d – Energia necessária para o deslocamento adicional do elemento de volume
 ΔF_T – Diferença de força penetração (tangencial à face de ataque)
 ΔL_{ct} – Deslocamento adicional dum elemento de volume ao longo da face de ataque

Abreviaturas

CCC	<i>Cúbica de Corpo Centrado</i>
CFC	<i>Cúbica de Face Centrada</i>
HC	<i>Hexagonal Compacta</i>
RT	<i>Restricted Contact</i>

1. Introdução

O desempenho dos processos de maquinagem é fortemente influenciado pelos fenómenos tribológicos presentes na zona de interação entre a ferramenta e a apara. O aumento do atrito promove as forças envolvidas no processo, o consumo de energia, mas também a qualidade da superfície maquinada e o tempo de vida da ferramenta. Porém, estimar o valor do atrito e compreender a forma como este influencia a maquinagem de metais são temas ainda não consolidados. Neste estudo procura-se contribuir para uma melhor compreensão de alguns desses fenómenos e mecanismos que dificultam o escoamento das aparas, nomeadamente o atrito na interface apara-ferramenta. Os principais objetivos da investigação passam pelo desenvolvimento de um aparato experimental para investigação do corte ortogonal, a utilização desse aparato para a realização de ensaios em condições laboratoriais controladas, e a discussão compreensiva dos resultados encontrados. A investigação experimental passa pela aplicação de três metodologias laboratoriais distintas: o corte ortogonal com ferramentas de face direita; o corte ortogonal com ferramentas de contacto restrito; e finalmente uma técnica inovadora, ensaios de corte ortogonal bidirecional.

Neste trabalho, realiza-se uma investigação experimental orientada para a análise tribológica na interface de contacto entre a apara e a ferramenta de corte, mais especificamente, a variação do coeficiente de atrito com a utilização de gases inertes ou ativos. Esses gases ao interagirem com as novas superfícies metálicas quimicamente ativas podem originar a formação de óxidos. Consequentemente, utilizaram-se ferramentas de contacto restrito que permitiram avaliar a contribuição física da adesão na interface de contacto e revelar o papel da oxidação metálica no valor do coeficiente de atrito. O desenvolvimento experimental consistiu na instalação de uma bancada de ensaios para a realização de ensaios tribológicos em condições laboratoriais controladas e representativas dos processos de maquinagem. O coeficiente de atrito foi estimado através das forças medidas durante os ensaios.

Este documento está organizado em seis capítulos, começando pela presente introdução. O segundo capítulo é dedicado a uma explicação introdutória dos fundamentos teóricos do corte por arranque de apara e dos seus parâmetros fundamentais. O terceiro e quarto capítulos são dedicados ao desenvolvimento experimental. Sendo que no primeiro, apresenta-se a máquina de ensaios tribológicos utilizada para realizar os ensaios pretendidos. Relativamente ao quarto capítulo, este descreve o aparato experimental utilizado nos ensaios assim como o plano de ensaios seguido na realização deste trabalho. O quinto capítulo corresponde à análise dos resultados obtidos. Na última secção, o sexto capítulo apresenta as conclusões e as perspetivas de trabalho futuro resultantes da presente dissertação.

2. Fundamentos Teóricos

2.1. Fundamentos da Tribologia

A realização de uma observação a nível microscópico de uma qualquer superfície permite verificar que esta não é completamente lisa, existindo irregularidades, geralmente denominadas de asperezas, constituídas por picos e vales que originam a rugosidade dessa mesma superfície. Estas características das superfícies são condições que influenciam o corte por arranque de aparas. Desta forma, estão ligadas ao acabamento e proteção do material da peça maquinada contra a corrosão e abrasão. As características superficiais, a temperatura e a atmosfera utilizadas no corte influenciam também o escorregamento da aparas sobre a face de ataque da ferramenta. Neste contexto, a ciência que estuda a mecânica do contacto entre superfícies é denominada tribologia, utilizando-se habitualmente o coeficiente de atrito para quantificar a dificuldade do escorregamento entre materiais. O atrito é um mecanismo que resulta da combinação de vários fenómenos físico-químicos, dos quais se destacam dois: a adesão entre materiais e a interferência mecânica entre asperezas.

2.1.1. Atrito

O atrito corresponde à força que se opõe ao movimento relativo, ou tendência para tal, entre duas superfícies em contacto. Atrito e desgaste não são propriedades características de um material, uma vez que correspondem sim a uma característica indicativa de como um par de materiais específico reage, em contacto, num certo ambiente quando sujeito a determinadas forças que tendem a promover o movimento relativo entre os materiais. No conceito de atrito importa distinguir entre atrito estático e atrito dinâmico. O primeiro conceito corresponde à situação em que se começa a aplicar força e nesse instante ainda não existe movimento relativo entre os dois corpos, sendo o segundo caso verificado quando já há movimento relativo no contacto entre as duas superfícies. O coeficiente de atrito estático é sempre superior ao dinâmico para o mesmo par de materiais e condições envolventes.

O atrito deve-se a um conjunto de mecanismos que atuam simultaneamente, mas que se manifestam de forma diferente em diferentes circunstâncias. Isto torna o estudo do atrito extremamente complexo envolvendo diferentes mecanismos ativos como: lubrificação, mecânica dos fluidos, mecânica dos sólidos deformáveis, ciência dos materiais, física e química de superfícies, termodinâmica, etc.

As forças de atrito são maioritariamente determinadas por dois fatores, para além da força aplicada: as propriedades dos materiais e a área de contacto estabelecida entre ambas as superfícies. O atrito não é, portanto, uma grandeza diretamente previsível pois ambos os fatores enunciados dependem muito das condições particulares que coexistem no sistema global. As propriedades dos materiais podem ser significativamente diferentes do que seria esperado, devido a várias situações: uma prende-se com facto de a sua superfície não ser na realidade plana (contendo fissuras,

porosidades e asperezas), que conduzem a que a área real de contacto seja menor que a área aparente; uma segunda situação corresponde à existência de impurezas na interface de contacto (gorduras que estão superficialmente interligadas com os óxidos, água, etc.). Outra situação deve-se à separação entre as superfícies por uma fina camada de óxidos no contacto entre materiais metálicos, com gamas de espessura que variam entre os 0,01–0,1 μm , que altera a interação química entre esses mesmos materiais, entre outras ocorrências (Silva, 2017).

2.1.2. Geometria das Superfícies e Rugosidade

O processo de fabrico de qualquer material introduz sempre defeitos no mesmo, que dão origem, por exemplo, à rugosidade. Assim, a superfície de qualquer material tem uma forma geométrica irregular, mesmo que não o pareça à vista desarmada. As formações que caracterizam qualquer superfície podem ser classificadas, ou seja, podem-se distinguir derivações macroscópicas (desvios), ondulações (flutuações), asperezas e microasperezas, relativamente a uma superfície verdadeiramente plana, consultar Fig. 2.1. Os defeitos superficiais e a rugosidade que uma superfície apresenta constituem protuberâncias, pelo que vão ter impacto no atrito entre superfícies, por exemplo, ao nível do fenómeno de interlocking e da adesão.

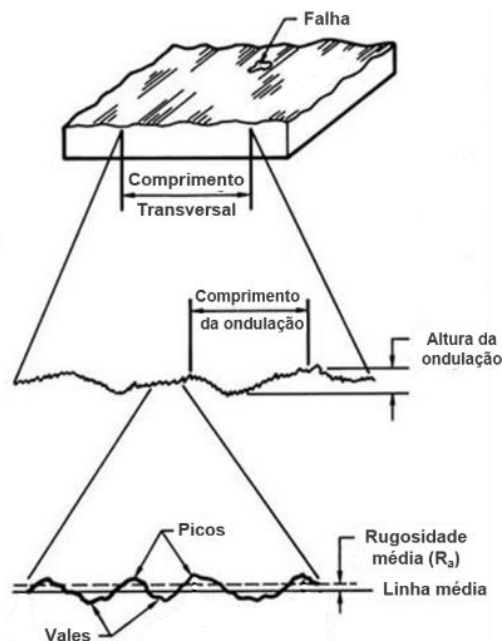


Fig. 2.1 – Representação esquemática do aspeto real de uma superfície quando analisada ao nível microscópico (CENAM - División Metrología Dimensional)

2.1.3. Adesão

O fenómeno da adesão é importante pois está implícito na geração de atrito. Este fenómeno é extremamente importante em certas situações como aplicações em vácuo e casos em que as superfícies são virgens ou estão muito limpas, tendo ainda influência em materiais com elevada

tendência para oxidação quando expostos ao ar. A adesão constitui a ligação entre protuberâncias numa interface quando sujeitas a elevadas pressões, podendo ser chamada de soldadura de pressão e constituindo-se como um fenómeno de ligação que ocorre a nível atómico. O fenómeno da adesão envolve o campo da física do estado sólido, relacionando-se com fatores físicos e químicos das superfícies. Relativamente às superfícies de contacto, de acordo com Maugis (2001), se estas forem ásperas ou contiverem impurezas, a adesão não se prevê relevante, podendo não se verificar de todo. A absorção de impurezas nas superfícies leva a que as ligações metálicas fiquem debilitadas, pelo que a adesão diminui bruscamente. As superfícies metálicas sem impurezas têm uma elevada energia de superfície, o que promove ligações metálicas mais fortes entre as mesmas quando existe contacto. O contacto entre superfícies recém-formadas deve ser evitado no que concerne ao atrito, embora seja uma tarefa quase impossível em certas situações, como no contacto entre a apara e a face de ataque de uma ferramenta de corte. De acordo com Maugis e Barquins (1980), diversos trabalhos experimentais demonstraram que imediatamente acima de uma determinada temperatura, a adesão entre metais cresce bruscamente com o seu aumento contínuo e tempo de contacto. Considera-se como um valor representativo desta temperatura aproximadamente $0.3T_f$, sendo T_f a temperatura de fusão do respetivo metal. Conclui-se que a adesão é um fenómeno que introduz um regime de tensões numa interface. Constituindo uma grandeza importante nos processos em que ocorre a geração de superfícies virgens, como no corte ortogonal de metais, a que se segue o contacto e a geração de atrito. Desta forma, a adesão é um importante fator no estudo do atrito no presente trabalho, uma vez que além de superfícies virgens no provete, a ferramenta tem as suas faces polidas.

2.1.4. Modelos de Atrito

Apesar de existirem inúmeras tentativas relativamente à modelação do atrito (Tabela 2.1), o atrito permanece como o fenómeno menos compreendido no corte de metais. Devido à sua simplicidade, a lei do atrito de Coulomb é adotada largamente na representação do modelo de corte ortogonal e pode ser expressa como a razão entre a média da tensão de corte e a pressão normal na face de ataque da ferramenta (Eq. 2.1). De acordo com o modelo de plasticidade de von Mises, a tensão de cedência ao corte é dada por $k = \sigma_y/\sqrt{3}$. Isto significa que o limite do modelo de Coulomb é $\mu = k/\sigma_y = 1/\sqrt{3} = 0.577$, devido a corresponder ao ponto de transição entre o escorregamento e a deformação ao corte (ausência de escorregamento). O modelo de atrito de tensão de corte constante (lei de Prandtl) contorna o problema ao assumir que a tensão de corte é proporcional à tensão crítica ao corte, k , (Eq. 2.2), ou seja, o fator de atrito, m_f , (o qual não deve ser confundido com o coeficiente de atrito) pode assumir valores desde 0 até 1. O modelo proposto por Zorev (1963) assume que a interface de contacto entre a apara e ferramenta (l_c) está dividida em duas regiões: adesão (l_p) perto da aresta de corte, e escorregamento ($l_c - l_p$) para além da primeira região, como ilustrado na face de ataque da ferramenta da Fig. 2.2. Devido às tensões normais muito elevadas, o autor define que ao longo de l_p , a tensão de corte iguala a tensão crítica ao corte do material (Eq. 2.3), ou seja, existe a ocorrência de deformação plástica (degolamento). Na região seguinte, l_c , o modelo de Coulomb é

aplicado. A utilização do modelo de atrito de tensão de corte constante na região de adesão e a lei de Coulomb na região de escorregamento, origina o modelo misto (Eq. 2.4). Importa distinguir o conceito de adesão aplicado na região l_p do modelo de Zorev e o conceito de adesão como um dos principais fatores que originam o atrito. Neste modelo, o terno adesão descreve a situação no qual a peça adere à superfície da face de ataque, estando estagnada nessa região. Seguindo uma tendência semelhante, Shirakashi e Usui (1973) propuseram uma equação não linear que satura na tensão crítica ao corte para elevadas pressões de contacto, semelhante à lei de Coulomb para baixas pressões de contacto. Para um melhor retrato da tensão de corte friccional média, Childs e Maekawa (1990) propuseram uma correção do modelo anterior. Existem também outras contribuições para a estimativa do coeficiente de atrito com a utilização da dureza (Eq. 2.6), contribuição da velocidade de escorregamento (Eq. 2.8) e aproximação polinomial das tensões normal e de corte/friccional (Eq. 2.9).

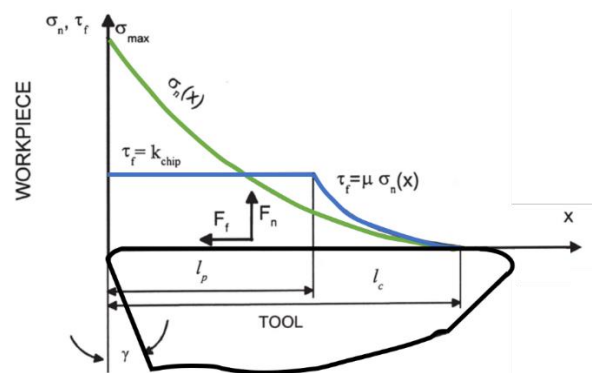


Fig. 2.2 – Representação esquemática da distribuição de tensões normal e de corte friccional ao longo da face de ataque da ferramenta (Özel e Altan, 2000)

Tabela 2.1 – Modelos de atrito

Modelo	Equação da tensão de corte friccional	Eq.
Amontons-Coulomb (1785)	$\tau_f = \mu \sigma_n$	(2.1)
Lei de Prandtl	$\tau_f = m_f k$	(2.2)
Zorev (1963)	$\tau_f = \begin{cases} k, & 0 \leq l \leq l_p \\ \mu \sigma_n, & l_p \leq l \leq l_c \end{cases}$	(2.3)
Modelo misto	$\tau_f = \begin{cases} m_f k, & 0 \leq l \leq l_p \\ \mu \sigma_n, & l_p \leq l \leq l_c \end{cases}$	(2.4)
Shirakashi e Usui (1973)	$\tau_f = k \left[1 - \exp\left(-\frac{\mu \sigma_n}{k}\right) \right]$	(2.5)
Iwata et al. (1984)	$\tau_f = \frac{HV}{0.07} \tanh\left(\frac{\mu \sigma_n}{HV/0.07}\right)$	(2.6)
Childs e Maekawa (1990)	$\tau_f = m_f k \left[1 - \exp\left(-\frac{\mu \sigma_n}{m_f k}\right) \right]^{1/n}$	(2.7)
Sekhon e Chenot (1993)	$\tau_f = -\alpha K \ v_f\ ^{p-1} v_f$	(2.8)
Yang e Liu (2002)	$\tau_f = \sum_{k=0}^4 \mu_k \sigma_n^k$	(2.9)

Os resultados insatisfatórios no que concerne à estimativa do atrito têm promovido a análise dos modelos já existentes como a sua correção com o desenvolvimento de novas abordagens. Sabendo que o efeito do atrito pode ser dividido em vários fatores, sendo os dois principais a adesão e as contribuições mecânicas (interlocking e deformação plástica), Grzesik (1999) estimou o termo da adesão, propondo uma abordagem para a estimativa do atrito que inclua a contribuição significativa da adesão. Relativamente aos modelos da região escorregamento/adesão, Arrazola e Özel (2010) mostraram que a maior desvantagem está relacionada com a incerteza relativa à tensão de corte no material, uma vez que é influenciada pelas condições do corte. Baseando-se na abordagem de Zorev, Zhou (2014) propõe uma nova estimativa do atrito que tenha em conta a camada de estagnação da avara (camada de material na zona l_p junto da superfície da face de ataque da Fig. 2.2). Cristino et al. (2010) concluíram que o corte com atmosfera controlada de oxigénio resulta em valores de atrito, fatores de compressão da avara e raio de curvatura mais elevados assim como valores do ângulo do plano de corte menores, sugerindo que a existência de filmes superficiais em superfícies virgens pode influenciar a formação da avara. Diversos autores têm notado que o material da peça maquinada, as características da ferramenta de corte, a lubrificação e a atmosfera são tudo fatores que influenciam os valores de coeficiente de atrito (Grzesik e Nieslony, 2004; Childs, 2006; Pulse et al., 2014; Rosa et al., 2019). A avaliação do atrito é normalmente realizada recorrendo a operações de maquinagem instrumentadas experimentalmente (sobretudo torneamento, mas também fresagem), através da força de corte, dimensões da avara e medições na superfície de contacto. A distinção entre as regiões de escorregamento e adesão é, contudo, desafiante em condições reais de corte. A realização de ensaios interrompidos aliados à utilização de técnicas de topografia das superfícies, mapeamento de elementos químicos, e de espectrometria de massa parecem ser uma boa abordagem na procura de uma estimativa do atrito (dos Santos et al., 2017; M'Saoubi e Chandrasekaran, 2005).

A existência de diferentes modelos de atrito deve-se ao facto de existir uma insatisfação com os modelos mais simples como o de Amontons-Coulomb não permitirem modelar perfeitamente os resultados obtidos em diferentes campos de aplicação. Assim, diferentes autores desenvolveram modelos que melhor se aplicam a cada campo de aplicação/investigação, os quais são explicados com maior detalhe seguidamente. A teoria de Amontons-Coulomb, relativa à mecânica do contacto entre corpos sólidos, considera como aspeto mais relevante que o coeficiente de atrito é independente das áreas real e aparente de contacto, sendo única e exclusivamente proporcional às forças aplicadas e, consequentemente, às tensões desenvolvidas entre as duas superfícies (Rodrigues e Martins, 2005). Na expressão associada a este modelo, μ corresponde ao coeficiente de atrito adimensional, σ_n à tensão normal à superfície de contacto entre os dois corpos, τ_f à tensão de corte friccional resultante.

Os processos de fabrico como a maquinagem que envolvem a deformação plástica de materiais metálicos caracterizam-se por possuir elevadas pressões de contacto na zona de contacto entre o material e a ferramenta. Desta forma, para pressões elevadas a definição do atrito com base no coeficiente de atrito deixa de ter significado, tornando-se assim necessário determinar uma expressão que permita quantificar o atrito em situações nas quais a pressão de contacto é elevada, como sucede no processo de corte por arranque de avara. Como tal, para melhor analisar os processos com elevadas

pressões de contacto o modelo de Prandtl é frequentemente utilizado. Neste segundo modelo, m_f é designado por fator de atrito e representa uma correção da tensão de corte máxima admissível, k . O fator m_f varia de 0 (condições de atrito nulo) a 1 (condições de atrito máximo). No modelo de Zorev, distinguem-se duas regiões: na região de adesão temos a situação de atrito máximo descrita no modelo de Prandtl com a tensão de corte igual à tensão de corte máxima admissível; na região de escorregamento pode-se modelar o comportamento do atrito através do modelo de Amontons-Coulomb. No caso do modelo misto, distinguem-se novamente as duas regiões mencionadas anteriormente, aplicando-se na primeira o modelo de Prandtl em que o fator de atrito é variável entre 0 e 1. Enquanto, que na segunda é aplicado o modelo de Amontons-Coulomb. O modelo experimental desenvolvido por Shirakashi e Usui utiliza uma lei exponencial para relacionar a tensão de corte friccional com a tensão normal e a tensão de corte máxima admissível. O modelo foi desenvolvido inicialmente para metais não ferrosos, partindo do conceito de área de contacto aparente e efetiva. Mais tarde foi aplicado aos materiais metálicos em geral (Vaz, 2000). O parâmetro μ corresponde ao coeficiente de atrito para um par de materiais específico: ferramenta e provete. Este modelo de atrito foi desenvolvido precisamente com o intuito de estudar o atrito na interface apara-face de ataque na maquinagem de metais metálicos. De acordo com Arrazola e Özel (2010), a expressão (2.5) reduz-se à expressão (2.1) para tensões normais baixas e torna-se igual à tensão de corte máxima admissível para valores elevados de tensão normal. Dirikolu et al. (2001) realizaram modificações ao modelo anterior, multiplicando k por um fator de atrito m_f ($0 < m_f < 1$) e introduzindo um expoente n que corresponde a um parâmetro de endurecimento do material.

Tendo em consideração o facto de na maquinagem, superfícies virgens contactarem diretamente com a face de ataque da ferramenta, Iwata et al. propuseram também um modelo de atrito (Melkote et al., 2017). Assim, segundo Vaz (2000) com base em ensaios experimentais nos quais uma ferramenta contacta com a superfície interior dum provete de anel, foi proposta uma expressão para a tensão de corte friccional dependente do coeficiente de atrito de Coulomb, tensão normal, σ_n , e a dureza de Vickers, HV , do material do provete (o valor da dureza a introduzir na expressão corresponde ao material com menor dureza no contacto entre as duas superfícies). Sekhon and Chenot (1993) adotaram a lei de atrito de Norton que assume a tensão de corte friccional como sendo proporcional à velocidade de escorregamento relativa entre a apara e a ferramenta de corte, v_f , (Vaz, 2000). Em que α corresponde ao parâmetro da lei de endurecimento Swift-Voce, K é um parâmetro do material e p constitui a sensibilidade do material à velocidade de escorregamento ($0 < p < 1$). Estes três parâmetros são dependentes da temperatura. Este modelo de atrito é também chamado por lei do atrito viscoplástica, sendo muito utilizada em processos de forjamento a elevadas temperaturas e pressões de contacto (Guerdoux, 2007).

No último modelo de atrito, Yang e Liu (2002) apresentam uma expressão polinomial para tentar modelar o atrito na interface apara-face de ataque em condições extremas de tensão normal aplicada. De acordo com estes autores, em condições em que a lei do atrito de Coulomb se verifica, um único coeficiente de atrito é suficiente para descrever a relação entre as forças normal e tangencial numa interface de contacto. No entanto, para condições extremas tal como as que se verificam na face de

ataque no corte de metais, um simples coeficiente de atrito deixa de representar corretamente a relação entre as duas forças ortogonais entre si. Na prática atual, um coeficiente de atrito médio é utilizado para modelar a relação referida anteriormente, o que tem sido criticado por ser enganador. Apesar do referido, a utilização deste coeficiente médio continua devido à sua simplicidade e ao facto de não ter sido desenvolvido um modelo que permita modelar perfeitamente todas as situações estudadas. Assim, foi feita uma tentativa para modelar o comportamento complexo do atrito na maquinagem através do recurso a uma equação polinomial entre as tensões normal e tangencial (Eq. 2.9).

2.2. Tribologia do Corte Ortogonal

Existem diversos métodos que são utilizados experimentalmente para estudar o atrito como por exemplo o ensaio de pino no disco ou o ensaio de anel (Silva, 2017). Tendo o trabalho experimental desenvolvido por Cristino (2007) mostrado que a influência do meio circundante sobre o coeficiente de atrito pode ser analisada observando a formação da apara no corte ortogonal. Assim, no caso do presente trabalho, para a análise do atrito realiza-se também o ensaio de corte ortogonal, que constitui um processo de corte por arranque de apara. O corte por arranque de apara é um processo de deformação plástica que consiste na remoção de uma camada de material utilizando uma ferramenta de corte constituída por um material com maior dureza que o primeiro e uma velocidade de corte constante durante esse mesmo corte, resultando na formação de uma apara. Existe um caso geral do corte por arranque de apara que corresponde ao corte oblíquo. No entanto, para facilitar a investigação dos fenómenos envolvidos no corte por arranque de apara, habitualmente, realiza-se corte ortogonal, reduzindo, assim, as variáveis envolvidas e transformando a questão num problema bidimensional em vez de tridimensional.

A utilização do modelo de corte ortogonal, leva à condição de deformação plana. Esta condição particular da deformação plástica exige a verificação de um conjunto de postulados para ser aceite como válida num caso específico de corte por arranque de apara. Assim, esta condição ocorre quando a largura da apara, b , é superior à espessura de corte (sendo esta razão superior a 4 – 5). Assume-se que o material a cortar tem um comportamento rígido-perfeitamente plástico, pelo que não apresenta comportamento elástico nem encruamento. Também se tem de verificar que a aresta de corte da ferramenta tem uma largura superior à do provete a cortar e que esta aresta está afiada (pelo que não existe raio de afiamento da ferramenta), podendo-se desprezar as forças de atrito na face de saída. Apenas existe gasto de energia durante o corte na deformação plástica da apara (registada no plano de corte), atrito na face de ataque com a apara e evolução da fissura no material a partir da aresta de corte. O corte deve ser estacionário, sendo necessárias uma velocidade de corte e uma espessura de corte constantes, pelo que a apara deve ser contínua regular. Não devem existir fenómenos dinâmicos como vibrações, propagação frágil ou fenómenos de apara aderente.

A ferramenta de corte é composta por duas superfícies (Fig. 2.3). A face de ataque corresponde à superfície onde a apara desliza e a face de saída à superfície direcionada para a nova camada de material exposta depois do corte. A interseção dos dois planos em que se encontram as superfícies mencionadas anteriormente dá origem à aresta de corte. O ângulo de ataque, α , é o ângulo entre a

face de ataque e a perpendicular à superfície do material. Este ângulo pode ser positivo ou negativo. O ângulo de saída, σ , é o ângulo diedro da face de saída com o plano definido pela aresta de corte e pela velocidade de corte. O ângulo de saída tem importância no atrito entre a face de saída e a nova camada de material virgem e, portanto, influencia o acabamento superficial da peça maquinada, assim como o desgaste da ferramenta de corte.

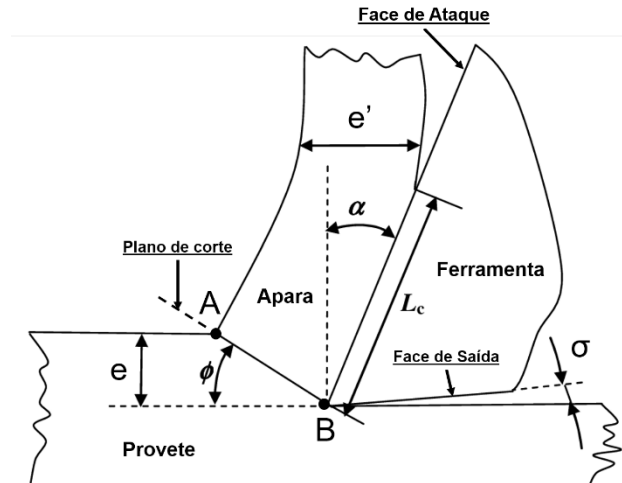


Figura 2.3 – Representação esquemática das principais variáveis do processo de corte ortogonal.

A profundidade da camada de material que a ferramenta retira em cada passagem é conhecida como espessura ou profundidade de corte, e ou t_0 . A espessura da apara, e' , resulta da deformação plástica ocorrida no plano AB. Este plano corresponde ao plano de corte ou por vezes chamado plano π . A relação entre as espessuras é denominada por razão de compressão da apara ou mais frequentemente por grau de encalque, R_c , calculado através da expressão (2.10).

$$R_c = \frac{e'}{e} = \frac{\overline{AB} \cdot \cos(\phi - \alpha)}{\overline{AB} \cdot \sin \phi}$$

$$R_c = \cot \phi \cos \alpha + \sin \alpha \quad (2.10)$$

Uma característica geométrica importante em qualquer análise de corte por arranque de apara é o ângulo do plano de corte, ϕ , medido relativamente ao plano que contém a velocidade de corte. Manipulando a expressão (2.10) obtém-se o ângulo do plano de corte, ϕ , sendo apenas necessário medir a espessura da apara:

$$\phi = \cot^{-1} \left[\frac{R_c - \sin \alpha}{\cos \alpha} \right] \quad (2.11)$$

Tendo em conta a condição de incompressibilidade, a velocidade de saída da apara, V_s , pode ser dada pela expressão (2.12):

$$V_s = \frac{V_c}{R_c} \quad (2.12)$$

Onde V_c é a velocidade de corte, isto é, a velocidade com que a ferramenta se desloca numa direção perpendicular à reta normal à superfície do material. É possível observar V_c na figura 2.4(a).

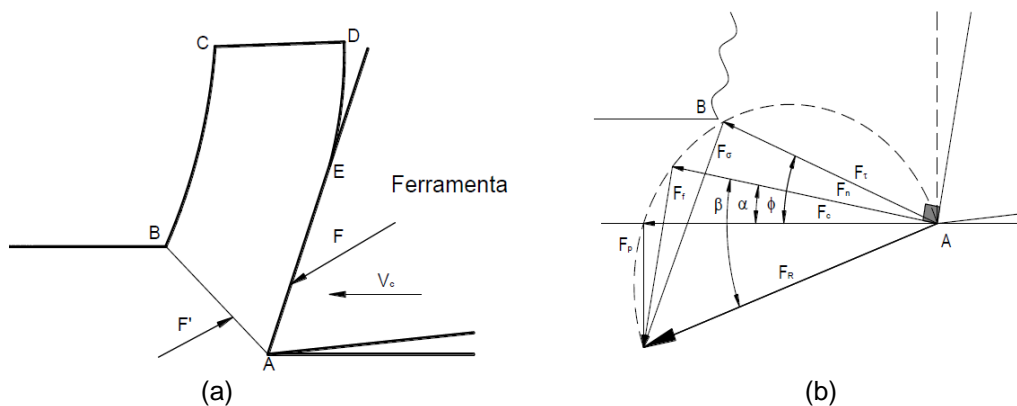


Figura 2.4 – Representação dos mecanismos de formação da apana, em que a ferramenta se move da direita para a esquerda; (a) Observação do equilíbrio da apana na ação das forças transmitidas através da interface apana-ferramenta e através do plano de corte; (b) Modelo de Ernst-Merchant que descreve o comportamento da apana como um corpo rígido (Pereira, 2009)

Na Fig. 2.4(b) pode-se observar a força resultante, F_R , que a ferramenta exerce na peça a sofrer o corte. Esta força parte da aresta de corte e pode ser decomposta em duas componentes de força: a força de corte, F_c , na direção da velocidade de corte, e a força de penetração, F_p , normal à direção do corte. A Fig. 2.4(b) esquematiza estas forças e a soma vetorial das mesmas que origina a força resultante. Estas duas forças são medidas experimentalmente através de uma célula de carga instrumentada com extensómetros tal como se ilustra no capítulo 3 da presente dissertação.

Um parâmetro importante numa análise de corte ortogonal que se pode calcular a partir da potência de corte é a pressão ou potência específica de corte, K_s . Este parâmetro indica a eficiência do corte e pode ser calculado através da seguinte expressão:

$$\frac{P_c}{Z} = \frac{F_c \cdot V_c}{A_0 \cdot V_c} = \frac{F_c}{A_0} = K_s \quad (2.13)$$

Onde P_c é a potência de corte e A_0 é a área da secção transversal da apana antes do corte, definida como o produto da espessura de corte, e , pela largura da apana, b .

Em ambas as superfícies de ataque e saída da ferramenta, o atrito desempenha um papel importante, uma vez que há contacto entre corpos em movimento. Desta forma, existe interesse em estudar o atrito no processo de forma a minimizar o mesmo. Assim, a aquisição de dados no ensaio experimental corresponde à medição das forças de corte e penetração representadas na Fig. 2.4(b) através de uma célula de carga, constituindo estas forças os dados experimentais que vão permitir a análise do atrito.

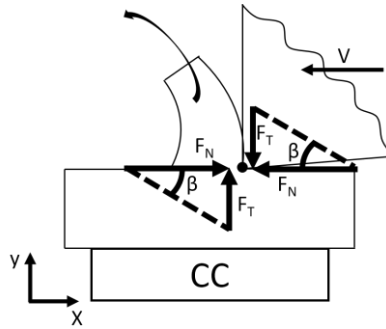


Figura 2.5 – Representação esquemática das forças tangencial e normal na interação entre a ferramenta de corte com $\alpha=0^\circ$ e a apara dum provete ensaiado com uma célula de carga (CC)

Para o cálculo do ângulo de atrito, β , e do coeficiente de atrito, μ , utiliza-se a expressão (2.14), tendo em conta que as ferramentas de corte utilizadas têm ângulo de ataque de 0° , as forças tangencial, F_T , e normal, F_N , coincidem com as forças vertical e horizontal, respetivamente, medidas na célula de carga (Fig. 2.5).

$$\frac{F_T}{F_N} = \tan \beta = \mu \quad (2.14)$$

A presença de atrito é na generalidade dos casos considerada indesejável e causadora de efeitos negativos no processo tecnológico, assim como, nas propriedades dos produtos obtidos e na vida das ferramentas (Santos, 2005). Face à dificuldade existente relativamente à avaliação do atrito, no presente trabalho recorreu-se a diferentes métodos para a avaliação do mesmo (Fig. 2.6), sendo dois deles mais tradicionais e um terceiro uma nova proposta.

O processo de formação da apara é muito sensível às condições tribológicas na face de ataque. Por exemplo, a redução do coeficiente de atrito leva ao aumento do ângulo do plano de corte, ϕ , e à redução da espessura da apara, assim como o aumento da curvatura da apara como se observa na Fig. 2.6(a). Um menor coeficiente de atrito resulta também numa menor área do plano de corte, menor pressão e comprimento de contacto na face de ataque, tendo como consequência final uma redução na força resultante necessária para realizar o corte.

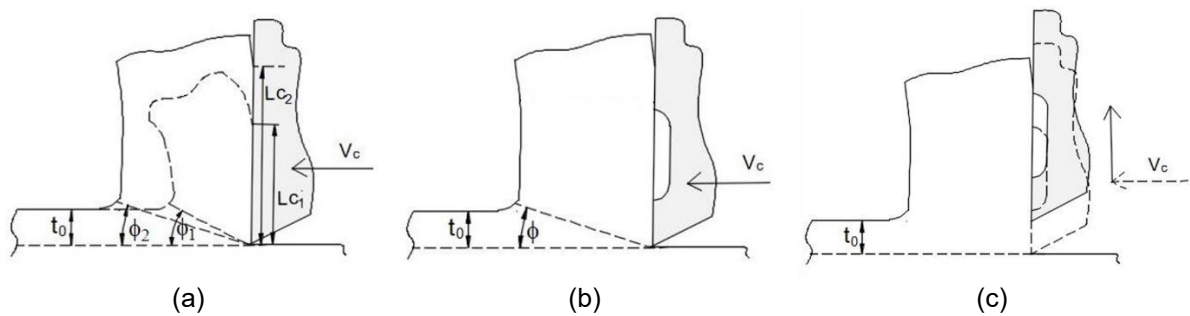


Figura 2.6 – Representação esquemática de diferentes ensaios e do tipo de ferramentas utilizadas. (a) Ensaio tradicional de corte ortogonal com ferramenta de faces planas; (b) Ensaio de corte ortogonal mas com ferramenta de contacto restrito, ou seja, o comprimento de contacto está limitado a uma faixa da face de ataque original; (c) Ensaio bidirecional utilizando uma ferramenta de contacto restrito, envolvendo o movimento da ferramenta em duas direções ao longo do corte.

A formação da apara é acompanhada pela exposição de novas superfícies geradas no corte. Estas superfícies são quimicamente muito ativas e levantam condições tribológicas particulares relativamente à adesão, entre outras.

A utilização de lubrificante, seja ele sólido, líquido ou gasoso, no processo de corte, permite variar as condições tribológicas na interface entre a apara e a ferramenta. Neste trabalho, apenas se varia a atmosfera envolvente da zona de corte, não sendo aplicado um lubrificante diretamente na interface ou mesmo injetado/pulverizado com um jato sobre o equipamento de trabalho.

Utilizando diferentes atmosferas envolventes com uma mesma geometria de corte originam-se resultados com diferentes valores para os parâmetros do processo. De facto, verifica-se que a concentração de oxigénio no meio envolvente tem um papel mais signficante na geometria do corte do que o ângulo de ataque de acordo com Cristino (2007). O mesmo autor refere também que se tem demonstrado com a investigação realizada que a concentração de oxigénio no meio envolvente tem um papel signficante na tribologia da maquinaria de metais e que o mecanismo de oxidação é essencial para uma compreensão completa da mecânica da formação da apara. Este resultado sugere que o mecanismo de oxidação tem bastante importância nas estimativas teóricas das forças de corte e do consumo de energia.

Outros estudos (Doyle e Horne, 1980; Kennedy, 1984) demonstraram que o contacto entre superfícies metálicas expostas a atmosfera ambiente ou atmosfera de oxigénio tem influência nas forças de corte, podendo estas aumentar ou diminuir consoante a combinação de materiais utilizada entre ferramenta e provete. Isto deve-se ao facto de a atmosfera envolvente influenciar o atrito entre essas mesmas superfícies. Por um lado, a formação de uma camada superficial de óxidos pode impedir o contacto entre os dois metais de base, diminuindo a adesão e como consequência o atrito. Por outro lado, os óxidos formados podem atuar como abrasivos entre as superfícies, aumentando a abrasão e adesão, o que se traduz num aumento do atrito e das forças de corte, tendo ainda como consequência maior desgaste da ferramenta de corte.

