

Desenvolvimento de Aparato Experimental para Ensaios de Corte por Arranque de Apara

Duarte Miguel Faria Andrade

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Mecânica

Orientadores: Prof. Pedro Alexandre Rodrigues Carvalho Rosa

Prof. Rodrigo Rossi

Júri

Presidente: Prof. Rui Manuel dos Santos Oliveira Baptista

Orientador: Prof. Pedro Alexandre Rodrigues Carvalho Rosa

Vogal: Prof. Jorge Manuel da Conceição Rodrigues

Junho 2019

Agradecimentos

Quero apresentar os meus sinceros e profundos agradecimentos a todos aqueles que se cruzaram nesta etapa da minha vida e contribuíram para a realização desta presente dissertação.

Ao meu orientador, professor Pedro Rosa, por todo o apoio e paciência prestados, pela constante motivação e pelos conhecimentos transmitidos, que contribuíram de forma positiva para o meu crescimento profissional e pessoal.

Aos técnicos João Raposo do Laboratório de Maquinagem e Micro-Fabrico (LabM3) e ao Sr. Farinha do Laboratório de Tecnologia Mecânica (LTM) por toda a ajuda e aconselhamento ao longo do desenvolvimento da componente experimental.

Aos meus amigos e colegas do curso que sempre me apoiaram e motivaram nesta etapa final do curso, nomeadamente, Pedro Santos, João Sousa, Luís Almeida, Flávio Duarte, Paulo Farinha e Daniel Ferreira.

À minha família, os meus pais por me terem apoiado continuamente neste percurso académico que nem sempre foi fácil, mas sem nunca descreditarem de mim.

Quero ainda agradecer o apoio fornecido pelo MIM/IDMEC ao abrigo do projeto LAETA (Referência UID/EMS/50022/2019), e do projeto “MAMTool - Maquinabilidade de componentes produzidos por fabricação aditiva para a indústria dos moldes”, financiado pelo Programa Operacional Competitividade e Internacionalização e Programa Operacional Regional de Lisboa, apoiado pelo FEDER e por fundos nacionais (FCT) (Referência PTDC/EME-EME/31895/2017)

Resumo

A presente dissertação apresenta o desenvolvimento de um aparato experimental para a realização de ensaios de corte por arranque de apara em condições laboratoriais controladas. Esta montagem permite controlar vários parâmetros de ensaio, tais como a velocidade, a largura e a penetração de corte, com elevada estabilidade e rigidez da máquina de ensaios. O principal resultado desta investigação é o próprio desenvolvimento da máquina para ensaios de corte ortogonal, tendo este aparato sido validado com base em ensaios de corte em alumínio AA1050, com e sem adição de lubrificante, em regime quase-estático e de alta velocidade. Estes ensaios permitiram uma avaliação exploratória da influência dos parâmetros na tribologia do corte ortogonal do alumínio AA1050.

Palavras-Chave: Corte por arranque de apara, máquina de ensaios, experimentação, lubrificação, forças de corte.

Abstract

The present dissertation addresses the development of an experimental apparatus to perform cutting tests in controlled laboratory conditions. This assembly enables the control of some test parameters such as cutting speed, width and cutting penetration, with high stability and stiffness. The main result of this investigation is the development of the machine for orthogonal cutting tests, being validated based on AA1050 aluminum cutting tests, with and without addition of lubricant, in a quasi-static and high velocity conditions. These tests allow an exploratory evaluation of the influence of these parameters in the orthogonal cutting tribology of the AA1050 aluminum.

Keywords: Metal cutting, test machine, experimentation, lubricant, cutting forces.

Índice

Agradecimentos.....	I
Resumo	II
Abstract.....	III
Lista de Tabelas	V
Lista de Figuras	VI
Abreviaturas	X
Nomenclatura	XI
1. Introdução.....	1
2. Revisão Bibliográfica	3
2.1. Breve introdução ao processo de maquinagem.....	3
2.2. Máquinas para ensaios de corte ortogonal	7
2.3. Corte por arranque de apara	13
3. Desenvolvimento da Máquina de Ensaios	22
3.1. Estrutura e cadeia cinemática	22
3.2. Verificação da máquina de ensaios	24
3.3. Instrumentação e aquisição de dados.....	27
3.4. Ferramenta e fixação.....	33
3.5. Integração do aparato experimental.....	35
4. Métodos e Materiais	36
4.1. Levantamento da espessura das aparas	36
4.2. Materiais	36
4.3. Lubrificação	37
4.4. Plano de ensaios	37
5. Ensaios Experimentais de Corte Ortogonal	38
5.1. Avaliação das forças envolvidas no processo.....	38
5.2. Tribologia do processo	43
6. Conclusões e Perspetivas de Trabalhos Futuros.....	51
6.1. Conclusões	51
6.2. Perspetivas de trabalhos futuros	52
7. Referências.....	53
Anexos.....	55

Lista de Tabelas

<i>Tabela 3.1. Variáveis presentes na análise da rigidez da estrutura para ambas as dimensões das ligações para uma força de aplicação de 700 N.</i>	<i>26</i>
<i>Tabela 4.1. Propriedades do alumínio AA1050.....</i>	<i>37</i>
<i>Tabela 4.2. Plano de ensaios.....</i>	<i>37</i>

Lista de Figuras

Figura 2.1. Torno a pedal	3
Figura 2.2. (a) Primeiro mecanismo para corte de parafusos; (b) Torno a pedal com manivela.	4
Figura 2.3. (a) Mandriladora e respetivas ferramentas; (b) Visão geral; (c) Detalhe de mesa de trabalho. (de Science & Society Picture Library, Londres).....	4
Figura 2.4. O primeiro torno mecânico de Henry Maudslay, datado de 1797. (de Science & Society Picture Library, Londres)	5
Figura 2.5. (a) Operação de furação pós Segunda Guerra Mundial; (b) Fresadora com spindle multifuncional.....	5
Figura 2.6. Uma das primeiras máquinas-ferramenta: a fresadora de fita perfurada, desenvolvida no M.I.T. A cabine por trás continha o controlador, usando 292 tubos de vácuo e uma frequência de 512 Hz. (de M.I.T. Museum, Cambridge, MA).....	6
Figura 2.7. (a) Centro de maquinagem CNC atual; (b) Programação CAM; (c) Maquinagem do componente.....	6
Figura 2.8. (a) Conceito original de plaina típica inglesa (Naysmith, 1841); (b) Esquema simplificado; (c) Plaina aberta Rockford, Belmont® Machinery Company, 1967; (d) Plaina de coluna dupla, Maruti® Machine Tools, 1990	7
Figura 2.9. (a) Limador de Naysmith, 1836 (Steeds, 1969); (b) Esquema simplificado.	8
Figura 2.10. (a) Corte em rodas dentadas; (b) Chavetas; (c) Escatéis; (d) Mesa de suporte; (e) Bloco motor diesel; (f) Placas de aço.....	8
Figura 2.11. Aparato experimental desenvolvido por Santos (2005): (a) Prensa hidráulica controlada por computador; (b) Ferramenta de corte, dispositivo de fixação e matéria prima; (c) Desenho esquemático do aparato.	9
Figura 2.12. Aquisição do processo de corte ortogonal: (a) DAQ; (b) Bloco terminal; (c) Cabo de ligação. (Santos, 2005).....	10
Figura 2.13. Instrumentação utilizada nos ensaios de corte: (a) Esquema utilizado para a instrumentação; (b) Amplificador Kistler 5011B; (c) Célula de carga piezoelétrica Kistler 9257B; (d) Régua de medida linear Balluf BTL5.-A11-M0500-P-S32. (Cristino, 2007).....	10
Figura 2.14. Aparato experimental para os ensaios de corte ortogonal: (a) Montagem do aparato; (b) Esquema representativo do aparato. (Esmeraldo, 2009)	11
Figura 2.15. (a) Detalhe da mesa de trabalho do aparato experimental; (b) Esquema do aparato experimental. (Pereira, 2009).....	11
Figura 2.16. Aparato experimental desenvolvido por Fernandes (2017): (a) Aparato experimental funcional; (b) Máquina de ensaios.	12
Figura 2.17. Esquema aparato experimental. (Fernandes, 2017)	12
Figura 2.18. Termos usados no corte ortogonal;(a) representação tridimensional do processo, onde podem ser identificadas as velocidades de corte V_c e de saída, V_s ; (b) representação bidimensional, geralmente conhecida como geometria de corte, mostrando as variáveis que influenciam o processo. (Cristino, 2007).....	13
Figura 2.19. Hodógrafo do corte ortogonal. (Cristino, 2007).....	14

Figura 2.20. Campo de linhas de escorregamento: (a) proposto por Lee-Shaffer para o corte ortogonal, (b) círculo de Mohr.	15
Figura 2.21. Zonas de corte existentes no processo de corte por arranque de apara.	16
Figura 2.22. Modos básicos de formação da apara; a) apara contínua; b) apara lamelar; c) apara descontínua; d) apara com aresta postíça formada; e) apara com formação de fissura. (Cristino, 2007)	17
Figura 2.23. Representação esquemática das principais leis de atrito usadas em engenharia, mostrando a tensão de atrito numa interface sólido – sólido, como uma função da pressão normal. São apresentadas duas curvas (A e B) geradas a partir da lei do atrito de Bay.....	20
Figura 3.1. CAD da máquina de ensaios montada: (a) Vista geral; (b) Vista explodida.....	22
Figura 3.2. (a) Estrutura; (b) Cinemática da máquina de ensaios.	23
Figura 3.3. (a) Aciador; (b) VARIAC; (c) Condensadores.	23
Figura 3.4. (a) Componentes no interior do carrinho móvel: 1-Computador; 2-Amplificador; 3-Gerador de sinais; 4-DAQ; 5-UPS; (b) Interruptor de emergência.....	24
Figura 3.5. (a) Teste com pesos calibrados no conjunto guia-carro móvel; (b) Detalho relógio comparador	25
Figura 3.6. Ligações aparafusadas na placa central vertical de apoio á célula de carga e sistema de fixação.	25
Figura 3.7. a) Detalhe das ligações aparafusadas inferiores; b) Distância das ligações aparafusadas ao ponto de aplicação da força.	25
Figura 3.8. Relação entre a carga aplicada e o alongamento da ligação aparafusada para ambos as dimensões	27
Figura 3.9. Célula de carga Kistler® 9257A.	28
Figura 3.10. (a) Gráfico representativo da calibração em zz de massa em função da voltagem traduzida pela célula de carga.; (b) Gráfico representativo da calibração em yy de massa em função da voltagem traduzida pela célula de carga; (c) Amplificador Kistler® Type 5007.	29
Figura 3.11. (a) Conjunto guia-carro móvel com as bobines; (b) Bobine indutora fixa á guia móvel; (c) Bobine recetora fixa ao suporte.	30
Figura 3.12. (a) Gráfico de deslocamento em função da voltagem da calibração de ensaios quase-estáticos; (b) Gráfico de deslocamento em função da voltagem da calibração de ensaios de alta velocidade.	30
Figura 3.13. Circuito elétrico de uma ponte retificadora, com indicação do tipo de sinal à entrada e à saída.....	31
Figura 3.14. Pontes retificadoras: (a) Ponte para ensaios em regime quase-estático; (b) Ponte para ensaios em regime de alta velocidade.	31
Figura 3.15. Gerador de sinais FeelTech® FY3200S Dual Channel.	32
Figura 3.16. Placa de aquisição de dados National Instruments® USB-6251.....	32
Figura 3.17. Interface do utilizador em LabView.	33
Figura 3.18. (a) Ferramenta de corte; (b) Desenho técnico da ferramenta.	33

<i>Figura 3.19. (a) Dispositivo de fixação; (b) Placa metálica; (c) Cubos; (d) Barra em L com furo para micrómetro.</i>	34
<i>Figura 3.20. Dispositivo de fixação do provete: (a) Vista geral; (b) Detalhe peça de encosto.</i>	34
<i>Figura 3.21. Aparato experimental.</i>	35
<i>Figura 3.22. Esquema aparato experimental.</i>	35
<i>Figura 4.1. Aparato dimensionada em AutoCad.</i>	36
<i>Figura 4.2. (a) Provete de alumínio; (b) Dimensões provete.</i>	36
<i>Figura 5.1. Forças de corte e de penetração resultantes de um ensaio a um provete de alumínio AA1050, para uma espessura de corte de 0.02 mm, em função do deslocamento, em regime quase-estático.</i>	38
<i>Figura 5.2. Forças de corte e de penetração resultantes de um ensaio a um provete de alumínio AA1050, para uma espessura de corte de 0.05 mm, em função do deslocamento, em regime quase-estático.</i>	38
<i>Figura 5.3. Forças de corte e de penetração resultantes de um ensaio a um provete de alumínio AA1050, para uma espessura de corte de 0.1 mm, em função do deslocamento, em regime quase-estático.</i>	39
<i>Figura 5.4. Forças de corte e de penetração resultantes de um ensaio a um provete de alumínio AA1050, para uma espessura de corte de 0.02 mm, em função do deslocamento, em regime de alta velocidade.</i>	40
<i>Figura 5.5. Forças de corte e de penetração resultantes de um ensaio a um provete de alumínio AA1050, para uma espessura de corte de 0.05 mm, em função do deslocamento, em regime de alta velocidade.</i>	40
<i>Figura 5.6. Forças de corte e de penetração resultantes de um ensaio a um provete de alumínio AA1050, para uma espessura de corte de 0.05 mm, em função do deslocamento, em regime de alta velocidade.</i>	41
<i>Figura 5.7. Captura fotográfica sequencial da face do provete maquinada após um ensaio em condições de alta velocidade.</i>	41
<i>Figura 5.8. Captura fotográfica sequencial da face do provete maquinada após um ensaio em condições estáticas.</i>	42
<i>Figura 5.9. Forças de corte e de penetração resultantes de um ensaio a um provete de alumínio AA1050 com e sem lubrificação, para uma espessura de corte de 0.1 mm, em função do deslocamento, em regime de alta velocidade.</i>	42
<i>Figura 5.10. Forças de corte e de penetração resultantes de um ensaio a um provete de alumínio AA1050 com lubrificação, em função do deslocamento, em regime de alta velocidade.</i>	43
<i>Figura 5.11. Forças de corte e de penetração resultantes de um ensaio a um provete de alumínio AA1050, para uma espessura de corte de 0.02 mm com lubrificante, em função do deslocamento, em regime de alta velocidade.</i>	44
<i>Figura 5.12. Forças de corte e de penetração resultantes de um ensaio a um provete de alumínio AA1050, para uma espessura de corte de 0.05 mm com lubrificante, em função do deslocamento, em regime de alta velocidade.</i>	44