3. Desenvolvimento Experimental

3.1. Montagem Experimental

A máquina de ensaios tribológicos utilizada constitui um aparato que permite avaliar o atrito em condições controladas, estando este capítulo focado na descrição desse mesmo aparato experimental. Os ensaios desenvolvidos foram realizados em condições de corte ortogonal numa fresadora CNC de 3 eixos com spindle vertical adaptada para o presente trabalho. O modelo da fresadora é Denford TRIAC. A fresadora CNC é controlada através de uma unidade de controlo TRIAC PNC 3, a partir da qual pode ser realizado o envio de comandos manuais ou programação em código ISO G e M. Na tabela do Anexo C encontram-se as especificações técnicas da fresadora utilizada. Para a realização dos ensaios foi projetado um dispositivo de fixação do provete a testar, assim como um dispositivo de fixação da mó de retificação. No anexo E encontram-se os desenhos técnicos CAD destes elementos. Este dispositivo permite realizar ensaios a provetes com uma espessura até 5 mm, existindo um local que permite encaixar provetes circulares assim como um degrau retilíneo para provetes retangulares de maiores dimensões (Fig. 3.1(a)).

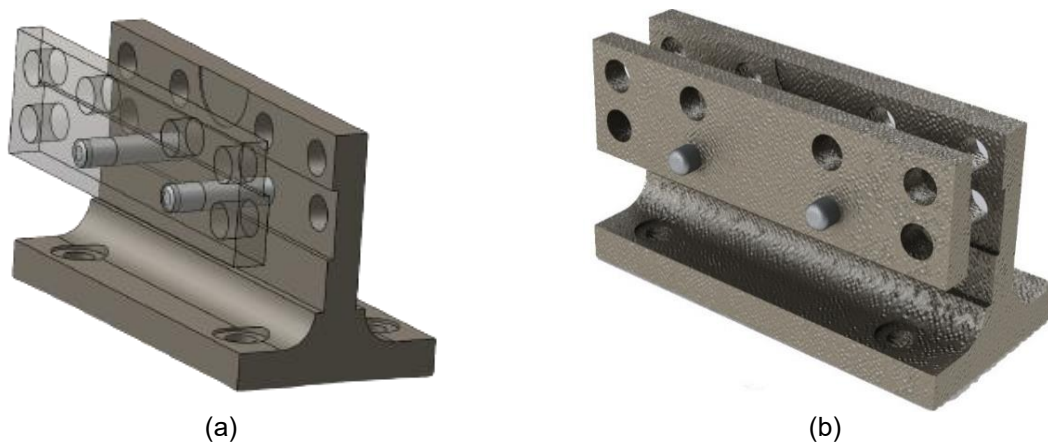


Fig. 3.1 – Dispositivo de fixação do provete. (a) Vista isométrica com maior detalhe da região para colocação de um provete circular e das guias; (b) Fotografia do dispositivo final obtido (grenalhado para evitar escorregamento).

Após a realização de um corte de material do provete com a ferramenta, passa a existir uma camada superficial de material que sofre encruamento, pelo que as propriedades mecânicas desse mesmo volume de material superficial se alteram. Para que seja possível realizar ensaios sucessivos de corte ortogonal no mesmo provete tendo o material as mesmas propriedades em todos os ensaios, é necessário proceder-se a uma operação de retificação que remove a camada afetada mecanicamente com uma mó de retificação. A mó de retificação está fixa na árvore da fresadora utilizando um suporte de fixação do tipo R8, tendo-se torneado a mó para abertura do furo central cónico que permite encaixar no suporte e retificada a sua concentricidade em relação ao dispositivo de fixação da mesma. A mó de retificação utilizada tem uma malha de 80 partículas por polegada quadrada (Fig. 3.2(a)).

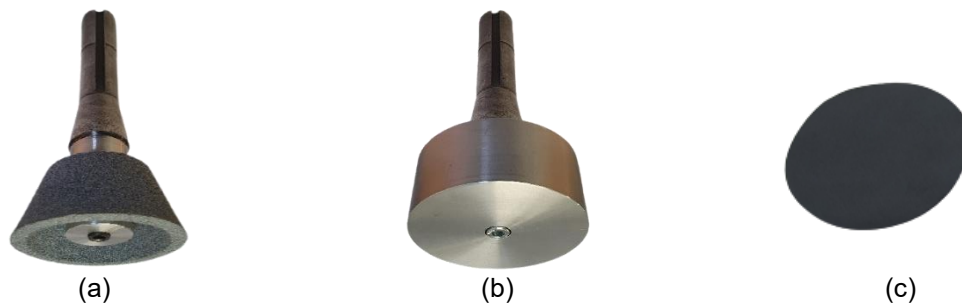


Fig. 3.2 – Acessórios de retificação dos provetes ensaiados. (a) Dispositivo de fixação da mó retificadora; (b) Dispositivo de fixação do disco para colagem de um abrasivo; (c) Disco de material abrasivo.

Realizou-se um estudo para determinar a espessura da camada de material removida em média pela mó em cada passagem. Realizaram-se 10 passagens da mó no provete, estando a superfície inferior da mó à mesma cota que a superfície superior do provete. Utilizou-se um comparador que mediu a diferença de altura no provete face à condição anterior à retificação. Obteve-se um resultado médio de 78 μm para os provetes dos diferentes materiais ensaiados, ou seja, aproximadamente 8 μm de material removido por passagem.

A literatura indica que para materiais convencionais por fundição a camada afetada mecanicamente, isto é, a camada de material encruado é aproximadamente igual à espessura da camada removida, ou seja, a profundidade de corte. Para materiais por fabrico aditivo a espessura da camada encruada é inferior, podendo-se assumir como sendo igual a aproximadamente 50% da profundidade de corte. Uma estratégia para encontrar o valor da espessura da camada encruada para cada material ensaiado pode ser a remoção de camadas de material sequenciais, intervaladas pela medição com um durómetro. Ao medir a dureza do material à superfície é possível saber se já se retirou todo o material que sofreu encruamento quando se obtiver um valor de dureza igual ao do material de base antes de ser ensaiado. No presente trabalho optou-se por remover, imediatamente a seguir a cada ensaio, uma camada de material igual à profundidade de corte desse mesmo ensaio precedente por uma questão de segurança.

De forma a permitir a realização dos ensaios, foram adicionadas três placas fabricadas em alumínio no carro móvel da fresadora, permitindo a fixação de equipamentos experimentais às mesmas, especificamente para o presente trabalho, a montagem de dois elementos essenciais: a câmara de filmar e a ferramenta de corte. Esta adaptação realizada é equivalente ao armazém de ferramentas existente em fresadoras CNC. As placas estão fixas à fresadora através de dezasseis parafusos M6, depois de se terem realizado as operações de furação e abertura de rosca (com macho e desandador) no corpo da fresadora.

A câmara de filmar (Fig. 3.3(a)) utiliza um suporte de fixação independente das placas que requereu também a abertura de quatro furos roscados do tipo M6 no carro móvel da máquina de ensaios. O dispositivo de filmagem tem um suporte que permite ajuste nos eixos Y e Z, sendo que a lente permite ajustar a focagem. Relativamente ao suporte da ferramenta, este está fixo na zona inferior das placas. Para medir a espessura de material retirado em cada corte realizado, recorreu-se a um

comparador micrométrico, sendo a sua utilização comparável à medição dimensional de uma peça utilizando uma *touch probe* ou apalpador de medição nos equipamentos CNC (Fig. 3.3(b)).

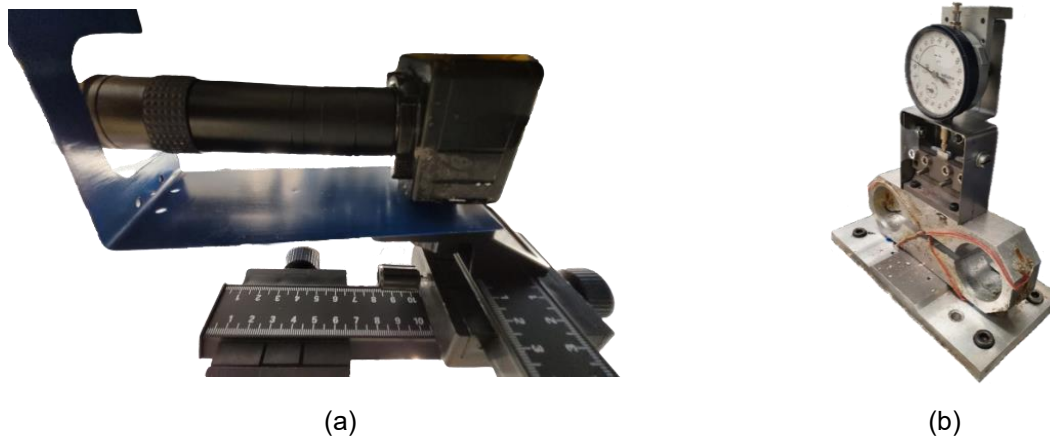


Fig. 3.3 – Acessórios do trabalho experimental realizado. (a) Câmara e lente utilizadas na filmagem dos ensaios montadas num suporte de movimentos cruzados; (b) Comparador Mitutoyo com uma resolução de 1 μm .

Os ensaios de corte ortogonal são realizados com uma atmosfera controlada utilizando um gás ativo (oxigénio) ou inerte (árgon) pelo que foi montado um invólucro em torno do provete e da ferramenta de corte, criando-se assim uma câmara de controlo da atmosfera semelhante a uma *hotte* laboratorial (Fig. 3.4). Foi realizada uma montagem que permitiu garantir a selagem adequada da câmara flexível. Para controlar a atmosfera interior utiliza-se um medidor de fluxo conectado a uma botija com o gás pretendido. Existindo um sistema com uma válvula de controlo de entrada de gás e conetores pneumáticos do tipo quick-release.



Fig. 3.4 – Equipamentos constituintes do aparato experimental. (a) Câmara de controlo da atmosfera; (b) Reservatórios de Árgon e Oxigénio com redutores de pressão instalados.

Para manuseamento dos provetes dentro da câmara de gás sem ser necessário abrir o invólucro e perder todo o gás no seu interior, criando-se um desperdício desnecessário, existem duas luvas de trabalho que permitem manipular objetos no interior da câmara. Na mesa de trabalho da máquina de ensaios encontra-se montada uma célula de carga, estando a mesma fixa através de quatro parafusos M8 e quatro *jig* colocados nas ranhuras em T da mesa. A célula de carga é composta por um bloco de alumínio com extensómetros que permitem medir as forças horizontal e vertical, sendo de

notar que para uma correta leitura dos valores de força, a carga deve ser aplicada no centro da superfície superior do bloco, tendo em conta a forma em 8 do mesmo.

Para a aquisição de dados utilizou-se uma placa DAQ ligada a um computador, no qual se recorreu ao software Labview 8.5 (consultar anexo F com o programa utilizado). Este software permite obter os valores de tensão elétrica registados nos extensómetros da célula de carga (Fig.3.5(a)). No entanto, os sinais elétricos emitidos pelos extensómetros são de uma ordem de grandeza muito pequena pelo que existe a necessidade desses sinais serem processados por uma unidade intermédia, National Instruments USB-9162 (Fig. 3.5(b)), que amplifica a tensão dos sinais e que comunica por sua vez diretamente com o computador. A frequência de aquisição de dados foi de 500Hz, registando dados correspondentes ao deslocamento e às forças horizontal (corte) e vertical (penetração).

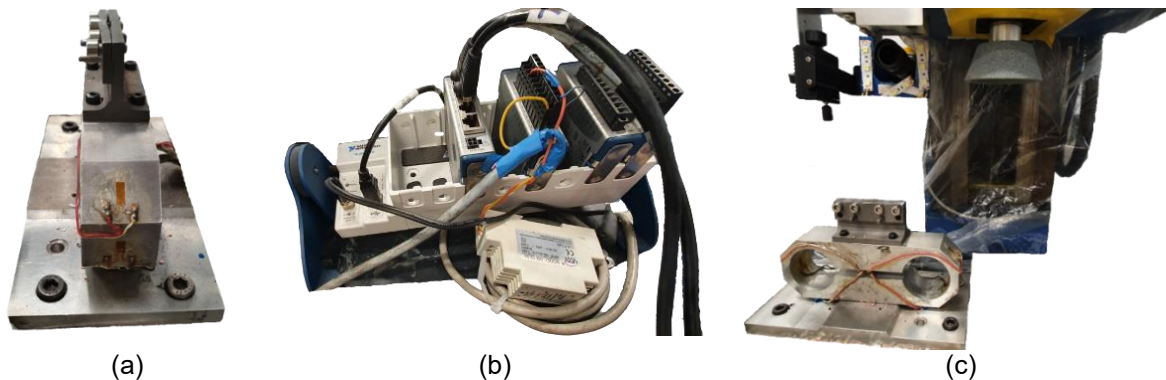


Fig. 3.5 – Equipamentos utilizados na aquisição de dados experimentais. (a) Extensómetros constituintes da célula de carga; (b) Placa de aquisição de dados National Instruments USB-9162; (c) Aparato experimental no interior da câmara atmosférica.

3.2. Calibração da Célula de Carga

Antes da realização de ensaios experimentais foi necessário calibrar a célula de carga (CC) nos seus dois eixos, obtendo-se as curvas de calibração dos extensómetros. Esta subsecção explica o procedimento de calibração efetuado, tendo o mesmo seguido uma linha orientadora de acordo de com o efetuado por Farinha (2016). Para esta operação recorreu-se a dois conjuntos de equipamento utilizados anteriormente para projetos experimentais na mesma máquina-ferramenta.

O dispositivo para calibração do eixo vertical não sofreu qualquer alteração, mantendo a funcionalidade plena. No entanto, a montagem necessária para o eixo horizontal foi adaptada ao aparato experimental atual na fresadora, tal como visível na Fig. 3.6(c). O componente utilizado para a calibração do eixo vertical é uma peça única resultante da soldadura de um disco entre dois varões, aplicando-se as massas calibradas cilíndricas na superfície superior do disco (Fig. 3.6(b)), servindo o varão com menor diâmetro para garantir que as massas calibradas de maior dimensão fiquem centradas no disco. A extremidade inferior deste componente contém uma semiesfera soldada para que o contacto com a célula de carga seja pontual e no centro da mesma (Fig. 3.6(d)).

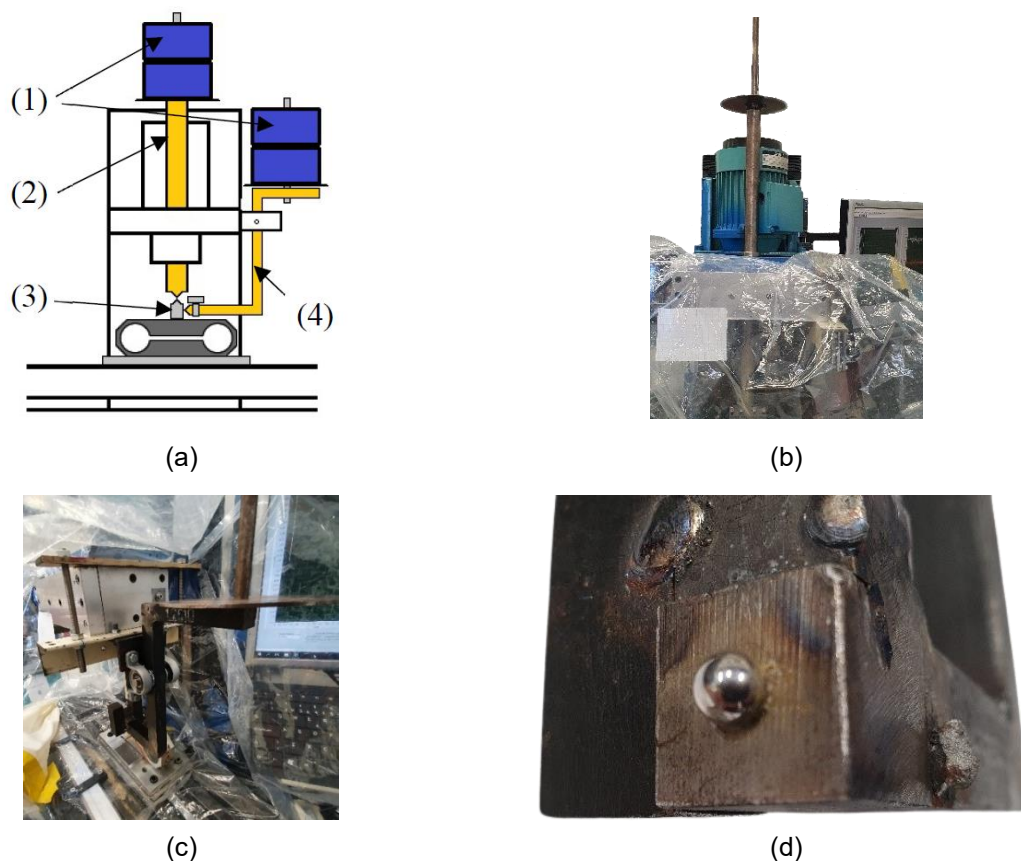


Fig. 3.6 – Acessórios de calibração da célula de carga. (a) Imagem esquemática dos pesos e componentes que transmitem as forças à célula de carga: 1 – Massas calibradas, 2 – Elemento de calibração do eixo vertical, 3 – Elementos de contacto pontual com a CC (semi-esferas soldadas nas extremidades das peças 2 e 4); 4 – Elemento de calibração do eixo horizontal (Farinha, 2016); (b) Varão de calibração do eixo vertical; (c) Dispositivo para calibração do eixo horizontal; (d) Semiesfera para contacto pontual colocada na extremidade do aplicador de força para calibração do eixo horizontal.

No que respeita à calibração do eixo horizontal, utilizou-se um mecanismo do tipo alavanca, no qual uma peça com a forma de S roda sobre um eixo horizontal suportado por duas chumaceiras, esta peça tem um furo numa das extremidades onde é inserido um varão e de seguida um disco para colocação das massas calibradas. A peça em forma de S contém também uma semiesfera soldada na sua extremidade inferior para aplicação pontual da força.

A alteração efetuada neste subsistema consistiu num conjunto de modificações: a disposição das duas barras passou duma posição vertical para uma horizontal; a sua fixação foi adaptada a uma das placas solidárias com a cabeça móvel da fresadora através de dois parafusos M4 e por aperto através de dois varões roscados M8; para o eixo horizontal foi maquinado um pino em aço rápido com um diâmetro de 10 mm e um comprimento de 60 mm.

O procedimento de calibração encontra-se explicado detalhadamente na secção 3 do anexo A, durante o mesmo as massas aplicadas vão sendo incrementadas em patamares (a calibração de cada eixo é feita de forma independente, significando que enquanto um dos eixos regista força aplicada, o outro permanece livre de carga). Utilizaram-se massas calibradas com os valores de 50g, 100g, 200g e 4500g, permitindo conjugá-las para aplicar massas totais de 50g, 100g, 200g, 400g, 500g, 4500g,

9000g e 13500g ao longo dos diferentes níveis. Ajustaram-se ainda os valores de tensão iniciais para que esses mesmos valores sejam zero quando não exista qualquer carga aplicada.

Foi medida a força horizontal aplicada na célula de carga apenas devido ao peso próprio do dispositivo de calibração do eixo horizontal, ou seja, antes de aplicar as massas calibradas e estando o ponto de contacto da peça em S nivelado com a horizontal. Nesta situação (Fig. 3.7(a)), a força aplicada devido ao peso próprio (F_{apl}) é igual à força realizada através do dinamómetro e medida por este (F_{din}). Utilizando um dinamómetro digital mediu-se o valor de aproximadamente 250g (Fig. 3.7(b)).

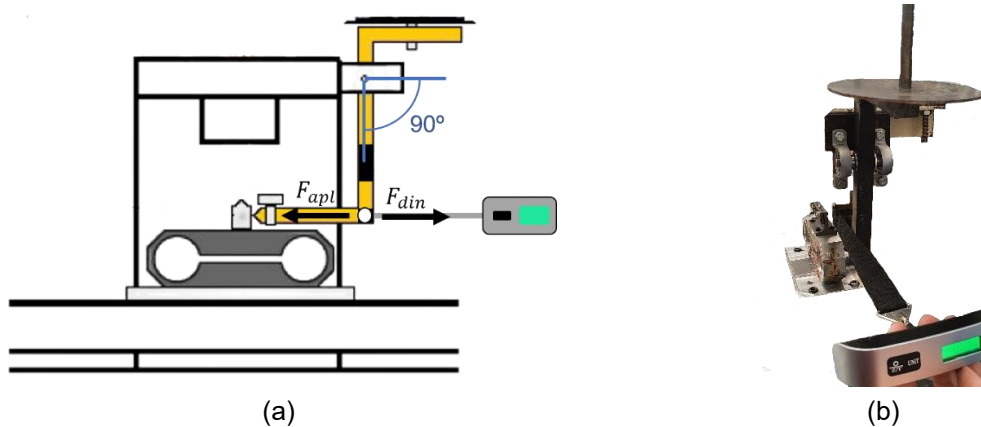
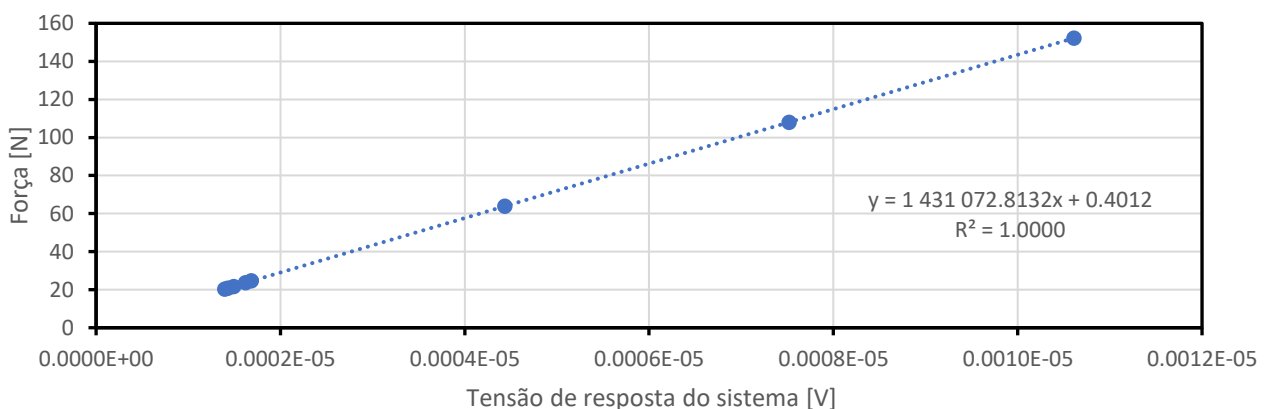
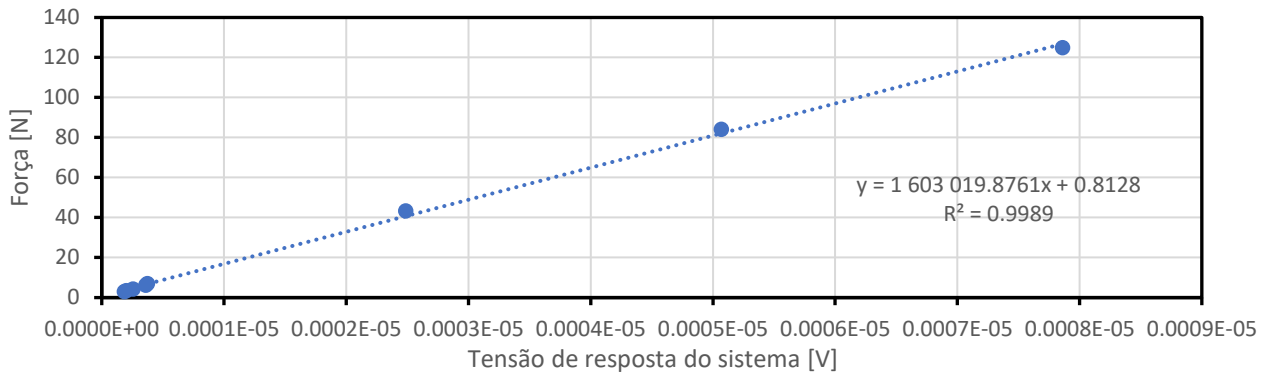


Fig. 3.7 – Dinamómetro digital utilizado para medição de forças. (a) Esquema explicativo das forças envolvidas; (b) Operação de medição real com dispositivo de calibração do eixo horizontal.

Já para a força vertical aplicada na célula de carga apenas devido ao peso próprio do dispositivo de calibração do eixo vertical, a massa pesada numa balança digital foi de 2016 g. Estes valores de peso próprio foram contabilizados para a correta obtenção das curvas de calibração, as quais se encontram expostas na Fig. 3.8.



(a)



(b)

Fig. 3.8 – Representação gráfica da calibração dos eixos: (a) Vertical; (b) Horizontal.

Obtiveram-se, assim, as seguintes expressões (3.1) e (3.2):

$$F_v = 1431072.8132 \times V_v + 0.4012 \quad (3.1)$$

$$F_h = 1603019.8761 \times V_h + 0.8128 \quad (3.2)$$

Onde F_v e F_h representam as forças vertical e horizontal em [N], respetivamente, da mesma forma que V_v e V_h correspondem às tensões vertical e horizontal, respetivamente, e que são enviadas pela célula de carga em [V].

4. Materiais e Métodos

A realização dos ensaios experimentais efetuados exigiu um conjunto de equipamentos e uma preparação adequada dos procedimentos a realizar, desta forma, este capítulo apresenta detalhadamente a preparação das ferramentas de corte utilizadas, os materiais dos provetes utilizados e o plano de ensaios efetuado.

4.1. Preparação das Ferramentas

Os ensaios de corte ortogonal foram realizados com ferramentas de corte que apresentavam parâmetros bem controlados. Assim, todas as ferramentas de corte derivaram da mesma base, a partir da qual se efetuaram processos para alterar o comprimento de contacto na face de ataque, o revestimento e a sua rugosidade (embora no presente trabalho apenas tenham sido ensaiadas as ferramentas polidas excepto a ferramenta comercial).

Das vinte e duas pastilhas de corte disponíveis inicialmente foram criados grupos de quatro, variando o comprimento de contacto da face de ataque em cada grupo (30, 60, 120, 240 ou 480 μ m), sobrando as ferramentas comercial e a de referência (RTCO). Em cada ferramenta dos cinco grupos mencionados foi aberto um entalhe através de um processo de corte com laser, obtendo-se uma face de ataque mais reduzida e criando-se um quebra-aperas consequentemente. Na Fig. 4.1(c) é observável o aspeto antes e depois do corte realizado.

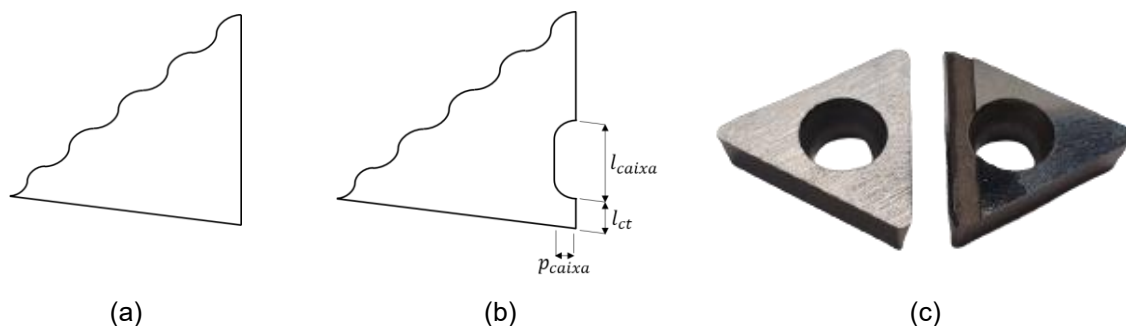


Fig. 4.1 – Ferramentas de corte com e sem entalhe. (a) Figura esquemática do perfil duma ferramenta de referência; (b) Figura esquemática do perfil duma ferramenta de contacto restrito (onde l_{ct} corresponde ao comprimento de contacto, l_{caixa} ao comprimento da caixa e p_{caixa} à profundidade da caixa); (c) Comparação entre duas ferramentas.

Para eliminar a variabilidade entre a superfície das diferentes pastilhas disponíveis procedeu-se a um polimento, tendo sido polidas as faces de saída e de ataque de todas as unidades excepto a ferramenta comercial. Neste processo utilizaram-se pastas abrasivas com diferentes tamanhos de grão desde 7 μ m até 0.5 μ m, reduzindo-se o tamanho do mesmo progressivamente até se obterem superfícies completamente lisas e espelhadas. Na Fig. 4.2 são observáveis essas pastas e um exemplo de aplicação de um abrasivo num pano de polimento. Para cada tamanho de grão, depositou-se a pasta num pano de polimento e realizaram-se passagens com a ferramenta no pano durante 180 segundos,

correspondendo a cerca de 150 passagens. Todas as passagens são realizadas no mesmo sentido e entre elas a ferramenta é levantada do papel.

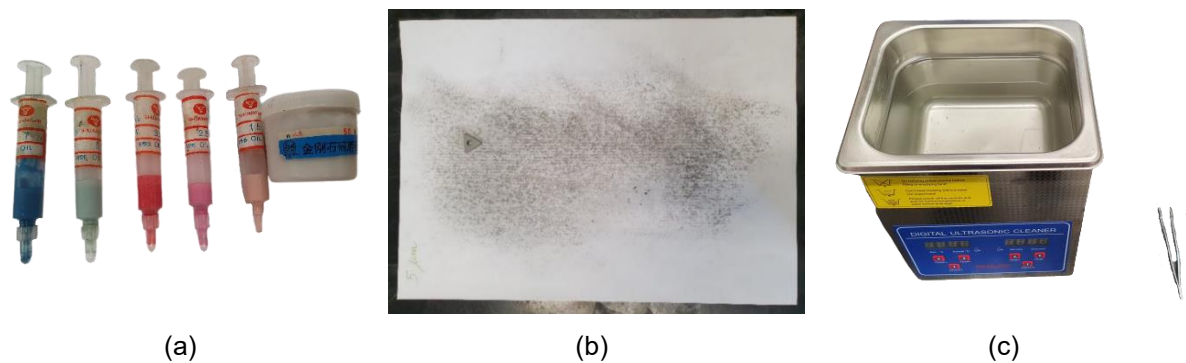


Fig. 4.2 – Técnicas e elementos de polimento. (a) Pasta abrasivas utilizadas; (b) Pano de polimento com tamanho de grão abrasivo de 5 µm; (c) Máquina de limpeza por ultrassons.

Embora a literatura recomende que se realizem passagens cruzadas (rodando cada passagem 90° face à anterior), os melhores resultados verificam-se quando as passagens são efetuadas todas na mesma direção e sentido. Sendo que para a face de saída de cada ferramenta, as passagens devem ser paralelas à aresta de corte, enquanto que para a face de ataque a direção das passagens de polimento devem ser orientadas a 45° com a aresta de corte, tal como indicado na Fig. 4.3. No polimento da face de ataque é importante que a aresta de corte esteja orientada para o topo da folha, uma vez que ao deslocar a ferramenta ao longo do papel este enruga e deixa de estar liso, pelo que acaba por arredondar a aresta lateral da ferramenta que é perpendicular à direção de polimento. Utilizando o método de polimento descrito consegue-se preservar a geometria original da ferramenta e a aresta de corte sem arredondar a mesma, isto é, sem aumentar o raio de bico da ferramenta.

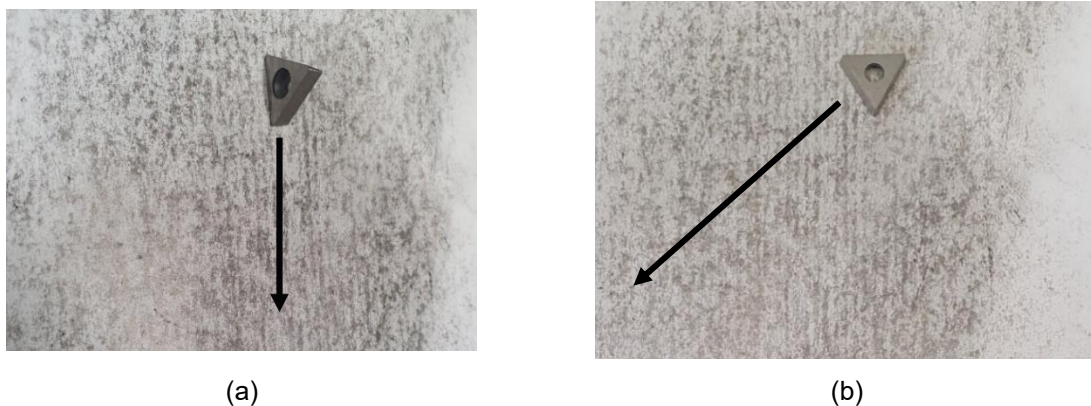


Fig. 4.3 – (a) Direção das passagens de polimento da face de saída paralelas à aresta de corte; (b) Direção das passagens de polimento da face de ataque a 45° com aresta de corte.

O estado da superfície antes e depois de cada etapa do polimento foi sendo analisado através da observação com microscópio ótico que continha uma câmara de filmar ligada a um computador, no qual foram captadas imagens da evolução das superfícies. Foram utilizados dois microscópios uma vez que permitem obter diferentes tipos de imagens com níveis de ampliação distintos. Assim, começou-se por utilizar uma pasta abrasiva com um tamanho de grão de 7 µm. Numa fase inicial estudou-se quantas passagens seriam necessárias para obter bons resultados em cada nível de abrasivo. Assim começou-

se com 90 passagens iniciais, tendo-se incrementado até ao número final de 150 passagens uma vez que as passagens no abrasivo com o maior tamanho de grão são as mais importantes na obtenção do resultado final pretendido, isto é, uma superfície lisa. No nível de polimento seguinte utilizou-se a pasta abrasiva com um tamanho de grão de 5 μm , procedendo-se da mesma forma para os patamares abaixo até ao de 0.5 μm . As figuras 4.4 a 4.10 apresentam a evolução da superfície da face de ataque ao longo do processo todo. Para a face de saída procedeu-se do mesmo modo que anteriormente para a face de ataque das ferramentas, sendo visível a evolução da superfície nas figuras 4.11 até 4.17.

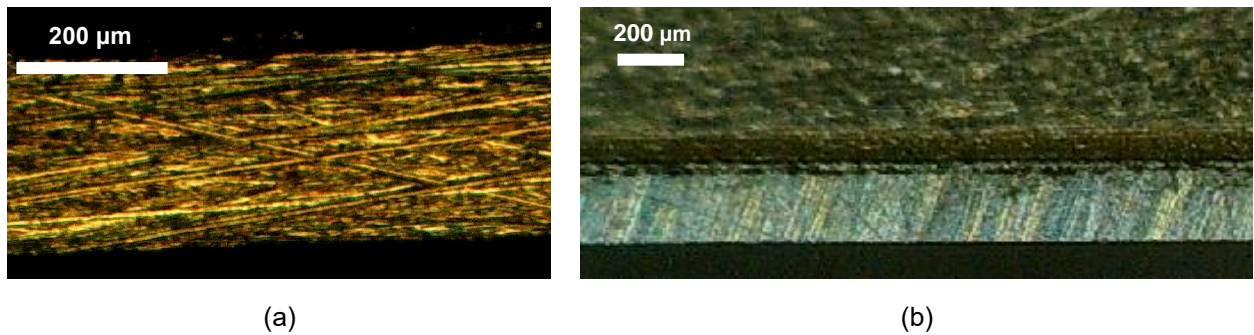


Fig. 4.4 – Superfície virgem da face de ataque com ampliação de: (a) 50X; (b) 2X.

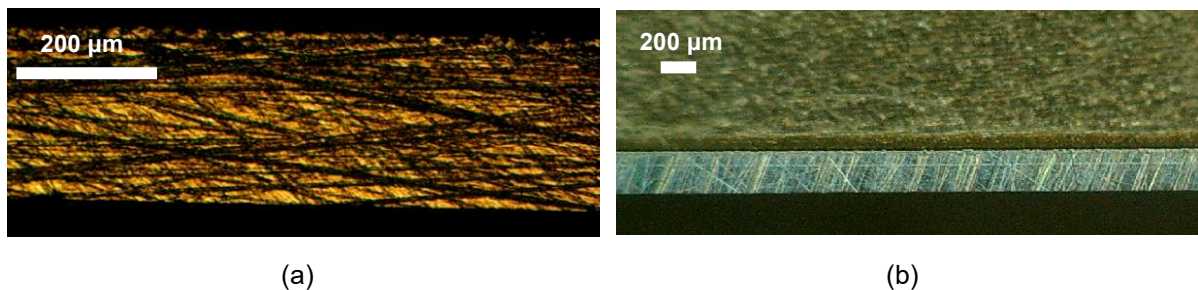


Fig. 4.5 – Superfície da face de ataque após passagem do abrasivo de 7 μm . Observação com ampliação de: (a) 50X; (b) 2X.

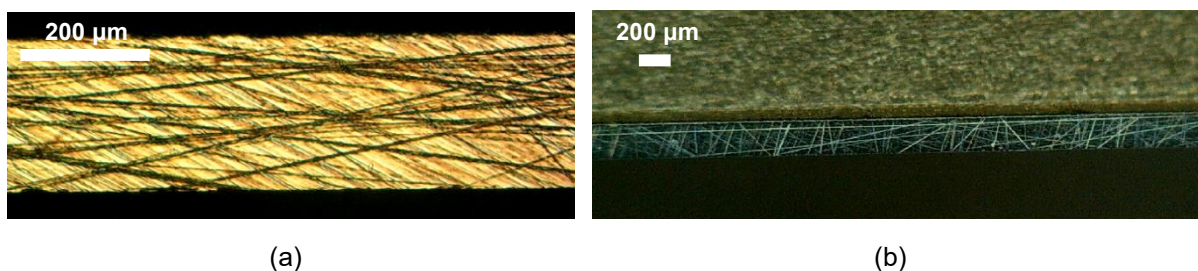
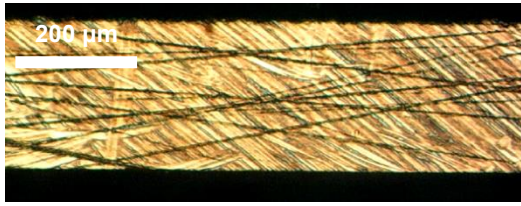
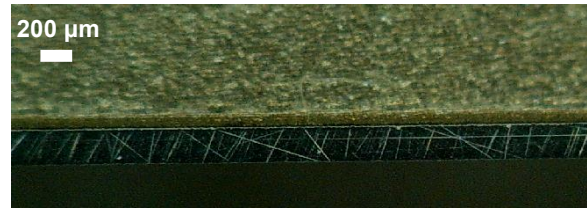


Fig. 4.6 – Superfície da face de ataque após passagem do abrasivo de 5 μm . Observação com ampliação de: (a) 50X; (b) 2X.