<i>Figura 5.13. Forças de corte e de penetração resultantes de um ensaio a um provete de alumínio AA1050, para uma espessura de corte de 0.1 mm com lubrificante, em função do deslocamento, em regime de alta velocidade.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 5.14. Forças de corte para alumínio AA1050 em função da espessura de corte para diferentes condições de velocidade, com e sem lubrificação.</i>	<i>45</i>
<i>Figura 5.15. Pressão específica de corte para alumínio AA1050 em função da espessura de corte para diferentes condições, com e sem lubrificação.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 5.16. a) Formação de apra na face do provete; b) Face da apra adjacente ao material; c) Face da apra adjacente à face de ataque da ferramenta</i>	<i>46</i>
<i>Figura 5.17. Processo de formação de apra presente em Cordeiro (2010): a) Formação da apra na face do provete; b) Em cima: face da apra adjacente ao material; Em baixo: face da apra adjacente à ferramenta de corte.</i>	<i>47</i>
<i>Figura 5.18. Diferentes aparas resultantes dos ensaios de corte em alumínio AA1050: a) Ensaio Est. s/ glic. (e=0,02mm); b) Ensaio Est. s/ glic. (e=0,05mm); c) Ensaio Est. s/ glic. (e=0,1mm); d) Ensaio A.V. s/ glic. (e=0,02mm); e) Ensaio A.V. s/ glic. (e=0,05mm); f) Ensaio A.V. s/ glic. (e=0,1mm); g) Ensaio Est. c/ glic. (e=0,02mm); h) Ensaio Est. c/ glic. (e=0,05mm); i) Ensaio Est. c/ glic. (e=0,1mm); j) Ensaio A.V. c/ glic. (e=0,02mm); k) Ensaio A.V. c/ glic. (e=0,05mm); l) Ensaio A.V. c/ glic. (e=0,1mm)</i>	<i>47</i>
<i>Figura 5.19. Grau de encalque do alumínio AA1050 em função da espessura de corte para diferentes condições, com e sem lubrificação.</i>	<i>48</i>
<i>Figura 5.20. Ângulo de corte do alumínio AA1050 em função da espessura de corte para diferentes condições, com e sem lubrificação.</i>	<i>49</i>
<i>Figura 5.21. Coeficiente de atrito do alumínio AA1050 em função da espessura de corte para diferentes condições, com e sem lubrificação.</i>	<i>49</i>
<i>Figura 5.22. Evolução da curva de escoamento plástico para o Alumínio puro e para a liga comercialmente pura AA1050 em diferentes taxas de deformação (Gregório, 2017).....</i>	<i>50</i>

Abreviaturas

AA – *Aluminium Association*

AC – Corrente Alternada

CC – Corrente Contínua

NOF – Núcleo de Oficinas

LabM3 – Laboratório de Maquinagem e Micro-Fabrico

CAA – Corte por Arranque de Apara

UPS – *Uninterruptible Power Source*

CAD – *Computer-Aided Design*

CAM – *Computer-Aided Manufacturing*

NI – *National Instruments*

IST – Instituto Superior Técnico

DAQ – *Data Acquisition*

NC – *Numeric Control*

CNC – *Computer Numeric Control*

MP – Megapixel

FEM – *Finite Element Method*

LTM – Laboratório de Tecnologia Mecânica

Nomenclatura

α - Ângulo de ataque da ferramenta

e - Espessura de corte

e' - Espessura da apara

ϕ - Ângulo de corte

R_c - Grau de encalque

V_s - Velocidade da apara

V_c - Velocidade de corte

V_{AB} - Velocidade através do plano de corte AB

R - Força resultante

F_c - Força de corte

F_p - Força de penetração

W_c - Potência de corte

K_s - Potência/pressão específica de corte

A_0 - Área transversal da espessura da apara antes do corte,

τ_{AB} - Tensão de corte máxima no plano de corte AB

β - Ângulo de atrito

k - Tensão de corte no plano de corte AB

l_c - Comprimento de contacto da apara com a ferramenta

μ - Coeficiente de atrito

F_N - Força normal à superfície de contacto

F_a - Força de atrito

τ_i - Tensão média de corte na superfície de contacto

P - Pressão normal na superfície de contacto

1. Introdução

A maquinagem é um dos processos de estudo mais importantes na indústria automóvel, aeronáutica, elétrica e naval. Para a sua aplicação e estudo existem inúmeras máquinas-ferramenta, oficinas e laboratórios que empregam dezenas de milhões de trabalhadores pelo mundo. Em 2016, a quota de mercado global da indústria da maquinagem era estimada em 5.99 mil milhões de dólares americanos, com expectativa de crescimento para 9.79 mil milhões em 2025 (Industry Report, 2017). Operações como o torneamento, a fresagem e a furação permitem gerar as mais variadas geometrias nos mais diversificados materiais, com excelente acabamento das superfícies, rigor geométrico e dimensional. Além disso, todos os dias são efetuados esforços no avanço das técnicas de maquinagem e novas ferramentas de corte.

Com o passar do tempo, o corte por arranque de apara tem sido objeto de um elevado estudo teórico e experimental através de contribuições científicas. Inúmeros esforços têm sido feitos para descrever este mecanismo de formação de apara, visando uma compreensão geral mais clara dos parâmetros mais influentes no processo. Num passado mais recente, a metodologia baseada em elementos finitos veio substituir os modelos analíticos postulados por Lee and Shaffer (1951) e Merchant (1944), conseguindo estudar o processo com mais precisão. Contudo, o trabalho feito a nível experimental tornou-se mais consistente com o passar do tempo através da utilização de equipamentos mais modernos e robustos, bem como sistemas de aquisição e instrumentação de dados tecnologicamente mais evoluídos.

No entanto, apesar desta evolução, estas contribuições continuam a mostrar evidências de que nenhuma das tentativas de reformular uma solução para o corte por arranque de apara é realmente capaz de representar os dados experimentais para uma vasta gama de materiais em diferentes condições operacionais, indicando que outros fenómenos relacionados com a formação da nova superfície têm de ser tidos em conta.

Um dos fenómenos ainda mal compreendidos no corte por arranque de apara é o atrito na interface de contacto entre a ferramenta e apara. Esta dificuldade está relacionada com alguma falta de precisão e fiabilidade na calibração dos valores experimentais. Esta é a razão pela qual muitos investigadores têm tentado quantificar o atrito através da medição direta das componentes da força de corte, sabendo mesmo assim da existência de contribuições secundárias (fenómenos na aresta de corte, face de saída, entre outros) que influenciam o valor final. Estas contribuições secundárias são em grande parte as responsáveis pela medição de valores de atrito muito acima dos limites teóricos, sendo possível encontrar na literatura da especialidade valores de coeficiente de atrito acima de 1 (Kato et al, 1972; Shirakashi et al, 1973; e Childs, 1990). Todas estas questões em torno da quantificação do atrito têm promovido discussões sobre quais os ensaios ou as técnicas que devem ser utilizadas que permitam reproduzir as condições tribológicas do corte por arranque de apara.

A presente dissertação é motivada pela necessidade em desenvolver uma máquina de ensaios com estabilidade e rigidez suficientes para assegurar a qualidade das medidas experimentais dos principais parâmetros do corte por arranque de apara em condições laboratoriais controladas. O documento está

estruturado em seis capítulos, incluindo a presente introdução. O segundo capítulo apresenta uma breve história da maquinagem ao longo dos tempos e como as máquinas e processos foram evoluindo até aos dias de hoje, bem como o historial de máquinas de ensaios desenvolvidas no Laboratório de Maquinagem e Micro-Fabrico e por fim os fundamentos do corte ortogonal considerados necessários para a compreensão dos resultados experimentais desta investigação. No terceiro capítulo é apresentado o desenvolvimento da máquina de ensaios e a sua integração no aparato experimental onde são descritos todos os componentes estruturais e cinemáticos da máquina de ensaios, bem como os componentes de aquisição e instrumentação de dados. No quarto capítulo são referidos os materiais que foram utilizados, o lubrificante e o plano de ensaios que irá ser efetuado. No quinto capítulo é apresentada a análise dos resultados provenientes dos ensaios, analisando a influência do lubrificante no estudo do corte, avaliando principalmente a diferença das forças envolvidas no processo, bem como a morfologia da apara, entre outros parâmetros. Por último são apresentadas no sexto capítulo as conclusões e perspetivas de trabalhos futuros.

2. Revisão Bibliográfica

Este capítulo apresenta os fundamentos teóricos que serviram de base ao desenvolvimento da presente dissertação. Em primeiro lugar é efetuada uma introdução histórica das máquinas e processos de corte por arranque de apra até à atualidade, realçando a evolução das máquinas-ferramenta ao longo do tempo. Em seguida serão abordados o funcionamento de máquinas-ferramenta de aplainamento e limagem e o historial de desenvolvimento experimental de máquinas de ensaios de corte ortogonal. Por fim serão abordados os fundamentos e princípios teóricos do corte ortogonal que serão aplicados durante a análise de resultados.

2.1. Breve introdução ao processo de maquinagem

Na Idade Média (476 – 1453 d.C.) os artesãos europeus desenvolveram os primeiros tornos com engrenagens (Woodbury, 1961). Uma das suas primeiras utilizações foi no fabrico de veios para rodas das carroças e uma das suas primeiras ilustrações foi encontrada numa janela em Chartres, França, desenhada pelos torneiros locais. Estes torneiros, preferindo estar de pé quando executam o processo, criaram um braço longo de madeira com uma mola de retorno para um pedal. Ao pressionar o pedal, é puxado um cordão que está enrolado no componente de madeira, girando-o, como se apresenta na figura 2.1.

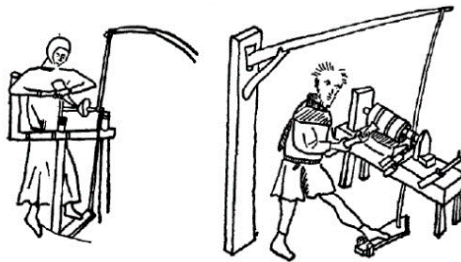


Figura 2.1. Torno a pedal

Uma das dificuldades apresentadas por este torno de pedal era a dificuldade de manter uma rotação linear constante, bem como a fixação do objeto a ser maquinado, recorrendo-se à mão do próprio artesão. Leonardo da Vinci (1452 – 1519) repensou a ideia do torno a pedal, revolucionando este conceito. É em *Codex Atlanticus*, uma coleção de documentos constituído por 12 volumes, reunida pelo escultor e colecionador italiano Pompeo Leoni (1533 – 1608), que se encontram gravuras do trabalho de Leonardo da Vinci na conceção de novas metodologias de tornear, vindo tanto a colmatar o que já se fazia no passado, bem como a introdução de conceitos como o volante, pedal e manivela (Rolt, 1965). A figura 2.2 (a) é descrita como o primeiro mecanismo para o corte de parafusos, podendo fixar componentes ao torno e na figura 2.2 (b) observa-se um torno com uma manivela, que está ligada ao pedal, fornecendo rotação constante. Esta dispõe ainda de um cabeçote ajustável à dimensão da peça a processar (Besson, 1578).

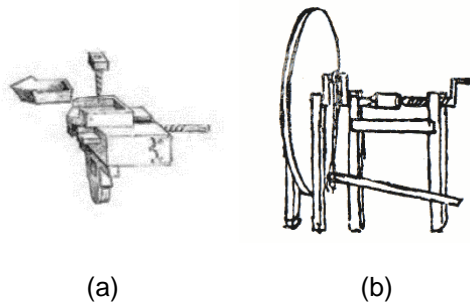


Figura 2.2. (a) Primeiro mecanismo para corte de parafusos; (b) Torno a pedal com manivela.

A primeira máquina-ferramenta de grandes dimensões alimentada externamente que foi desenvolvida na Europa foi uma mandriladora, destinada para furação interior (*boring canon*). Esta máquina encontrava-se descrita num livro publicado em 1540 por Vannoccio Biringuccio (1480 – 1539), artesão oriundo de Sienna (Biringuccio, 1540). Na figura 2.3 (a) podemos observar duas destas máquinas com um moinho de água a alimentar cada uma, com as suas respetivas ferramentas de corte. Esta arquitetura expandiu-se pelo resto da Europa em países como França, Inglaterra, Holanda, Rússia e Escócia nos duzentos anos seguintes (Steeds, 1969). Nesta máquina ilustrada, a ferramenta rodava enquanto a peça mantinha-se imóvel e era alimentada através do moinho. Estas máquinas não tinham rigidez suficiente para o processo de furação, servindo apenas para remover excessos de materiais indesejados provenientes de processos de fundição, como o caso do bronze e ferro fundido.