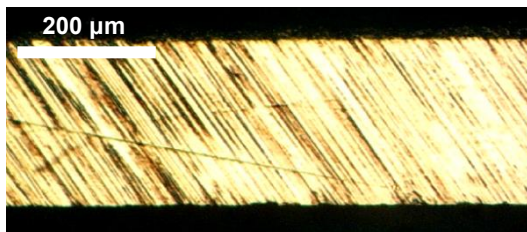


(a)



(b)

Fig. 4.7 – Superfície da face de ataque após passagem do abrasivo de 3.5 μm . Observação com ampliação de: (a) 50X; (b) 2X.

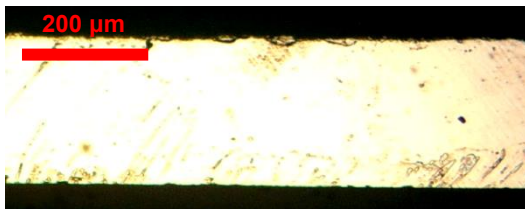


(a)



(b)

Fig. 4.8 – Superfície da face de ataque após passagem do abrasivo de 2.5 μm . Observação com ampliação de: (a) 50X; (b) 2X.

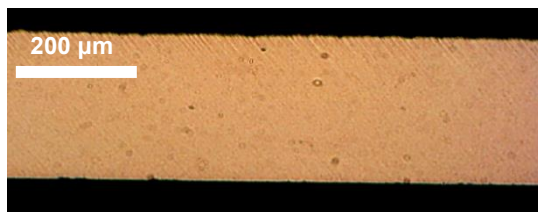


(a)



(b)

Fig. 4.9 – Superfície da face de ataque após passagem do abrasivo de 1.5 μm . Observação com ampliação de: (a) 50X; (b) 2X.

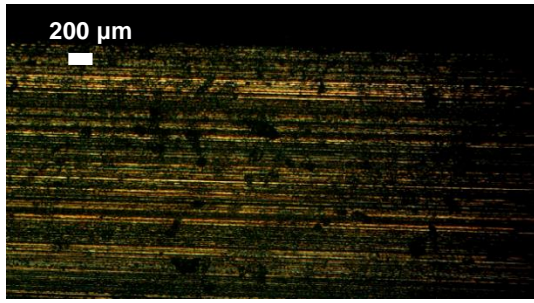


(a)

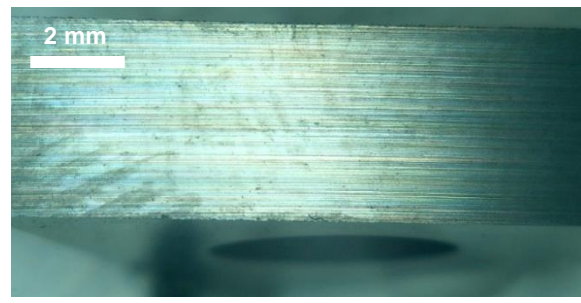


(b)

Fig. 4.10 – Superfície da face de ataque após passagem do abrasivo de 0.5 μm . Observação com ampliação de: (a) 50X; (b) 2X.

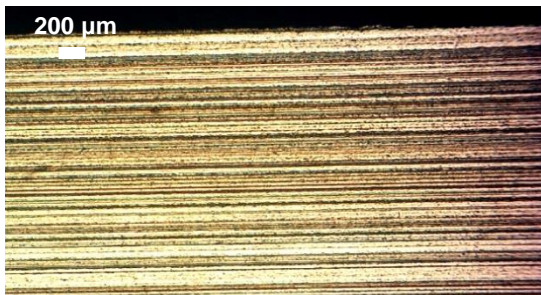


(a)

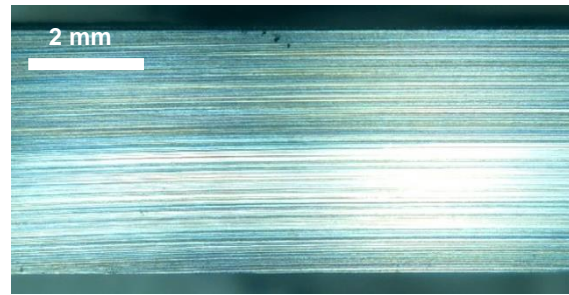


(b)

Fig. 4.11 – Superfície virgem da face de saída. Observação com ampliação de: (a) 50X; (b) 1X.

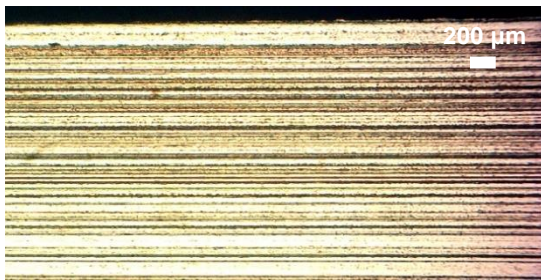


(a)

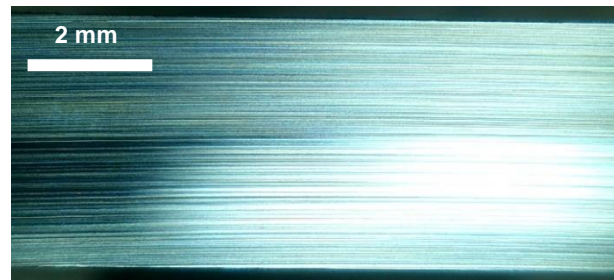


(b)

Fig. 4.12 – Superfície da face de saída após passagem do abrasivo de 7 μm. Observação com ampliação de: (a) 50X; (b) 1X.

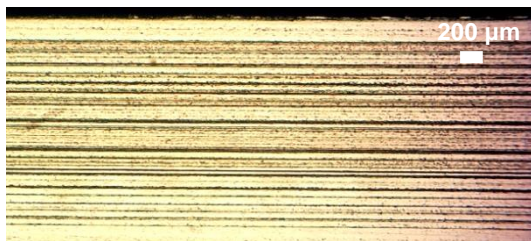


(a)

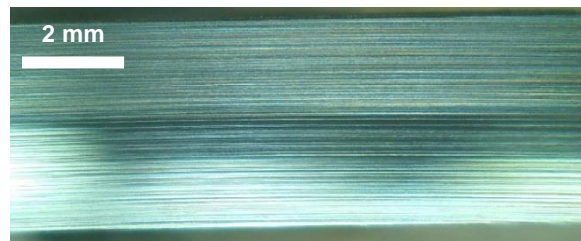


(b)

Fig. 4.13 – Superfície da face de saída após passagem do abrasivo de 5 μm. Observação com ampliação de: (a) 50X; (b) 1X.

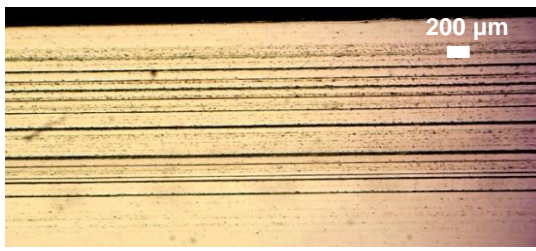


(a)

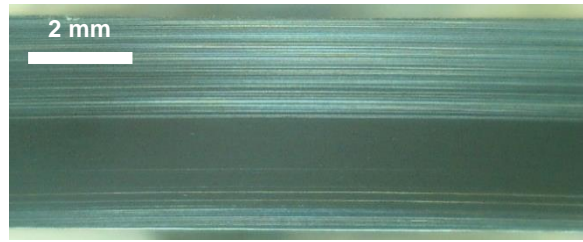


(b)

Fig. 4.14 – Superfície da face de saída após passagem do abrasivo de 3.5 μm. Observação com ampliação de: (a) 50X; (b) 1X.

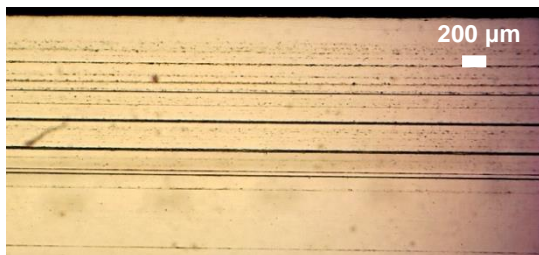


(a)

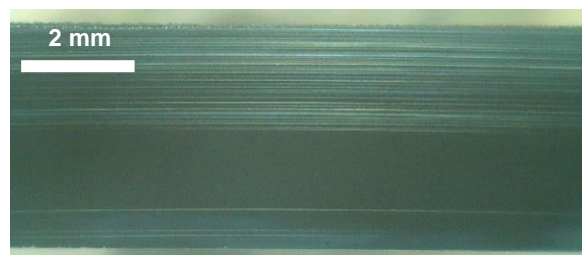


(b)

Fig. 4.15 – Superfície da face de saída após passagem do abrasivo de 2.5 μm . Observação com ampliação de: (a) 50X; (b) 1X.

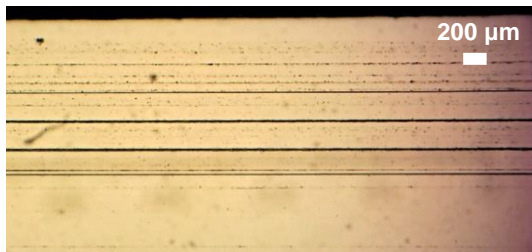


(a)

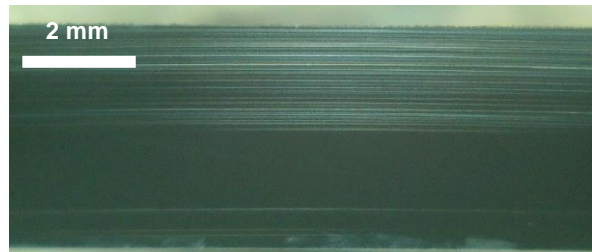


(b)

Fig. 4.16 – Superfície da face de saída após passagem do abrasivo de 1.5 μm . Observação com ampliação de: (a) 50X; (b) 1X.



(a)



(b)

Fig. 4.17 – Superfície da face de saída após passagem do abrasivo de 0.5 μm . Observação com ampliação de: (a) 50X; (b) 1X.

Entre cada patamar de polimento, findas as passagens na pasta abrasiva, é necessário remover as partículas abrasivas que ficam depositadas na ferramenta de corte. Assim, utilizou-se uma máquina de limpeza por ultrassons (Fig. 4.2(c)) na qual as pastilhas estavam mergulhadas em água. Esta limpeza é importante para garantir que ao passar para uma pasta com um grão mais fino, não existem grãos de maior tamanho a riscar a superfície. Depois de se terem superfícies polidas em todas as ferramentas de corte, é possível passar à aplicação dos parâmetros que vão diferenciar estas pastilhas durante os ensaios, isto é, aplicar um nível de rugosidade controlado e/ou um revestimento. Dentro de cada grupo de quatro ferramentas mencionado anteriormente, pretende-se variar a rugosidade. Assim, em cada conjunto de quatro pastilhas, uma unidade foi deixada completamente

polida enquanto que as outras três tiveram a sua face de ataque riscada em pedras de polimento (6000, 2000 e 600), com oito passagens paralelas à aresta de corte, tal como se mostra na Fig. 4.18.



Fig. 4.18 – Pedras de polir e direção das passagens efetuadas com as ferramentas. (a) Pedra de polir de 6000; (b) Pedra de polir de 2000.

Na Fig. 4.19 é possível observar a comparação entre a superfície virgem da face de ataque de uma ferramenta com a superfície de uma ferramenta após a passagem nas diferentes pedras de polir.

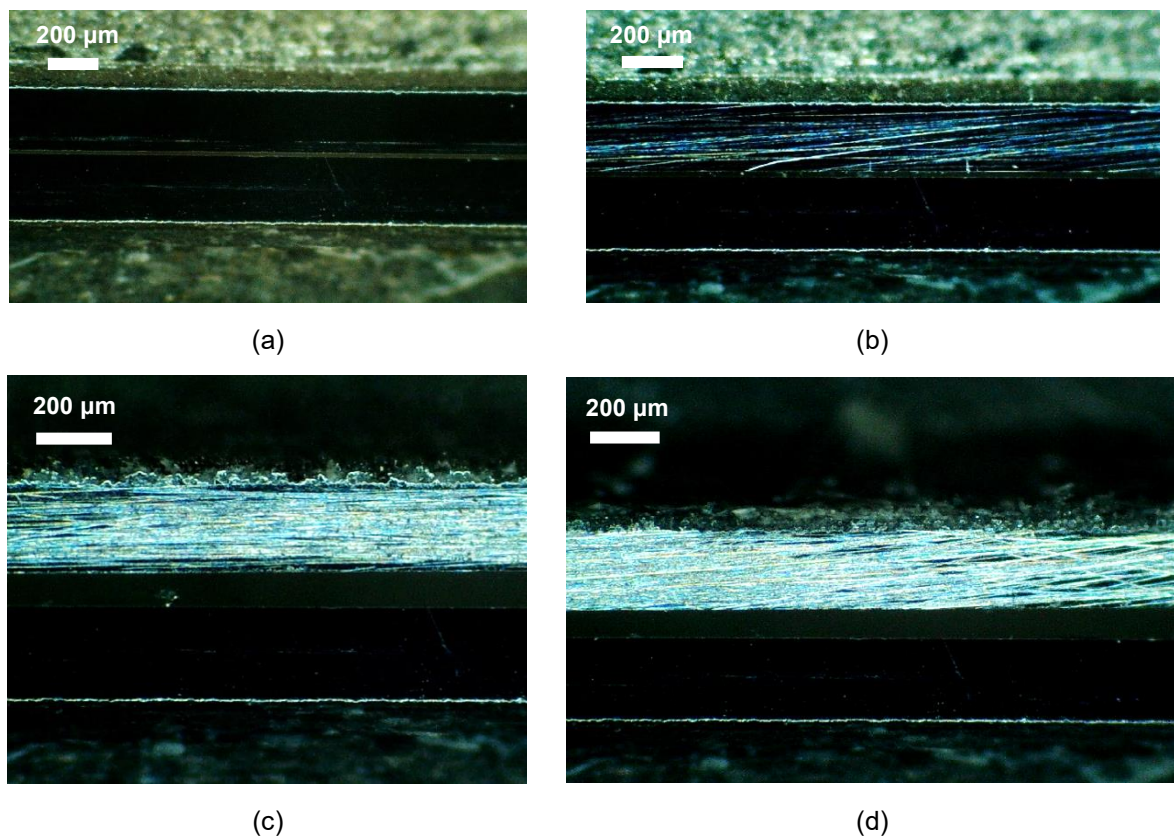


Fig. 4.19 – Comparação da rugosidade na face de ataque de duas ferramentas, sendo a inferior sempre polida. (a) Superfície polida da face de ataque em ambas as ferramentas; Superfície da face de ataque de uma ferramenta (superior) após passagem na pedra de polir de: (b) 6000; (c) 2000; (d) 600.

Findo este passo de aplicação de rugosidade controlada, as ferramentas foram divididas em dois grupos tal como visível na Fig. 4.20, isto é, as ferramentas que serão revestidas e as não revestidas. Um conjunto de doze ferramentas recebeu um revestimento de TiAlSiN com uma espessura de 2,5 µm. O processo de revestimento utilizado foi o Physical Vapor Deposition (PVD) recorrendo à tecnologia de High-Power Impulse Magnetron Sputtering (HiPIMS). A imagem esquemática da Fig. 4.21 descreve o processo de HiPIMS.



Fig. 4.20 – Conjunto de ferramentas que serão revestidas (caixas à esquerda) e as não revestidas (caixa à direita).

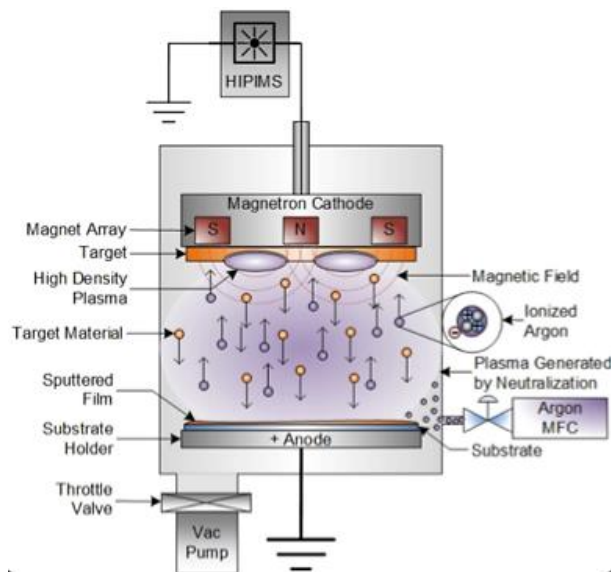


Fig. 4.21 – Diagrama esquemático do processo de High-Power Impulse Magnetron Sputtering (Cortesia Semicore Equipment, Inc).

Esta tecnologia baseia-se na deposição de uma camada de material na superfície de uma peça através da pulverização catódica desse mesmo objeto, uma vez que a peça está conectada a um pólo negativo e o filme de material de revestimento tem uma carga contrária pois parte de um pólo positivo. A ferramenta está inserida numa câmara onde é criado vácuo para remover a atmosfera original, sendo depois preenchida com gás árgon. São utilizados impulsos energéticos na ordem dos kW.cm^{-2} e com uma duração de dezenas de microssegundos responsáveis pela formação de plasma que resulta na ionização do material de revestimento. Os iões que partem do filme de revestimento no ânodo são atraídos até à superfície da peça onde se depositam.

Na Fig. 4.22 é possível observar o aspeto final de uma ferramenta com o revestimento aplicado, assim como uma comparação entre as várias fases do tratamento realizado nas ferramentas de corte.

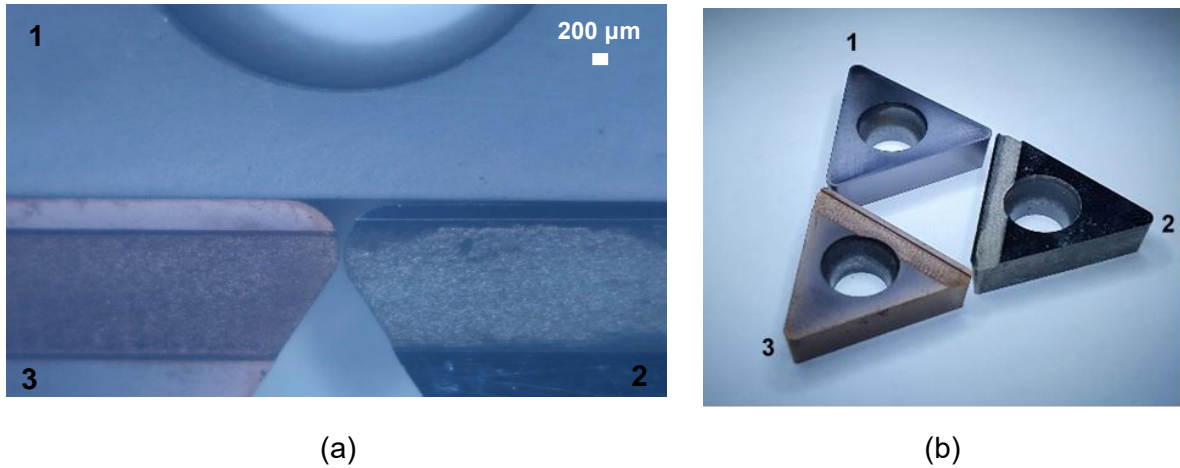


Fig. 4.22 – Comparação visual entre as diferentes fases da preparação de uma ferramenta de corte, isto é, uma ferramenta Palbit comercial (1), uma ferramenta polida (2) e uma ferramenta polida e revestida (3). (a) Fotografia de microscopia com ampliação de 2X; (b) Panorama geral dos três tipos de ferramenta.

Após a aplicação do revestimento, foi também realizada a medição de alguns parâmetros relativos à geometria de três ferramentas de corte. A Fig. 4.23(a) contém uma visualização 3D das faces de saída e de ataque de uma ferramenta assim como a caixa aberta na face de ataque através de micro-maquinagem por ablação laser, obtendo-se um comprimento de contacto restrito. Realizou-se ainda a medição de um conjunto de parâmetros que são apresentados na tabela 4.1 com base no diagrama da secção perpendicular à aresta de corte da Fig. 4.23(b). Procedeu-se ainda à medição dos parâmetros referentes a outras duas ferramentas, estando essa análise presente no Anexo D.

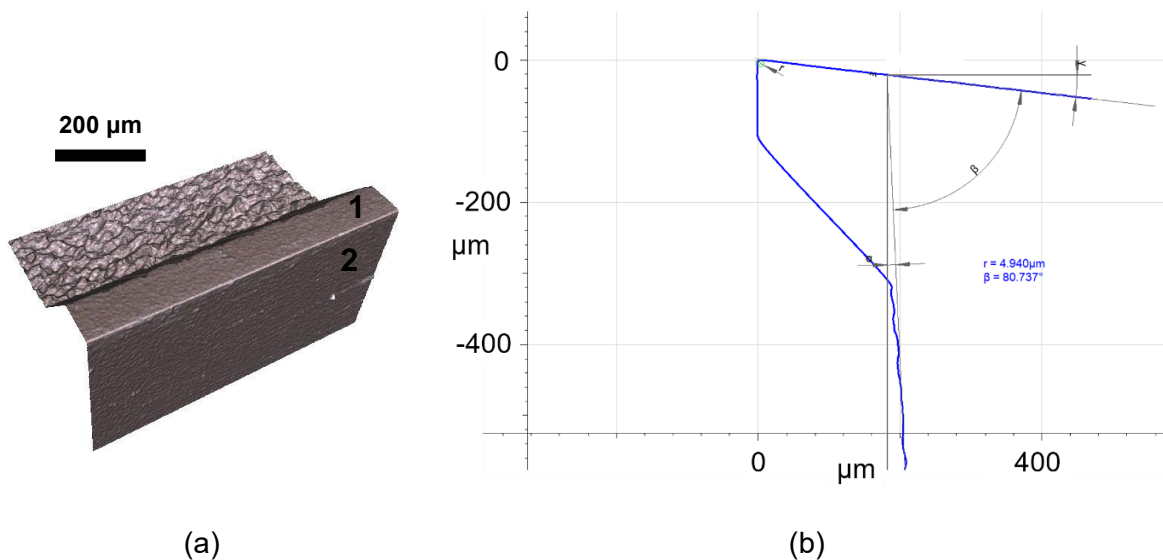


Fig. 4.23 – Análise de uma ferramenta de corte RT120. (a) Visualização 3D da face de ataque da ferramenta com ampliação de 10X (1 – Face de ataque com um comprimento de contacto controlado; 2 – Face de saída); (b) Diagrama da secção perpendicular à aresta de corte da ferramenta.

Tabela 4.1 – Parâmetros geométricos medidos na preparação de uma ferramenta de corte RT120

Parâmetro	Valor	Descrição
r_b	4.940 μm	Raio de bico médio
α	2.584°	Ângulo de ataque do interior do entalhe
β	80.737°	Ângulo de gume
γ	6.679°	Ângulo de saída
φ	-853.774e-9°	Ângulo de simetria
S_α	6.459 μm	Distance apex to end of rake roundness (Distância desde a aresta de corte até ao final da zona curva (raio de bico) na face de ataque)
S_γ	5.054 μm	Distance apex to end of clearance roundness (Distância desde a aresta de corte até ao final da zona curva (raio de bico) na face de saída)

A Fig. 4.24 revela as diferentes geometrias das ferramentas de corte utilizadas nos ensaios experimentais do presente trabalho.

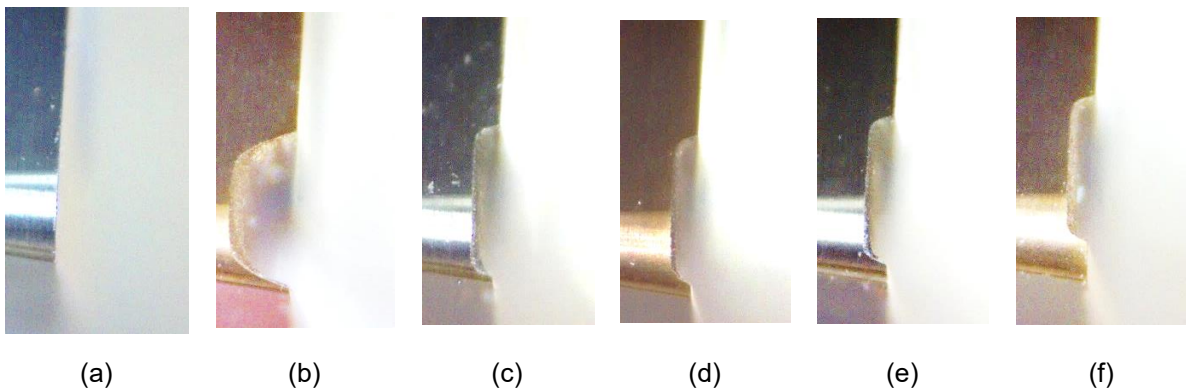


Fig. 4.24 – Diferentes tipos de ferramentas de corte utilizadas (vista lateral) com comprimento de contacto restrito de: (a) Ferramenta de referência (sem comprimento de contacto restrito, RTO0); (b) 30 μm (RT30); (c) 60 μm (RT60); (d) 120 μm (RT120); (e) 240 μm (RT240); (f) 480 μm (RT480).

4.2. Materiais Ensaçados

Os materiais ensaiados são materiais metálicos: liga de alumínio AA1085; cobre puro (encruado e recozido); aço maraging 18Ni300 por fabrico aditivo; zinco puro; liga de aço AISI1045; titânio. Nas tabelas 4.2 a 4.7 encontram-se indicadas as principais propriedades mecânicas destes materiais. O nome *maraging* resulta da combinação de duas palavras, “martensite” e “aging”, termos ingleses para designar “martensite” e “envelhecimento”. Neste tipo de aço, a transformação martensítica produz um material com estrutura cúbica de corpo centrado com elevada densidade de deslocações e alto teor de elementos de liga em solução sólida. Isto propicia que as deslocações atuem como núcleos para a precipitação de compostos intermetálicos durante o envelhecimento. Estes compostos intermetálicos variam conforme o material e o tratamento termomecânico aplicado. O endurecimento por precipitação é responsável por aproximadamente cinquenta por cento do

endurecimento total apresentado por este tipo de aço. Na Fig. 4.25 que se segue estão expostos alguns dos provetes ensaiados, tendo três deles uma forma circular uma vez que foram cortados a partir de um varão de material. Na secção 4.4. encontra-se explicado o plano de ensaios utilizando os materiais metálicos mencionados na presente secção.

Tabela 4.2 – Propriedades metalúrgicas da liga de Alumínio AA1085

Liga de Alumínio AA1085			
Densidade [kg/m ³]	2700	Dureza [Vickers]	20
Módulo de Young [GPa]	68	Estrutura Cristalina	CFC

Tabela 4.3 – Propriedades metalúrgicas do Cobre puro

Cobre puro			
Densidade [kg/m ³]	8960	Dureza [Vickers]	50
Módulo de Young [GPa]	128	Estrutura Cristalina	CFC

Tabela 4.4 – Propriedades metalúrgicas do Aço Maraging 18Ni 300 *grade*

Aço Maraging 18Ni 300 <i>grade</i>			
Densidade [kg/m ³]	8100	Dureza [Vickers]	360-600
Módulo de Young [GPa]	210	Estrutura Cristalina	CCC

Tabela 4.5 – Propriedades metalúrgicas do Zinco puro

Zinco puro			
Densidade [kg/m ³]	7100	Dureza [Vickers]	30
Módulo de Young [GPa]	96-108	Estrutura Cristalina	HC

Tabela 4.6 – Propriedades metalúrgicas do AISI1045

AISI1045			
Densidade [kg/m ³]	7870	Dureza [Vickers]	180
Módulo de Young [GPa]	200		

Tabela 4.7 – Propriedades metalúrgicas do Titânio

Titânio			
Densidade [kg/m ³]	4430	Dureza [Vickers]	350
Módulo de Young [GPa]	120		



Fig. 4.25 – Aspeto de alguns dos materiais ensaiados: liga de Alumínio AA1085; cobre puro (proвете encruado); Cobre puro (proвете recozido); Aço maraging 18Ni 300 grade por fabrico aditivo (ordem da esquerda para a direita).

4.3. Definição dos Parâmetros de Corte

Antes de se realizarem ensaios finais que deram origem aos resultados apresentados no capítulo 5, efetuou-se uma série de ensaios preliminares. A análise das imagens captadas nos vídeos destes ensaios preliminares indica que nem todos os ensaios formaram uma apara com a geometria pretendida, isto é, uma tira de material retangular com comprimento elevado face à largura assim como espessura da apara muito inferior às outras dimensões. Em alguns ensaios observa-se a formação de um concentrado de material desordenado que é empurrado pela ferramenta (Fig.4.26(a)). Isto constitui um comportamento mecânico diferente do registado na formação de uma apara ideal, logo os resultados de força e conseqüentemente de coeficiente de atrito serão diferentes. Desta forma, deve ser realizada uma análise das imagens recolhidas relativamente à formação da apara correspondentes a cada ensaio e relacionar com a profundidade de corte utilizada. O intuito dessa análise é relacionar os valores de profundidade de corte e o comprimento de contacto da apara com a ferramenta nos casos de ferramenta de contacto restrito. É possível a ocorrência de três situações: comprimento de contacto da apara menor, igual ou maior que o comprimento da face de ataque da ferramenta. Quer-se encontrar a gama de valores de profundidade de corte que permite a apara utilizar todo o comprimento da face de ataque e descolar da ferramenta na extremidade superior desse mesmo comprimento, sem ocorrência posterior de contacto com a ferramenta novamente. As Figuras 4.27 a 4.31 contêm uma análise à formação da apara para diferentes profundidades de corte nas várias ferramentas utilizadas no presente estudo.



Fig. 4.26 – Formação de diferentes aparas num ensaio de corte ortogonal. (a) Apara com geometria indesejável (AA1085, encruado, $V_c = 45$ mm/min, $w_a = 1.4$ mm, árgon, Wc-Co, $R_a \approx 0.01$ μ m); (b) Apara com a geometria desejada (zinco puro, encruado, $V_c = 45$ mm/min, $w_a = 1.03$ mm, árgon, Wc-Co, $R_a \approx 0.01$ μ m).

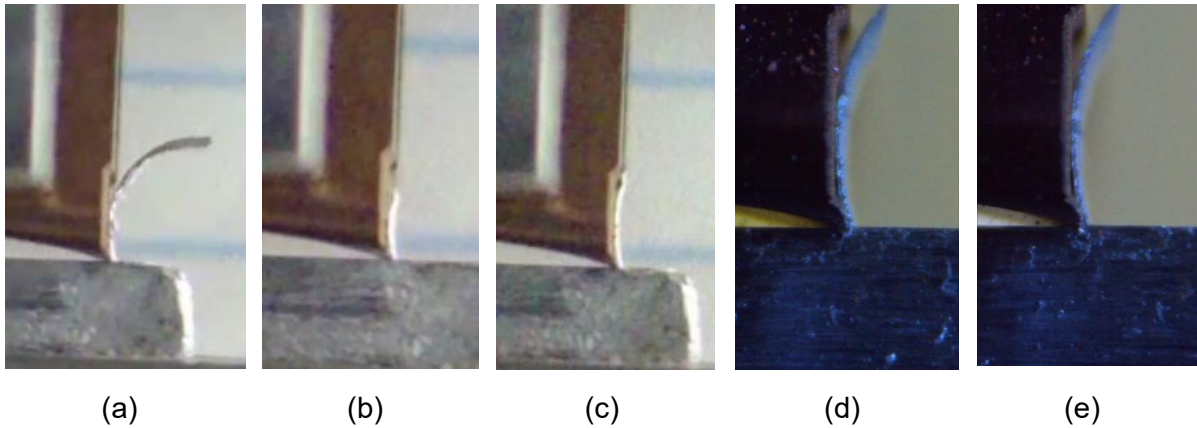


Fig. 4.27 – Formação da apara utilizando a ferramenta RT30 (AA1085, $V_c = 45$ mm/min, $w_a = 1.4$ mm, Wc-Co, $R_a \approx 0.01$ μm) para diferentes profundidades de corte, e: (a) 13 μm (apara aceitável); (b) 14 μm (apara aceitável); (c) 16 μm (apara excede comprimento da face de ataque); (d) 20 μm (apara excede comprimento da face de ataque); (e) 25 μm (apara excede comprimento da face de ataque).

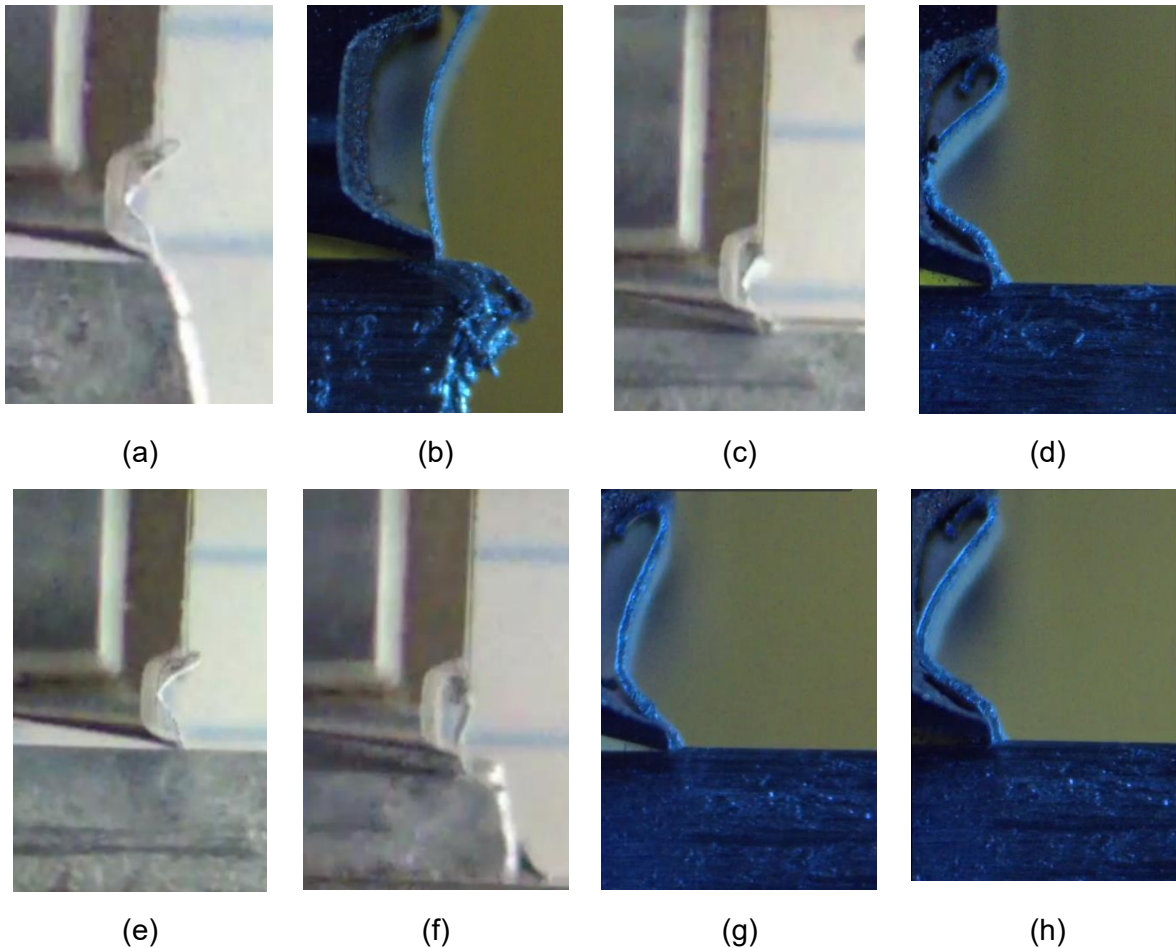


Fig. 4.28 – Formação da apara utilizando a ferramenta RT60 (AA1085, $V_c = 45$ mm/min, $w_a = 1.4$ mm, Wc-Co, $R_a \approx 0.01$ μm) para diferentes profundidades de corte, e: (a) 22 μm (apara inaceitável); (b) 30 μm (apara aceitável); (c) 33 μm (apara inaceitável); (d) 35 μm (apara excede comprimento da face de ataque); (e) 36 μm (apara excede comprimento da face de ataque); (f) 39 μm (apara excede comprimento da face de ataque); (g) 40 μm (apara excede comprimento da face de ataque); (h) 45 μm (apara excede comprimento da face de ataque).