Foi durante a Revolução Industrial no final do séc. XVIII que se deram grandes avanços com a introdução do motor a vapor na automatização de máquinas para a produção têxtil. A implementação do motor a vapor veio substituir a necessidade de alimentação de máquinas industriais a água através dos moinhos. Foi através de John Wilkinson (1728 – 1808), mestre forjador inglês, depois de tentativas falhadas por outros indivíduos, conseguiu aplicar com sucesso o motor a vapor numa mandriladora (*boring machine*), usando o veio principal da máquina, que contém o cabeçote que suporta a ferramenta, muito mais pesado que no conceito introduzido por Biringuccio (Biringuccio, 1540). Assim, a máquina, inventada em 1775 e apresentada na figura 2.3 (b) e (c), estava suportada nas duas extremidades, o que aumentava consideravelmente a rigidez e precisão, obtendo cortes profundos com alguma precisão, empregando um design básico que foi replicado até ao final do séc. XX (Soldon, 1998).

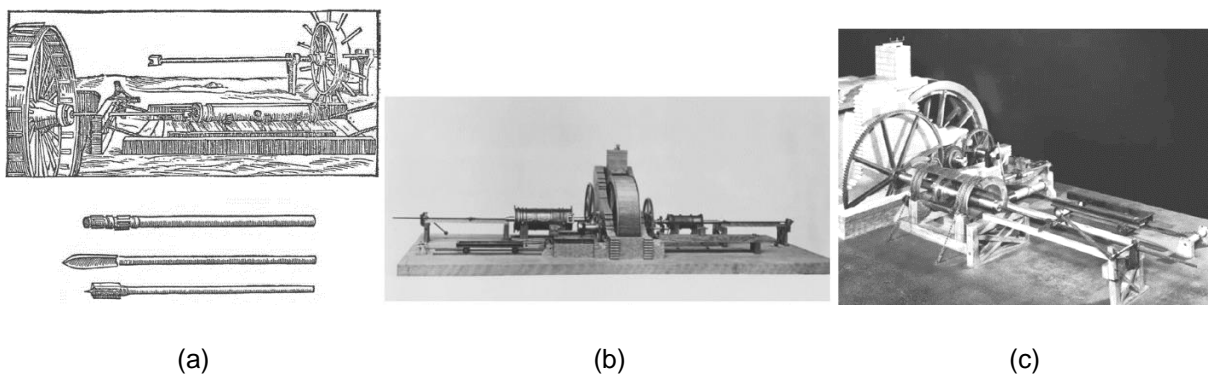


Figura 2.3. (a) Mandriladora e respetivas ferramentas; (b) Visão geral; (c) Detalhe de mesa de trabalho. (de Science & Society Picture Library, Londres)

Henry Maudslay (1771 – 1831), engenheiro e inventor inglês, foi o primeiro a utilizar tornos construídos inteiramente de metal para obter a precisão necessária para poder maquinar ferro e aço (Roe, 1916), como se pode observar na figura 2.4. Este modelo básico iria ser replicado até ao séc. XX, com apenas melhorias na estrutura. Maudsley foi também quem elevou a precisão deste processo de torneamento ao inventar um micrómetro de bancada.

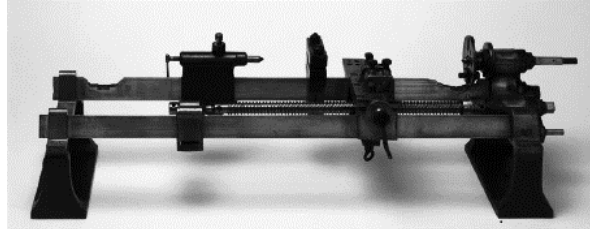
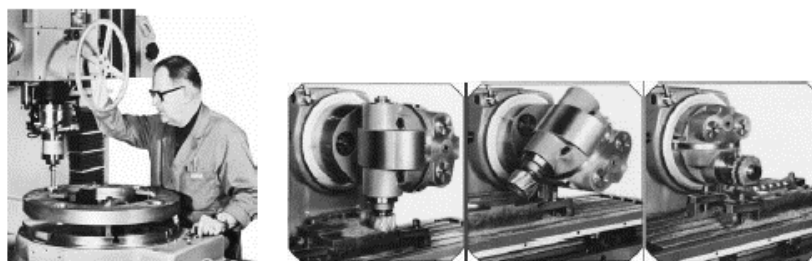


Figura 2.4. O primeiro torno mecânico de Henry Maudslay, datado de 1797. (de Science & Society Picture Library, Londres)

Entre 1860 e 1960, o paradigma sobre as máquinas ferramentas muda: em vez da preocupação no desenvolvimento de máquinas ferramenta e o *know-how* de como maquinar objetos com determinadas geometrias, a atenção começou a recair na problemática de como maquinar diversos materiais e ligas metálicas, bem como a redução dos custos de maquinagem. Foi por volta desta altura que o processo de Bessemer foi desenvolvido. Este processo permitiu a produção em massa de aço a partir de ferro gusa fundido, um produto da redução de minério de ferro pelo carvão num forno (Ponting, 2000), substituindo rapidamente o ferro forjado como matéria prima mais utilizada na indústria. Contudo, o aço provou ser mais difícil de maquinar que o ferro forjado, sendo que as velocidades de corte tinham de ser menores para prolongar o tempo de vida da ferramenta. Foi em 1926 que a empresa alemã *Krupp* iniciou a produção de metais duros, chamando-os de *Widia*, abreviatura alemã de *wie Diamant* (como diamante) (Prosser, 1929), possibilitando elevadas velocidades de corte sem um desgaste acentuado da ferramenta de corte ao maquinar aços, contribuindo para uma maior rentabilidade nos custos de maquinagem. Estas ferramentas de corte expandiram-se além continentes, sendo vendidas nos Estados Unidos com o nome de *Carboly* (Rolt, 1965). Na figura 2.5 podemos observar um técnico a efetuar uma furação num engenho de furar, bem como o detalhe de uma fresadora com um *spindle* multifuncional, após a Segunda Guerra Mundial.



(a)

(b)

Figura 2.5. (a) Operação de furação pós Segunda Guerra Mundial; (b) Fresadora com *spindle* multifuncional.

Com o término da Segunda Guerra Mundial, a indústria aeronáutica começou a estabelecer-se como um mercado importante para as máquinas-ferramenta, sendo que componentes com geometrias complexas começaram a ser uma necessidade para essa indústria. Foi através de uma inovação tecnológica denominada controlo numérico (NC), utilizando informação em suporte digital para o controlo da maquinagem do componente desejado. Em 1952 no M.I.T (*Massachusetts Institute of Technology*), Estados Unidos, foi aplicado um protótipo de controlo numérico a uma máquina-ferramenta, por um grupo de investigadores, que ao efetuaram melhorias no conceito inicial, desenvolveram e demonstraram uma fresadora de fita de papel perfurado (*paper tape*), consistindo numa longa tira de papel com furos perfurados que armazenavam informações (Reinties, 1991). Esta máquina pode ser observada na figura 2.6.

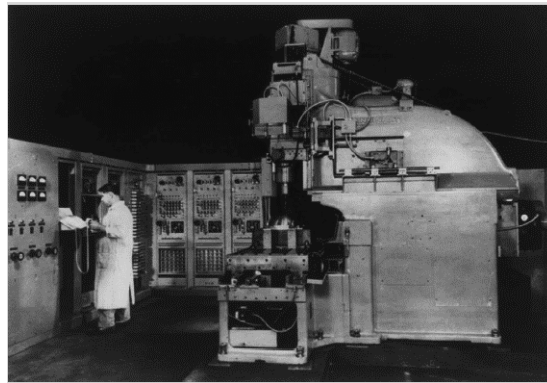


Figura 2.6. Uma das primeiras máquinas-ferramenta: a fresadora de fita perfurada, desenvolvida no M.I.T. A cabine por trás continha o controlador, usando 292 tubos de vácuo e uma frequência de 512 Hz. (de M.I.T. Museum, Cambridge, MA)

Estas máquinas-ferramenta começaram a ser comuns na Europa nos anos sessenta. Os componentes produzidos por estas máquinas inicialmente não eram completamente fiáveis, sendo que ainda assim tinham melhorado largamente em comparação à maquinagem convencional, mas foi com a entrada do CNC, no final dos anos cinquenta, em que a máquina estava equipada com um computador *on-board*, gravando assim as informações num ficheiro informático, ao invés de numa fita perfurada (Noble, 2011). Esta melhoria, que só a começou a ser implementada em larga escala por volta de 1980, conseguiam geometrias e acabamentos superiores aos mais experientes técnicos de maquinagem. Durante a década de setenta, começaram a surgir os primeiros programas de CAD e CAM para ajudar na programação CNC. A evolução do CNC nos dias de hoje, permite-nos máquinas-ferramenta com tecnologia de ponta, assistidas por programas CAD e CAM substancialmente mais avançados que há vinte ou trinta anos atrás, como se pode observar na figura 2.7.

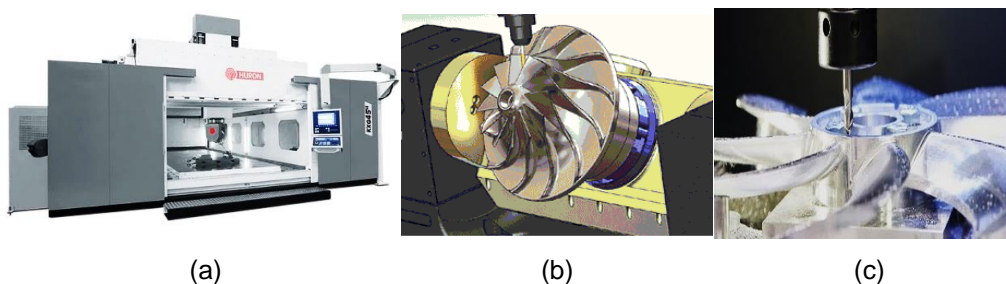


Figura 2.7. (a) Centro de maquinagem CNC atual; (b) Programação CAM; (c) Maquinagem do componente.

2.2. Máquinas para ensaios de corte ortogonal

Esta secção aborda as máquinas-ferramenta de aplainamento e limagem, bem como as máquinas para a realização de ensaios de corte ortogonal.

2.2.1. Máquinas-ferramenta de aplainamento e limagem

A necessidade da obtenção de superfícies planas fez com que no início do séc. XIX fossem desenvolvidas as máquinas-ferramenta limador e plaina. Este tipo de equipamentos produz superfícies planas avançando e recuando continuamente e de forma paralela através uma ferramenta de corte por cima de uma mesa de trabalho, onde se encontra o componente a maquinar. No caso da plaina, a ferramenta mantém-se fixa enquanto a mesa de trabalho se move; no limador, a mesa de trabalho mantém-se estacionária enquanto a ferramenta se move (Roe, 1916). As plainas têm como maior propósito o facejamento de superfícies planas devido ao facto de a mesa de trabalho ter uma massa muito elevada, tornando-se difícil de se movimentar com perfis diferentes usando apenas ciclos de avanço e recuo. Um dos *layouts* mais comuns de plainas é de um artigo publicado por James Naysmith em 1841 (Naysmith, 1841) e apresenta-se na figura 2.8 (a) e (b). No aplainamento, a máquina-ferramenta é constituída por uma base, de elevada massa e rigidez, que contém uma mesa de trabalho, feita normalmente de ferro fundido de elevada qualidade, que com movimentos recíprocos de avanço e recuo, passa por uma ferramenta de corte fixa, maquinando o material. Estas podem ter velocidades de corte entre os 6 e os 15 m/min. As suas dimensões e estrutura permitem maquinar peças de maiores dimensões do que um limador. Estas máquinas podem ser classificadas em dois grandes tipos: plainas abertas, ou de coluna única e plainas de coluna dupla. A plaina de coluna única possui uma única coluna que suporta o *crossrail* (caminho percorrido transversalmente pela ferramenta) onde a ferramenta está montada. Esta configuração permite maquinar peças de largura elevada. A plaina de coluna dupla tem duas colunas, uma em cada lado da base e da mesa de trabalho, que permitem montar mais do que uma ferramenta no *crossrail*. O uso de duas colunas resulta numa estrutura com maior rigidez para o processo, mas limitando a largura da peça que pode ser maquinada. Estas plainas podem ser observadas na figura 2.8 (c) e (d).

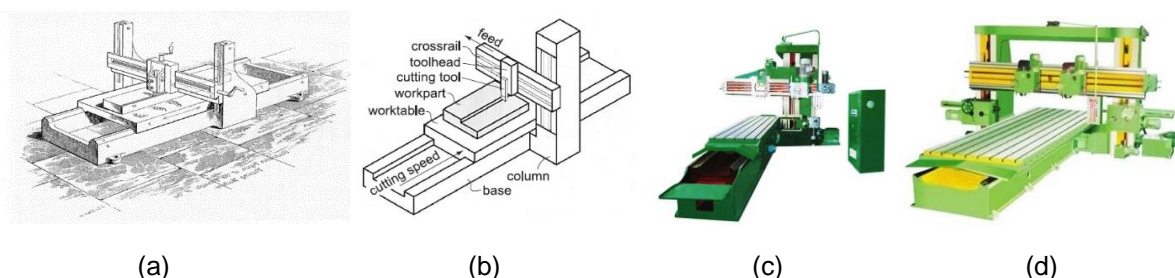


Figura 2.8. (a) Conceito original de plaina típica inglesa (Naysmith, 1841); (b) Esquema simplificado; (c) Plaina aberta Rockford, Belmont Machinery Company, 1967; (d) Plaina de coluna dupla, Maruti Machine Tools, 1990

Os limadores, por outro lado, conseguem adaptar-se para efetuar rasgos ou fendas em componentes como por exemplo chavetas ou rodas dentadas de dentes retos. Um dos primeiros limadores foi desenvolvido por Naysmith por volta de 1836 (Steeds, 1969) e consiste no mecanismo biela-manivela, como mostra a figura 2.9, que se manteria como mecanismo base ao longo do séc. XIX.