A análise das imagens captadas durante ensaios com diferentes profundidades indica que para a ferramenta RT30 a gama de profundidades de corte que permite obter uma apara sem contacto indesejado com a ferramenta depois de ter utilizado todo comprimento da face de ataque tem um limite superior de aproximadamente 14 μm (Razão entre o comprimento da face de ataque e profundidade de corte igual a $30/14 \approx 2$). Não se conseguiu encontrar um limite inferior da profundidade de corte aceitável para a ferramenta RT30. A análise das imagens captadas durante ensaios com diferentes profundidades indica que para a ferramenta RT60 a gama de profundidades de corte que permite obter uma apara sem contacto indesejado com a ferramenta depois de ter utilizado todo comprimento da face de ataque tem um limite superior de aproximadamente 30 μm (Razão entre o comprimento da face de ataque e profundidade de corte igual a $60/30 \approx 2$). Não se conseguiu encontrar um limite inferior da profundidade de corte aceitável para a ferramenta RT60.

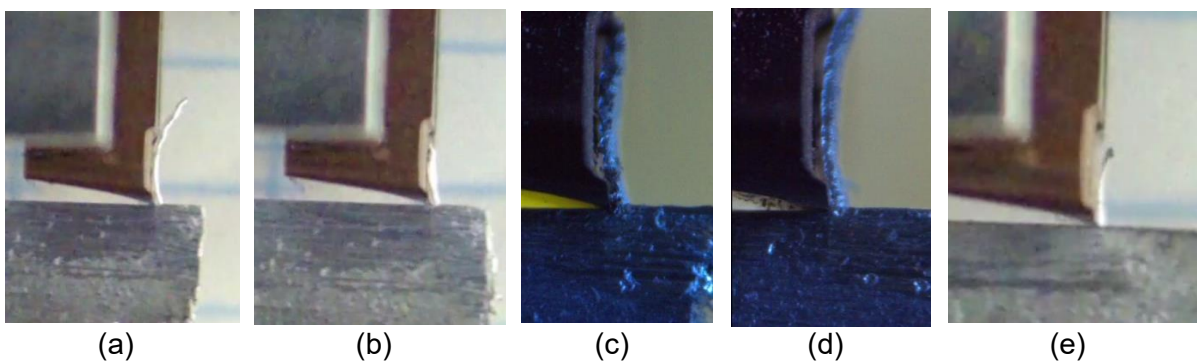
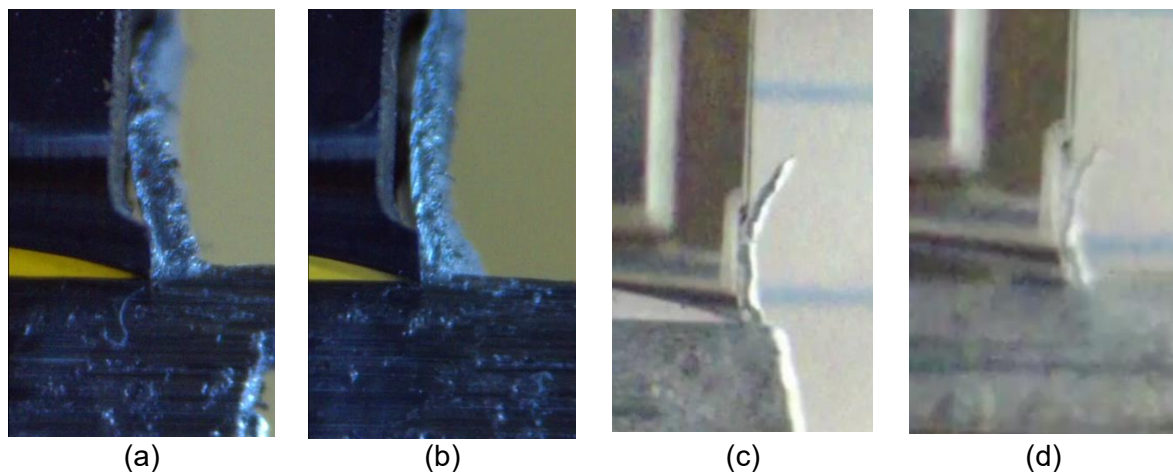


Fig. 4.29 – Formação da apara utilizando a ferramenta RT120 (AA1085, $V_c = 45 \text{ mm/min}$, $w_a = 1.4 \text{ mm}$, Wc-Co, $R_a \approx 0.01 \mu\text{m}$) para diferentes profundidades de corte, e: (a) 30 μm (apara inaceitável); (b) 36 μm (apara inaceitável); (c) 40 μm (apara aceitável); (d) 50 μm (apara aceitável); (e) 56 μm (apara aceitável).

A análise das imagens captadas durante ensaios com diferentes profundidades indica que para a ferramenta RT120 a gama de profundidades de corte que permite obter uma apara sem contacto indesejado com a ferramenta depois de ter utilizado todo comprimento da face de ataque localiza-se aproximadamente entre 40 μm e 56 μm (Razão entre o comprimento da face de ataque e profundidade de corte situa-se entre $120/40 \approx 3$ e $120/56 \approx 2.1$).



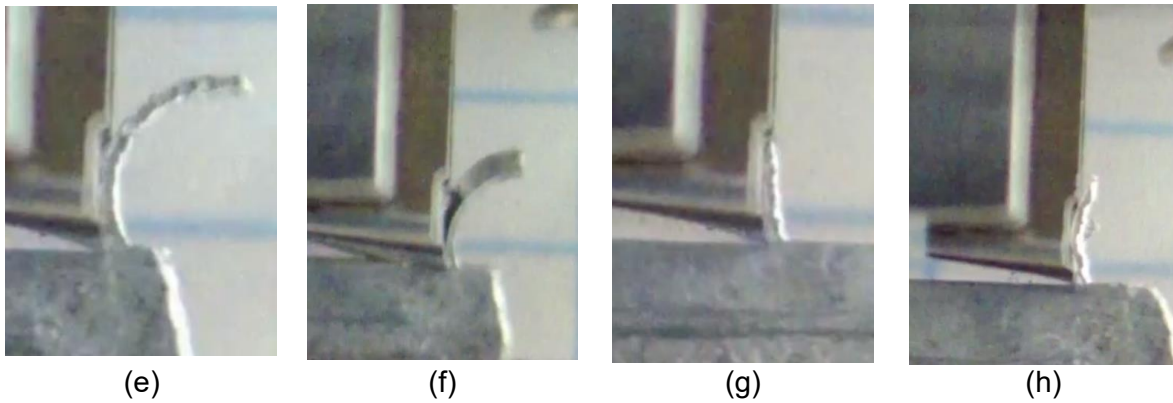


Fig. 4.30 – Formação da apara utilizando a ferramenta RT240 (AA1085, $V_c = 45$ mm/min, $w_a = 1.4$ mm, Wc-Co, $R_a \approx 0.01$ μm) para diferentes profundidades de corte, e: (a) 83 μm (apara inaceitável); (b) 89 μm (apara inaceitável); (c) 95 μm (apara aceitável); (d) 97 μm (apara aceitável); (e) 99 μm (apara aceitável); (f) 101 μm (apara excede comprimento da face de ataque); (g) 102 μm (apara excede comprimento da face de ataque); (h) 106 μm (apara excede comprimento da face de ataque).

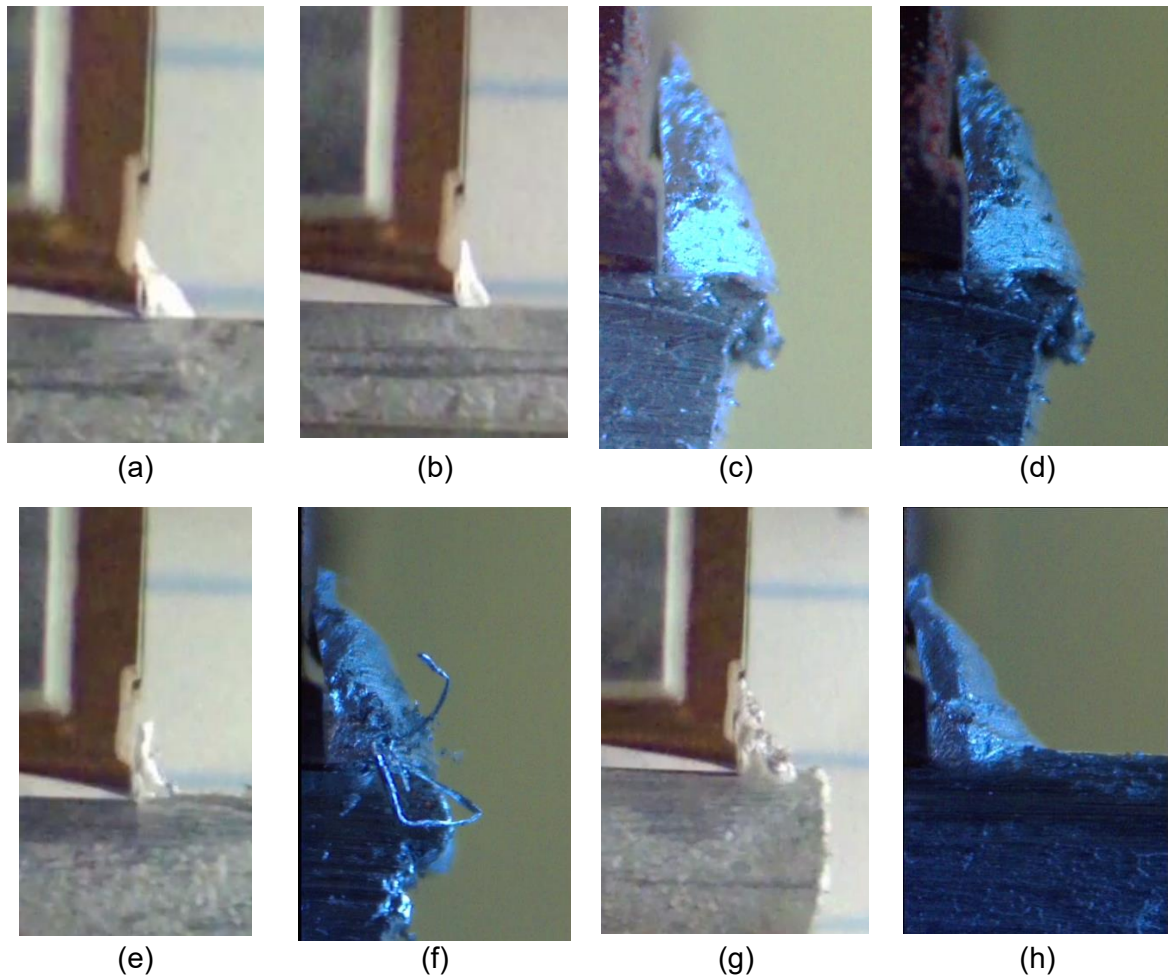


Fig. 4.31 – Formação da apara utilizando a ferramenta RT480 (AA1085, $V_c = 45$ mm/min, $w_a = 1.4$ mm, Wc-Co, $R_a \approx 0.01$ μm) para diferentes profundidades de corte, e: (a) 71 μm (apara aceitável); (b) 73 μm (apara aceitável); (c) 78 μm (apara aceitável); (d) 90 μm (apara aceitável); (e) 100 μm (apara aceitável); (f) 101 μm (apara aceitável); (g) 114 μm (apara excede comprimento da face de ataque); (h) 118 μm (apara excede comprimento da face de ataque).

A análise das imagens captadas durante ensaios com diferentes profundidades indica que para a ferramenta RT240 a gama de profundidades de corte que permite obter uma apara sem contacto indesejado com a ferramenta depois de ter utilizado todo comprimento da face de ataque localiza-se aproximadamente entre 95 μm e 99 μm (Razão entre o comprimento da face de ataque e profundidade de corte situa-se entre $240/95 \approx 2.5$ e $240/99 \approx 2.4$). A análise das imagens captadas durante ensaios com diferentes profundidades indica que para a ferramenta RT480 a gama de profundidades de corte que permite obter uma apara sem contacto indesejado com a ferramenta depois de ter utilizado todo comprimento da face de ataque localiza-se aproximadamente entre 71 μm e 101 μm (Razão entre o comprimento da face de ataque e profundidade de corte situa-se entre $480/71 \approx 6.8$ e $480/101 \approx 4.8$). Alguns dos ensaios realizados nesta análise preliminar (tal como os (b), (g) e (h) da Fig.4.28 ou os apresentados na Fig.4.31) apresentam aparas condizentes com um ensaio de indentação e não com corte ortogonal, uma vez que o primeiro se revela energeticamente mais favorável na deformação do material, possivelmente devido à velocidade a que o ensaio é realizado (velocidade de corte) ser baixa.

4.4. Plano de Ensaios

Os ensaios experimentais foram concebidos com vista a garantir os objetivos do trabalho. Desta forma, os ensaios foram realizados em condições controladas, variando-se os parâmetros em cada ensaio (material, geometria/revestimento da ferramenta de corte, atmosfera e profundidade de corte), de forma a avaliar a influência sobre o mecanismo global de corte, assim como a influência do atrito na geometria da apara. A tabela 4.8 contém a informação sobre cada parâmetro referente aos diferentes ensaios unidirecionais realizados. Quando é realizado mais do que um ensaio com a mesma profundidade de corte teórica para as mesmas condições experimentais, indica-se entre parêntesis o número de ensaios repetidos. Para os ensaios experimentais com uma espessura de corte, e ou t_o , até 0.5 mm, considera-se que estes foram realizados em condições de corte ortogonal. A aresta de corte estava paralela à superfície superior da peça a cortar e perpendicular ao movimento do provete, sendo a razão entre a largura da apara, b , relativamente à espessura de corte, e , chamada de esbeltez da apara, G , superior a 4, pelo que se garante a condição de deformação plana. Os provetes estavam fixos num dispositivo instrumentado e uma velocidade de corte constante de 45 mm/min foi utilizada nos ensaios. Depois do corte a superfície maquinada foi medida com um comparador e retificada para remoção de uma camada de material igual à espessura da camada removida. Para a operação de corte efetuado pela ferramenta, criou-se o procedimento presente no Anexo A do presente documento, tendo-se feito o mesmo para a operação de retificação. A atmosfera interior à hotte foi controlada para diferentes concentrações (árgon, oxigénio e atmosfera ambiente composta por, aproximadamente, 21% de oxigénio e 79% de azoto)). A atmosfera pode variar entre ativa de oxigénio (21% ou 100%) ou inerte de árgon. O fluxo de gás foi limitado a 5 L/min através de um medidor de fluxo depois da câmara estar completamente cheia. Algo que deve ser tido em conta quando se utiliza atmosfera ambiente é o facto de esta não ser sempre igual, pois o nível de humidade é variável, algo que tem influência na interação entre os materiais e, portanto, nos resultados dos ensaios com esta atmosfera envolvente.

Tabela 4.8 – Plano de ensaios

L _c (μm)	Material	Atmosfera	t ₀ (μm)
∞ (Ferramenta de referência)	AA1085 encruado (work-hardened)	Atm. Ambiente	35; 40
		Oxigénio	45
		Árgon	10 (x2); 20; 30; 40; 50 (x2); 55; 70; 80; 90; 100
	Cobre puro encruado	Atm. Ambiente	35
		Oxigénio	30 (x2); 35
		Árgon	10 (x2); 20; 30; 40; 50; 60; 70; 80; 90; 100
	Cobre puro recozido (annealed)	Atm. Ambiente	45 (x2)
		Oxigénio	30; 40; 45
		Árgon	10; 20; 30; 40; 50; 60; 70; 80; 90; 100
∞ (comercial)	AA1085 encruado	Árgon	20; 30; 40; 60; 70; 80; 90
	Cobre puro recozido		10; 20; 30; 40; 50; 60; 70; 80; 90; 100
30	AA1085 encruado	Atm. Ambiente	15 (x3)
		Oxigénio	15; 20
		Árgon	15; 20 (x2); 25
	Cobre puro encruado	Atm. Ambiente	15; 20
		Oxigénio	20
		Árgon	15 (x2); 20 (x2); 25
	Cobre puro recozido	Atm. Ambiente	10
		Oxigénio	15; 20
		Árgon	15 (x2); 20 (x2); 25
60	AA1085 encruado	Atm. Ambiente	35
		Oxigénio	35; 40
		Árgon	30; 35 (x3); 40; 45
	Cobre puro encruado	Atm. Ambiente	25; 35
		Oxigénio	30; 35
		Árgon	30; 35 (x2); 45
	Cobre puro recozido	Atm. Ambiente	35 (x3)
		Oxigénio	35 (x3)
		Árgon	30; 35 (x3)
120	AA1085 encruado	Atm. Ambiente	50 (x2)
		Oxigénio	30 (x2)
		Árgon	30; 35; 40; 50
	Cobre puro encruado	Atm. Ambiente	30
		Oxigénio	30 (x2)
		Árgon	30 (x2); 35; 40; 45
	Cobre puro recozido	Atm. Ambiente	25 (x2)
		Oxigénio	30 (x2)
		Árgon	35; 40; 45; 50
240	AA1085 encruado	Atm. Ambiente	100; 110
		Oxigénio	100 (x2); 105
		Árgon	80; 90; 100 (x3)
	Cobre puro encruado	Atm. Ambiente	50; 70
		Oxigénio	95 (x2); 100
		Árgon	60; 70; 75; 80; 105
	Cobre puro recozido	Atm. Ambiente	70; 100
		Oxigénio	90; 100
		Árgon	70; 80; 90; 95; 100
480	AA1085 encruado	Atm. Ambiente	75 (x2)
		Oxigénio	100; 120
		Árgon	80; 90; 100; 130
	Cobre puro encruado	Atm. Ambiente	40; 100
		Oxigénio	100
		Árgon	50; 90; 120; 130; 140
	Cobre puro recozido	Atm. Ambiente	30; 50
		Oxigénio	40
		Árgon	80; 90; 95; 100
Maraging aditivo	Atm. ambiente	50; 100; 150	
	Árgon	100	

5. Análise dos Resultados

5.1. Ensaios de Corte Ortogonal Unidirecional

Este capítulo dedica-se à análise e discussão dos resultados obtidos nos ensaios realizados. Foram efetuados ensaios de corte ortogonal com uma passagem da ferramenta de corte no provete numa única direção, aos quais se chamou de ensaios unidirecionais. Realizou-se também uma variação deste tipo de ensaio, na qual o movimento da ferramenta é interrompido no centro do provete para depois ser retirada na direção perpendicular. A este segundo tipo de ensaio chamou-se de ensaio bidirecional. Estes dois tipos de ensaios apresentam comportamentos diferentes ao nível dos gráficos de forças e coeficiente de atrito, pelo que se efetuará uma análise dos mesmos. Começando pelos ensaios unidirecionais, a Fig. 5.1 apresenta um ensaio de corte ortogonal que se considerou ser um ensaio de referência.

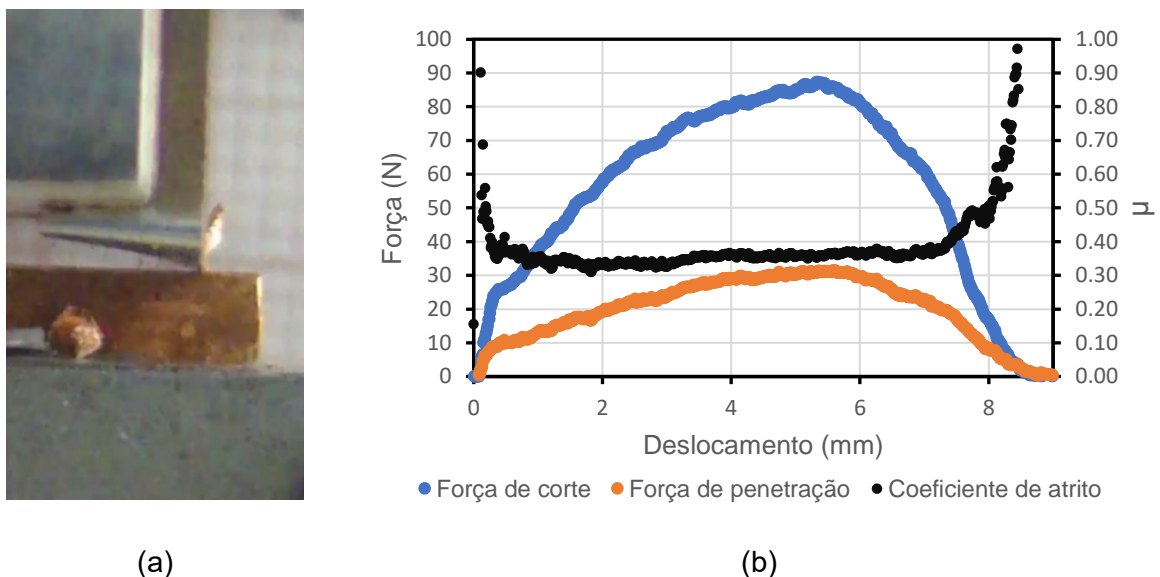


Fig. 5.1 – Ensaio de referência. (a) Formação da aparatura num ensaio unidirecional; (b) Evolução das forças de corte e de penetração assim como do coeficiente de atrito num ensaio de corte ortogonal (Cobre, recozido, $V_c = 45$ mm/min, $w_a = 1.36$ mm, $t_0 = 0.018$ mm, árgon, Wc-Co, $R_a \approx 0.01$ μm).

Da Fig. 5.1 retira-se que as forças aumentam inicialmente com o deslocamento ao longo do provete, até que se regista um valor máximo de força. Apesar de ser esperado atingir um regime estacionário de força tal não aconteceu, pois, a ferramenta de corte ao se aproximar do final do provete inicia o regime transiente de saída com redução das forças de corte e de penetração. Deste comportamento das forças conclui-se que o comprimento dos provetes utilizados é pequeno para os ensaios realizados. Esta situação é especialmente notória nos ensaios com profundidades de corte mais elevadas em que se utilizou as ferramentas RT240 e RT480. Apesar de as forças não atingirem um regime estacionário ao longo do provete, o valor do coeficiente de atrito é aproximadamente constante ao longo do ensaio como seria de esperar pois as condições de atrito permanecem as mesmas.

A assinatura final das curvas de força no gráfico de alguns ensaios também pode ser influenciada pela acumulação de material na extremidade do provete onde se efetua a saída da ferramenta. Este fenómeno encontra-se documentado na Fig. 5.2. A existência desta rebarba constitui uma falha no procedimento efetuado, pois se se realiza a remoção da camada de material encruado e da rebarba lateral para não influenciar os resultados, devia ter-se feito o mesmo com esta.

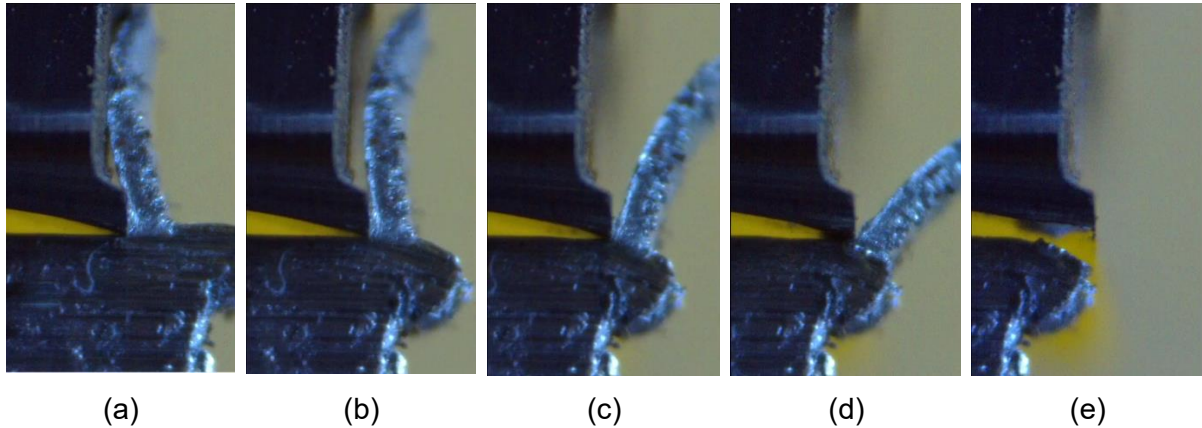


Fig. 5.2 – Acumulação de material na extremidade do provete devido aos sucessivos ensaios e interação com a avara formada. (AA1085, $V_c = 45$ mm/min, $w_a = 1.4$ mm, árgon, Wc-Co, $R_a \approx 0.01$ μ m). (a)-(e): Instantes finais de um ensaio de corte ortogonal.

A análise dos resultados experimentais de ensaios de corte ortogonal em provetes de material encruado AA1085 (Fig. 5.3), cobre na condição metalúrgica encruada (Fig. 5.4) e cobre na condição metalúrgica recozida (Fig. 5.5) revelou diferentes patamares de energia/força necessária em condições experimentais semelhantes com atmosfera controlada de árgon para os diferentes tipos de ferramenta de corte utilizados. A Fig. 5.3(a) apresenta a evolução da força de corte com a profundidade de corte para o material AA1085 encruado. A força de corte aumenta linearmente com a espessura para todas as condições de corte testadas. Porém, é possível observar a existência de quatro agrupamentos distintos, paralelos entre si e afastados por um valor de força constante, para as diferentes condições da ferramenta de corte: (i) a ferramenta comercial (sem contacto restrito e sem polimento); (ii) a ferramenta de referência (sem contacto restrito e polida sem revestimento); (iii) com contacto restrito e polida sem revestimento; (iv) com contacto restrito, polida e com revestimento. A ferramenta de referência (RTCO) revela valores da força de corte mais elevados relativamente às ferramentas de contacto restrito. Entre as ferramentas de contacto restrito é possível observar que aquelas com revestimento de TiAlSiN apresentam um acréscimo na força de corte. Este resultado parece estar relacionado com a rugosidade da superfície das mesmas (como será discutido futuramente nesta secção e na Fig. 5.6). A Fig. 5.3(b) mostra a evolução da força de penetração com a seção de corte. A análise destes resultados indica serem em tudo similares aos anteriormente descritos para a força de corte.

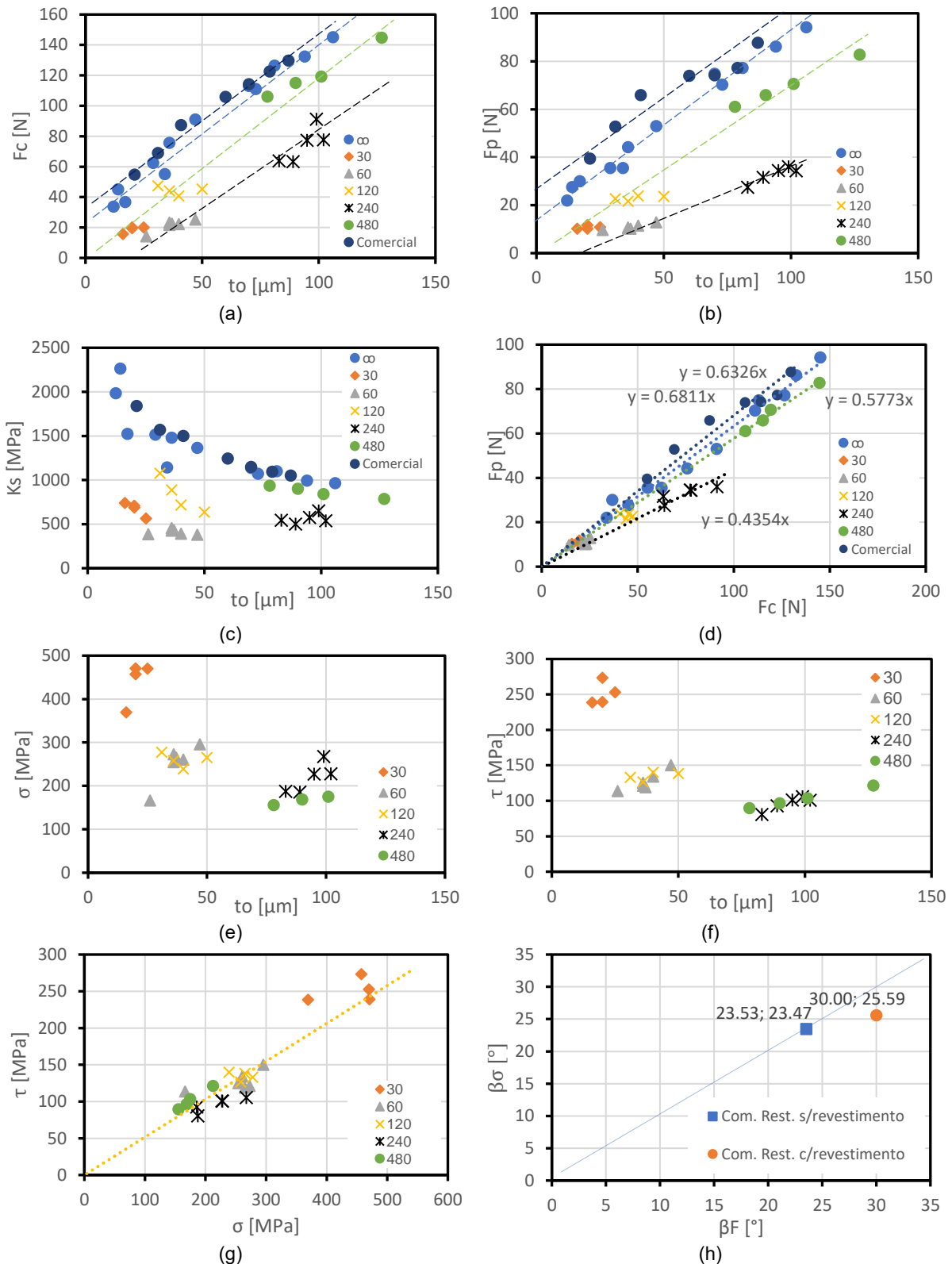


Fig. 5.3 – Ensaio em condições de corte ortogonal (AA1085, $V_c = 45$ mm/min, $w_a = 1.42$ mm, argon, Wc-Co, $R_a \approx 0.01$ μ m). (a) Evolução da força de corte com a espessura de corte; (b) Evolução da força de penetração com a espessura de corte; (c) Evolução da pressão específica de corte com a espessura de corte; (d) Relação entre as forças de corte e de penetração; (e) Evolução da tensão normal na face de ataque com a espessura de corte; (f) Evolução da tensão de corte na face de ataque com a espessura de corte; (g) Relação entre as tensões normal e de corte; (h) Relação entre os ângulos de atrito obtidos a partir dos gráficos de força e de tensões.

Na Fig. 5.3(c), o gráfico mostra claramente um decréscimo do valor da pressão específica de corte com o aumento da espessura de corte. Essa evolução aparenta ser independente do tipo de ferramenta utilizada e aproxima-se dum modelo descrito por uma função potência de expoente negativo. Do gráfico retira-se também que nos ensaios com espessuras da secção de corte baixas, os valores de K_s são muito elevados para ensaios de corte ortogonal, aproximando-se na verdade dos valores obtidos em ensaios de indentação. Da Fig. 5.3(d) conclui-se que os quatro grupos de ferramentas apresentam diferentes tendências na relação entre as forças de corte e de penetração, no entanto, verifica-se a existência de linearidade dentro de cada um desses quatro grupos. A inclinação das retas denuncia que o nível de atrito é menor no caso de ensaios com ferramentas não revestidas e contacto restrito, sendo o mais elevado nos ensaios com a ferramenta comercial. Nas Fig. 5.3(e) e Fig. 5.3(f) observa-se que as tensões normal e de corte na face de ataque registam um comportamento semelhante, isto é, o crescimento das mesmas com o aumento da profundidade de corte dentro de cada tipo de ferramenta. Identifica-se o aparecimento de três agrupamentos de pontos referentes aos ensaios realizados com as ferramentas: RT240 e RT480; RT60 e RT120; RT30. Na Fig. 5.3(g) apresenta-se a relação entre a tensão normal e de corte na face de ataque, destacando-se o facto de ambas as tensões serem tanto mais baixas quanto maior o comprimento de contacto restrito da ferramenta ensaiada. Este comportamento evidencia-se também na análise das figuras 5.3(e) e 5.3(f), pois em ensaios com profundidades de corte mais elevadas são utilizadas ferramentas com maior comprimento de contacto restrito, sendo as tensões na face de ataque das ferramentas menores. A Fig. 5.3(h) corresponde à relação entre o ângulo de atrito obtido no gráfico das forças de corte e de penetração da Fig. 5.3(d), β_F , e o ângulo de atrito obtido no gráfico das tensões normal e de corte da Fig. 5.3(g), β_σ , para os dois tipos de ferramenta com e sem revestimento em condições de corte ortogonal com atmosfera de argon. As expressões (5.1) e (5.2) permitem calcular estes ângulos de atrito a partir da inclinação das retas no gráfico das forças, $m_{F_p F_c}$, e no gráfico das tensões, $m_{\tau\sigma}$. Da análise da Fig. 5.3(h) retira-se que os ensaios com ferramentas sem revestimento apresentaram ângulos de atrito menores do que os ensaios com as ferramentas com revestimento aplicado.

$$\beta_F = \text{atan}(m_{F_p F_c}) \quad (5.1)$$

$$\beta_\sigma = \text{atan}(m_{\tau\sigma}) \quad (5.2)$$

Nas figuras 5.4 e 5.5 que se seguem, apresentam-se os resultados dos ensaios realizados com provetes de cobre puro encruado e recozido. Os resultados correspondentes a estes dois materiais são idênticos aos obtidos para os provetes da liga de alumínio AA1085, sendo, portanto, a análise também ela idêntica à realizada nos parágrafos anteriores.

Tal como se referiu na secção 4.3 que se obtiveram aparas que apontam para ensaios de indentação, os gráficos das Figuras 5.3(c) e 5.5(c) relativos à pressão específica de corte revelam valores de K_s muito elevados em ensaios realizados com espessuras da secção de corte baixas. Estes valores extremamente elevados para ensaios de corte ortogonal indiciam que alguns dos ensaios se aproximam mais de um ensaio de indentação na realidade. Estes resultados permitem retirar outras duas conclusões. A primeira, que seria esperada, indica um coeficiente de atrito mais elevado nos

ensaios realizados com ferramenta de referência (RT ∞) face aos ensaios com outros dois tipos de ferramentas de contacto restrito, quer revestidas quer não revestidas. No entanto, a segunda conclusão é surpreendente, uma vez que revela que o grupo de ferramentas com revestimento aplicado tem um nível de atrito inferior à ferramenta RT ∞ , mas superior ao conjunto de ferramentas de contacto restrito sem revestimento. Este resultado levou à necessidade de uma análise microscópica das faces e arestas dos diferentes conjuntos de ferramentas utilizadas de forma a tentar justificá-lo. Assim, realizou-se um registo fotográfico (Fig. 5.6) em que se compara o aspeto de uma ferramenta sem comprimento restrito (RT ∞) e uma ferramenta com comprimento de contacto restrito de 480 μ m (RT480).

A análise da Fig. 5.6 mostra que a ferramenta com a geometria original polida (RT ∞) apresenta uma rugosidade na face de ataque inferior à face de ataque duma ferramenta revestida, embora esta segunda ferramenta também tenha sido polida antes da aplicação do seu revestimento de TiAlSiN num processo de Physical Vapor Deposition (PVD). Verifica-se também que a própria aresta de corte da ferramenta RT ∞ conserva uma geometria retilínea, enquanto que a ferramenta RT480 apresenta defeitos nas arestas. Uma vez que estes defeitos apenas foram encontrados nas ferramentas revestidas conclui-se que alguma operação no processo de revestimento danificou as ferramentas.

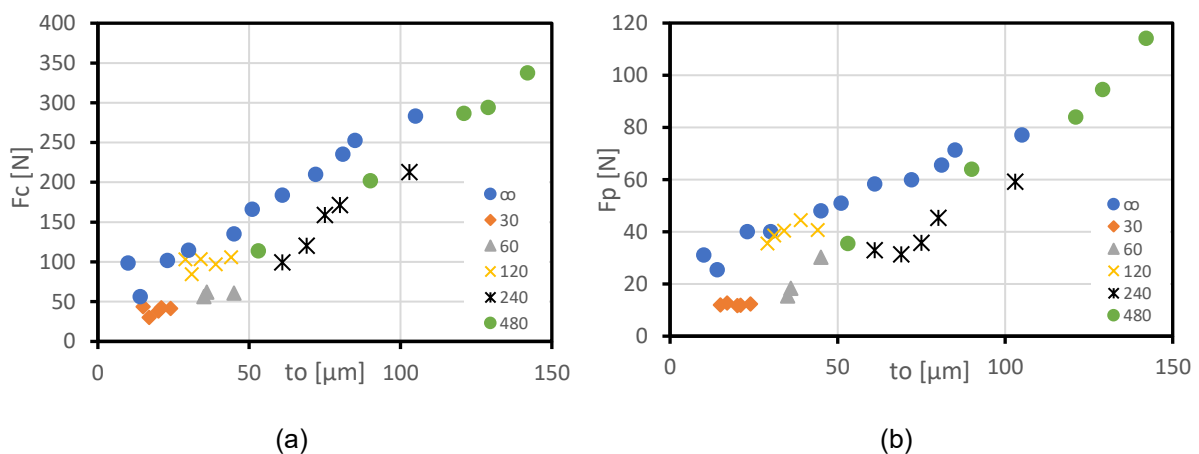


Fig. 5.4 – Ensaio em condições de corte ortogonal (Cobre (encruado), $V_c = 45$ mm/min, $w_a = 1.05$ mm, árgon , Wc-Co, $R_a \approx 0.01$ μ m). (a) Evolução da força de corte com a espessura de corte; (b) Evolução da força de penetração com a espessura de corte.

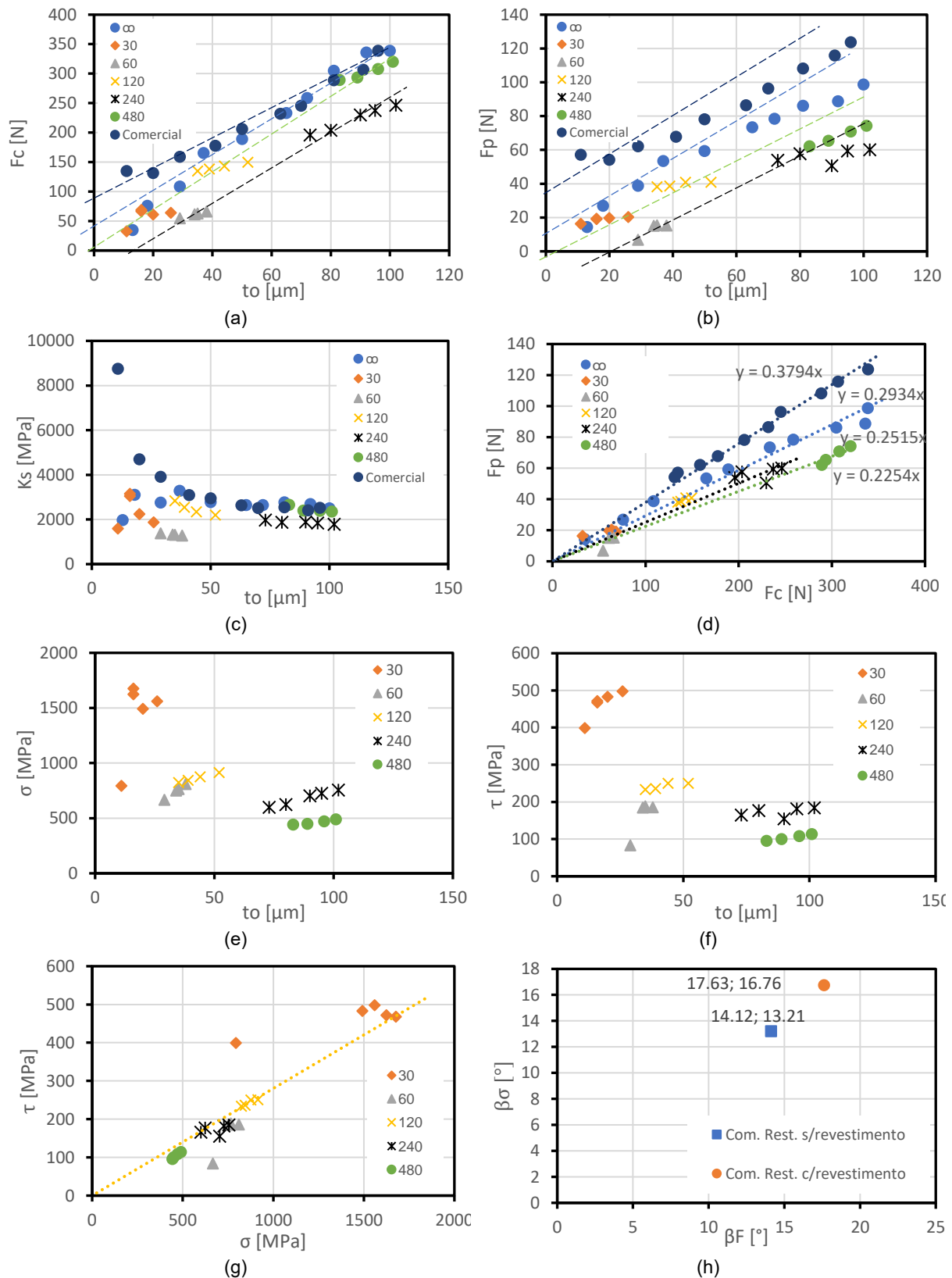
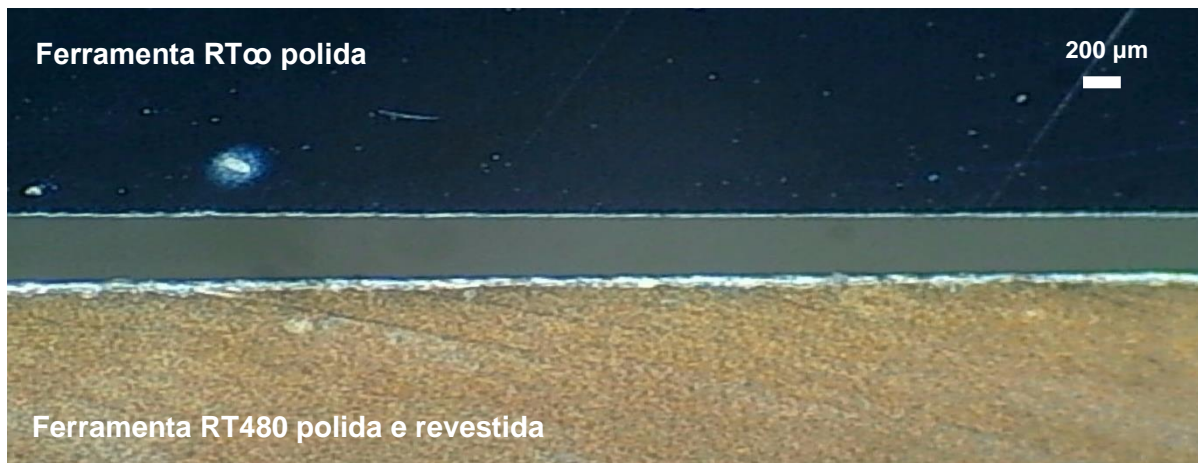
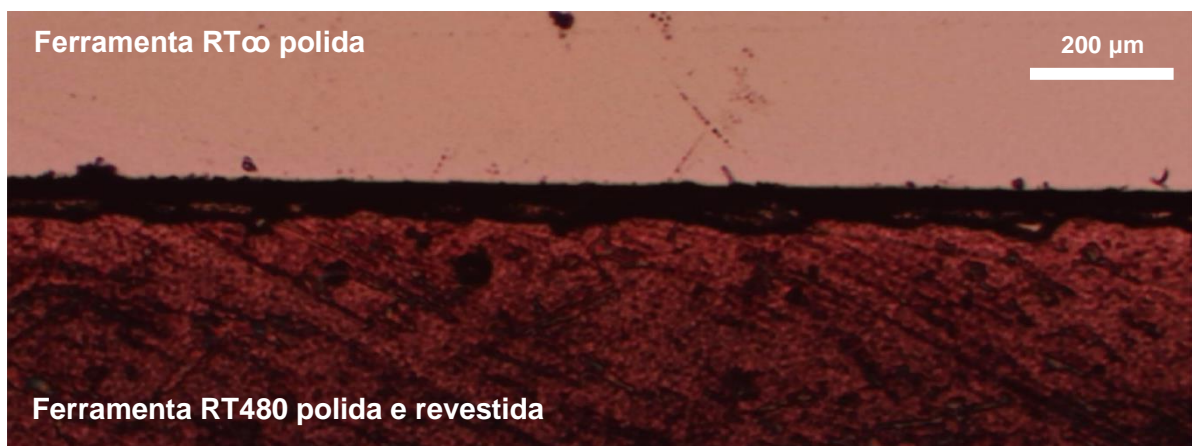


Fig. 5.5 – Ensaios em condições de corte ortogonal (Cobre (recozido), $V_c = 45$ mm/min, $w_a = 1.36$ mm, árgon, Wc-Co, $R_a \approx 0.01$ μm). (a) Evolução da força de corte com a espessura de corte; (b) Evolução da força de penetração com a espessura de corte; (c) Evolução da pressão específica de corte com a espessura de corte; (d) Relação entre as forças de corte e de penetração; (e) Evolução da tensão normal na face de ataque com a espessura de corte; (f) Evolução da tensão de corte na face de ataque com a espessura de corte; (g) Relação entre as tensões normal e de corte; (h) Relação entre os ângulos de atrito obtidos a partir dos gráficos de força e de tensões.



(a)



(b)

Fig. 5.6 – Observação microscópica de duas ferramentas, RT ∞ polida e RT480 polida e revestida, colocadas paralelamente. (a) Ampliação de 3X; (b) Ampliação de 50X.

Depois de discutir o processo de revestimento com a Palbit, determinou-se que se efetuou uma operação de granalhagem para limpeza das ferramentas, antes de receberem o revestimento, operação essa que naturalmente, causa uma maior rugosidade na superfície das ferramentas. Assim, em trabalhos futuros, na aplicação de revestimentos em ferramentas polidas, o procedimento tem de ser alterado para não ser efetuada a granalhagem das mesmas. A observação das Fig. 5.3(a), 5.3(b), 5.5(a) e 5.5(b) permite perceber que a ferramenta comercial exige ainda um nível de força superior ao da ferramenta RT ∞ quando as demais condições de corte se mantêm constantes, logo, existem vantagens ao nível de poupança energética ao realizar operações de maquinagem com ferramentas polidas. A análise dos gráficos das figuras 5.3(a), 5.3(b), 5.4(a), 5.4(b), 5.5(a) e 5.5(b) referentes à evolução das forças de corte e penetração com a espessura de corte levanta uma questão importante: o conjunto ensaios realizados com ferramentas RT60 e RT240 indica que para valores de profundidade de corte abaixo dos 10 μm as forças de corte e de penetração seriam negativas. Isto significaria uma inversão no sentido destas forças face ao sentido convencional (consultar Fig. 2.4(b)), ou seja, uma situação em que a apanha em formação sofreria tração em vez de compressão. Face a este resultado, torna-se necessário encontrar uma explicação que o permite compreender.

Assim, a análise dos gráficos revela que dentro de cada grupo de resultados referente a uma ferramenta verifica-se a existência de linearidade, tendo-se inicialmente tentado caracterizar o comportamento de um tipo de ferramenta através de um modelo linear que descrevesse vários grupos. No entanto, verifica-se que não existe uma modelação perfeita através de uma reta. Se se focar a atenção no grupo de ferramentas revestidas e contacto restrito (30, 120 e 480 μm) cada grupo tem uma inclinação diferente. Os grupos de pontos referentes a RT30 e RT120 apresentam uma inclinação mais próxima da horizontal face ao grupo de resultados referentes a RT480. Este último revela uma linearidade bem definida nos seus resultados e com inclinação mais pronunciada. Face a esta evidência, pode-se conceber um modelo linear que só é válido para cada um dos seis tipos de ferramenta específico (Fig. 5.7(a) e 5.7(b)).

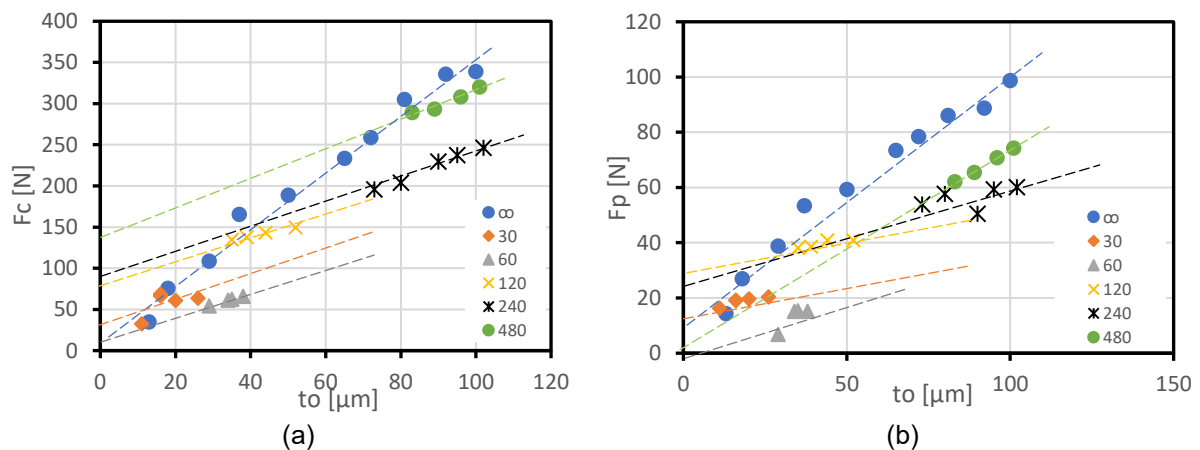


Fig. 5.7 – Evolução das forças de corte e de penetração com a espessura de corte em condições de corte ortogonal (Cobre (recozido), $V_c = 45 \text{ mm/min}$, $w_a = 1.36 \text{ mm}$, argon, Wc-Co, $R_a \approx 0.01 \mu\text{m}$). (a)/(b) – Hipótese de análise através dum modelo de atrito linear para cada ferramenta individual.

Ao analisar os gráficos da Fig. 5.7, verifica-se que as linhas referentes a cada tipo de ferramentas não interseam a origem, começando num patamar mais elevado, ou seja, para profundidades de corte muito pequenas é necessário um certo valor de força (de corte e de penetração) que permita realizar o corte pretendido. Este patamar de força está relacionado com a tenacidade à fractura do material do provete. Quer isto dizer que para iniciar e propagar uma fissura no material que leva à criação de novas superfícies é necessário fornecer uma determinada energia ao mesmo, iniciando-se assim o corte numa camada de material que irá originar a aparas. Tendo em conta os resultados obtidos tentou-se encontrar diferenças ao nível dos ensaios realizados com as ferramentas dentro de cada grupo. Analisando o grupo composto pelas ferramentas RT30, RT120 e RT480 nomeadamente as aparas formadas por cada uma, as figuras Fig. 5.8 e 5.9 denunciam um comportamento diferente na formação da aparas em ensaios com diferentes espessuras de corte. Os ensaios com as ferramentas RT30 e RT120, obteve-se uma aparas com boa curvatura e atingiu-se um regime estacionário. Nas aparas formadas pela ferramenta RT480, apenas se obtém um bloco de material com uma espessura elevada e sem qualquer enrolamento. Ou seja, a aparas está ainda no início da sua formação sem atingir um regime estacionário. Isto pode levar a que os resultados obtidos ao nível das forças e coeficiente de atrito não sejam totalmente corretos, daí que se obtenham inclinações diferentes nos gráficos de forças em questão para as ferramentas do mesmo tipo: por exemplo, RT480 diferente de RT30 e RT120.

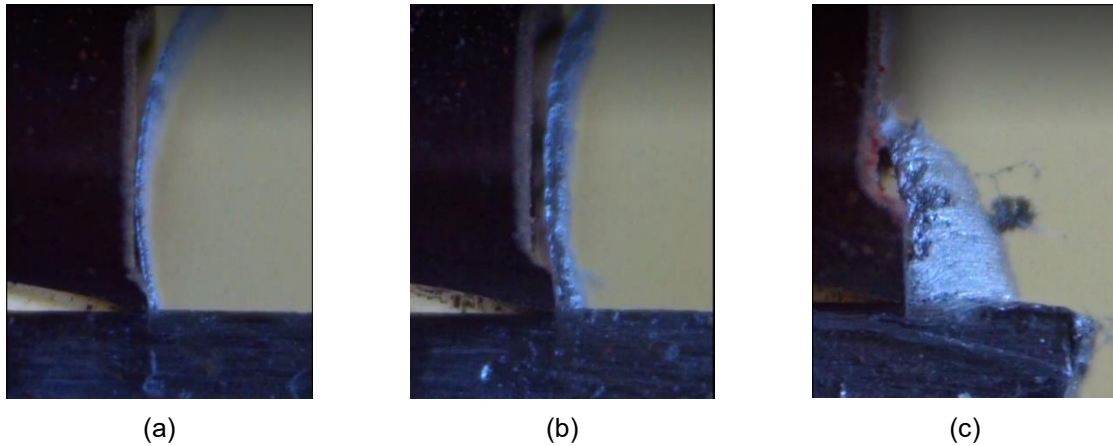


Fig. 5.8 – Apara obtida nos ensaios de corte ortogonal realizados com ferramenta e profundidade de corte, respetivamente: (a) RT30 e $e = 25 \mu\text{m}$; (b) RT120 e $e = 50 \mu\text{m}$; (c) RT480 e $e = 78 \mu\text{m}$ (AA1085, $V_c = 45 \text{ mm/min}$, $w_a = 1.42 \text{ mm}$, árgon, Wc-Co, $R_a \approx 0.01 \mu\text{m}$).

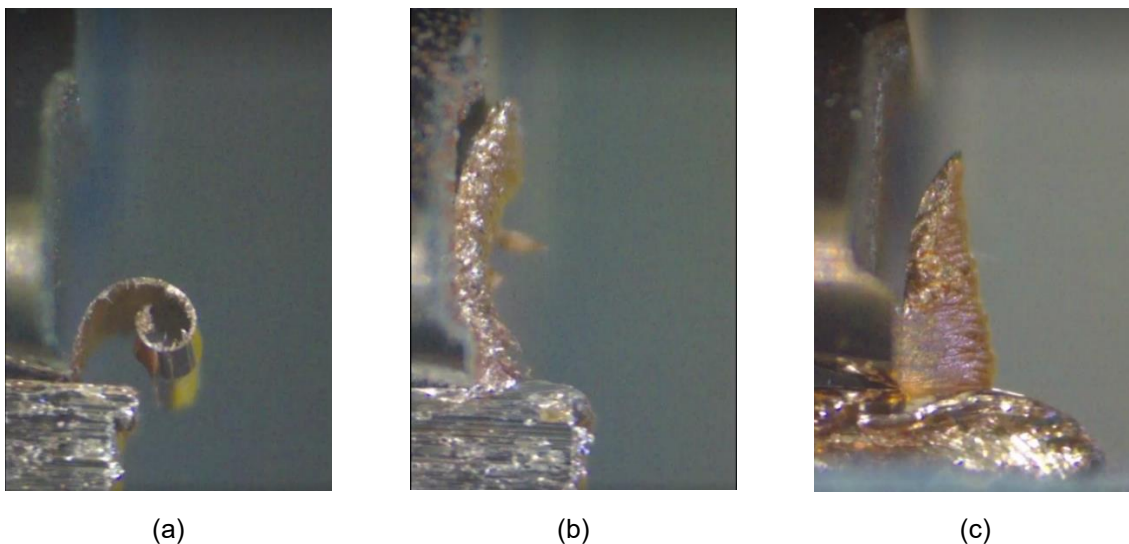


Fig. 5.9 – Apara obtida nos ensaios de corte ortogonal realizados com ferramenta e profundidade de corte, respetivamente: (a) RT30 e $e = 11 \mu\text{m}$; (b) RT120 e $e = 52 \mu\text{m}$; (c) RT480 e $e = 89 \mu\text{m}$ (Cobre (recozido), $V_c = 45 \text{ mm/min}$, $w_a = 1.36 \text{ mm}$, árgon, Wc-Co, $R_a \approx 0.01 \mu\text{m}$).

De acordo com Rosa et al. (2007), existe um pico de força num gráfico força-deslocamento no início dum ensaio de corte ortogonal (Fig. 5.10), seguindo-se uma fase estacionária em que o valor das forças de corte e de penetração se mantém constante, decaindo para zero no final do provete. Nos primeiros dois casos (ensaios com as ferramentas RT30 e RT120), a medição foi feita mais à frente dessa fase inicial, efetuou-se o registo da força na zona central do gráfico (zona estacionária). No último caso (ensaios com ferramenta RT480), o ensaio decorreu só na região inicial do gráfico (antes de atingir um regime estacionário), estando-se só a observar a cabeça da aparta. A análise do comportamento das forças no início dum ensaio (Fig. 5.10) e das imagens da aparta obtida permite fazer a ligação com os resultados apresentados e os desvios das forças referentes aos ensaios com ferramenta RT480.

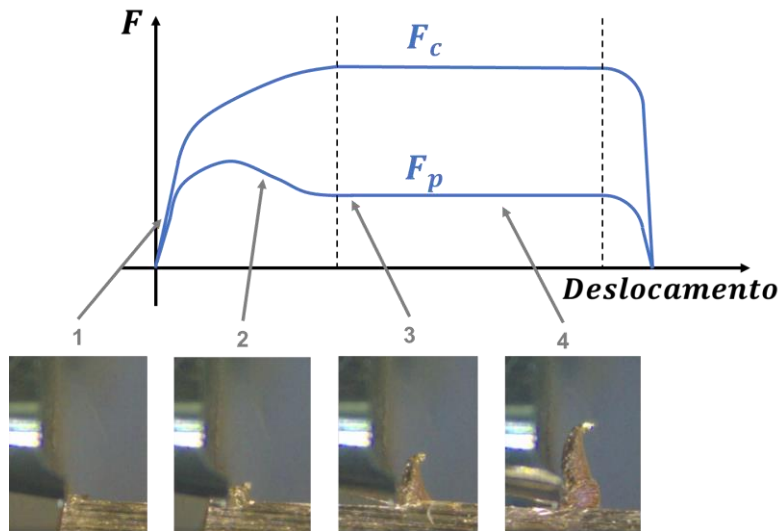


Fig. 5.10 – Evolução das forças de corte e de penetração ao longo de um ensaio de corte ortogonal acompanhada da apara formada em quatro fases do ensaio. 1 – Apara obtida no contacto inicial da ferramenta com o provete; 2 – Apara começa a desenvolver-se e ocupa por completo o comprimento de contacto restrito; 3 – Apara inicia o enrolamento; 4 – Apara adquire um comportamento estacionário tendo os parâmetros associados valores constantes (fase estacionária demarcada pelas duas linhas verticais).

Tendo em conta que as ferramentas RT30, RT120 e RT480 são idênticas ao nível do material de base, revestimento, polimento e geometria (ângulos de ataque e saída) as forças registadas para as profundidades de corte ensaiadas na ferramenta RT480 deviam situar-se no gráfico das Fig. 5.7(a) e Fig. 5.7(b) sobre a linha laranja que passa pelos pontos RT30, estando à direita destes últimos.

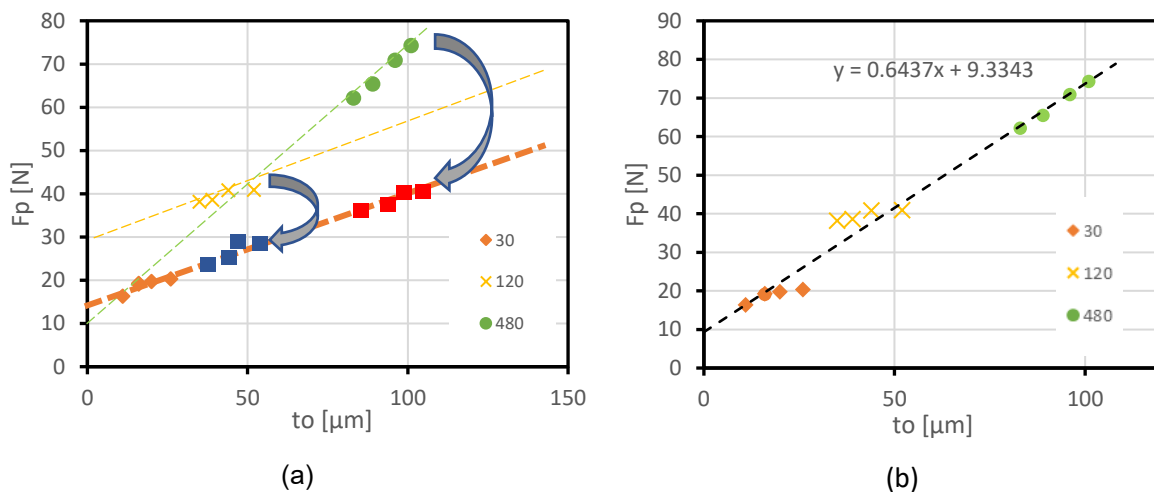


Fig. 5.11 – Análise do gráfico força de penetração vs espessura de corte. (a) Deslocamento dos resultados referentes às ferramentas RT120 e RT480 se seguirem a linha de tendência definida pelos resultados da ferramenta RT30 no gráfico força de penetração correspondente à força tangencial na face de ataque; (b) Linha de tendência definida pelos três conjuntos de resultados das ferramentas revestidas e comprimento de contacto restrito (Cobre (recozido), $V_c = 45 \text{ mm/min}$, $w_a = 1.36 \text{ mm}$, árgon, Wc-Co, $R_a \approx 0.01 \text{ μm}$)

Caso os ensaios com a ferramenta RT480 fossem realizados de forma a obter um gráfico de força-deslocamento que englobasse uma zona estacionária do ensaio (quando a apara já se encontra

com um comportamento estável como acontece com os ensaios efetuados com as ferramentas RT30 e RT120), obter-se-iam resultados sobre a linha laranja da Fig. 5.11. Ou seja, os pontos a verde deslocar-se-iam para a região dos pontos a vermelho. E os pontos a amarelo para a região dos pontos a azul. A verificação desta hipótese podia ser efetuada através da realização de ensaios com provetes com maior comprimento face aos utilizados anteriormente (por exemplo, 50 mm contra os 10 mm dos provetes utilizados).

Os ensaios realizados com a ferramenta RT120 levaram à formação de apara em condições estacionárias e foram medidas as forças durante os ensaios nessas condições, no entanto, os pontos destes ensaios com RT120 não se encontram sobre a reta formada pelos pontos dos ensaios RT30. Apesar desta evidência, a análise do gráfico indica existirem outros elementos que merecem análise: a inclinação das funções lineares formadas pelos resultados de cada ferramenta é muito próxima, existindo entre essas mesmas funções uma diferença de força constante para diferentes valores de profundidade de corte. Ora, a análise desta situação permite a formulação de uma nova hipótese: a separação entre os níveis de força dados pelas retas deve-se à diferença de trabalho/energia fornecida ao material para a apara se deslocar a diferença entre o comprimento das duas faces de ataque. Assim, um elemento de volume tem de percorrer uma maior distância ao longo da superfície da face de ataque numa ferramenta com comprimento de contacto restrito de 120 μm em comparação com uma de 30 μm (Fig. 5.12). Pelo que a energia necessária fornecer ao material para se escoar ao longo da superfície é superior no caso da ferramenta de 120 μm relativamente à de 30 μm .

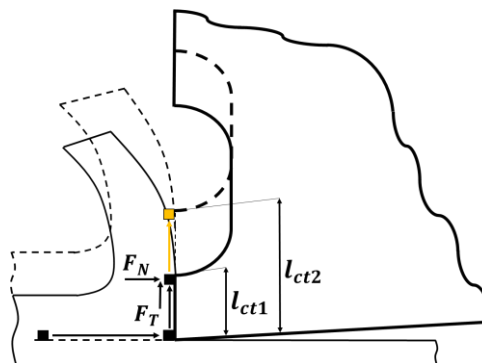


Fig. 5.12 – Percurso percorrido por um elemento de volume no corte ortogonal com duas ferramentas de corte com comprimentos de contacto restrito diferentes.

As expressões 5.3 e 5.4 permitem comparar o trabalho adicional devido à dissipação de energia ao longo do deslocamento adicional (ΔL_{ct}). Este cálculo foi feito de duas maneiras distintas, uma com base na medida da força de penetração, W_{Atrito} , e outra com base numa medida estimada da tensão de corte friccional, E_d . O trabalho W_{Atrito} resulta da multiplicação da diferença de força penetração (tangencial à face de ataque), ΔF_T , pelo deslocamento adicional, ΔL_{ct} .

$$W_{Atrito} = \Delta F_T \times \Delta L_{ct} \quad (5.3)$$

$$E_d = \tau \times Area \times (\Delta L_{ct}) \quad (5.4)$$

Analisando primeiro o caso da realização do mesmo corte com ferramenta RT120 em vez da RT30, sendo a profundidade de corte ensaiada $t_0 \approx 40 \mu\text{m}$, obtém-se:

$$\Delta L_{ct} = 120 - 30 = 90[\mu\text{m}] \equiv 90 \times 10^{-6}[\text{m}]$$

$$E_d = 200 [\text{MPa}] \times (1.36 \times 0.09 [\text{mm}^2]) \times 90 \times 10^{-6} = 0.002203[\text{J}]$$

$$\Delta F_T = 40 - 20 = 20[\text{N}]$$

$$W_{\text{Atrito}} = 20[\text{N}] \times 90 \times 10^{-6} = 0.0018[\text{J}]$$

$$W_{\text{Atrito}}/E_d = 0.0018/0.002203 = 0.82$$

Analisando um segundo caso da realização do mesmo corte com ferramenta RT480 em vez da RT30, sendo a profundidade de corte ensaiada $t_0 \approx 90 \mu\text{m}$, obtém-se:

$$\Delta L_{ct} = 480 - 30 = 450[\mu\text{m}] \equiv 450 \times 10^{-6}[\text{m}]$$

$$E_d = 90 [\text{MPa}] \times (1.36 \times 0.45 [\text{mm}^2]) \times 450 \times 10^{-6} = 0.024786[\text{J}]$$

$$W_{\text{Atrito}} = 50[\text{N}] \times 450 \times 10^{-6} = 0.0225[\text{J}]$$

$$W_{\text{Atrito}}/E_d = 0.0225/0.024786 = 0.91$$

Os valores de W_{Atrito} e E_d estão próximos, existindo uma diferença de 18% no primeiro caso analisado e de apenas 9% no segundo. Efetivamente os valores não coincidem, mas essa diferença assenta no pressuposto de um valor conhecido e constante da tensão de corte friccional. Conclui-se no que toca à variável ferramenta de corte que: os gráficos para os três materiais ensaiados revelam a mesma tendência, ou seja, a conclusão de que a energia necessária ao corte é maior para a ferramenta comercial e menor para o grupo de ferramentas polidas e não revestidas.

5.2. Ensaios de Corte Ortogonal Bidirecional

O seguinte estudo dirige a sua atenção para o tipo de ensaio que envolve o movimento da ferramenta de corte em duas direções. Nos ensaios bidirecionais (Fig. 5.13(b) e 5.13(c)) a ferramenta percorre metade do comprimento do provete, parando no centro do mesmo e sai depois numa direção perpendicular à direção de movimento anterior. Este procedimento permite a avaliação do coeficiente de atrito em duas direções do provete, horizontal e vertical, mantendo as mesmas condições experimentais (material ensaiado, ferramenta de corte, atmosfera envolvente, etc.) utilizadas no ensaio unidirecional (Fig. 5.13(a)). As forças de corte e penetração passaram a ser chamadas forças normal e tangencial nos ensaios bidirecionais. Nas figuras 5.14 e 5.15 é possível analisar as forças e o coeficiente de atrito para um ensaio unidirecional enquanto nas figuras 5.16 e 5.18 são apresentados os mesmos valores para um ensaio bidirecional. A assinatura das curvas é igual no início de ambos os tipos de ensaios, consistindo num regime transiente de entrada no qual a apanha inicia a sua formação, região (A) das Fig. 5.13(a), 5.13(b) e 5.13(c). Depois desse momento, existe um regime estacionário,

zona (B), durante o qual a avara tem um comportamento estável em termos de comprimento de contacto com a face de ataque e da curvatura da própria avara (Rosa et al., 2007). A partir desse ponto os ensaios unidirecional e bidirecional divergem um do outro, existindo dentro dos próprios ensaios bidirecionais duas assinaturas gráficas diferentes esquematizadas na Fig. 5.13.

Assim, realizaram-se ensaios com um provete de aço maraging 18Ni300 por fabrico aditivo com dimensões $26 \times 20 \times 2 \text{ mm}^3$ para melhorar a compreensão dos ensaios bidirecionais e estabelecer uma comparação entre os diferentes tipos de ensaios. Foram utilizados dois tipos de ferramenta de corte neste estudo: o primeiro corresponde a uma ferramenta não revestida sem comprimento de contacto restrito ($RT\infty$), já o segundo a uma ferramenta revestida com TiAlSiN e comprimento de contacto restrito de $480 \mu\text{m}$ ($RT480$). Em ambos os tipos de ferramenta, o ângulo de ataque é de 0° e o de saída é de 6.5° . Apenas se utilizaram estas duas ferramentas pois as restantes ferramentas com comprimento de contacto restrito apresentam-se demasiado frágeis para a realização de ensaios bidirecionais existindo o risco de fratura da zona inferior da ferramenta aquando da segunda fase do ensaio no movimento vertical.

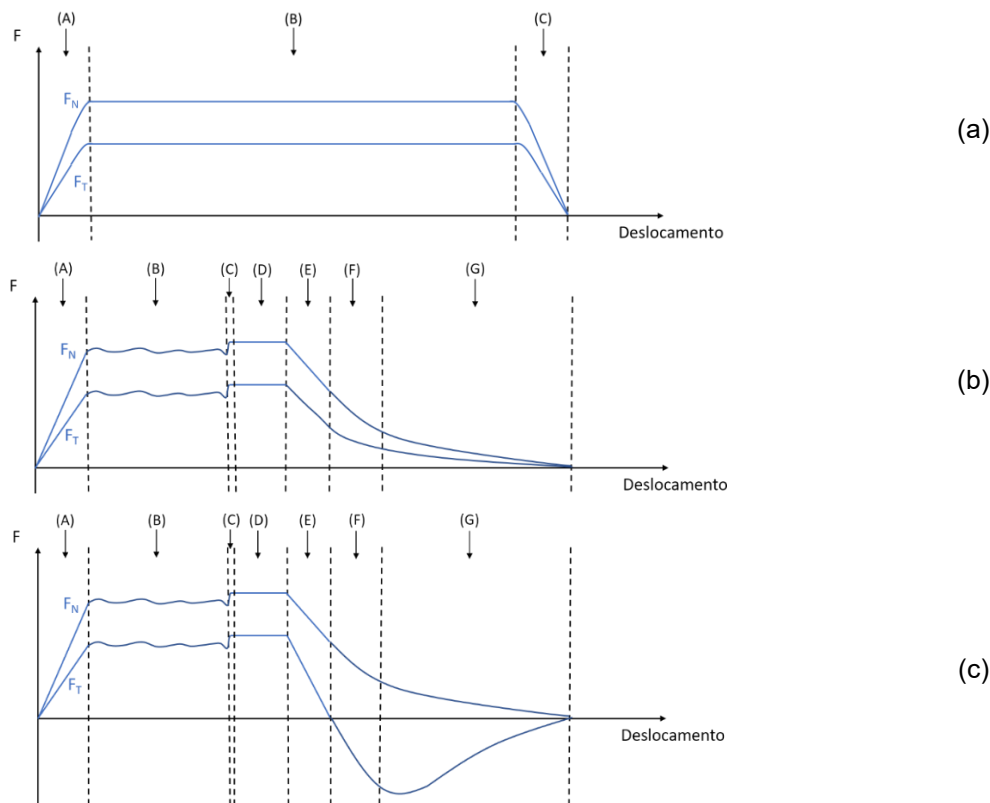


Fig. 5.13 – Análise das diferentes fases dos ensaios uni e bidirecionais. (a) Resposta gráfica dum ensaio unidirecional; (b) Assinatura gráfica dum ensaio bidirecional onde a força tangencial é sempre positiva; (c) Ensaio bidirecional com inversão do sentido da força tangencial.

No ponto de divergência referido anteriormente, o ensaio de corte ortogonal unidirecional mantém o regime estacionário (região (B) da Fig. 5.13(a)) até que termina abruptamente no limite final do comprimento do provete (região (C)). As curvas de coeficiente de atrito em ambas as Fig. 5.14 e Fig. 5.15 são demonstrativas desse tipo de ensaio unidirecional.

No ensaio bidirecional existe uma mudança do regime estacionário inicial para um regime transiente enquanto a ferramenta abranda até parar totalmente (correspondente ao patamar de força de paragem observado nas zonas (C) e início da (D) das Fig. 5.13(b) e 5.13(c)). No final da zona (D) existe uma nova fase estacionária onde a ferramenta está parada, sendo a fase seguinte (zonas (E), (F) e (G)) correspondente ao movimento numa nova direção (movimento vertical), perpendicular à direção de movimento anterior (movimento horizontal). Nesta última fase, a face de ataque da ferramenta de corte desliza simplesmente na superfície inferior da avara, permitindo a avaliação do coeficiente de atrito nesta nova direção. As Fig. 5.16 e Fig. 5.18 mostram a fase final quando a curva do coeficiente de atrito tende para um valor específico que corresponde ao valor do coeficiente de atrito para a direção vertical (a linha vermelha a tracejado denota esse momento do ensaio em que a ferramenta inicia o movimento vertical). De forma a compreender melhor esta fase dos ensaios bidirecionais as Fig. 5.17 e 5.19 mostram com grande detalhe a tendência assumida pela curva de coeficiente de atrito.

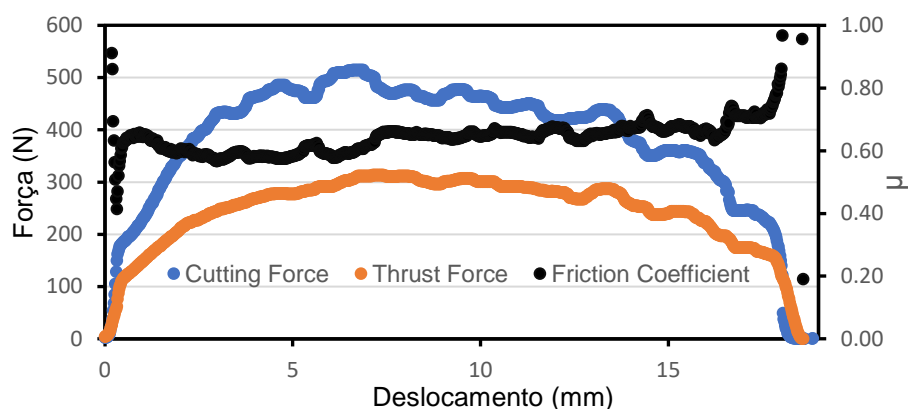


Fig. 5.14 – Valores experimentais da força de corte, F_c , força de penetração, F_p , e coeficiente de atrito, μ , para um ensaio unidirecional com a ferramenta RT00.