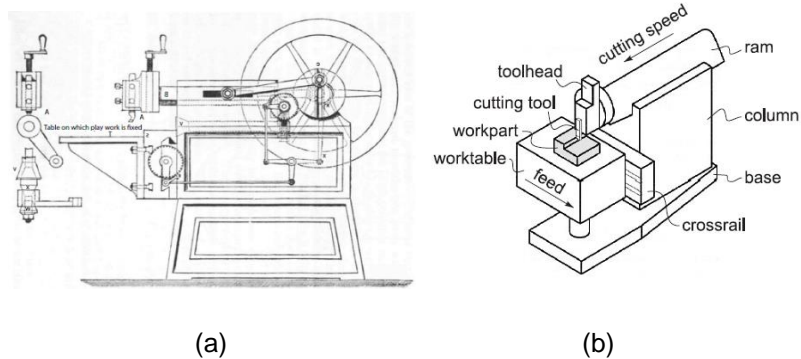


Figura 2.9. (a) Limador de Naysmith, 1836 (Steeds, 1969); (b) Esquema simplificado.

Na figura 2.9 a ferramenta de corte é colocada no dispositivo de fixação montado num cabeçote móvel, avançando com um curso para a frente, cortando o material com uma certa velocidade de avanço, retornando a uma velocidade ainda mais elevada. A velocidade de corte não é, portanto, constante ao longo do corte, aumentando no início do curso e diminuindo gradualmente para zero no fim do curso. A velocidade de corte é assumida como sendo o dobro da velocidade de avanço média do braço (Marinov, 2008).

As grandes diferenças entre estas máquinas residem no facto de que o limador é mais aconselhado para pequenos componentes, ao contrário da plaina que é usada para componentes de dimensões bastante superiores. Outra das diferenças é que no limador apenas uma ferramenta é usada, sendo que a velocidade de corte pode variar numa vasta gama de valores enquanto que na plaina mais do que uma ferramenta pode ser utilizada, mas com velocidades de corte mais limitadas. Estas duas máquinas conseguem maquinar ligas difíceis e aços de alta dureza tais como aços carbono e aços inoxidáveis. A nível de aplicabilidade em componentes, os limadores normalmente são usados para efetuar cortes internos de rodas dentadas, escatéis, chavetas e até ranhuras (figura 2.10 (a), (b), (c)). As plainas têm mais como função facejar componentes como bases de suporte de máquinas-ferramenta, blocos de motor a diesel, perfis quadrados de aço para componentes ferroviários e de construção naval, em geral, componentes maquinados por fundição ou soldadura de grandes dimensões que requerem acabamentos (figura 2.10 (d), (e), (f)).

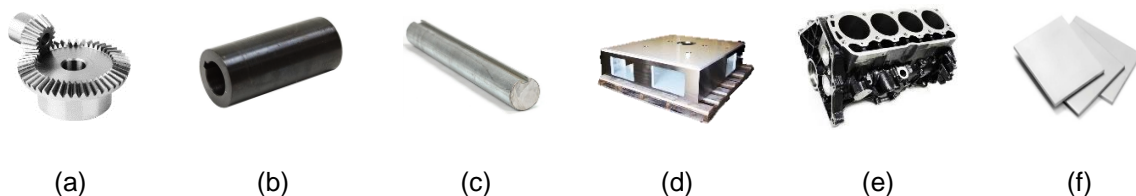


Figura 2.10. (a) Corte em rodas dentadas; (b) Chavetas; (c) Escatéis; (d) Mesa de suporte; (e) Bloco motor diesel; (f) Placas de aço.

2.2.2. Historial de máquinas de ensaios de corte ortogonal

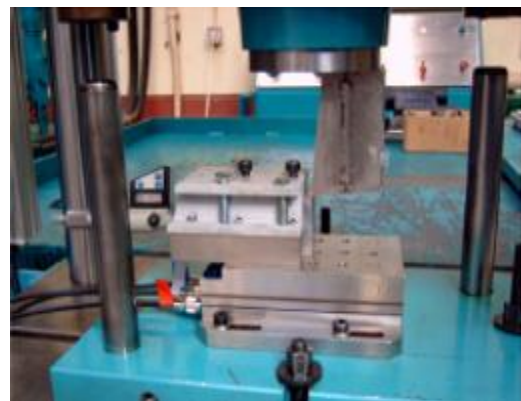
No que diz respeito ao corte ortogonal foram realizadas várias dissertações ao longo dos anos sobre este tema dentro da Área Científica de Tecnologia Mecânica e Gestão Industrial, no Departamento de Engenharia Mecânica, IST.

Para a realização de ensaios de corte ortogonal é necessário que exista uma espécie de aparato, constituído por uma máquina de ensaios e um conjunto de componentes de instrumentação e aquisição, que fazem a conexão entre o ensaio que está a ser executado na máquina-ferramenta e um computador, que nos transmitirá as variáveis ou resultantes destas dos ensaios a decorrer.

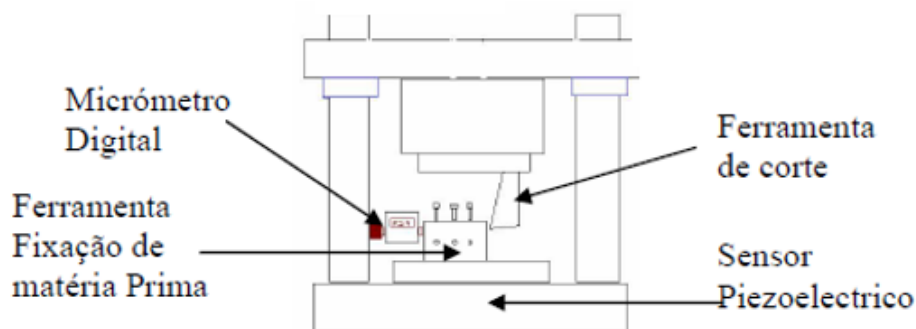
Santos (2005) propôs-se a estudar a influência dos principais parâmetros de corte na geometria da avara, em condições de corte ortogonal com o objetivo de caracterizar a deformação junto à aresta de corte. O material ensaiado foi o chumbo tecnicamente puro (99.9%) com propriedades como densidade de 11.35 g/mm³, dureza de 1.5 Mohs e ponto de fusão de 327.46 °C. Os ensaios de corte por arranque de avara em chumbo foram efetuados no aparato experimental que pode ser observado na figura 2.11. Este aparato tem como objetivo a execução de ensaios de corte ortogonal em regime quase-estático. A prensa hidráulica, de força máxima de 500kN, tem quatro colunas, velocidade continuamente variável e regulável ente os 0 e os 6 m/min, potência de 60 cv (44kW) e curso de trabalho de 300 mm. O controlo desta prensa hidráulica é executado por um controlo de posição numérica que executa programas definidos pelo utilizador automaticamente. Para poder tornar esta prensa num aparato que execute corte ortogonal, Santos (2005) montou uma ferramenta, na mesa de trabalho da prensa, que fixa o provete de matéria prima, conseguindo-o ajustar facilmente através de um micrómetro digital. Foi instalado também um sensor de força piezoelétrico para a medição das forças envolvidas no processo.



(a)



(b)



(c)

Figura 2.11. Aparato experimental desenvolvido por Santos (2005): (a) Prensa hidráulica controlada por computador; (b) Ferramenta de corte, dispositivo de fixação e matéria prima; (c) Desenho esquemático do aparato.

Neste estudo, foram utilizadas ferramentas de corte com ângulos de ataque variáveis (-10° , -5° , 0° , 5° , 10°). A célula de carga piezoelétrica é a Kistler® 9257B, com um intervalo de leitura ± 10 kN e sensibilidade de 7.5 V/pC no canal x e 3.5 V/pC nos canais y e z. Foi também utilizado um amplificador Kistler® type5011B. O sinal assim vai passar pelo amplificador antes de entrar na placa de aquisição de dados da National Instruments®, de modelo NI-PCI-6070E, com 16 canais analógicos a 1.25 MS/s, resolução de 12 bits e gama de voltagem ± 10 . Esta placa irá adquirir a informação servindo de interface entre o sinal obtido experimentalmente e o sinal analisado pelo computador, seja o sinal tanto analógico como digital. Para tal foi utilizado um bloco terminal CB-68LP de 68 terminais aparafusados com 68 pinos (7.6x16.2 cm) e um cabo de ligação R6868 com 68 pinos para ligar ao computador (figura 2.12). O computador irá analisar os dados através do programa *LabView*. Este resultado é depois exportado em ficheiro *.txt*, de fácil leitura e tratamento de dados utilizando o Microsoft® Excel. O deslocamento foi medido através de uma régua de medida linear (transdutor) Balluf *BTL5.-A11-M0500-P-S32*, baseada no princípio da indução.

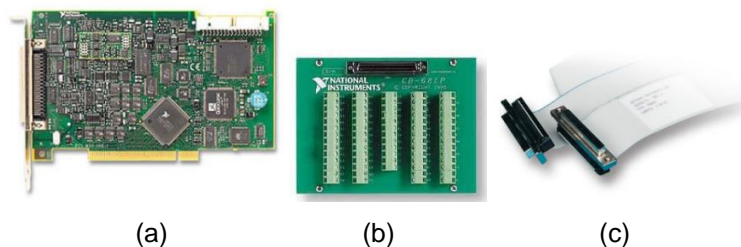


Figura 2.12. Aquisição do processo de corte ortogonal: (a) DAQ; (b) Bloco terminal; (c) Cabo de ligação. (Santos, 2005)

Cristino (2007) estudou o corte por arranque de apara orientado para a avaliação das soluções analíticas do corte ortogonal. Carilho (2007) analisou a força de atrito ao longo da face de ataque da ferramenta no processo de corte. Ambos utilizaram o aparato desenvolvido por Santos (2005) sem nenhuma alteração significativa a nível estrutural e de instrumentação. O esquema mais detalho pode ser consultado na figura 2.13.

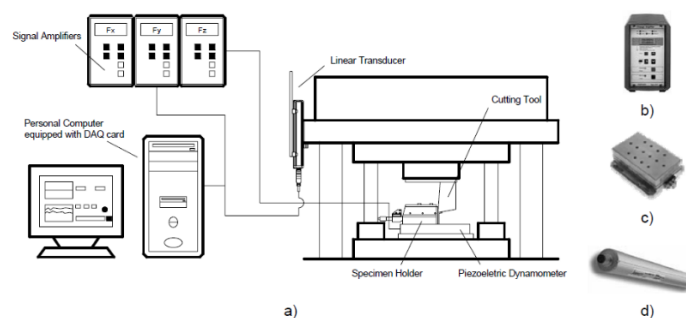


Figura 2.13. Instrumentação utilizada nos ensaios de corte: (a) Esquema utilizado para a instrumentação; (b) Amplificador Kistler 5011B; (c) Célula de carga piezoelétrica Kistler 9257B; (d) Régua de medida linear Balluf *BTL5.-A11-M0500-P-S32*. (Cristino, 2007)

Esmeraldo (2009) investigou a condição tribológica no processo de corte por arranque de apara. Para assegurar os ensaios de corte ortogonal, foi utilizada uma fresadora CNC TRIAC de 3 eixos, composto essencialmente por uma ferramenta de corte, uma célula de carga piezoelétrica e um provete, observável na figura 2.14. As ferramentas de corte tinham todas a mesma geometria (ângulo de ataque

$\alpha=0^\circ$ e ângulo de saída $\sigma=5^\circ$). Tanto a célula de carga utilizada como o amplificador escolhido são idênticos aos referidos em Santos (2005). O deslocamento foi realizado através da programação do código G. Esta máquina permitia velocidades até 1000 mm/min.

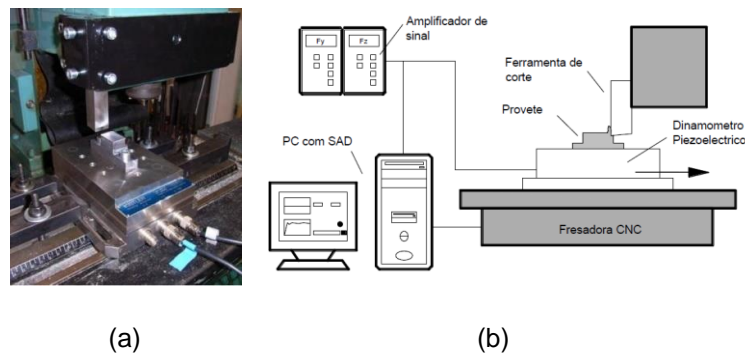


Figura 2.14. Aparato experimental para os ensaios de corte ortogonal: (a) Montagem do aparato; (b) Esquema representativo do aparato. (Esmeraldo, 2009)

Pereira (2009) examinou a influência de vários parâmetros no processo do corte ortogonal. Para tal utilizou o centro de maquinagem *DMG 63V* do fabricante *DMG* disponível no Laboratório de Tecnologia Mecânica. Nesta máquina foi instalada uma célula de carga, uma *DAQ* e um amplificador do mesmo modelo que os descritos anteriormente. Esta máquina tem a capacidade de fazer ensaios com velocidades superiores às máquinas desenvolvidas anteriormente, variando a sua velocidade entre 0.6 m/min até 30m/min, velocidade máxima obtida neste centro de maquinagem, que pode ser observado na figura 2.15. Esta máquina foi usada mais tarde por Cordeiro (2010) para o estudo do corte do alumínio.

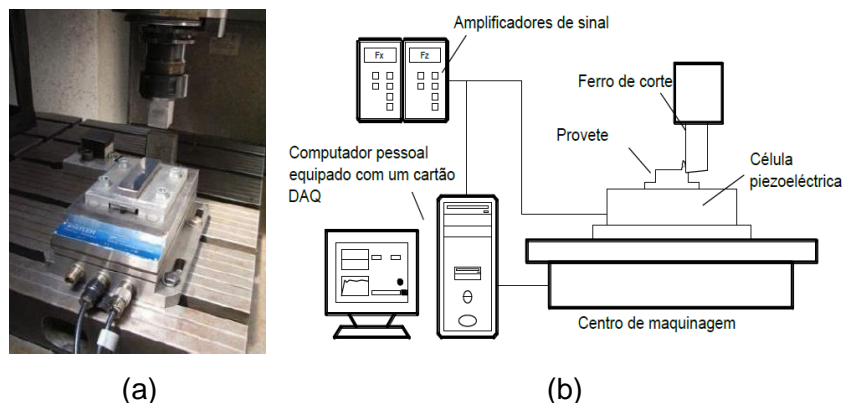


Figura 2.15. (a) Detalhe da mesa de trabalho do aparato experimental; (b) Esquema do aparato experimental. (Pereira, 2009)

Até aqui todos os contributos experimentais na área do corte ortogonal prendiam-se com ensaios em condições de corte quase-estáticas. Foi através de Fernandes (2017) que foi elaborado o primeiro aparato experimental com ensaios em condições de alta velocidade, através de um atuador eletromagnético controlado por cinco condensadores que conseguem armazenar cargas elétricas que iram gerar correntes da ordem dos 400 Volts, possibilitando velocidades adquiridas por Fernandes (2017) de 200 m/min, valor utilizado pelo autor em alguns ensaios de corte.

O aparato consistia numa câmara de controlo de atmosfera fechada, em que lá dentro estavam acoplados os componentes experimentais do ensaio, tais como uma célula de carga, um dispositivo de fixação para o provete, uma guia móvel suportada por dois rolamentos de esferas e um sensor de deslocamento por indução magnética. Esta estrutura era fechada e possuía três furos para alimentação de gás proveniente de botijas. Este aparato pode ser observado nas figuras 2.16 e 2.17.



Figura 2.16. Aparato experimental desenvolvido por Fernandes (2017): (a) Aparato experimental funcional; (b) Máquina de ensaios.

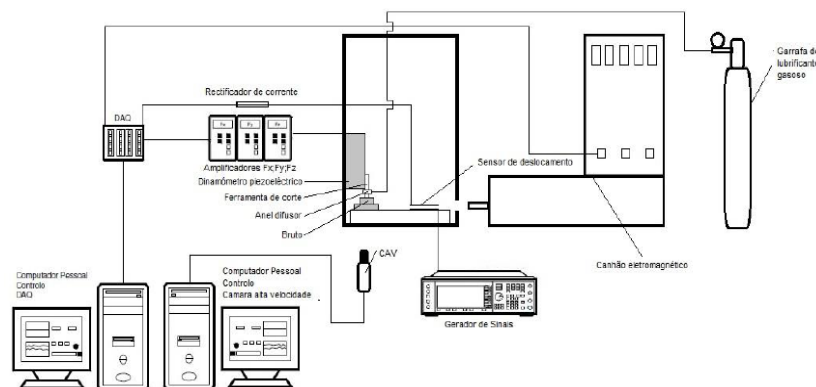


Figura 2.17. Esquema aparato experimental. (Fernandes, 2017)

Este aparato continha um gerador de sinais TTI® TG120 capaz de gerar sinais analógicos, sinusoidais, triangulares, quadrados, etc., com determinada tensão entre valores de 0 e 20 V e uma câmara de alta velocidade (CAV) Basler® acA2000-340km, com captura até 6000 *frames* por segundo e resolução de 2 MP para a observação do processo. Este foi desenvolvido visando o estudo da importância do oxigénio no comportamento tribológico do corte por arranque de apara, utilizando a câmara desenvolvida para controlar uma atmosfera inerte de argón e uma atmosfera ativa de oxigénio no corte de provetes fabricados em AA1050 e chumbo tecnicamente-puro. Mas no caso do corte do alumínio AA1050 foram obtidas algumas inconsistências nos resultados obtidos, parcialmente atribuídas a falhas na conceção da máquina de ensaios, como a sua estrutura não contemplar rigidez suficiente quando sujeita a cargas mais elevadas, sendo detetado posteriormente uma folga no conjunto guia-carro móvel, utilizado como suporte para o provete. Um teste realizado pelo autor ao colocar sucessivos pesos calibrados em cima do conjunto guia-carro móvel, com a ajuda de um relógio comparador, verificou que para uma carga de 28 kg o conjunto guia-carro moveu-se 0.022mm, sendo esta a principal causa da inconsistência dos resultados obtidos nos ensaios em alumínio, refere o autor.

2.3. Corte por arranque de apra

Nesta secção será abordada uma descrição dos mecanismos de formação de apra usando modelos baseados na teoria da plasticidade e tribologia clássica para uma análise e compreensão do corte ortogonal.

2.3.1. Corte Ortogonal

O corte por arranque de apra é um mecanismo de remoção de material que envolve um escoamento plástico tridimensional complexo que torna o estudo do mecanismo de remoção de material difícil de ser compreender na totalidade. Para uma simplificação da aproximação a este problema é considerado o escoamento em condições de deformação plana, representando as componentes vetoriais das forças e o campo de deformações num plano bidimensional (Merchant, 1944). Esta simplificação tem sido largamente utilizada para uma comparação de estimativas teóricas e resultados experimentais.

A figura 2.18 (a) ilustra a operação básica de uma operação de corte de um ponto de vista tridimensional. Após a simplificação introduzida pelo conceito de corte ortogonal, o processo pode ser estudado bidimensionalmente (figura 2.18 (b)), podendo assim descartar várias variáveis, tornando a sua compreensão menos complexa. A ferramenta de corte é caracterizada pela interseção de duas superfícies, sendo que a face de ataque está adjacente com a apra e a face de saída à superfície maquinada. Neste processo de corte existem várias variáveis importantes para a sua compreensão. O ângulo de ataque é uma das mais importantes e define-se como o ângulo diedro do plano da face de ataque com o plano perpendicular à velocidade de corte, passando pela aresta de corte. Esta inclinação denomina-se ângulo de ataque da ferramenta, α , e está representado na figura 2.18 (b). A face de saída não está tão presente no processo para este estudo, apesar de ser importante quando no estudo do desgaste das ferramentas.

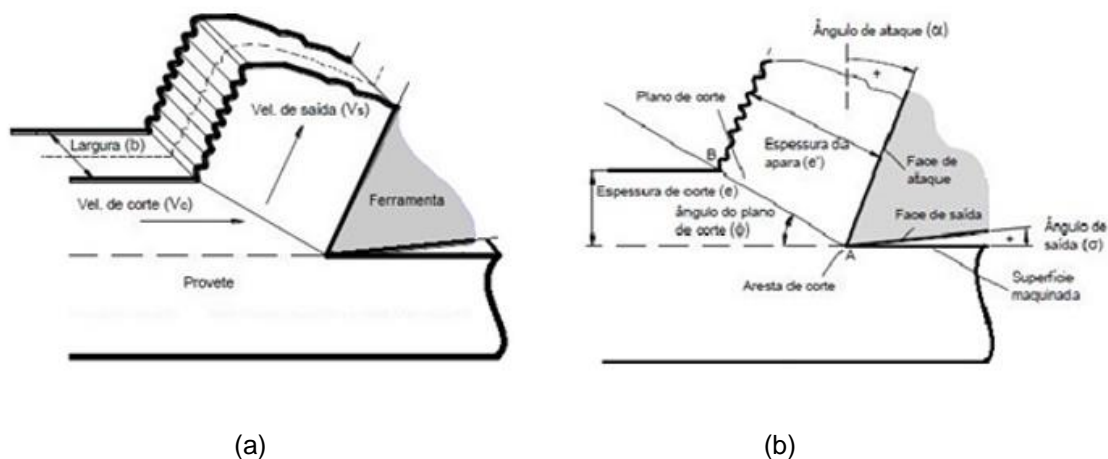


Figura 2.18. Termos usados no corte ortogonal;(a) representação tridimensional do processo, onde podem ser identificadas as velocidades de corte V_c e de saída, V_s ; (b) representação bidimensional, geralmente conhecida como geometria de corte, mostrando as variáveis que influenciam o processo. (Cristino, 2007)

O material removido pela ferramenta tem uma determinada espessura, conhecida como a espessura de corte, e . Outro parâmetro de elevado interesse apresentado na figura 2.18 (b) é a espessura da apra, e' , resultado do corte existente no plano AB, que se compreende entre a aresta até à superfície

de trabalho, com um ângulo ϕ , denominado ângulo de corte. Este ângulo de corte pode ser obtido através da razão de compressão da avara, normalmente denominada por grau de encalque, R_c , permitindo obter analiticamente o valor do ângulo de corte através das seguintes relações:

$$R_c = \frac{e'}{e} = \frac{\overline{AB} \cdot \cos(\phi - \alpha)}{\overline{AB} \cdot \sin(\phi)} = \cot\phi \cos\alpha + \sin\alpha \quad (1)$$

Em função do ângulo de corte ϕ temos que:

$$\phi = \cot^{-1} \left[\frac{R_c - \sin\alpha}{\cos\alpha} \right] \quad (2)$$

Pela condição de incompressibilidade podemos obter a velocidade da avara, V_s :

$$V_s = \frac{V_c}{R_c} \quad (3)$$

Onde V_c é a velocidade de corte que pode ser observada na figura 2.18 (a).

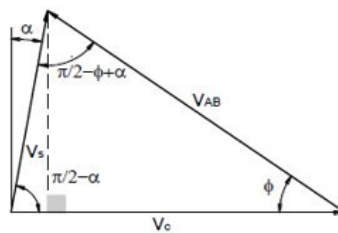


Figura 2.19. Hodógrafo do corte ortogonal. (Cristino, 2007)

A velocidade através do plano de corte, V_{AB} , pode ser obtida através do hodógrafo (figura 2.19) e através da relação dada pela seguinte equação:

$$V_{AB} = V_c \frac{\cos\alpha}{\cos(\phi - \alpha)} \quad (4)$$

Um parâmetro que é usado para avaliar a eficiência do processo de corte é a potência ou pressão específica de corte, K_s , cujas dimensões são iguais às de uma potência por unidade de volume de material cortado por unidade de tempo e também de força por unidade de superfície. Pela seguinte expressão:

$$\frac{W_c}{Z} = \frac{F_c \cdot V_c}{A_0 \cdot V_c} = \frac{F_c}{A_0} = K_s \quad (5)$$

Em que A_0 é secção de corte da avara antes do corte, dada pelo produto da espessura de corte pela largura (figura 2.18).

Através do plano de Mohr é possível demonstrar através da geometria calculada a seguinte expressão para o ângulo do plano de corte ϕ :

$$\phi + \beta - \alpha = \frac{\pi}{4} \quad (6)$$

Uma vez mais, através da geometria obtida no plano de Mohr, é possível calcular o valor da força de corte F_c , considerando que a região ABC está em equilíbrio. Como a superfície BC está livre de tensões, então a força de corte será a força sobre a superfície AC . Demonstra-se, portanto:

$$F_c = k \cdot \overline{AB}(1 + \cot\phi) \quad (7)$$

2.3.3 Formação da Apara

A apara, apesar de não fazer parte do produto final de um componente desejado, é objeto de estudo. Através dos parâmetros operativos do processo de corte, a apara pode ser formada em vários tipos e com diferentes curvaturas.

Zona de corte

Existem três zonas típicas de consumo energético, exemplificadas na seguinte figura:

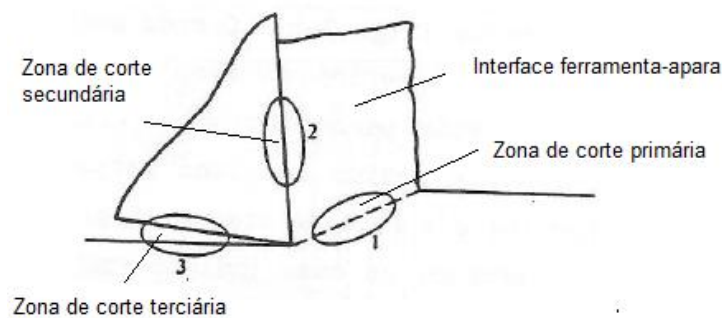


Figura 2.21. Zonas de corte existentes no processo de corte por arranque de apara.

A primeira zona de corte da figura 2.21 é delimitada entre aresta de corte da ferramenta e a superfície do material, contendo as zonas de material antes e após deformação plástica. A segunda zona ocorre ao longo da face de ataque ferramenta, onde é estudado o atrito nessa interface apara-ferramenta. Na terceira zona de corte está geralmente associada ao desgaste da ferramenta, uma vez que a nova superfície maquinada está em contacto com a face de saída da ferramenta.

Modos de formação da apara

Uma apara removida de um material pela ferramenta pode ser classificada em dois tipos: contínua e descontínua. Um processo com uma parametrização, tal como o aumento da velocidade de corte, ângulo de ataque da ferramenta positivo ou uma lubrificação tende a promover a formação de uma apara contínua. Por outro lado, por exemplo, o aumento da espessura de corte ou o uso de materiais frágeis são fatores que tendem a produzir uma apara descontínua, dividindo a apara em pequenos segmentos ou até mesmo ocorrer rotura (Rosenhain, 1925).