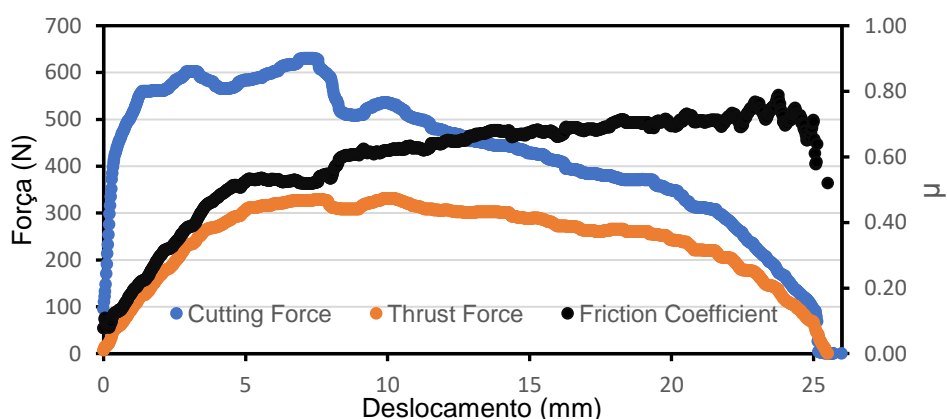


Fig. 5.15 – Valores experimentais da força de corte, F_c , força de penetração, F_p , e coeficiente de atrito, μ , para o ensaio unidirecional com ferramenta polida, revestida e comprimento de contacto restrito de 480 μm .

Relativamente ao coeficiente de atrito, μ , a análise da Fig. 5.14 revela um valor médio de 0.59 e de 0.63 para a Fig. 5.15.

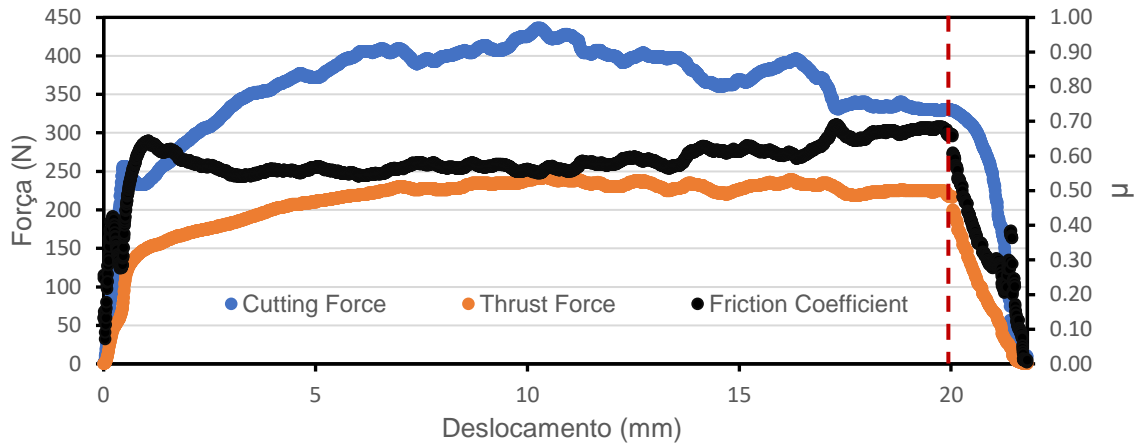


Fig. 5.16 – Valores experimentais da força de corte, F_c , força de penetração, F_p , e coeficiente de atrito, μ , para o ensaio bidirecional com ferramenta não revestida RT00.

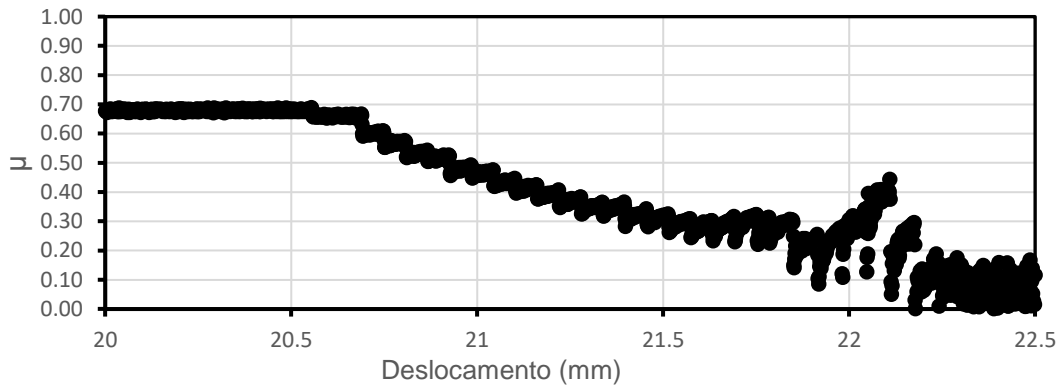


Fig. 5.17 – Valores experimentais do coeficiente de atrito μ na fase final do ensaio bidirecional com ferramenta não revestida RT00.

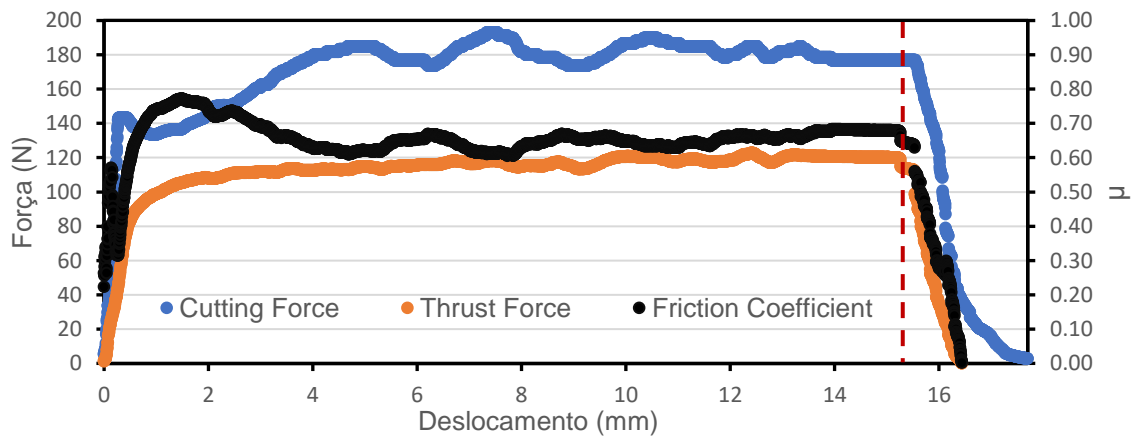


Fig. 5.18 – Valores experimentais da força de corte, F_c , força de penetração, F_p , e coeficiente de atrito, μ , para o ensaio bidirecional com ferramenta RT480.

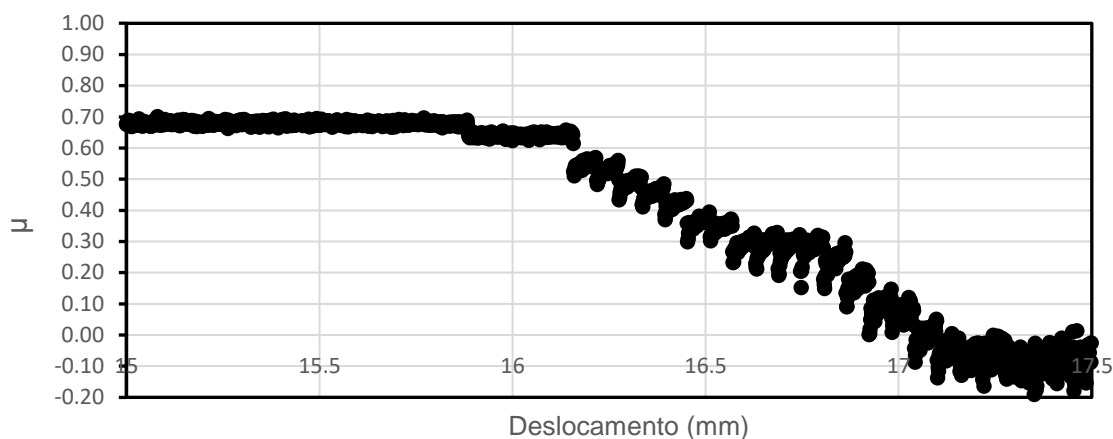


Fig. 5.19 – Valores experimentais do coeficiente de atrito μ na fase final do ensaio bidirecional com ferramenta RT480.

Na primeira fase de regime estacionário nos ensaios bidirecionais é medido um valor do coeficiente de atrito dinâmico, diferente da fase seguinte de regime estacionário onde o valor desse coeficiente de atrito é mais elevado devido ao facto de agora se estar perante o coeficiente de atrito estático. Os ensaios com a ferramenta não revestida RT00 revelam um valor de 0.57 e 0.70 para os coeficientes dinâmico e estático, respetivamente (Fig. 5.16). A mesma análise para uma ferramenta revestida e com comprimento de contacto restrito, RT480, revela um valor de 0.64 e 0.70 para os coeficientes dinâmico e estático, respetivamente (Fig. 5.18). Por fim, o coeficiente de atrito na direção vertical pode ser avaliado quando se coloca em foco a zona final do gráfico. Assim, a Fig. 5.17 revela um resultado para μ igual a 0.30 referente à ferramenta não revestida RT00. A Fig. 5.19 revela um degrau em torno dos 16.5 mm de deslocamento a partir do qual é possível concluir um valor de μ igual a 0.30 para a ferramenta revestida RT480 no movimento vertical ascendente.

Durante o abrandamento da ferramenta, a força de corte aumenta pois diminui a velocidade de corte, alterando-se o ângulo do plano de corte que diminui enquanto que a espessura da aparatura aumenta. Daí que no abrandamento da ferramenta exista um patamar de força no gráfico. Dentro dos ensaios bidirecionais obtiveram-se duas assinaturas diferentes em termos gráficos. Isto é, numa primeira, analisada anteriormente para ensaios com Maraging por fabrico aditivo, os valores de força normal (cutting force) e tangencial (thrust force) mantêm-se sempre positivos durante todo o ensaio. No entanto, numa segunda assinatura gráfica, a força tangencial adquire um valor negativo depois do patamar de força correspondente aos instantes em que a ferramenta está parada. Ou seja, a força tangencial começa por diminuir até zero (essa diminuição é linear seguindo a linearidade da célula de carga) e depois passa a negativa. No movimento ascendente da ferramenta, a força tangencial toma um valor negativo correspondente a uma inversão do sentido desta força do ponto de vista de um referencial com origem na célula de carga (Fig. 5.20). Atingindo um pico, a partir do qual começa a diminuir em termos absolutos até à ferramenta deixar de contactar com o provete totalmente. Uma possível explicação para a obtenção da segunda assinatura nos ensaios bidirecionais é a rotação do material ensaiado no suporte do mesmo derivado do movimento ascendente da ferramenta de corte. A observação dos vídeos de alguns ensaios permite a visualização dessa ocorrência. Esta rotação do

material altera a direção da força normal relativamente ao provete e, por isso, a decomposição dessa força nos eixos vertical (X) e horizontal (Y) leva a que a força tangencial se torne também ela negativa. Nas Fig. 5.21 e Fig. 5.22 apresentam-se os resultados experimentais e as imagens captadas obtidos para os dois tipos de ensaios bidirecionais verificados.

Por forma a tentar explicar a inversão do sentido da força tangencial numa das assinaturas gráficas dos ensaios bidirecionais, explicita na Fig. 5.13(c), elaborou-se na Fig. 5.20 um esquema das várias fases da interação entre a ferramenta e a avara. Pelo que recuperando o gráfico esquemático da Fig. 5.13(c), é possível realizar um paralelismo com a Fig. 5.20. Assim, a Fig. 5.20(a) corresponde à zona (B) de corte ortogonal; a Fig. 5.20(b) ao final da zona (D) com a paragem e descarga elástica; a Fig. 5.20(c) ao movimento ascendente da ferramenta com inversão da força tangencial, ou seja, zonas (E) e (F); por fim, a Fig. 5.20(d) corresponde ao contacto final com a avara e saída da ferramenta, zona (G) da Fig. 5.13(c).

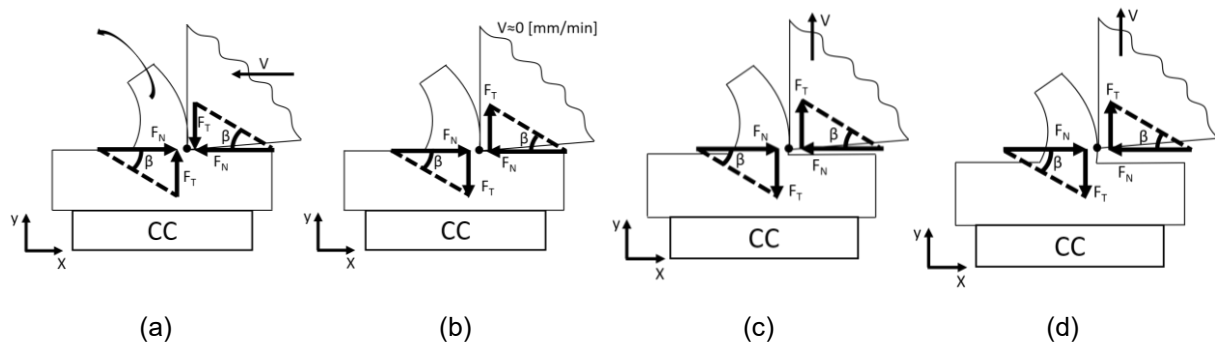
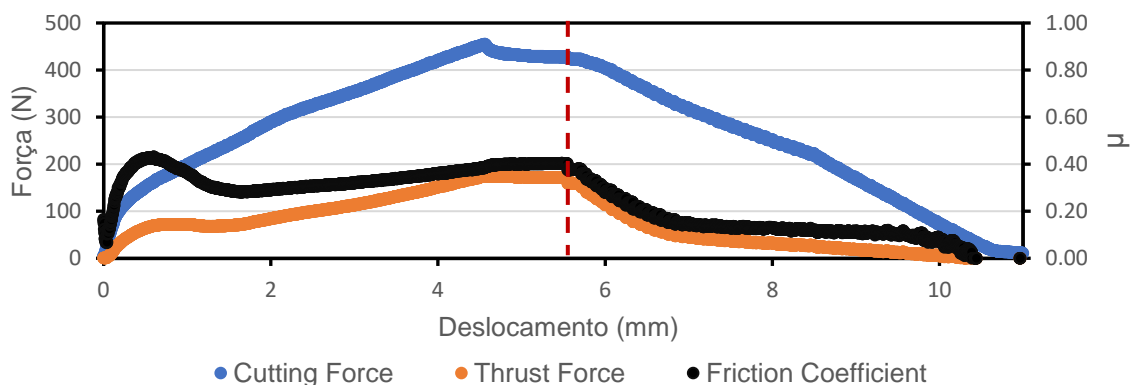
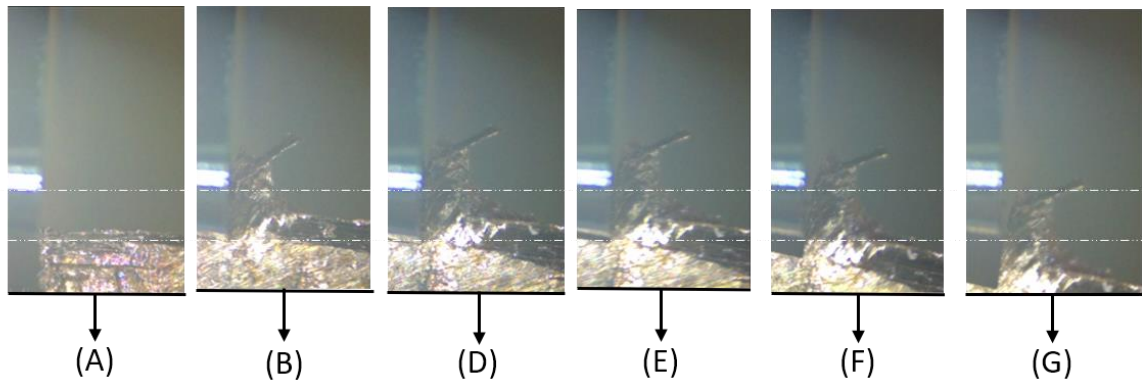


Fig. 5.20 – Interação da ferramenta com a avara em quatro instantes diferentes num ensaio bidirecional e medição das forças pela célula de carga (CC). (a) Movimento horizontal da ferramenta correspondente ao corte ortogonal; (b) Paragem da ferramenta e mudança da direção de movimento da ferramenta. Este instante corresponde ao patamar de força registado a meio dos dois tipos de gráficos obtidos em ensaios bidirecionais; (c) Recuperação elástica do material do provete que deixa de estar em compressão (observar inversão do sentido da força tangencial); (d) Saída da ferramenta com as forças a diminuírem à medida que varia a área de contacto.

De seguida, podemos observar dois ensaios bidirecionais realizados que revelam assinaturas gráficas diferentes (Fig. 5.21(a) e 5.22(a)). Nas Fig. 5.21(b) e 5.22(b) está presente um registo fotográfico dos vários instantes do ensaio mencionados nas Fig. 5.13(b) e 5.13(c), respetivamente.

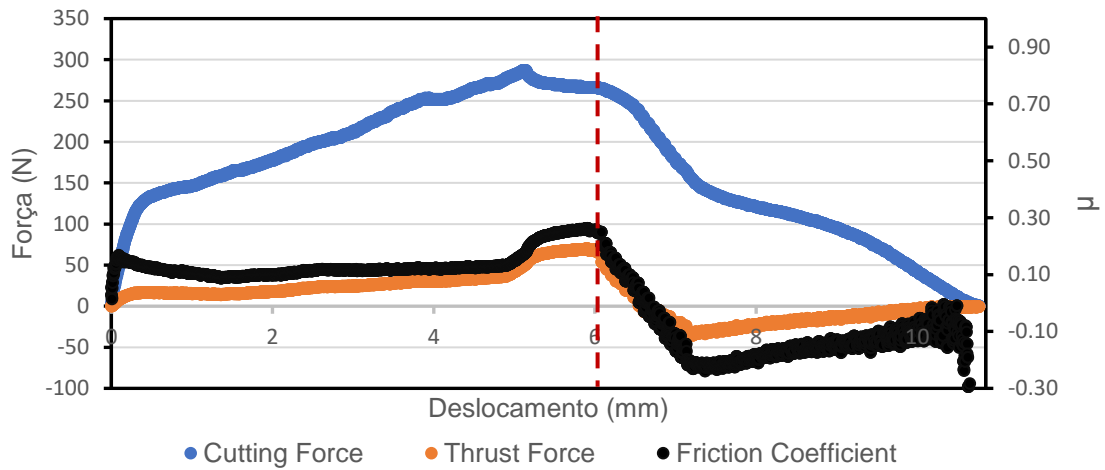


(a)

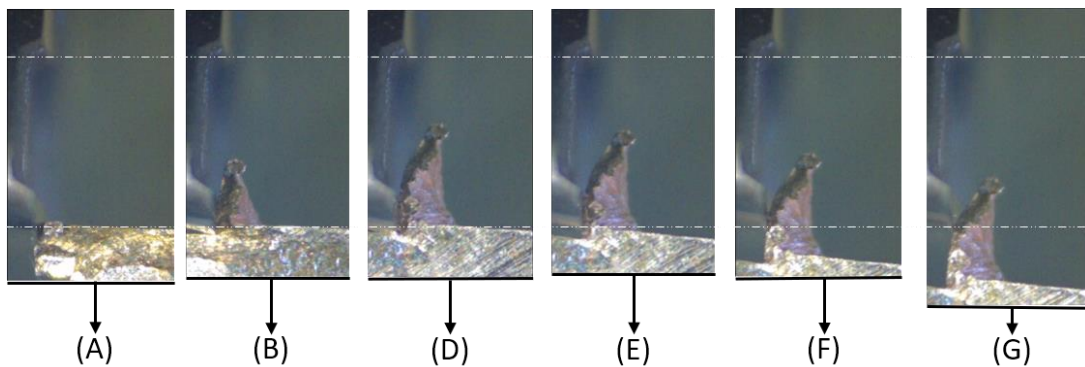


(b)

Fig. 5.21 – Ensaio bidirecional sem inversão do sinal da força tangencial (RT00, cobre (recozido), árgon, $t_0 = 150 \mu\text{m}$, $V_c = 45 \text{ mm/min}$, $w_a = 1.36 \text{ mm}$, Wc-Co, $R_a \approx 0.01 \mu\text{m}$). (a) Gráfico de forças e coeficiente de atrito; (b) Registo fotográfico dos vários instantes do ensaio referidos na Fig. 5.13(b).



(a)



(b)

Fig. 5.22 – Ensaio bidirecional com inversão do sinal da força tangencial (RT480, cobre (recozido), árgon, $t_0 = 100 \mu\text{m}$, $V_c = 45 \text{ mm/min}$, $w_a = 1.36 \text{ mm}$, Wc-Co, $R_a \approx 0.01 \mu\text{m}$). (a) Gráfico de forças e coeficiente de atrito; (b) Registo fotográfico dos vários instantes do ensaio referidos na Fig. 5.13(c).

Nos ensaios bidirecionais com o provete de Aço Maraging por fabrico aditivo, obtiveram-se os dois tipos de assinaturas gráficas (i.e., com e sem inversão da força tangencial). Já nos provetes dos

materiais AISI1045 e titânio obteve-se sempre a mesma assinatura gráfica com a força tangencial positiva (descrita anteriormente na Fig. 5.13(b)). Assim, apresentam-se de seguida os resultados dos ensaios com provetes de AISI 1045 na Fig. 5.23. A qual contém os gráficos de força de corte e de penetração assim como do coeficiente de atrito relativamente a ensaios bidirecionais com ferramenta de referência RT∞ (Fig. 5.23(a)) e com a ferramenta RT480 (Fig. 5.23(b)). Este grupo de ensaios permite analisar o coeficiente de atrito a duas dimensões. Na direção horizontal recolheu-se um valor de coeficiente de atrito de 0.65 que passa a 0.51 na direção vertical para a ferramenta RT∞, enquanto para RT480 tem μ igual a 0.62 no movimento horizontal e 0.51 vertical.

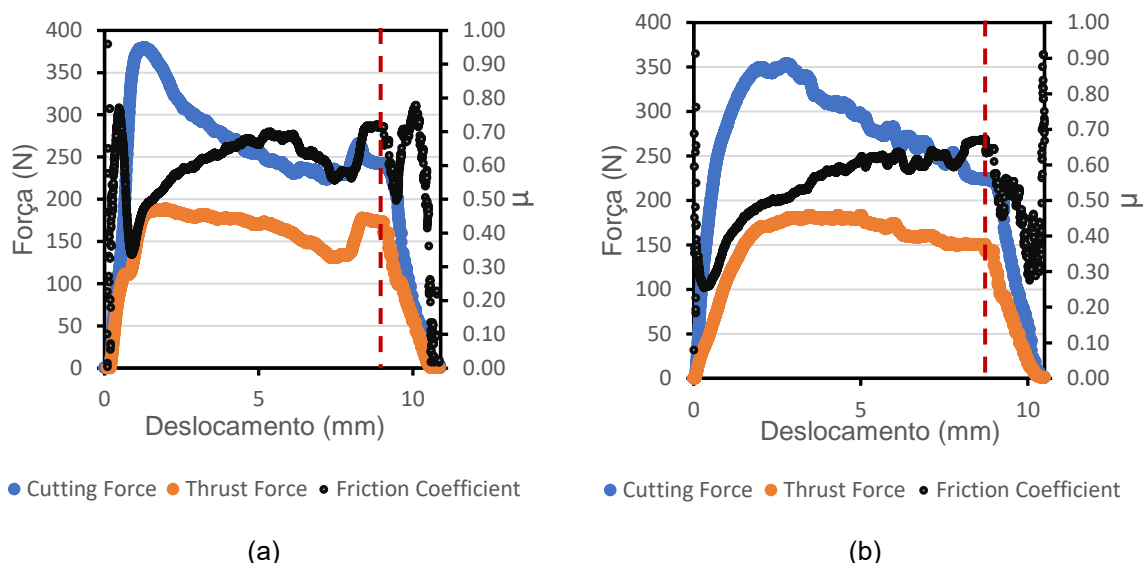


Fig. 5.23 – Exemplo de ensaios bidirecionais sem inversão do sentido da força tangencial (AISI1045 (encruado), $V_c = 45$ mm/min, atmosfera ambiente, Wc-Co, $R_a \approx 0.01$ μ m).

5.3. Estimativa do Coeficiente de Atrito

Tendo em conta que foram realizados centenas de ensaios e não é possível apresentar todos os gráficos (como por exemplo o das forças e coeficiente de atrito) para cada ensaio no presente documento, optou-se então por resumir os resultados relativamente aos coeficientes de atrito de alguns ensaios nas tabelas seguintes 5.1, 5.2 e 5.3. Nas tabelas 5.1 e 5.2 é possível comparar os coeficientes de atrito médios obtidos para os três materiais mais analisados. A análise dos mesmos revela a obtenção de resultados próximos para condições iguais, sendo o desvio mais significativo aquele referente ao ensaio bidirecional de um provete de cobre encruado com a ferramenta RT∞ com um valor de μ igual a 0.42 face ao valor de 0.32 obtido no ensaio unidirecional equivalente.

Tabela 5.1 – Resultados do coeficiente de atrito médio obtido em ensaios unidirecionais com atmosfera de argon

Ferramenta	Material		
	AA1085 (Encruado)	Cobre (Encruado)	Cobre (Recozido)
RT30	0.58	0.33	0.34
RT120	0.52	0.41	0.28
RT480	0.58	0.31	0.22
RT60	0.51	0.35	0.24
RT240	0.44	0.27	0.25
RT∞ (Referência)	0.62	0.32	0.32
Comercial	0.71	Não realizado	0.38

Tabela 5.2 – Resultados do coeficiente de atrito médio obtido em ensaios bidirecionais com atmosfera de argon

Ferramenta	Movimento da ferramenta	Material			
		AA1085 (Encruado)	Cobre (Encruado)	Cobre (Recozido)	Zinco (Encruado)
RT480	Horizontal	0.54	0.28	0.20	0.45
	Vertical	Não se conseguiu retirar um valor válido dos gráficos			0.28
RT∞ (Referência)	Horizontal	0.62	0.42	0.33	0.73
	Vertical	Não se conseguiu retirar um valor válido dos gráficos		0.12	0.30

Tabela 5.3 – Resultados do coeficiente de atrito médio obtido em ensaios bidirecionais com atmosfera ambiente

Ferramenta	Movimento da ferramenta	Material		
		Aço Maraging 18Ni 300 <i>grade</i> por fabrico aditivo	AISI 1045 (Encruado)	Titânio (Encruado)
RT480	Horizontal	0.65	0.60	0.54
	Vertical	0.40	0.49	0.38
RT∞ (Referência)	Horizontal	0.62	0.61	0.73
	Vertical	0.25	0.48	0.66

Da tabela 5.1 verifica-se que de forma geral, a ferramenta comercial apresenta valores de coeficiente de atrito mais elevados, seguidos pelos da ferramenta RT∞, passando depois aos valores médios do grupo de ferramentas revestidas RT30, RT120 e RT480, terminando nos valores médios mais baixos com o grupo composto pelas ferramentas RT60 e RT240.

Os ensaios realizados com a ferramenta RT480 revelam um coeficiente de atrito na interface aparafusado de ataque mais baixo do que nos ensaios realizados com a ferramenta de referência, sendo esta tendência independente da atmosfera utilizada (atmosfera ambiente ou argon). Isto é coerente com o esperado tendo em conta que esta ferramenta RT480 apresenta um revestimento que permite diminuir a adesão face à ferramenta de referência. Obtiveram-se estes resultados apesar de ferramenta RT∞ estar polida e a RT480 ter passado por um processo anterior à aplicação do seu revestimento que resultou num aumento de rugosidade deixando de estar polida.

Outros resultados que importa também destacar são os dos ensaios com o provete de AISI 1045 que se revelaram muito próximos para ambas as ferramentas e nos dois sentidos, apesar de serem ferramentas com e sem comprimento restrito assim como com e sem revestimento. A observação dos resultados das tabelas anteriores revela também que para todos os ensaios bidirecionais o coeficiente de atrito obtido no movimento vertical da ferramenta é inferior ao do movimento horizontal.

No que toca a outras conclusões que se retiraram da análise dos resultados, tem-se que: no desenvolvimento experimental do presente estudo estabeleceu-se uma gama de valores de profundidade de corte para cada ferramenta de contacto restrito que permite obter uma apara com um comportamento correto. No entanto, nos gráficos apresentados correspondentes incluíram-se pontos cuja profundidade de corte está fora dessa gama ideal. Tomou-se a opção de incluir esses ensaios na análise de resultados tendo em conta que os valores experimentais obtidos estavam em linha com os restantes ensaios dentro da gama de profundidades ideal para cada ferramenta específica.

A formação da apara é diferente entre os vários comprimentos de contacto restrito das ferramentas. Em pequenas espessuras de corte a apara é mais comprida e com menor espessura. Enquanto que para espessuras de corte mais elevadas, a apara apresenta um comprimento menor e elevada espessura, utilizando sempre o mesmo provete com o mesmo comprimento.

Os ensaios realizados apresentam uma boa precisão (sem dispersão significativa) e em linha com o valor esperado para as condições experimentais de cada tipo de ensaio. No entanto, os resultados de alguns ensaios afastam-se do esperado. Esta situação foi influenciada por vários fatores tais como: a experiência do operador, a melhoria contínua do procedimento experimental, a realização dos cortes com a ferramenta serem feitos em diferentes pontos ao longo da largura da ferramenta de corte e, por isso, zonas com diferentes desgastes/danos (consultar Fig. 5.24); etc.

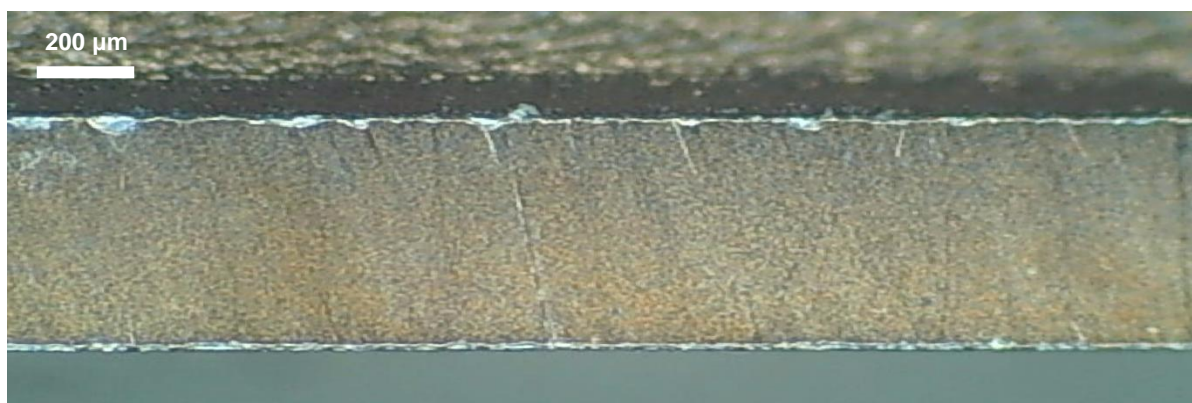


Fig. 5.24 – Observação microscópica duma ferramenta RT480 polida e revestida com defeitos ao longo da sua largura devido aos sucessivos ensaios experimentais realizados (ampliação de 4X). A aresta inferior corresponde à aresta de corte.

Os fatores referidos têm influência no comportamento das curvas associadas a esses ensaios, por conseguinte influenciam os valores médios retirados dos gráficos e finalmente acabam por criar desvios face aos valores esperados nos gráficos das forças medidas.

Um resultado do trabalho desenvolvido foi revelado durante a análise dos ensaios com um provete de Aço Maraging 18Ni 300 *grade* por fabrico aditivo. Verificou-se a formação de apara serrilhada/lamelar no corte ortogonal do material referido, confirmada pelas imagens captadas (Fig. 5.25).

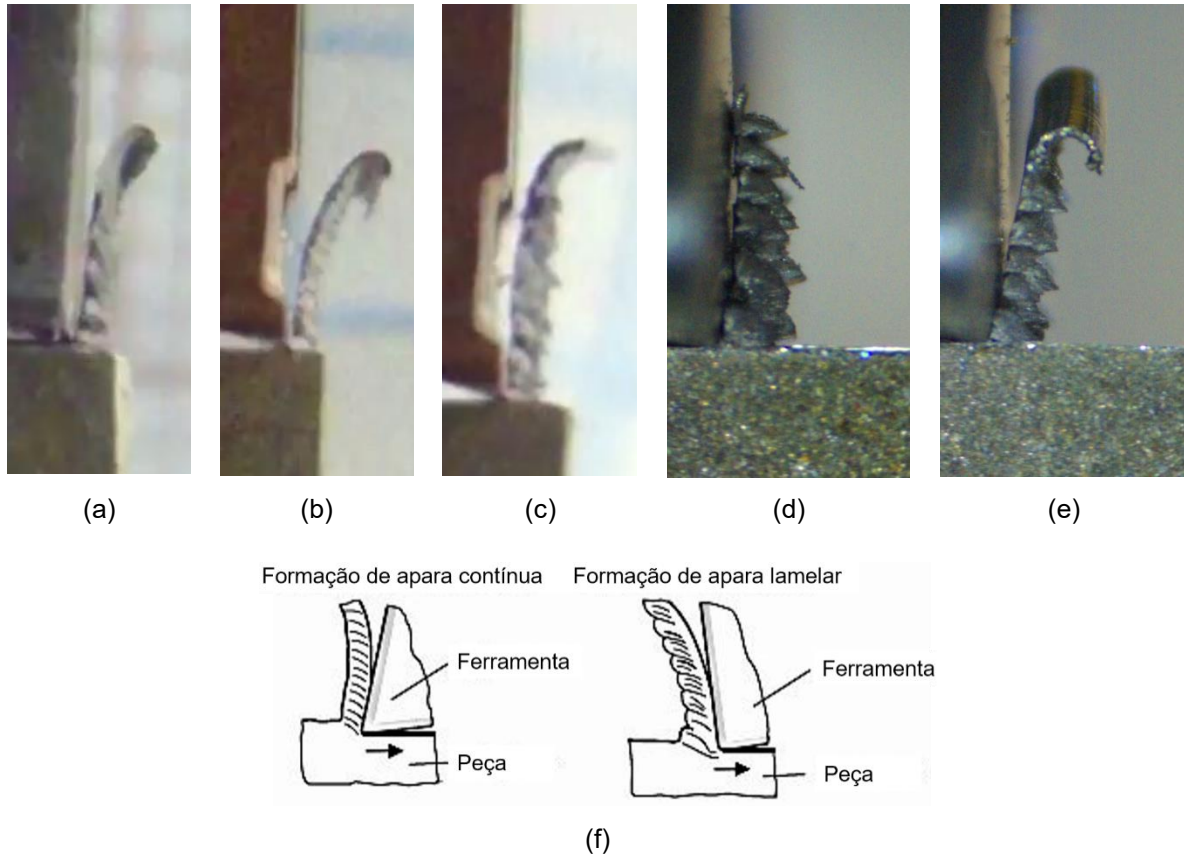


Fig. 5.25 – Formação da apara serrilhada/lamelar em ensaios de corte ortogonal de provetes de aço maraging por fabrico aditivo. (Aço maraging 18Ni 300 *grade* por fabrico aditivo, $V_c = 45$ mm/min, $w_a = 2$ mm, árgon, Wc-Co, $R_a \approx 0.01$ µm). (a) $t_0 = 100$ µm; (b) $t_0 = 100$ µm; (c) $t_0 = 100$ µm; (d) $t_0 = 50$ µm; (e) $t_0 = 60$ µm; (f) Imagem esquemática da formação da apara lamelar (Bergander e Salmen, 2000).

Embora em alguns ensaios a evolução das forças seja crescente durante todo ensaio sem estabilização do seu valor, ou seja, sem se atingir um regime estacionário, verifica-se que a evolução do coeficiente de atrito é constante em torno de um valor específico ao longo desse mesmo ensaio.

Outro fenómeno que se revelou na análise posterior do trabalho experimental desenvolvido foi que a captação das imagens dos ensaios permitiu inclusive observar o plano de corte com algum detalhe como se mostra na Fig. 5.26, sendo possível observar a formação de uma apara e a evolução dos parâmetros associados ao plano de corte, sejam eles o comprimento ou o ângulo do plano de corte (associado à inclinação do mesmo e à distorção do material do provete).

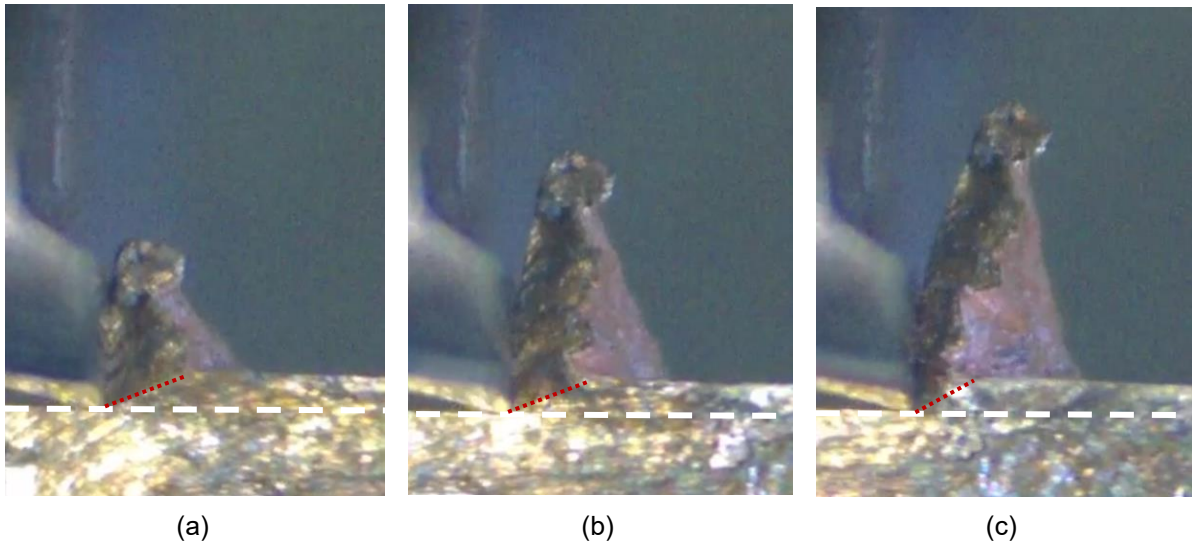


Fig. 5.26 – Formação da apara num ensaio de corte ortogonal e evolução do plano de corte (variação do comprimento e do ângulo do plano de corte, ϕ). (a)-(c) – Diferentes instantes do ensaio (Cobre (recozido), $e = 98 \mu\text{m}$, $V_c = 45 \text{ mm/min}$, $w_a = 1.36 \text{ mm}$, árgon, Wc-Co, $R_a \approx 0.01 \mu\text{m}$).

A análise das imagens captadas indica que em materiais com elevada dureza a profundidade de corte medida após os ensaios geralmente é menor que a profundidade pretendida. Verifica-se que a ferramenta ao aproximar-se do provete está na cota certa, mas ao contactar com o material do provete sobe um pouco, levando ao corte de uma camada de material com menor espessura do que se pretendia.

5. Conclusões

Da análise do conjunto de resultados experimentais obtidos procurou-se encontrar uma resposta que permita compreender os mesmos. Desta forma, torna-se possível melhorar as técnicas laboratoriais utilizadas e, a nível industrial, a utilização de ferramentas de corte revestidas e/ou com comprimento de contacto restrito na face de ataque. As dificuldades sentidas inicialmente ao nível da correta profundidade de corte a ensaiar para cada ferramenta e do acondicionamento da ferramenta de corte colocaram um desafio à realização do presente trabalho, mas a repetição de ensaios e a melhoria contínua do procedimento experimental permitiu corrigir estes pontos, obtendo-se assim ensaios experimentais válidos para o estudo realizado. A captura de imagens do processo de corte ortogonal colocou desafios ao longo do trabalho realizado. Ao contrário do controlo de parâmetros como a composição da atmosfera ou a profundidade de corte em cada ensaio, os parâmetros associados à captura de imagens como a posição X, Y e Z da câmara de filmar; a ampliação que permita ao mesmo tempo captar a formação da avara e a deformação plástica/plano de corte no material; a focagem correta da avara revelaram-se mais difíceis de ajustar e muito sensíveis ao movimento do carro móvel da máquina de ensaios. A evolução registada ao nível das imagens captadas através da experimentação com diferentes lentes e focos de iluminação permitiu a observação detalhada da deformação plástica no plano de corte do material do provete, a geometria do plano de corte e a formação da avara.

A formação da avara nos ensaios realizados com as ferramentas com maior comprimento de contacto (240 μm e 480 μm) não permitiram atingir o regime estacionário. Isso reflete-se nas forças medidas e nos resultados daí retirados potencialmente com desvios significativos. Assim, em trabalhos futuros os materiais ensaiados devem ter maior comprimento do que o utilizado no presente trabalho.

O comprimento, l_{caixa} , e profundidade, p_{caixa} , da caixa na face de ataque das ferramentas tem influência na ocorrência de choques da avara com a ferramenta depois do comprimento de contacto inicial. Assim, a abertura de entalhes mais profundos e com maior comprimento permite validar mais ensaios mantendo o comprimento de contacto constante. No entanto, uma consequência negativa do aumento desses dois parâmetros é o facto da ferramenta se tornar menos resistente aos esforços mecânicos na zona inferior junto à face de ataque, devido à menor quantidade de material nessa zona, podendo levar à fratura da ferramenta.

Conclui-se ainda que a ferramenta comercial apresenta os maiores valores de coeficiente de atrito, seguida da ferramenta de referência e do grupo de ferramentas revestidas, terminando com os menores valores das ferramentas de contacto restrito não revestido. Essa hierarquia que se estabeleceu dentro dos tipos de ferramentas testadas permite perceber que ferramentas geram poupanças de energia, ao exigirem menos forças durante o corte, e, portanto, menos potência ao equipamento industrial que utilizar estes tipos de ferramenta.

Perspetiva de Trabalho Futuro

Embora, durante o trabalho realizado se tenha efetuado uma constante melhoria dos procedimentos e equipamentos utilizados. Nomeadamente nos equipamentos como lentes; iluminação; suporte da câmara de captura de imagem; sistema de calibração da célula de carga no eixo horizontal; entre outros, existem ainda pontos que podem e devem ser melhorados em trabalhos futuros. Um dos possíveis avanços, é a realização de mais ensaios utilizando as ferramentas que foram preparadas no presente trabalho e que têm diferentes níveis de rugosidade controlada (através da passagem das ferramentas nas pedras de polir de: 6000, 2000 e 600 partículas por polegada quadrada), permitindo aprofundar/estender a investigação nesta área.

A melhoria da forma como as aparas são recuperadas tanto nos ensaios unidirecionais como bidirecionais é outro tópico a melhorar. No primeiro tipo de ensaios, utilizando um saco de pequenas dimensões que permita recolher as aparas que saem com elevada velocidade. No segundo tipo, recorrendo um paquímetro que deve estar inserido no interior da câmara atmosférica que permita obter um valor aproximado da espessura da apara mesmo ficando ligada ao provete.

A utilização de uma bomba de vácuo que permita a ligação ao encaixe quick-release seria uma melhoria importante em trabalhos futuros. Uma vez que a utilização de um aspirador residencial permite retirar o ar que se encontra inicialmente dentro da câmara através do orifício na zona frontal do invólucro, mas assim que se retira a ponteira do aspirador da câmara, inicia-se a entrada de ar na câmara devido à pressão inferior dentro da mesma face ao exterior. A utilização da bomba de vácuo e do acoplamento quick-release na zona traseira do invólucro através do seguinte procedimento resolveria o problema identificado: (i) Fechar a válvula manual; (ii) Conectar a bomba de vácuo no encaixe quick-release; (iii) Abrir a válvula; (iv) Remover a atmosfera inicial da câmara; (v) Fechar a válvula; (vi) Desconectar a bomba de vácuo; (vii) Conectar a botija do gás pretendido; (viii) Abrir a válvula e injetar o gás no interior a câmara.

Deve ser instalada uma segunda câmara de filmar colinear com o comprimento do provete de forma a que seja possível observar a rebarba existente nos dois lados do provete, sendo assim possível remover a rebarba com a mó de retificação até esta desaparecer por completo. Além disso, deve ser removida a rebarba exposta na Fig. 5.2, alterando o procedimento experimental.

Por fim, uma perspetiva de trabalho futuro que se considera muito importante passa pela realização de mais ensaios bidirecionais e um estudo mais aprofundado deste tipo de ensaios, com o objetivo final de melhorar a sua utilização na avaliação do atrito na interface de contacto entre a apara e a ferramenta de corte. Tendo em conta que não se conseguiu encontrar com total certeza o fator causador da inversão da força tangencial em alguns ensaios e não noutros, futuras investigações no âmbito dos ensaios bidirecionais devem começar por analisar esta situação.

Referências

- Anderson G., Bennett S., DeVries K., Analysis and Testing of Adhesive Bonds, Academic Press, 1977.
- Arrazola P. J. e Özel T., Investigations on the effects of friction modelling in finite element simulation of machining. *International Journal of Mechanical Sciences*, 52(1):31–42, 2010
- Blau P.J., Glossary of Terms, Friction, Lubrication, and Wear Technology, Vol 18, ASM Handbook, ASM International, 1992.
- Bowden F. P., G. W. Rowe, "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, 40, 243-253, 1954.
- Bowden F.P., Tabor D. "Friction and Lubrication of Solids", Oxford Clarendon Press, Oxford, 1964.
- Bowden F.P., Tabor D., "Friction and Lubrication of solids Part II", Oxford University Press, London, 1964.
- Brown E.D., Owens R.S., Booser E.R., "Friction of Dry surfaces", ASME, New York, 1969.
- Bushlya V., Lenrick F., Ståhl J. E., M'Saoubi, R., "Influence of oxygen on the tool wear in machining", Lund University, 2018.
- Buckley D.H., Surface Effects in Adhesion, Friction, Wear and Lubrication, Elsevier, Amsterdam, 1981.
- Carrilho J., "Avaliação Experimental da Força de Atrito Durante o Processo de Corte por Arranque de Apara", Tese de mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2007.
- CENAM - División Metrología Dimensional, Laboratorio de Acabado Superficial. Acedido em: 25, julho, 2021, em: <https://www.cenam.mx/dimensional/laboratorios/acabadosuper>.
- Childs T. H. C., Friction modelling in metal cutting. *Wear*, 260(3):310–318, 2006.
- Childs T. H. C. e Maekawa K., Computer-aided simulation and experimental studies of chip flow and tool wear in the turning of low alloy steels by cemented carbide tools. *Wear*, 139(2):235–250, 1990.
- Cristino V., "Experimental Assessment of Analytical Solutions for Orthogonal Metal Cutting", Tese de mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2007.
- Cristino V., Rosa P. e Martins P., Cutting under active and inert gas shields: A contribution to the mechanics of chip flow. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 50(10):892–900, 2010.
- Denford Machine Tools Limited, "TRIAC PNC3 Programming and Maintenance Manual", Datareward Ltd, Huddersfield, UK, 1986.
- Dirikolu M.H., Childs T.H.C., Maekawa K., Finite element simulation of chip flow in metal machining, *International Journal of Mechanical Sciences* 43, 2699–2713, (2001).

dos Santos T., Outeiro J. C., Rossi R. e Rosa P., A New Methodology for Evaluation of Mechanical Properties of Materials at Very High Rates of Loading. *Procedia CIRP*, 58:481–486, 2017.

Doyle E.D., Horne J.G., Adhesion in metal cutting: anomalies associated with oxygen, *Wear*, Volume 60, Issue 2, p. 383-391, 1980.

Fernandes J., “A Importância do Oxigénio no Comportamento Tribológico do corte por Arranque de Apara”, Tese de mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2017.

Grzesik W., Experimental investigation of the influence of adhesion on the frictional conditions in the cutting process. *Tribology international*, 32(1):15–23, 1999.

Grzesik W. e Nieslony P., Prediction of friction and heat flow in machining incorporating thermophysical properties of the coating–chip interface. *Wear*, 256(1-2):108–117, 2004.

Guerdoux S., Numerical simulation of the friction stir welding process, *École Nationale Supérieure des Mines de Paris*, 2007.

Iwata K., Osakada K. e Terasaka Y., Process Modeling of Orthogonal Cutting by the Rigid-Plastic Finite Element Method. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 106(2):132–138, 1984.

Kennedy F. E., Thermal and thermomechanical effects in dry sliding, *Wear*, Volume 100, Issues 1–3, p. 453-476, 1984.

Kim K.S. e Kim J., Elasto-plastic analysis of the peel test for thin film adhesion, *Trans. ASME*, 110:266-273, 1988.

Markopoulos A., *Finite element method in machining processes*. Springer, 2012.

Maugis, D., Barquins, M., Fracture mechanics and adherence of viscoelastic solids, in *Adhesion and Adsorption of Polymers, Part A*, Lee, L.H. (Ed.), Plenum Press, New York, p. 203, 1980.

Maugis D., “Contact, Adhesion and Rupture of Elastic Solids”, Springer, New York, 2000.

Maugis D., Chapter 4 – Adhesion of Solids: Mechanical Aspects, “*Modern Tribology Handbook, Volume One*”, CRC Press LLC, Florida, 2001.

Melkote S., Grzesik W., Outeiro J., Rech J., Schulze V., Attia H., Arrazola P., M’Saoubi R. e Saldana C., Advances in material and friction data for modelling of metal machining. *CIRP Annals*, 66(2):731–754, 2017.

Mittal K.L., Ed., *Adhesion Measurements of Films and Coatings*, VSP, 1995.

Moidu A.K., Sinclair A.N., Spelt J.K., Analysis of the peel test: prediction of adherent plastic dissipation and extraction of fracture energy in metal-to-metal adhesive joints, *J. Testing Eval.*, p. 23:241-253, 1995.

M’Saoubi R. e Chandrasekaran H., Innovative methods for the investigation of tool-chip adhesion and layer formation during machining. *CIRP Annals*, 54(1):59–62, 2005.

Özel T. e Altan T., Determination of workpiece flow stress and friction at the chip–tool contact for high-speed cutting. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 40(1):133–152, 2000.

Pereira J., “Análise Experimental e Modelação Numérica do Mecanismo de Formação de Apara em Condições de Corte Ortogonal”, Tese de mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2009.

Polke, R., Adhesion of solids at elevated temperatures, in *Adhésion et Physico-Chimie des Surfaces Solides*, Colloque CNRS/DGRST, Soc. Chim. de France, p. 51-54, 1969.

Puls H., Klocke F. e Lung D., Experimental investigation on friction under metal cutting conditions. *Wear*, 310 (1-2):63–71, 2014.

Rodrigues J.M.C. e Martins P.A.F., “Tecnologia da deformação plástica, Vol. I. Fundamentos teóricos”, Escolar Editora, Portugal, 2005.

Rosa, P. & Kolednik, Otmar & Martins, P. & Atkins, A., The transient beginning to machining and the transition to steady-state cutting. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2007.

Rosa P. A. R., Gregorio A. V. L. e Davim J. P., The role of oxygen in orthogonal machining of metals. *Measurement in Machining and Tribology*, pages 49–88. Springer, 2019.

Santos S., “Influência dos principais parâmetros de corte na geometria da apara”, Tese de mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2005.

Sekhon G. S. e Chenot J. L., Numerical simulation of continuous chip formation during non-steady orthogonal cutting. *Engineering computations*, 10(1):31–48, 1993.

Shirakashi T. e Usui E., Friction characteristics on tool face in metal machining. *Journal of the Japan Society of Precision Engineering*, 39(9):966–971, 1973.

Silva V., “Modelação do Atrito na Simulação Numérica do Corte Ortogonal”, Tese de mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2017.

Vaz M., On the numerical simulation of machining processes. 2000, 631–640.

Yang X. e Liu C. R., A new stress-based model of friction behavior in machining and its significant impact on residual stresses computed by finite element method. *International Journal of Mechanical Sciences*, 44(4):703–723, 2002.

Zhou F., A new analytical tool-chip friction model in dry cutting. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 70(1-4):309–319, 2014.

Zorev N. N., Inter-relationship between shear processes occurring along tool face and shear plane in metal cutting. *International research in production engineering*, 49:143–152, 1963.

Anexos

A. Procedimento experimental para ensaios de corte ortogonal (Denford TRIAC)

Este documento apresenta detalhadamente o procedimento experimental para a realização de ensaios de corte ortogonal orientados para a quantificação do coeficiente de atrito. Este procedimento é constituído pelas seguintes etapas: preparação da máquina de ensaios; preparação da aquisição de dados, captura de imagem e calibração da célula de carga; preparação da instrumentação; aquisição de dados e captura de imagem; exemplo de um ensaio de corte ortogonal.

1. Preparação da máquina de ensaios

- Ligar o interruptor **On/Off** da extensão elétrica dedicada à estação de trabalho;
- Ligar o interruptor **On/Off** na zona posterior da fresadora de modo a ficar iluminado;
- Desbloquear o **botão de emergência** puxando o mesmo na direção do operador utilizando a chave e rodando-a no sentido horário;
- Ligar as drives do equipamento pressionando o comando **ON** no painel frontal dentro do menu DRIVE;
- Referenciar o zero de cada eixo através do comando **ABS DATUM**;

Nota: Caso a máquina apresente uma mensagem de erro no ecrã, deve ser premido o botão **RESET**, localizado no canto superior direito do menu FUNCTION, e de seguida o comando **ABS DATUM**. É possível agora retomar o trabalho.



Fig. A1 – Painel de controlo da máquina de ensaios.

2. Preparação da aquisição de dados e captura de imagens

- Verificar as ligações USB da câmara de filmar, da iluminação e da unidade intermediária da célula de carga ao computador;
- Ligar o interruptor **On/Off** da fonte de alimentação na zona posterior do computador e de seguida pressionar o botão **On/Off** na face frontal do mesmo;
- Abrir software “amcap”, e “TRIAC – Corte Ortogonal” (software desenvolvido em Labview). De forma a obter dados experimentais corretos é importante iniciar antecipadamente o software “TRIAC – Corte Ortogonal” e começar a captação de informação dos extensómetros da célula de carga pressionando o comando **Run** no painel de controlo deste software. **Esta operação deve ser realizada 24h antes da calibração da célula de carga e realização dos ensaios;**

3. Procedimento da calibração da célula de carga

Direção vertical

- a) Inserir o componente de calibração vertical no spindle da fresadora (Fig. A2(a));
- b) No painel frontal da máquina-ferramenta, utilizar os comandos do menu MANUAL ajustando a extremidade da barra até uma posição que permita aplicar a carga pontualmente no centro do dispositivo de fixação do provete;

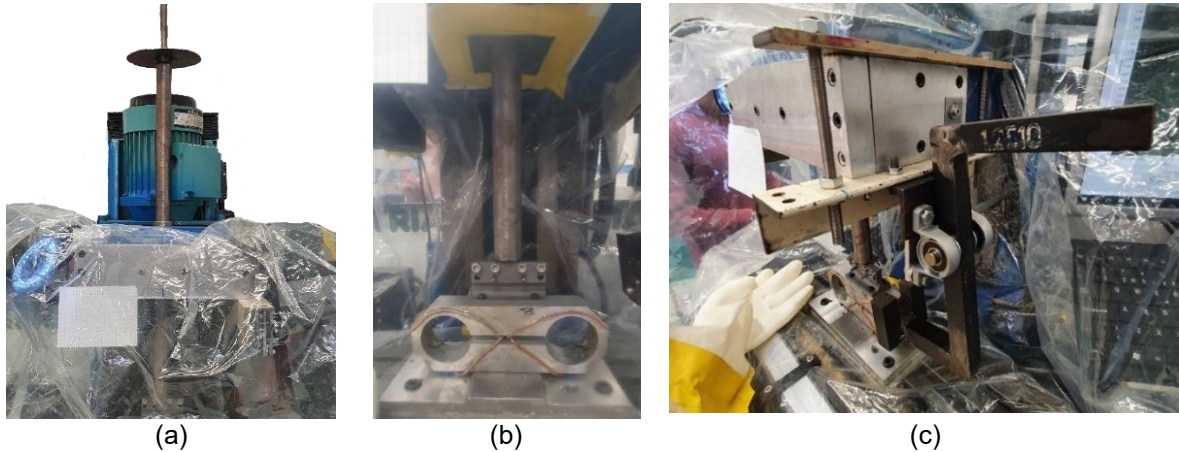


Fig. A2 – Componente de calibração vertical. (a) Componente inserido no spindle da fresadora com o prato das massas calibradas vazio; (b) Posicionamento correto do componente para aplicação da carga vertical no centro da célula de carga; (c) Estrutura de calibração horizontal do tipo alavanca. As massas calibradas são colocadas num prato que se fixa na extremidade superior da alavanca e o peso das massas é convertido numa força horizontal na extremidade inferior da mesma.

- c) Iniciar a aquisição de dados experimentais, pelo que deve ser criado um ficheiro de dados com o formato do tipo .txt, indicando dentro do software a localização do mesmo no comando “**Local do ficheiro a gravar**”;
- d) Iniciar a aquisição de dados experimentais pressionando o comando **Run** no painel de controlo do software “TRIAC – Corte Ortogonal” e em seguida **Começar/Parar de guardar dados**;
- e) Esperar 2s;
- f) Colocar as massas calibradas no prato;
- g) Esperar 2s;
- h) Retirar as massas calibradas do prato;
- i) Esperar 2s;
- j) Terminar a aquisição de dados experimentais pressionando o comando **Começar/Parar de guardar dados** no canto inferior direito do painel no software “TRIAC – Corte Ortogonal”;

Direção Horizontal

- k) Apertar as duas porcas inferiores M8 em ambos os varões roscados da estrutura de calibração horizontal.
- l) Posicionar a estrutura de forma a que esteja completamente encostada ao carro móvel da fresadora e apertar a porca superior M8 em ambos os varões roscados da estrutura, garantindo que a mesma fica fixa, comprimindo a placa lateral.

- m) Apertar os dois parafusos M4 que ligam a estrutura à placa lateral do carro móvel da fresadora através de uma chapa em formato de “L”.
- n) No painel frontal da máquina-ferramenta, utilizar os comandos do menu MANUAL ajustando a extremidade da peça em S até uma posição que permita aplicar a carga pontualmente no dispositivo de fixação do provete. Utilizar um nível de bolha para garantir que a força é aplicada na horizontal.
- o) Iniciar a aquisição de dados experimentais, pelo que deve ser criado um ficheiro de dados com o formato do tipo .txt, indicando dentro do software a localização do mesmo no comando “**Local do ficheiro a gravar**”;
- p) Iniciar a aquisição de dados experimentais pressionando o comando **Run** no painel de controlo do software TRIAC e em seguida **Começar/Parar de guardar dados**;
- q) Esperar 2s;
- r) Colocar as massas calibradas no prato;
- s) Esperar 2s;
- t) Retirar as massas calibradas do prato;
- u) Terminar a aquisição de dados experimentais pressionando o comando **Começar/Parar de guardar dados** no canto inferior direito do painel no software “TRIAC – Corte Ortogonal”;

4. Preparação da mesa de ensaios

- a) Realizar uma verificação visual relativamente a objetos estranhos ou desnecessários deixados na bancada de trabalho e mesa da fresadora.
- b) Colocar todos os instrumentos e utensílios necessários (Fig. A3) dentro da câmara para evitar a sua abertura durante a realização dos ensaios: chave Allen M5, chave Torx M4, comparador micrométrico, paquímetro, caixa de armazenamento das ferramentas de corte, pinça, papel de lixa, cotonete e pipeta com acetona.



Fig. A3 – Conjunto de instrumentos e utensílios necessários no interior da câmara para a realização dos ensaios de corte ortogonal.

5. Preparação da célula de carga, provete e ferramenta de corte

- d) Fixar provete no suporte apertando os 6 parafusos M5. O provete deve ser posicionado ao centro do suporte coincidindo com o centro da célula de carga;

- e) Retirar a ferramenta de corte pretendida da caixa de armazenamento utilizando uma pinça. Avaliar a sua condição atual e ponderar a necessidade de recondicionar a mesma.
- f) A ferramenta de corte deve-se encontrar completamente limpa antes de ser fixada, isto é, sem resíduos de material de provetes ensaiados anteriormente. O recondicionamento da ferramenta deve seguir a seguinte ordem: Limpar as superfícies da ferramenta com uma lixa. As passagens devem ser realizadas do centro da face de ataque para a aresta de corte, conservando a geometria da mesma e o valor do raio de bico original. O papel de lixa deve ser colado numa superfície plana e rígida para que as passagens do abrasivo sejam realizadas sempre paralelamente à face de ataque. De seguida, com um cotonete embebido em acetona passar na ferramenta de corte para a remoção de resíduos de material que tenham sido deixados nas faces de ataque e saída da ferramenta.

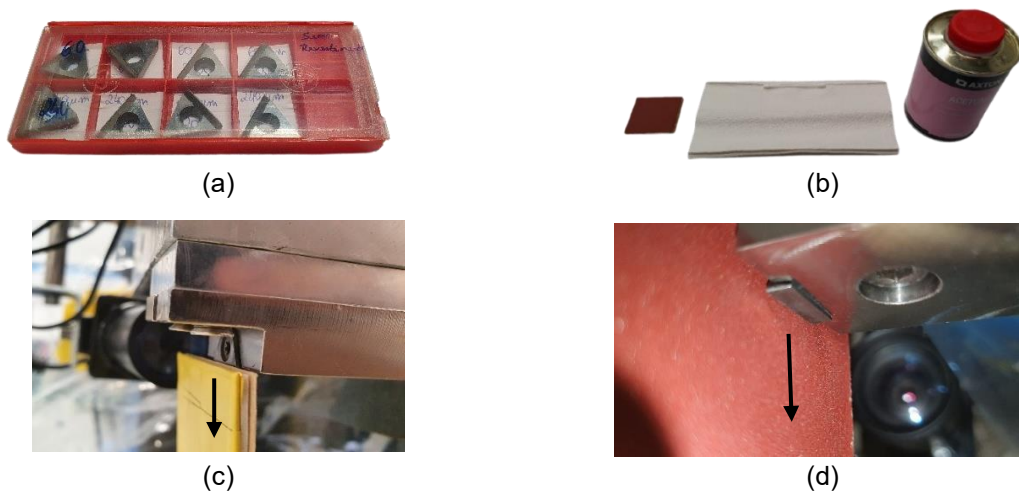


Fig. A4 – Preparação/recondicionamento da ferramenta de corte. (a) Caixa de armazenamento das ferramentas de corte; (b) Acessórios de limpeza da ferramenta de corte (papel de lixa com granulometria de 180, cotonete e acetona); (c) Direção correta das passagens com a lixa na face de ataque da ferramenta; (d) Direção correta das passagens com a lixa na face de ataque vista do lado da face de saída.

- g) Fixar ferramenta de corte com um parafuso M4 no suporte;
- h) Fixar a mó de retificação no spindle utilizando um parafuso M6;

6. Registo do offset entre a ferramenta e a mó de retificação

- i) Com os comandos do menu MANUAL posicionar a ferramenta na superfície de topo do dispositivo de fixação do provete. É importante utilizar uma folha de papel entre ambas para não danificar a ferramenta de corte. Devem ser pressionados simultaneamente os comandos das **setas direcionais e +**;
- j) No painel informativo à esquerda na bancada de trabalho colocar as coordenadas do eixo Z (eixo vertical) igual a zero.
- k) Com os comandos do menu MANUAL posicionar a superfície inferior da mó de retificação na superfície de topo do dispositivo de fixação do provete, colocando uma folha de papel entre ambas. Devem ser pressionados simultaneamente os comandos das **setas direcionais e +**;

- l) No painel informativo à esquerda na bancada de trabalho registar as coordenadas do eixo Z (eixo vertical), correspondendo o módulo do valor dessas mesmas coordenadas somado à espessura da folha de papel (0,100mm) ao offset entre os dois dispositivos.

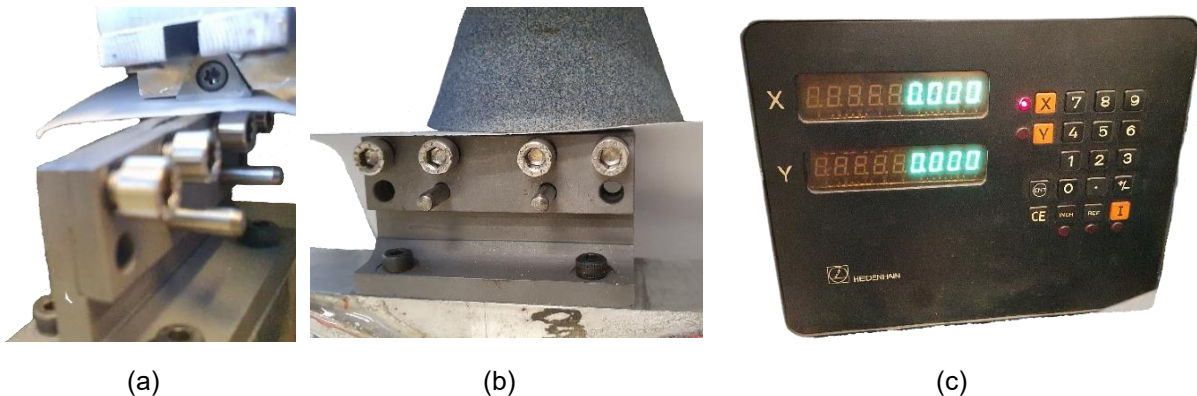


Fig. A5 – Método de registo do offset entre a ferramenta de corte e a mó de retificação utilizadas num ensaio. (a) Ferramenta de corte em contacto com o suporte do provete; (b) Mó de retificação em contacto com o suporte do provete; (c) Indicador de coordenadas.

7. Esvaziamento da atmosfera da câmara (Vácuo)

- m) Fechar o invólucro da câmara atmosférica, apertando por completo o fecho que está situado na extremidade direita do mesmo;
- n) Remover a tampa do orifício existente no canto superior direito da parte frontal do invólucro, rodando-a no sentido anti-horário;
- o) Conectar o equipamento de extração de ar à câmara através do orifício;
- p) Pressionar o interruptor **On/Off** do aspirador e manter o mesmo em funcionamento até toda a atmosfera inicial tiver sido removida do interior da câmara (condição de vácuo);
- q) Desligar o aspirador pressionando novamente o interruptor **On/Off**;
- r) Colocar de novo a tampa do orifício utilizado para extração do ar, rodando-a no sentido horário.

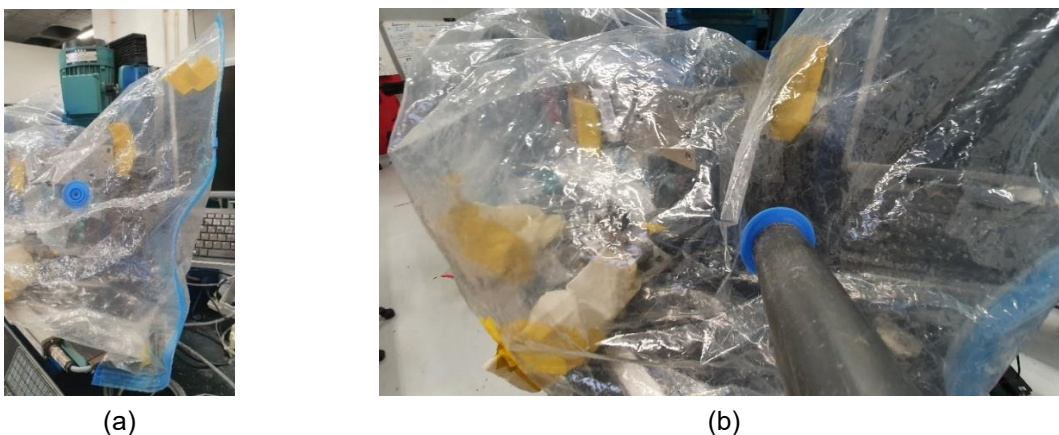


Fig. A6 – Esvaziamento da câmara atmosférica. (a) Fecho do invólucro da câmara e orifício para extração da atmosfera interior; (b) Operação de extração do ar interior da câmara.

8. Enchimento da câmara com uma atmosfera controlada

- s) Conectar a mangueira entre a garrafa do gás desejado (Árgon ou O₂) e o medidor de fluxo na bancada;

- t) Conectar a mangueira entre o medidor de fluxo e a câmara, utilizando o sistema de quick-release;
- u) Abrir a válvula no lado direito da câmara de gás;
- v) Abrir a válvula de segurança na garrafa, desbloqueando a patilha vermelha puxando-a para a esquerda;
- w) Abrir a válvula de controlo de fluxo da garrafa, rodando a mesma no sentido anti-horário;
- x) Abrir a válvula do medidor de fluxo da bancada de trabalho, rodando a mesma no sentido anti-horário. Este medidor de fluxo permite controlar o fluxo de gás que entra na câmara;
- y) Quando a câmara tiver o volume de gás pretendido, deve-se diminuir o fluxo de gás que entra para um valor mais baixo de 5L/min no medidor de fluxo (permitindo compensar eventuais fugas de gás que existam para o exterior da câmara);



(a)



(b)

Fig. A7 – Garrafa com gás argônio e acessórios. (a) Válvulas de emergência e de controlo de fluxo da botija; (b) Válvula de esfera e conector quick-release.

9. Corte ortogonal do provete

- v) Retificar superfície do provete;
- w) Verificar cota da superfície retificada com comparador;
- x) Realizar uma limpeza da superfície lateral do provete virada para câmara de vídeo com papel de lixa, de forma a facilitar a observação da deformação do material e do plano de corte nas imagens captadas.
- y) Fazer a referência da ferramenta com os comandos do menu MANUAL ao posicionar a ferramenta nas coordenadas corretas para a profundidade de corte pretendida, consultando o painel informativo à esquerda na bancada de trabalho. Devem ser pressionados simultaneamente os comandos das **setas direcionais e +**;
- z) Limpar as superfícies da ferramenta seguindo o procedimento descrito no ponto 5.f). A realização desta limpeza é importante entre cada corte realizado pela ferramenta, eliminando a influência que os depósitos de material na ferramenta têm nos ensaios posteriores;
- aa) Iniciar a aquisição de dados experimentais, pelo que deve ser criado um ficheiro de dados com o formato do tipo .txt, indicando dentro do software a localização do mesmo no comando **“Local do ficheiro a gravar”**;
- bb) A mesma operação deve ser realizada no software da câmara de filmar, designando um ficheiro corretamente para o registo de imagens do ensaio. Como tal ir a **File > Set Capture File** para definir o ficheiro com o formato .avi onde será guardada a gravação. Nomear o ficheiro de vídeo

- e carregar em **Open**. Na janela **Set File Size** que aparece em seguida não alterar nada e carregar em **OK**;
- cc) Verificar no gráfico das forças de corte e de penetração do Labview se o valor de ambas está a zero. Caso seja necessário, deve-se corrigir o valor de tensão utilizando as setas na caixa **Offset vertical** e **Offset horizontal** incrementando o valor ou diminuindo para cada um dos sinais.
- dd) Iniciar a captação de vídeo na barra de tarefas em **Capture > Start Capture**. Na janela **Ready to Capture** que aparece em seguida, carregar em **OK**;
- ee) Iniciar a aquisição de dados experimentais pressionando o comando **Começar/Parar de guardar dados** no painel de controlo do software “TRIAC – Corte Ortogonal”;
- ff) No menu MANUAL do painel da fresadora, utilizar os comandos das **setas direcionais e +** para mover a ferramenta ao longo do comprimento do provete de forma a realizar o corte ortogonal. **Importante:** A velocidade de corte correspondente à velocidade da ferramenta no eixo X pode ser incrementada através de sucessivos cliques na tecla **+**. Para atingir a velocidade de corte pretendida deve ser consultado o ecrã no painel frontal da fresadora, até que o valor indicado corresponda ao pretendido.
- gg) Terminar a captação de imagens pressionando o comando **Capture > Stop Capture** no software específico;
- hh) Terminar a aquisição de dados experimentais pressionando o comando **Começar/Parar de guardar dados** no canto inferior direito do painel no software “TRIAC – Corte Ortogonal”;
- ii) Verificar cota da superfície maquinada com o comparador após ensaio. A diferença entre os valores medidos no ponto 9.w) e no ponto atual corresponde à profundidade de corte real do ensaio efetuado.

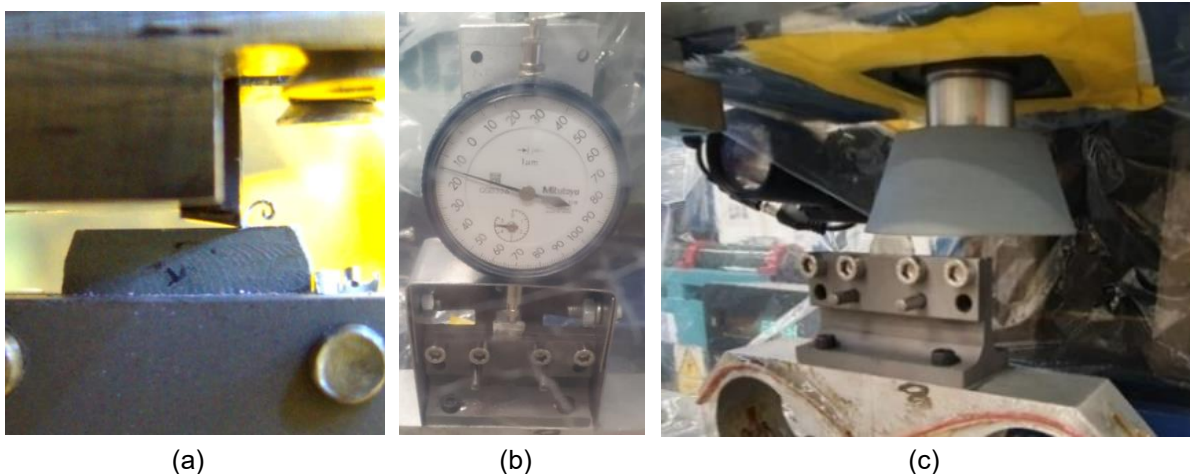


Fig. A8 – Ensaio de corte ortogonal com material zinco. (a) Formação de apra durante o ensaio de corte ortogonal; (b) Verificação da cota no final do ensaio com o comparador; (c) Operação de retificação de um provete após um ensaio de corte ortogonal.

10. Retificação do provete

- jj) No painel frontal da máquina-ferramenta, utilizar os comandos do menu MANUAL ajustar a altura da mó até uma posição inicial junto do provete;

- kk) Escolher a velocidade de rotação do spindle da fresadora no painel frontal, na zona do menu SPINDLE. Deve ser pressionado o comando + até atingir a velocidade pretendida;
- ll) Fazer uma passagem na superfície superior do provete;
- mm) Voltar à posição inicial;
- nn) Ajustar a altura da mó para retirar mais uma camada de material;
- oo) Repetir os últimos dois passos até retirar a subcamada de material do provete afetada pelo encruamento devido ao ensaio de corte ortogonal anterior.
- pp) Parar a rotação do spindle pressionando o comando **OFF** do menu SPINDLE.