Outro fenómeno que pode ser possível de observar é a formação de uma aresta postiça de corte, o chamado fenómeno de apara aderente, que ocorre na face de ataque da ferramenta e é um dos principais fatores na influência da superfície maquinada. Quando esta atinge certas dimensões, é arrancada e escoada ao longo da face de ataque, podendo provocar danos na peça final.

É possível observar na figura 2.22 os modos básicos de formação da apara. Estes modos de formação estão relacionados com propriedades mecânicas e químicas do material, parâmetros de corte e afinidade entre o par apara-ferramenta. Segundo Cristino (2007) é habitual haver uma distinção entre cinco tipos de formação da apara:

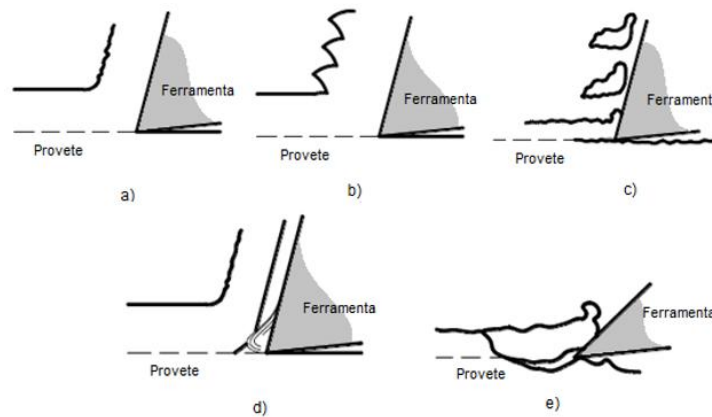


Figura 2.22. Modos básicos de formação da apara; a) apara contínua; b) apara lamelar; c) apara descontínua; d) apara com aresta postiça formada; e) apara com formação de fissura. (Cristino, 2007)

Na figura 2.22 (a) está representada uma apara contínua de espessura constante com uma deformação uniforme. Este tipo de apara está associado a bons acabamentos superficiais e forças de cortes estáveis. No entanto, por vezes, a dimensão da apara pode interferir com o processo, nomeadamente, estando em contacto com a zona de corte provocando danos no componente final. Para estes casos é utilizado uma ferramenta com quebra aparas. Na figura 2.22 (b) a apara é contínua, mas com espessura e grau de deformação não homogêneos. A apara apresentada na figura 2.22 (c) é descontínua e ocorre em condições de elevada deformação ou em presença de materiais frágeis.

A formação da aresta postiça de corte é observável na figura 2.22 (d), um fenómeno indesejado, tal como a formação e propagação de fendas no material, representado na figura 2.22 (e), em que pode ocorrer em materiais frágeis.

2.3.4 Tribologia

A ciência que estuda a mecânica do contacto entre superfícies é denominada tribologia e procura quantificar a dificuldade do escorregamento entre materiais através da utilização do coeficiente de atrito. Porém, as propriedades das superfícies exteriores diferem daquelas do material base e obriga a uma revisão do conceito tradicional de atrito utilizado no corte ortogonal. As condições em que se encontram as superfícies de contacto desempenham um papel importante no corte ortogonal, desde influenciarem o acabamento até à proteção do material da peça contra a corrosão e a abrasão.

Atrito

O atrito é um mecanismo amplamente estudado e resulta da contribuição de diversos fenômenos que se opõem ao movimento entre duas superfícies em contacto, num determinado ambiente. A causa do atrito não é unânime, mas compreende-se que são um conjunto de mecanismos e fenômenos que atuam simultaneamente que o influenciam. Por existirem múltiplos fenômenos, o estudo do atrito torna-se bastante complexo, abrangendo o estudo da física e química das superfícies.

Existem três leis de atrito, com interesse nos processos de corte e de deformação plástica. Essas leis são conhecidas por Lei de Prandtl (teoria da adesão), Lei de Wanheim-Bay (modelo misto) e Lei de Amonton-Coulomb (teoria das asperezas), sendo esta última a que suportará esta investigação.

Lei de Prandtl

Para solucionar as limitações verificadas na lei do atrito de Coulomb, a lei de atrito constante ou simplesmente a lei de Prandtl, assume que a tensão de corte é proporcional à força necessária para que ocorra deformação plástica do material, resultando a seguinte expressão:

$$\tau_f = m \cdot \tau_{m\acute{a}x} = m \cdot k \quad (8)$$

Nesta formulação (8), m representa o fator de atrito ou fator de proporcionalidade e varia de 0 (condições de atrito nulo) a 1 (condições de atrito máximo geralmente com ocorrência do fenômeno de adesão), k corresponde a tensão de corte máxima do material.

Tal como o coeficiente de atrito, o fator de atrito é dependente de parâmetros como a temperatura, a pressão, a velocidade, o meio envolvente e a solubilidade dos materiais envolvidos (Brown e co-autores, 1969). Atendendo que estes parâmetros podem variar ao longo do processo, é de esperar que o coeficiente de atrito varie ao longo da interface de contacto. O uso do valor médio do coeficiente de atrito é razoável para o cálculo de forças, mas pode levar a erros consideráveis quando aplicado para determinar a distribuição de tensão na interface de contacto, conforme descrito por Schey (1983). Igualmente, como no caso da distribuição de tensão, não é correto usar o valor médio do coeficiente de atrito para prever a microestrutura dos materiais envolvidos no processo.

Usando o critério de plasticidade de Von Mises, o coeficiente de atrito máximo é:

$$\mu = \frac{k}{\sigma_e} = \frac{\sigma_e / \sqrt{3}}{\sigma_e} \quad (9)$$

Portanto, o valor do coeficiente de atrito definido pela equação (9) pode ser considerado como o valor limite, isto é, se $\mu \geq 0.577$, não pode existir movimento relativo na interface. A equação (9) mostra ainda que se o coeficiente de atrito na interface entre a avara e a ferramenta de corte é constante, então a razão entre a tensão de corte e a tensão normal é constante ao longo de todo o comprimento de contacto.

Contudo, apesar deste constrangimento teórico para a existência de movimento relativo na interface entre dois corpos, na prática este aspeto nem sempre é verificado. Estudos anteriores realizados por

vários investigadores encontraram valores muito superiores ao limite teórico. Como pode ser observado, os valores de coeficiente de atrito obtido nos processos de corte de metais estão muito acima do valor limite teórico $\mu=0.577$.

Lei de Wanheim-Bay

A teoria de adesão considera que as superfícies são rugosas e possuem vales e picos, assunto abordado em pormenor mais à frente nesta dissertação. O contacto entre dois corpos ocorre apenas em pontos específicos, resultando numa área real de contacto, sendo esta uma fração da área aparente de contacto. Devido a valores reduzidos da área de contacto, a pressão aplicada é frequentemente elevada. Bowden e Tabor (1964) afirmaram que o fenómeno de adesão ocorre nas zonas em contacto e a força necessária para romper esta ligação é a medida de atrito. Analisando a deformação plástica de asperezas de forma isolada, Bowden e Tabor (1964) apresentaram uma explicação teórica para o coeficiente de atrito, na lei de Amonton.

Nas suas primeiras análises, nas quais o efeito da pressão normal foi considerado independente da tensão de corte, o valor máximo obtido para o coeficiente de atrito foi de 0.2. Para alguns metais em condições de atmosfera controlada (p. ex. no vácuo ou aquando da utilização de uma atmosfera inerte) este valor pode aumentar significativamente. Para incorporar este fator, esta teoria foi posteriormente modificada de modo a incluir o efeito combinado entre as tensões de corte e normais bem como o aumento das áreas de contacto, chegando-se à seguinte formulação:

$$\mu = \frac{f}{\sqrt{3(1-f^2)}} \quad (10)$$

Onde f é uma constante que representa a tensão de corte na interface de contacto, sendo que para ligações fortes o seu limite é 1 e reduz-se à medida que a força na ligação diminui. Bay (1985) modificou a equação anterior tendo substituído o valor 3 por β , que representa a percentagem da área da superfície realmente capaz de entrar em contacto com a outra representando-se como:

$$\mu = \frac{f}{\sqrt{\beta(1-f^2)}} \quad (11)$$

Nas teorias de Bowden e Tabor é considerada de forma isolada a deformação de cada impureza. Porém, maioritariamente nos processos de corte e deformação plástica, a pressão na interface entre a peça e a ferramenta é elevada fazendo com que as asperezas se deformem aumentando a área efetiva de contacto. A necessidade de se considerar a interação entre asperezas vizinhas fez com que este problema fosse estudado por Wanheim, Bay e co-autores (1997). Estes estudos foram resumidos por Bay (1985). Considerando a área real de contacto e a deformação plástica das asperezas, o estudo propôs um modelo de atrito que assume que o atrito e a pressão são proporcionais simplesmente até o limite da proporcionalidade:

$$\frac{\tau}{k} = m \cdot \alpha \quad (12)$$

Onde α (que não deve ser confundido com o ângulo de ataque de uma ferramenta de corte) corresponde à relação entre a área real de contacto e a área aparente.

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

A figura 2.23 mostra uma representação esquemática das leis de atrito discutidas anteriormente, apresentando a evolução da tensão de corte em função da pressão normal de contacto para diferentes leis. Verifica-se, no entanto, que para pressões baixas as leis de atrito de Coulomb e Bay confundem-se entre si.

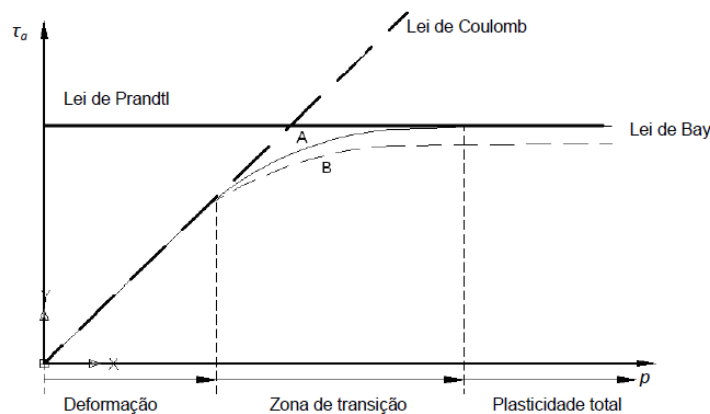


Figura 2.23. Representação esquemática das principais leis de atrito usadas em engenharia, mostrando a tensão de atrito numa interface sólido – sólido, como uma função da pressão normal. São apresentadas duas curvas (A e B) geradas a partir da lei do atrito de Bay.

Lei de Amonton-Coulomb

A lei do atrito de Amonton-Coulomb é baseada em trabalhos desenvolvidos anteriormente por Leonardo da Vinci (1452 - 1519) e Amonton (1663 - 1705). É também denominada como a lei clássica do atrito e é definida por:

$$\mu = \frac{F_T}{F_N} = \frac{\tau_i}{P} \quad (13)$$

Em que através da análise das forças do mecanismo de formação de apar:

$$F_T = F_c * \sin(\alpha) + F_p * \cos(\alpha) \quad (14)$$

$$F_N = F_c * \cos(\alpha) - F_p * \sin(\alpha) \quad (15)$$

Em que μ é o coeficiente de atrito (adimensional), F_N é a força normal à superfície de contacto, F_T , a força resultante do efeito da aplicação da força normal, τ_j a tensão média de corte na superfície de contacto e P a pressão normal de contacto. É possível observar na equação (13) que para o mesmo coeficiente de atrito, a tensão de corte aumenta proporcionalmente à pressão de contacto.

Esta equação (13) apenas é válida para baixas pressões de acordo com a teoria da plasticidade (Ali, 2001), dado que valores de pressão elevados são atingidos em certos processos de deformação plástica, superando os valores da tensão de corte, o que se traduz em gripagem das superfícies.

Contribuição dos óxidos superficiais no coeficiente de atrito

O atrito entre duas superfícies é considerado como uma interação do tipo metal-metal, óxido-metal e óxido-óxido. O conjunto metal-metal é a combinação tribológica, normalmente mais estudada, em que apenas as propriedades dos materiais serão levadas em consideração no comportamento do atrito. Quando estudamos os dois últimos pares de casos, as características dos óxidos poderão influenciar o comportamento do atrito, já que as suas propriedades são diferentes do material do metal base (Winer et al, 1980). É no par metal-metal que a lubrificação pode representar um papel importante na inibição da oxidação de superfícies recém geradas, conduzindo a um menor desgaste das ferramentas de corte e a um menor consumo energético nos processos industriais.

Lubrificação

A lubrificação pode ser definida como a redução do atrito entre duas superfícies através da redução do nível de interação existente entre as asperezas (Myers, 1999). Estes mecanismos de redução do atrito entre duas superfícies podem ser divididos em quatro mecanismos (Myers, 1999); (i) regime hidrodinâmico, quando um lubrificante de camada relativa espessa reduz o contacto direto entre as superfícies em movimento reduzindo o atrito; (ii) regime elasto-hidrodinâmico, em que uma camada muito fina de lubrificante sobre altas pressões localizadas faz com que o lubrificante ative as suas propriedades evitando o contacto direto entre as asperezas; (iii) camada limite, onde a ação do lubrificante é devido à existência de uma película mono molecular adsorvida em um ou ambos os sólidos com o intuito de reduzir as forças de adesão atuadas nos pontos de contacto; (iv) lubrificação química, onde o lubrificante enfraquece ou destrói as ligações soldadas das asperezas por meio de ataque químico.

Um lubrificante pode existir sob a forma de substância sólida, líquida ou gasosa e é através deste combinado com as propriedades das superfícies em contacto dos materiais que reside a dependência do atrito. Se as superfícies dos materiais não se tocam, o coeficiente de atrito aí dependerá fundamentalmente das propriedades do lubrificante.