11. Nomenclatura dos ficheiros de dados

O ficheiro de dados gravado deve ser designado por uma chave universal que permita identificar as condições de ensaio a que se refere. Este procedimento facilita a organização e reduz significativamente o risco da utilização errada dos ficheiros de dados, mais permite a utilização de ensaios realizados anteriormente noutras investigações. Deve-se procurar a utilização sequencial de designações alfanuméricas. Desta forma, explica-se de seguida a fórmula utilizada para a organização dos ensaios realizados:

(Número do ensaio)_ (Material)_ (Condição Metalúrgica)_ (Ângulo de ataque)_ (Revestimento)_ (Rugosidade)_ (Ângulo de saída)_ (Atmosfera)_ (Velocidade de corte)_ (Largura)_ (Penetração)

Exemplo: 001_AI999_H_P05_WC_015_P06_OX_250_125_030

- (Número do ensaio): 001 – 099 (Ensaio unidirecionais com ferramenta de corte RT∞); 100 – 199 (Ensaio unidirecionais com as ferramentas RT60 e RT240); 200 – 299 (Ensaio unidirecionais com as ferramentas RT30, RT120 e RT480); 300 – 399 (Ensaio bidirecionais com ferramenta RT∞); 400 – 499 (Ensaio bidirecionais com a ferramenta RT480); 500 – 599 (Ensaio unidirecionais com ferramenta comercial);
- (Material): AI999, AA1085, AA1050, Ck45, 316L, Ni300, Cu999, etc.;
- (Condição Metalúrgica): O – recozido; H – Encruado, etc.;
- (Ângulo de ataque): P05 – positivo de 5°, N05 – negativo de 5°, N00 – nulo;
- (Revestimento): WC – Ferramenta com material de base carboneto de tungsténio sem revestimento; NiTi, NiAlTi; TiAlSiN; etc.;
- (Rugosidade): 015 – Ra=15µm;
- (Ângulo saída): P06 – positivo de 6°, N05 – negativo de 5°, N00 – nulo;
- (Atmosfera): OX – oxigénio 99.999%, AR – árgon 99.999%, RA – Room Atmosphere (Atmosfera ambiente);
- (Velocidade corte) 250 – 250mm/min;
- (Largura): 125 – 1.25mm;
- (Penetração): 030 – 30µm.

As pastas de arrumação dos ficheiros devem ter uma estrutura bem definida igualmente. Existindo uma pasta para um conjunto de ensaios para o mesmo material, mesma ferramenta e tipo de ensaio (uni ou bidirecional), tendo no seu interior três subpastas referentes a cada um dos três tipos de atmosfera possível. Dentro destas subpastas encontram-se os ficheiros de dados .txt, assim como as fotos e vídeos correspondentes a cada ensaio. De seguida, é dado um exemplo possível de organização hierárquica dum conjunto de pastas referentes aos dados experimentais recolhidos para um material ensaiado.

➤ AA1085

- Ensaios unidireccionais
 - Ferramenta de referência RT ∞ (polida, s/ comprimento de contacto restrito e s/ revestimento)
 - ◆ Árgon
 - ◆ Oxigénio
 - ◆ Atmosfera ambiente
 - Ferramenta de RT30 (polida, c/ comprimento de contacto restrito e c/ revestimento)
 - Ferramenta de RT60 (polida, c/ comprimento de contacto restrito e s/ revestimento)
 - Ferramenta de RT120 (polida, c/ comprimento de contacto restrito e c/ revestimento)
 - Ferramenta de RT240 (polida, c/ comprimento de contacto restrito e s/ revestimento)
 - Ferramenta de RT480 (polida, c/ comprimento de contacto restrito e c/ revestimento)
 - Ferramenta comercial (não polida, s/ comprimento de contacto restrito e s/ revestimento)

- Ensaios bidireccionais
 - Ferramenta de referência RT ∞ (polida, s/ comprimento de contacto restrito e s/ revestimento)
 - ◆ Árgon
 - ◆ Oxigénio
 - ◆ Atmosfera ambiente
 - Ferramenta de RT480 (polida, c/ comprimento de contacto restrito e c/ revestimento)
 - ◆ Árgon
 - ◆ Oxigénio
 - ◆ Atmosfera ambiente

B. Exemplo de um ensaio de corte ortogonal realizado

Seguindo o procedimento experimental descrito anteriormente realizaram-se dois ensaios de corte ortogonal com um provete de liga AA1085 e atmosfera de oxigénio. Utilizou-se uma ferramenta de corte revestida e com comprimento de contacto restrito de 120 μm (RT120). A profundidade de corte pretendida foi de 30 μm , obtendo-se uma profundidade de corte real de 30 μm e 31 μm , assim como um coeficiente de atrito na interface ferramenta-apara de 0.48 e 0.47, respetivamente. Na figura B1 é possível observar alguns instantes da formação da apara num destes ensaios:

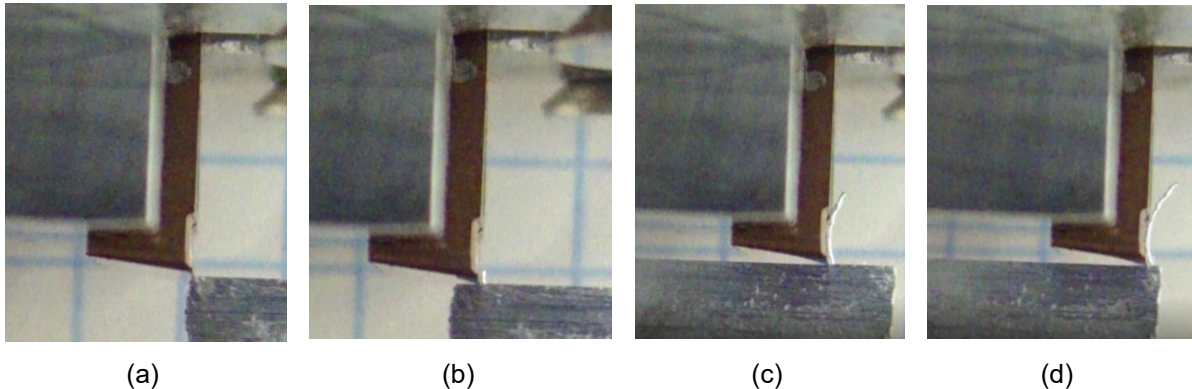


Figura B1 – Formação da apara resultante de um ensaio de corte ortogonal. (a) Contacto inicial da ferramenta com o material do provete; (b) Início da formação da apara (regime transiente); (c) Formação de uma apara contínua, sendo esta formação um processo em si já estacionário com estabilização do valor das forças de corte e penetração, do atrito (dinâmico), do comprimento de contacto na face de ataque e da curvatura da apara; (d) Instantes finais do corte em que o valor das forças envolvidas no ensaio registam uma queda acentuada.

C. Tabela das especificações técnicas da fresadora Denford TRIAC

Spindle	
Fixação das ferramentas	R8 Taper with easychange holder
Motor do Spindle	0.371 KW / 240 V / AC
Velocidade de rotação	100-2500 RPM
Eixos	
Curso longitudinal (eixo X)	290 mm
Curso transversal (eixo Y)	170 mm
Curso vertical (eixo Z)	235 mm
Motor de passo eixo X, Y e Z	200 passos/rotação
Velocidade de avanço	Variável de 0-1000 mm/min Movimento rápido em todos os eixos G00 = 1000 mm/min
Resolução Mecânica	0.01 mm

Dimensões da mesa de trabalho	
Comprimento	500 mm
Largura	160 mm
Distância spindle até à mesa	280 mm

D. Análise das ferramentas de corte

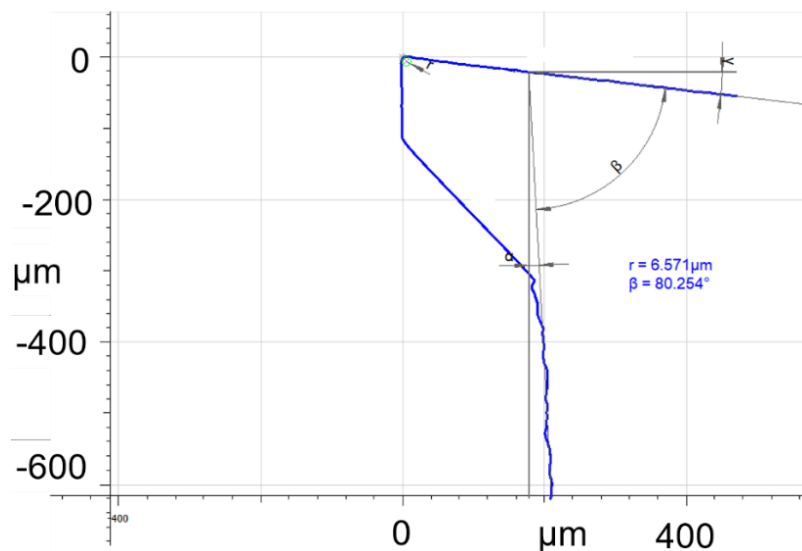


Fig. D1 – Diagrama da secção transversal à aresta de corte de uma segunda ferramenta RT120.

Nesta segunda ferramenta de corte RT120 analisada foram realizadas 50 medições ao longo da largura da aresta de corte, tal como se demonstra na Fig. D2(a) estando os resultados destas medições organizados na tabela D1, a qual contém os parâmetros resumidos estatisticamente. Na Fig. D2(b) é possível observar a evolução do raio de bico ao longo das medições realizadas.

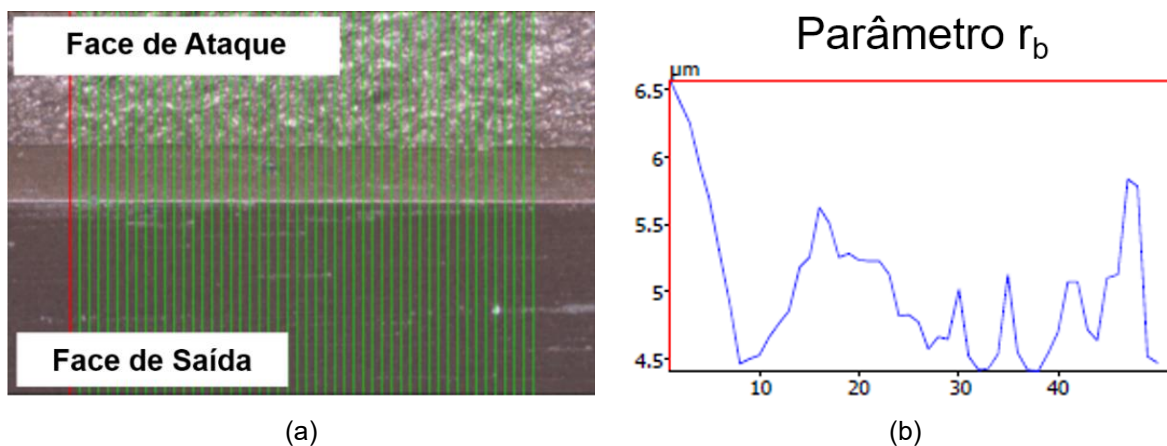


Fig. D2 – Análise da ferramenta RT120. (a) Representação da trajetória efetuada em cada uma das 50 medições feitas entre as faces de ataque e de saída de uma ferramenta; (b) Evolução do valor do raio de bico ao longo das medições efetuadas para a segunda ferramenta analisada.

Tabela D1 – Resumo estatístico dos parâmetros geométricos medidos na preparação de uma ferramenta de corte

	r_b [μm]	α [$^\circ$]	β [$^\circ$]	γ [$^\circ$]	ϕ [$^\circ$]	$S\alpha/ S\gamma$ [μm]
Média	5.023	1.821	81.502	6.677	11.367e-9	6.770/ 5.201
Desvio Padrão	0.541	1.717	1.711	0.020	520.670e-9	0.693/ 0.481
Mínimo	4.413	-0.386	78.055	6.642	-1.207e-6	5.991/ 4.533
Máximo	6.571	5.274	83.680	6.723	853.774e-9	10.422/ 7.014
Mediana	4.881	0.607	82.701	6.676	0.000	6.673/ 5.135

Por fim, foi analisada uma terceira ferramenta de corte, RT00, a qual apresenta uma rugosidade superior às anteriores tal como visível na Fig. D3(a), sendo isso mesmo perceptível nos riscos que percorrem toda a largura da face de ataque. Para esta última ferramenta cujo perfil se apresenta na Fig. D3(b) foram também realizadas 50 medições ao longo da largura da aresta de corte, tal como se demonstra na Fig. D3(c). Os resultados destas medições organizados e resumidos na tabela D2, a qual contém os valores médios desses mesmos parâmetros do perfil.

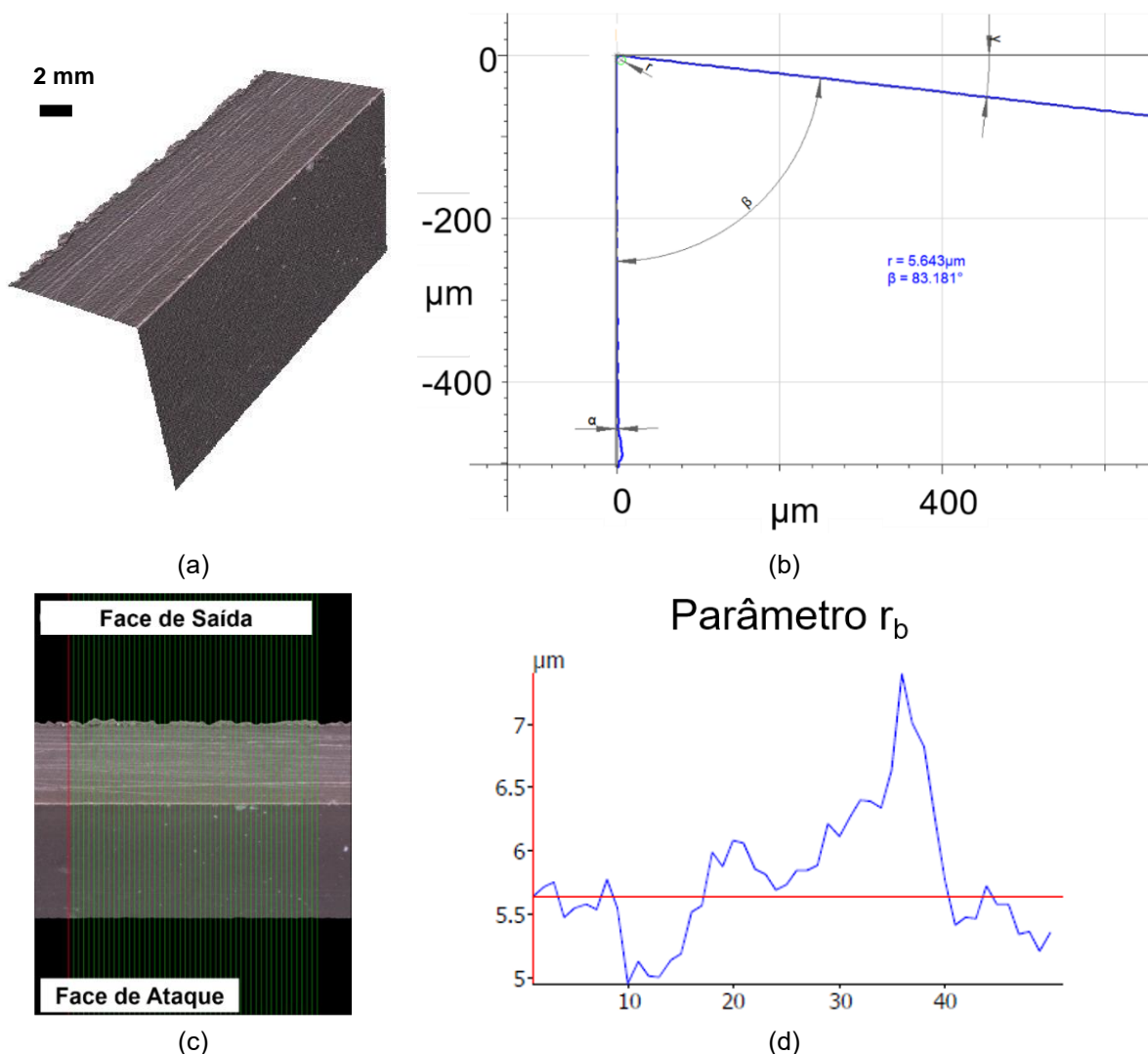


Fig. D3 – Análise de uma ferramenta de referência RT∞. (a) Visualização 3D das faces de ataque e saída de uma ferramenta com ampliação de 10X; (b) Diagrama da secção perpendicular à aresta de corte; (c) Representação da trajetória efetuada em cada uma das 50 medições feitas entre as faces de ataque e de saída; (d) Evolução do valor do raio de bico ao longo das medições efetuadas para a terceira ferramenta analisada.

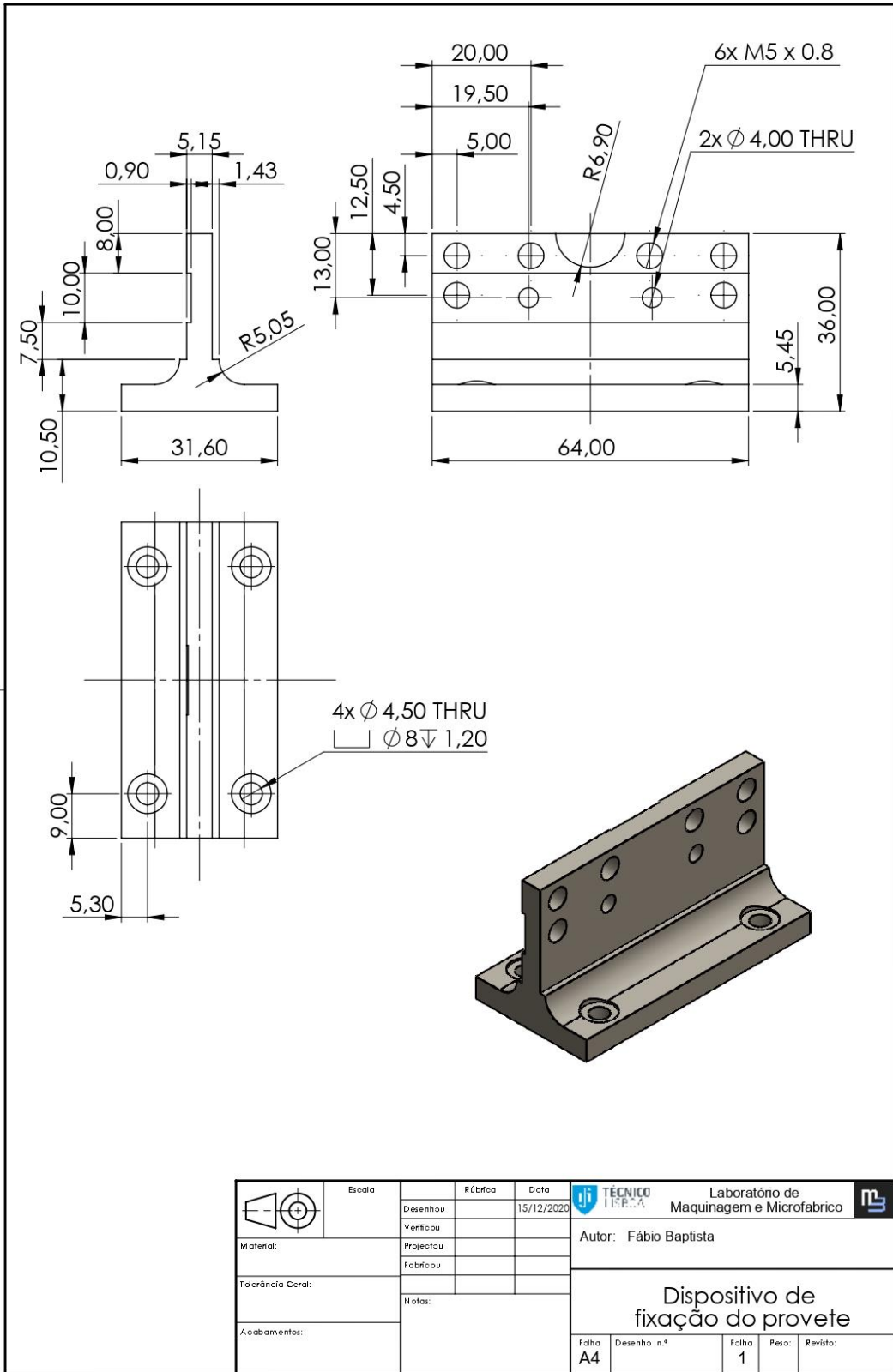
Tabela D2 – Resumo estatístico dos parâmetros geométricos medidos na preparação de uma ferramenta de corte

	r_b [μm]	α [$^\circ$]	β [$^\circ$]	γ [$^\circ$]	φ [$^\circ$]	$S\alpha/ S\gamma$ [μm]
Média	5.779	0.295	83.196	6.509	13.867e-9	7.498/ 5.920
Desvio Padrão	0.512	0.015	0.022	0.010	498.704e-9	0.619/ 0.998
Mínimo	4.953	0.270	83.167	6.483	-1.479e-6	6.386/ 4.532
Máximo	7.399	0.322	83.240	6.524	1.207e-6	9.347/ 8.771
Mediana	5.719	0.292	83.194	6.512	0.000	7.442/ 5.731

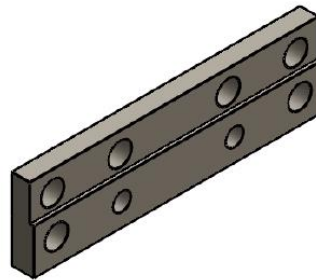
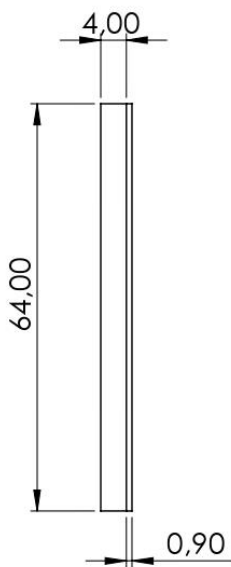
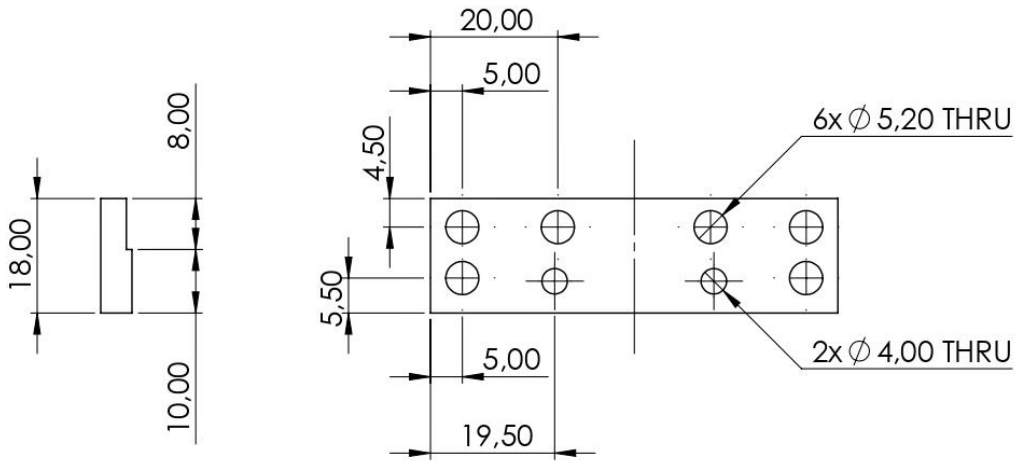
E. Desenhos Técnicos

Nas páginas seguintes deste anexo E, encontram-se os desenhos técnicos dos componentes que permitem a fixação da montagem experimental na célula de carga, correspondentes aos desenhos “Dispositivo de fixação do provete” e “Bloco de aperto”.

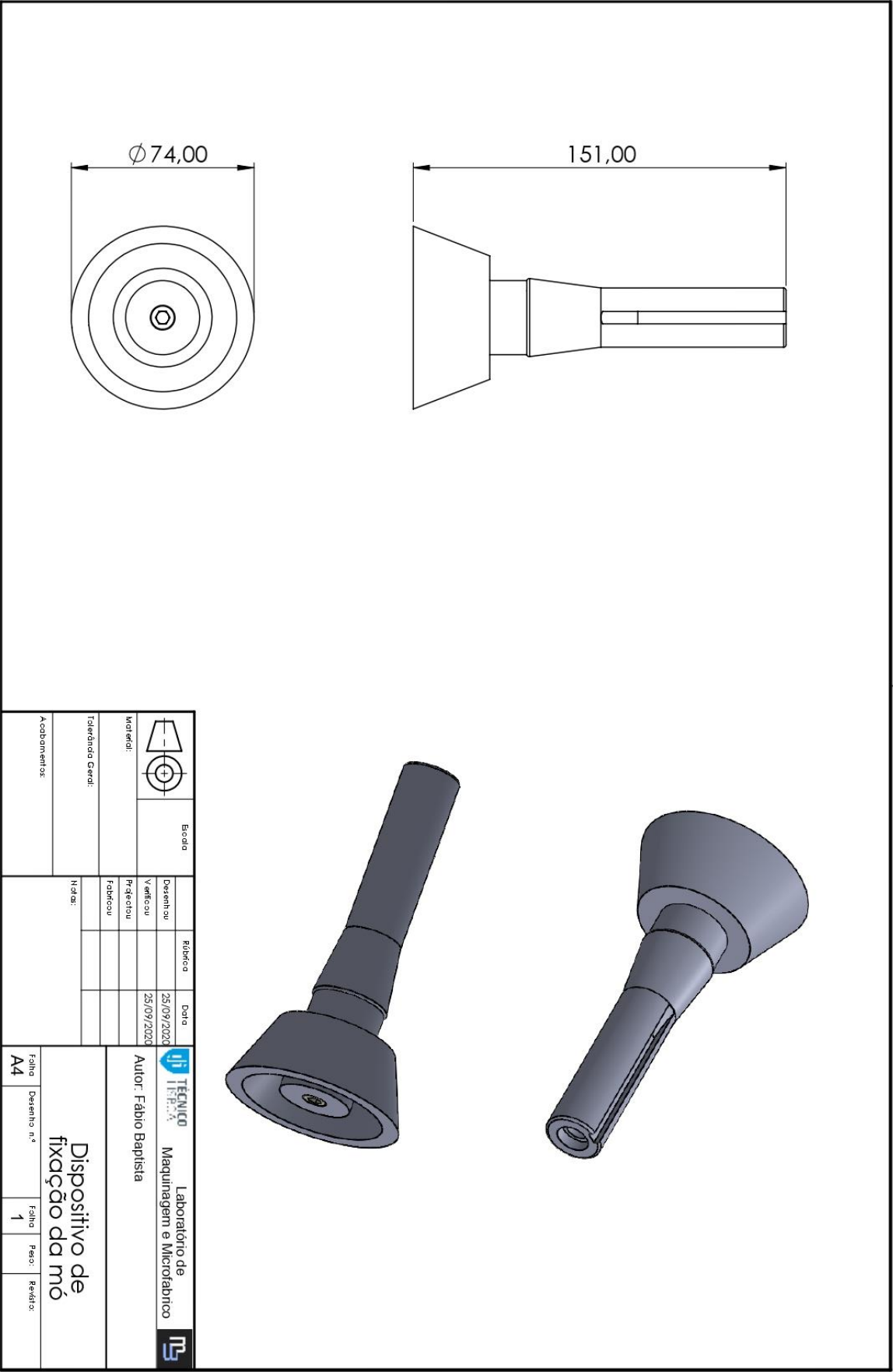
Os componentes que permitem a fixação de uma mó de retificação ou de um disco de lixa no spindle da máquina de ensaios experimentais correspondem aos desenhos técnicos designados por “Dispositivo de fixação da mó”, “Montagem com o disco”, “Aperto” e “Disco”.



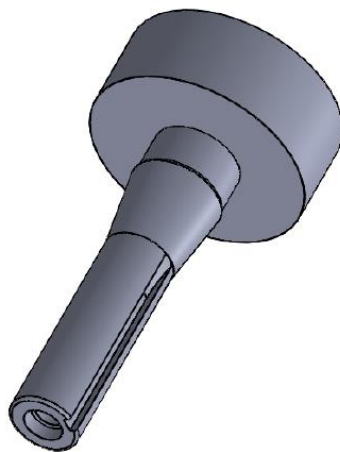
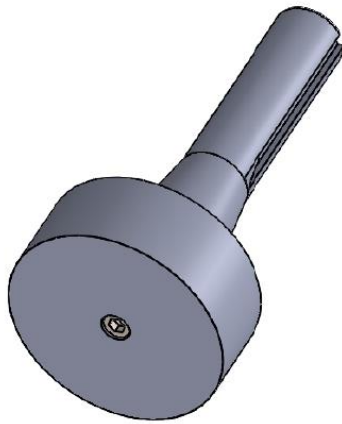
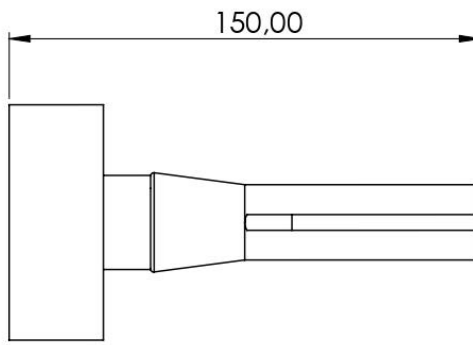
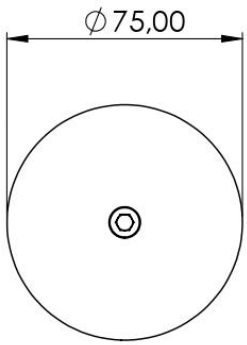
	Escola	Rúbrica	Data		Laboratório de Maquinagem e Microfabrico			
	Desenhou		15/12/2020		Autor: Fábio Baptista			
	Verificou				Dispositivo de fixação do provete			
	Projectou							
Material:	Fabricou			Folha	Desenho n.º	Folha	Peso:	Revista:
Tolerância Geral:	Notas:			A4		1		
Acabamentos:								

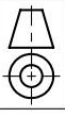


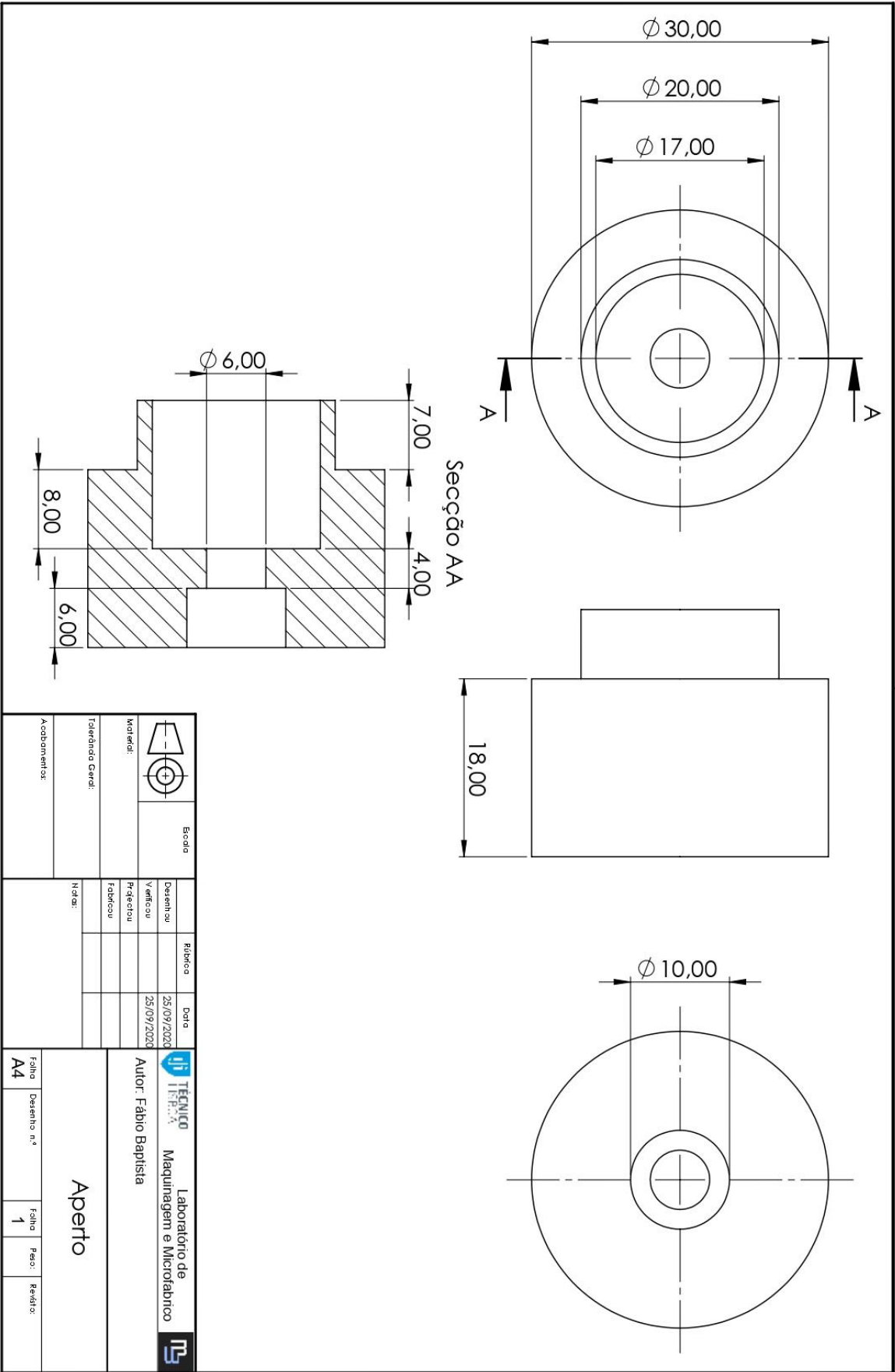
	Escola	Rúbrica	Data	 Laboratório de Maquinagem e Microfabrico
	Desenhou		15/12/2020	
	Verificou			
	Projectou			
Material:	Fabricou			Autor: Fábio Baptista
Tolerância Geral:	Notas:			Bloco de aperto
Acabamentos:				
Folha	Desenho n.º	Folha	Peso:	Revisão:
A4		1		

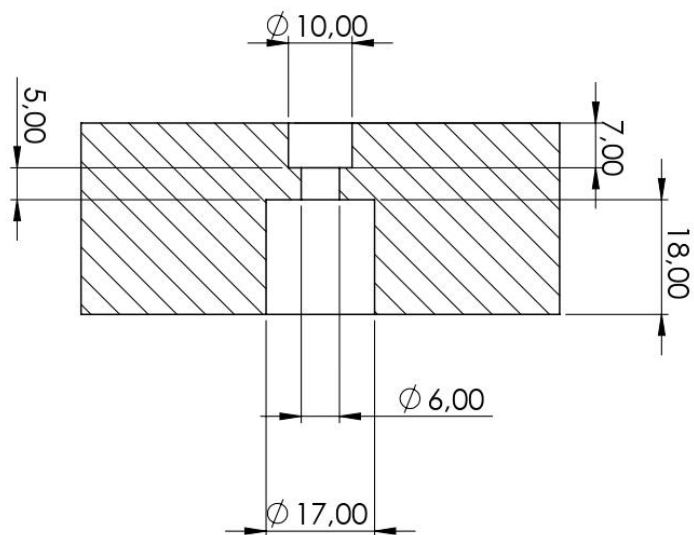
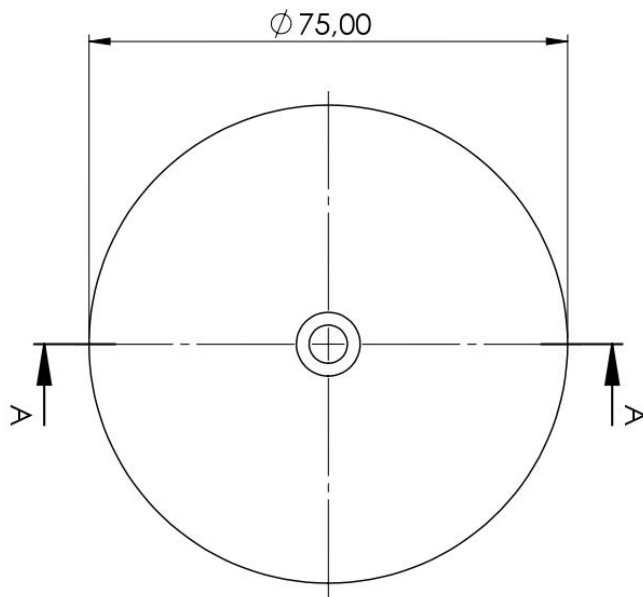


		Escala		Borracha		Data			
Material:		Desenho	25/09/2020	Autor: Fábio Baptista		Laboratório de Maquinagem e Microfabricação		Dispositivo de fixação da mó	
Tolerâncias Gerais:		Verificou	25/09/2020	Fabricou		Folha		Folha	
Acabamentos:		Notas:		Folha		Folha		Folha	
				A4		1		1	



		Escala:	
Material:		Desenho: 25/09/2020	
Tolerância Geral:		Verificação: 25/09/2020	
Acomodação:		Fabricação:	
N.º de:		Data:	
Montagem com o disco		TÉCNICO I I.P.A. Laboratório de Maquinagem e Microfabrico	
Autor: Fabio Baptista		Folha: A4	
Desenho n.º		Folha: 1	
Part.:		Peças:	
Feições:		Feições:	





SECTION A-A

		Escola		
X.X		Disciplina	Laboratório de	
Material:		Verificação	Maquinagem e Microeletrónica	
Tolerância Geral:		Projecção	Autor: Fábio Baptista	
Acabamentos:		Fabricou	Data: 25/09/2020	
		Notas:		
		DISCO		
Folha	Desenho n.º	Folha	Peso:	Revisão:
A4		1		

F. Programa Labview desenvolvido