3. Desenvolvimento da Máquina de Ensaios

Neste capítulo é apresentado o aparato experimental, onde são abordados os principais desafios encontrados e soluções adaptadas ao longo da elaboração deste.

3.1. Estrutura e cadeia cinemática

A máquina de ensaios foi desenvolvida visando uma elevada rigidez e estabilidade, tendo sido construída a partir de uma placa de aço CK45, aço comum na indústria, com medidas de 2000x300 mm e encontra-se atualmente no LabM3. A máquina de ensaios desenhada pode ser observada em detalhe na figura 3.1.

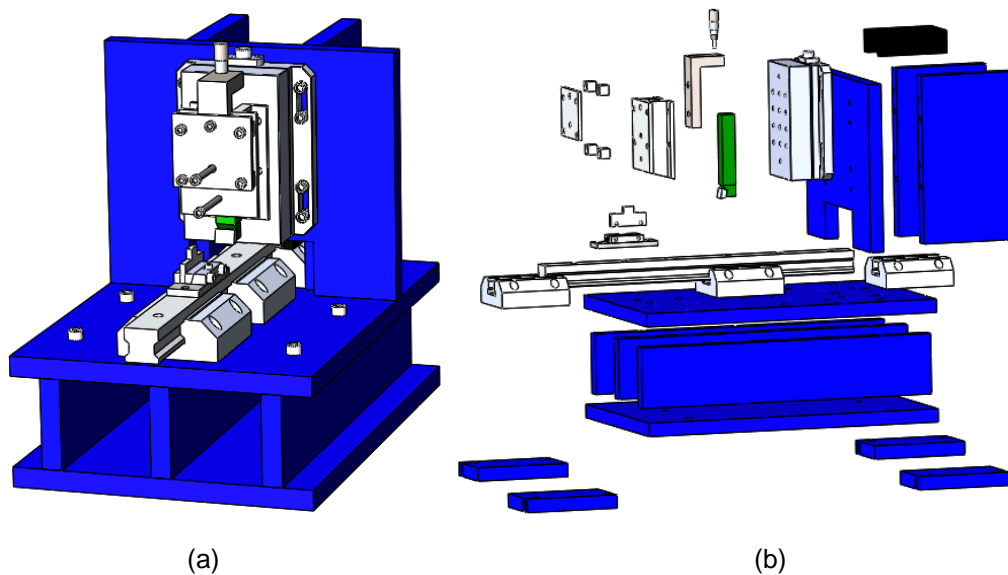


Figura 3.1. CAD da máquina de ensaios montada: (a) Vista geral; (b) Vista explodida.

Na figura 3.2 é mostrada a máquina de ensaios desenvolvida. Esta máquina de ensaios é constituída por um conjunto de 8 placas de aço maquinadas com a dimensão desejada. Para garantir uma rigidez elevada foram efetuadas perto de 40 ligações aparafusadas entre todas estas placas (ver anexo VII). Além destas 8 placas, foram ainda dimensionadas mais 4 placas de menor dimensão que servem para “prender” a máquina de ensaios à estrutura que a suporta (ver anexo VII). O facto desta máquina de ensaios conter um elevado número de ligações aparafusadas possibilita futuras adaptações ou modificações. Para realizar ensaios de corte ortogonal montaram-se 3 rolamentos de esferas lineares, alinhados entre si, que irão suportar e direccionar uma guia (conjunto guia-carro móvel) que irá por sua vez também suportar um dispositivo de fixação de provetes, bem como uma das bobines que nos traduziram o deslocamento efetuado por esta guia. A colocação do terceiro rolamento de esferas reforça o alinhamento da guia promovendo ainda uma maior rigidez desta ao deslocar-se, garantindo assim um constrangimento maior.



(a)

(b)

Figura 3.2. (a) Estrutura; (b) Cinemática da máquina de ensaios.

A guia, feita de aço, é atuada por um motor linear eletromagnético, através de um sistema elétrico constituído por um *VARIAC*, que recebe um determinado valor de corrente e através de um reóstato converte essa corrente num valor pretendido que será acumulado nos condensadores para posterior uso no processo. Os condensadores descarregam quando o acionador é ligado (figura 3.3).



(a)



(b)



(c)

Figura 3.3. (a) Acionador; (b) *VARIAC*; (c) Condensadores.

A célula de carga está fixa na placa vertical central e permite medir as forças de corte e penetração aplicadas na ferramenta de corte. O corte é realizado quando a guia se move em direção à ferramenta de corte, cortando uma porção do material com determinada força e velocidade, que irá ser reconhecida e registada pela célula de carga e instantaneamente lida pela placa de aquisição de dados, através do software *LabView*, que apresentará estes valores para o utilizador. Os restantes componentes de instrumentação e aquisição, incluindo a placa de aquisição de dados, estão todos alocados dentro de um carrinho móvel com um interruptor que corta a corrente fornecida ao sistema, em caso de emergência, e uma fonte *UPS* caso exista alguma falha no sistema elétrico do edifício (figura 3.4).

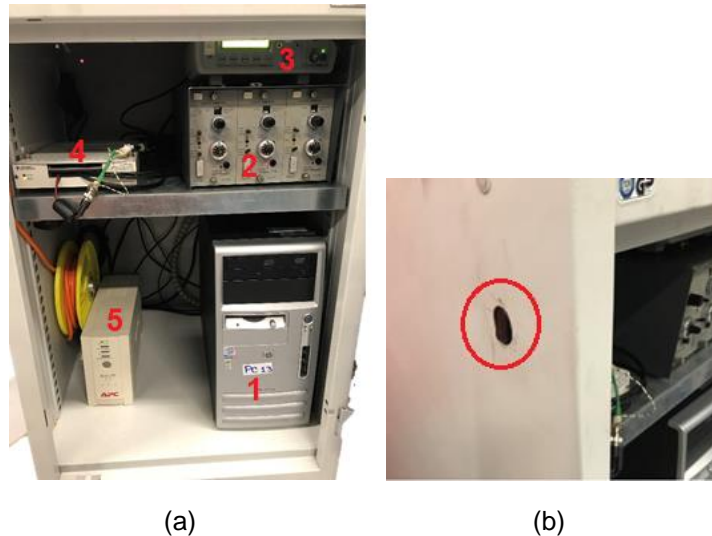


Figura 3.4. (a) Componentes no interior do carrinho móvel: 1-Computador; 2-Amplificador; 3-Gerador de sinais; 4-DAQ; 5-UPS; (b) Interruptor de emergência.

3.2. Verificação da máquina de ensaios

Esta máquina de ensaios foi verificada ao nível da sua rigidez do sistema de guiamento onde se encontra o provete, bem como à rigidez da sua própria estrutura. Numa primeira aproximação, não apresenta influências de empeno ou momento provenientes de desalinhos ou descentramentos dos componentes. Esta foi desenvolvida sempre a pensar na altura do atuador eletromagnético, pois a posição deste é inamovível, daí o desenvolvimento de placas que serviram para elevar a altura da própria máquina, não esquecendo um alinhamento entre guia e atuador o mais rigoroso possível. Os apoios de rolamentos estão alinhados em relação ao centro da máquina. A célula de carga encontra-se numa posição central em relação à placa vertical, fixando a ferramenta numa posição o mais central possível. A aproximação entre o projeto modelado em software e o componente estrutural físico final obtido em laboratório é bastante satisfatória, não apresentando dificuldades relevantes que tornassem esta comparação díspar.

3.2.1. Verificação da rigidez estática da cadeia cinemática

Para uma verificação da rigidez do sistema que guia o provete, foi efetuado um teste antes da montagem para a confirmação da rigidez do sistema quanto à inexistência de folgas. À imagem de Fernandes (2017) foram colocados sucessivos pesos calibrados de 4.5 kg cada um até atingir um total 22.5 kg (5 pesos calibrados) e com ajuda do relógio comparador, foi observada uma folga inferior a 1 μm , sendo que o ponteiro praticamente não se deslocou durante este teste, como se pode observar na figura 3.5. O movimento da guia é promovido com facilidade derivado ao seu alinhamento com actuador electromagnético.

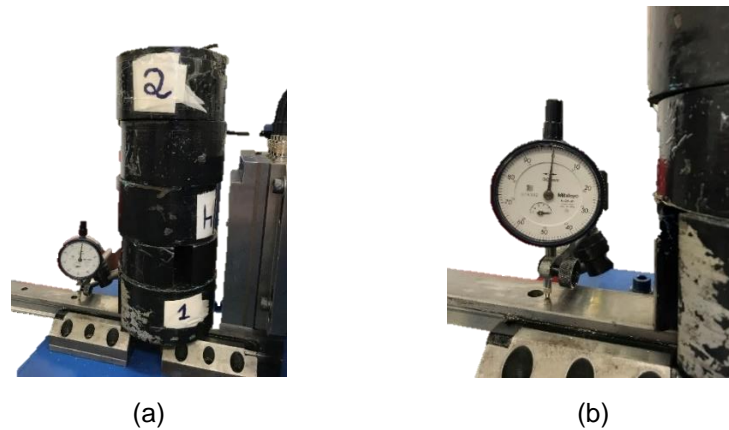


Figura 3.5. (a) Teste com pesos calibrados no conjunto guia-carro móvel; (b) Detalho relógio comparador

3.2.2. Dimensionamento da rigidez da estrutura

Além do sistema de guiamento, também a estrutura terá de ser validada quanto à sua rigidez. Para tal foi calculada a rigidez através das ligações aparafusadas. Esta máquina de ensaios conta com várias ligações aparafusadas na sua estrutura. No total, existem 42 ligações que promovem a união das placas de aço entre si. Dentro destas ligações, existem placas que apenas estão sujeitas à rigidez dos parafusos sem influência das forças externas, em que a rigidez promovida nessas ligações depende exclusivamente do tipo de parafuso e material da placa. Em outros casos, como a placa central vertical que sustenta o sistema composto por célula de carga, dispositivo de fixação da ferramenta e própria ferramenta, existe uma influência direta da força de corte nos parafusos que tanto sustentam o sistema acima descrito, bem como os parafusos que ligam as placas entre si, como demonstra as figuras 3.6 e 3.7. Em ambas as figuras estão cotadas as distâncias desde o centro do parafuso até ao ponto de aplicação da força. Serão estes os parafusos com mais foco neste estudo.

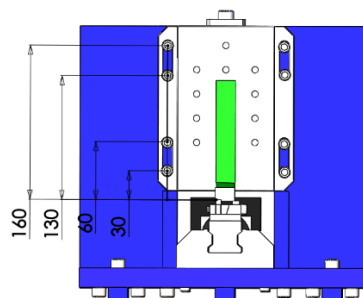


Figura 3.6. Ligações aparafusadas na placa central vertical de apoio à célula de carga e sistema de fixação.

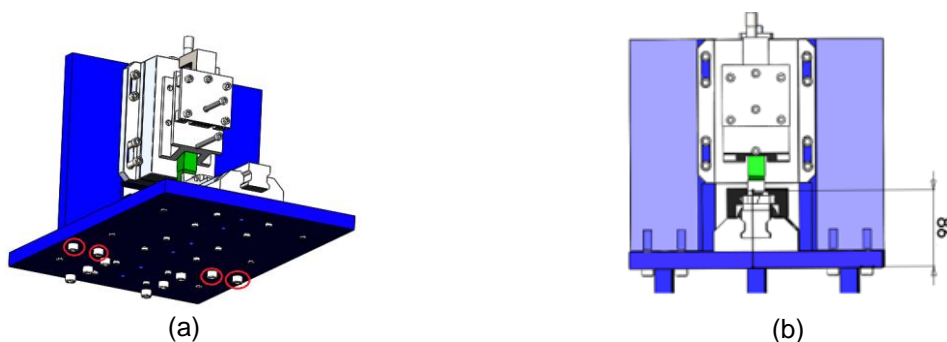


Figura 3.7. a) Detalhe das ligações aparafusadas inferiores; b) Distância das ligações aparafusadas ao ponto de aplicação da força.

Sendo que a finalidade desta máquina de ensaios sempre primou pela elevada rigidez, foram escolhidos parafusos M8 e M10, de cabeça de bocal hexagonal, para este desenvolvimento experimental. Na figura 3.6, os parafusos que sustentam o sistema são do tipo M8, pois adequavam-se ao rasgo da célula de carga, sendo que um diâmetro maior já faria com que houvesse um embarramento nas paredes do rasgo. Na figura 3.7, os parafusos escolhidos são do tipo M10. Esta escolha foi pensada para não comprometer a máquina a esforços de valor inesperado, tendo a noção que com este tipo de parafuso será certamente assegurada uma rigidez para além dos valores de forças envolvidos nos processos da presente dissertação. As dimensões dos parafusos escolhidos encontram-se descritas em anexo (ver anexo VI). Estes parafusos são de classe 8.8 e as suas propriedades estão também descritas no anexo VI.

Analisando as forças envolvidas nos ensaios da presente dissertação, a força máxima lida pela célula de carga encontra-se na ordem dos 700 N, para uma certa velocidade e espessura de corte. Recorrendo às fórmulas no anexo VI, é apresentada na seguinte tabela os valores usados no cálculo:

Tabela 3.1. Variáveis presentes na análise da rigidez da estrutura para ambas as dimensões das ligações para uma força de aplicação de 700 N.

	Parafuso M8	Parafuso M10
Carga de prova F_p (N)	21960	34800
Pré-Carga F_i (N)	16470	26100
Força direta aplicada ao parafuso $F_{parafuso}$ (N)	62,5	125
Força indireta aplicada no parafuso $F'_{parafuso} = F_{sep}$ (N)	0,85	2,27
Força resultante no parafuso $F_{resultante} = F_{corte}$ (N)	63,35	127,27
Rigidez efetiva estimada do parafuso k_b (N/m)	1,92*10E8	3,02*10E8
Rigidez efetiva dos membros k_m (N/m)	1,27*10E9	1,69*10E9
Constante da rigidez de ligação C	0,131	0,152
Fator de resistência do parafuso n_p	49303,99	24411,45
Fator de separação n_{sep}	22297,43	13558,7
Fator de corte n_{corte}	51,99	41,01
Fator global n_{global}	51,87	40,9
Elongamento δ da ligação aparafusada (mm)	5,82*10E-7	1,14*10E-6

Olhando para a figura 1.a) e 1.b) do anexo VI é possível chegar a um coeficiente geral de segurança de um determinado projeto através do método de Pugsley. Este coeficiente ditará se os coeficientes calculados em cima estão dentro das normas de segurança para o projeto. Definindo cada uma das variáveis A, B, C, D e E obtemos um coeficiente de Pugsley teórico de $n = 1,75$, o que nos diz que com base numa força máxima de 700 N no processo não haverá qualquer risco de as ligações aparafusadas cederem. Dado que a célula de carga utilizada neste processo consegue processar cargas até 10000 N, foi efetuado um estudo de rigidez até esses valores de carga aplicada, descrito na figura 3.8. É possível observar pelo gráfico que se existirem forças envolventes no processo na ordem do limite adquirido pela célula de carga, as ligações aparafusadas não iram ceder teoricamente, apresentando alongamentos na ordem dos $1,2 \cdot 10^{-6}$ mm para ligações M8 e $2,3 \cdot 10^{-6}$ para ligações M10.

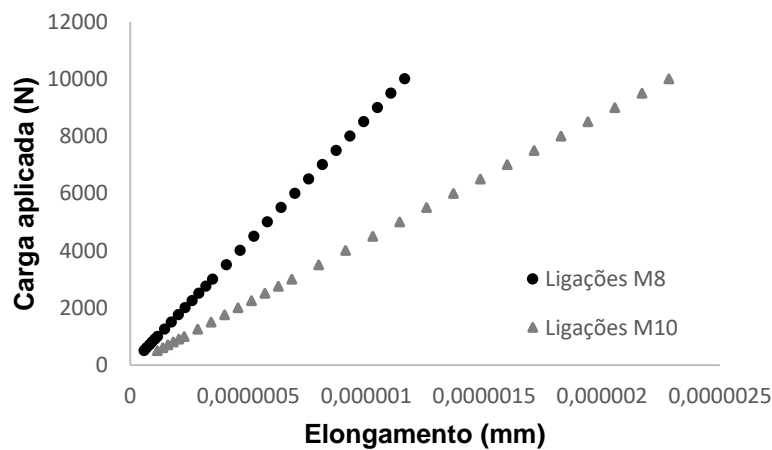


Figura 3.8. Relação entre a carga aplicada e o alongamento da ligação aparafusada para ambas as dimensões

3.3. Instrumentação e aquisição de dados

Nesta secção serão abordados os componentes escolhidos para a instrumentação e aquisição de dados dos ensaios.

3.3.1. Força

Célula de carga

Para a medição das forças envolvidas no processo foi utilizada uma célula de carga (piezoelétrica) da marca Kistler® e de modelo 9257A (figura 3.9). Este sensor é composto de substâncias como o quartzo que têm a característica de se polarizarem quando comprimidas, um fenómeno que é reversível, podendo ser integrado em sensores de força ou vibração (Holler et al., 2007). A sua grande vantagem prende-se com a durabilidade e resistência dos elementos de quartzo às cargas aplicadas sem afetar a precisão de medida. Mais especificamente, quando uma pressão é aplicada a um cristal polarizado, a deformação mecânica resulta numa carga elétrica. Quando este é calibrado, normalmente não requer nenhuma recalibração até ao resto do seu tempo útil de funcionamento. Esta célula foi escolhida considerando a sua funcionalidade e estabilidade, bem como a sua compatibilidade geométrica com a estrutura da máquina de ensaios. Esta célula tem uma massa de 7,4 kg, uma gama de leitura de valores de +/- 5000N nas direções x e y e +/- 10000N na direção z.

Esta célula de carga tem também como vantagem o facto de a zona útil da ferramenta de corte poder estar posicionada fora da área real desta até 25 mm sem haver influência direta na leitura das forças (Kistler, 2009).



Figura 3.9. Célula de carga Kistler® 9257A.

Amplificação

Por vezes os sensores geram sinais de baixa voltagem para serem medidos diretamente numa DAQ, tendo assim que condicionar o sinal para uma aquisição de dados eficaz. A quantidade de amplificação fornecida por um amplificador é medida pelo seu ganho, a relação da tensão de saída, corrente ou potência com a respetiva entrada (Agarwal et al., 2005). O amplificador escolhido será um conjunto de três amplificadores da marca Kistler® Type 5007 (figura 3.10 (c)), apropriados ao uso da célula de carga anterior descrita (Kistler, 2009). Este conjunto de amplificadores têm uma sensibilidade do transdutor regulável, T , que neste caso tendo em conta a ficha técnica da célula de carga Kistler® 9257 tem para a direção x , y e z tem respetivamente: $T_x=T_y=7,5$ pC/N e $T_z=3,7$ pC/N. Para a escala de amplificação foi usado o valor de $S=1000$ para os canais de y e z , já que o canal x não será ativado. Por fim a constante de tempo será $TC= LONG$.

Após a parametrização do amplificador será feita uma calibração da célula de carga de modo a verificar se os valores introduzidos para a sensibilidade do transdutor, bem como a sua escala, se encontram adequados para a realização do plano de ensaios. Foram feitas duas calibrações: uma para a direção y e outra para a direção z . Em ambos os casos foram colocados sucessivamente pesos calibrados de massa conhecida de valor 4,5 kg, sendo que para calibrar na direção z a célula de carga encontrava-se assente numa estrutura de elevada massa e rigidez enquanto os pesos foram colocados na área útil da célula de carga. Já na calibração na direção y a célula encontra-se montada na sua posição final e, através de um conjunto de fusos roscados à superfície da célula de carga, os pesos serão “empilhados” tendo por base de suporte esses mesmos fusos. Foi concluído que para ambas as calibrações bastaram três pesos calibrados, num total de 13,5 kg, para aferir o comportamento linear da célula de carga, como se pode observar nos gráficos das figuras 3.10 (a) e (b). Estes valores apresentados no gráfico estão assim dentro da gama de aquisição compatível pela placa de +/- 5 volts.

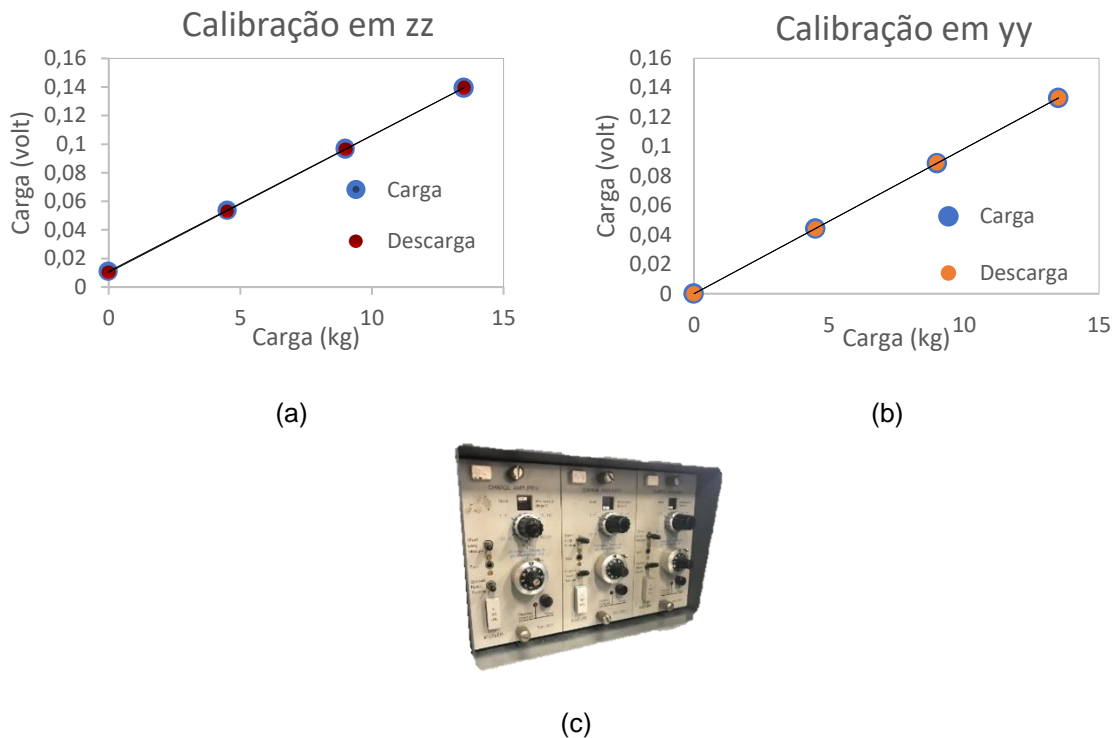


Figura 3.10. (a) Gráfico representativo da calibração em zz de massa em função da voltagem traduzida pela célula de carga.; (b) Gráfico representativo da calibração em yy de massa em função da voltagem traduzida pela célula de carga; (c) Amplificador Kistler® Type 5007.

3.3.2. Deslocamento

Para um melhor entendimento do mecanismo de formação da avara, a monitorização das forças de corte com o deslocamento é indispensável quando estão a ser estudadas as forças envolvidas no corte ortogonal, tanto como no cálculo do trabalho realizado pela força, bem como na criação de gráficos de força-deslocamento para uma melhor interpretação do processo em si. Para tal será necessário introduzir um sensor de deslocamento. Ao analisar os tipos de sensores mais comuns utilizados neste tipo de processos deparamo-nos com dois tipos: sensores resistivos, como por exemplo um potenciômetro linear, aos quais existem uma grande variedade a nível comercial, ou sensores indutivos, que têm por base a indução magnética, que apresentam a vantagem de não necessitarem de contacto físico entre si, minimizando o desgaste dos componentes e estão menos sensíveis a ruídos mecânicos ou elétricos. Optou-se pelo fabrico de um sensor indutivo, composto por duas bobines, uma indutora e outra recetora, que pela passagem de corrente elétrica irá produzir um campo magnético, variável, dependendo da posição entre elas.

Após a escolha do tipo de sensor a ser utilizado resta definir a sua geometria. Para tal recorreu-se ao trabalho desenvolvido por Fernandes (2017), optando-se por bobines planas a partir de placas de circuito impresso. O autor efetuou um desenho que posteriormente foi impresso numa folha de acetato e em seguida exposto a radiação violeta durante alguns minutos. Depois foi mergulhada a placa num ácido fosfórico, para de seguida ser mergulhada numa solução de percloroato de ferro para remover partículas de cobre em excesso. Assim há uma proteção do desenho inserido na placa. Esta geometria promove um paralelismo entre os sensores com uma distância entre si sempre constante.

As bobines têm dimensões de 90x20 mm e possuem quatro espiras de 1 mm e 1,5 mm de espaçamento entre elas. A bobine indutora será a que irá ser colocada solidariamente com a guia (móvel), enquanto a bobine recetora irá permanecer estática num suporte desenhado especialmente para a sua fixação (figura 3.11). Devido a pontos de soldadura que tiveram de ser necessariamente efetuados para ligações de cabos às bobines, estas para não haver contacto entre ligações, tiveram de ser colocadas com uma distância entre si de 2 mm.

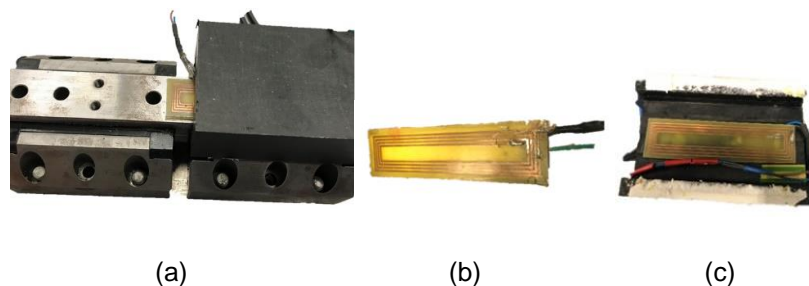


Figura 3.11. (a) Conjunto guia-carro móvel com as bobines; (b) Bobine indutora fixa á guia móvel; (c) Bobine recetora fixa ao suporte.

Calibração de sensores

Foram efetuadas várias calibrações para encontrar a zona linear de funcionamento deste sensor. Para isso foi integrada na guia para este motivo (e não só) uma pequena régua de 100mm para comparação com uma escala física e ocularmente fácil de relacionar com o movimento do sensor, acompanhado de um “marcador” para saber a distância à medida que a guia se move. As bobines, durante a calibração, foram posicionadas com incrementos de 5 mm, tendo sido monitorizada a sua resposta elétrica em tensão. Foram feitas várias tentativas de calibração para ambas as condições de velocidade dado que para cada uma destas condições são gerados sinais elétricos de valor de frequência (3MHz para regime quase-estático e 0,7MHz para alta velocidade). Em ambos os casos observa-se que existe uma zona linear nos 35 mm de distância entre as bobines, pois nas extremidades (primeiros e últimos 5 mm) não geram um campo eletromagnético de perfil linear. Para cada uma das calibrações existe uma distância máxima a que as bobines podem estar entre elas para a geração de um campo eletromagnético. Estas calibrações estão representadas na figura 3.12 e foram efetuadas várias vezes para cada uma das condições de velocidade até achar concordância e repetibilidade dos valores entre si.

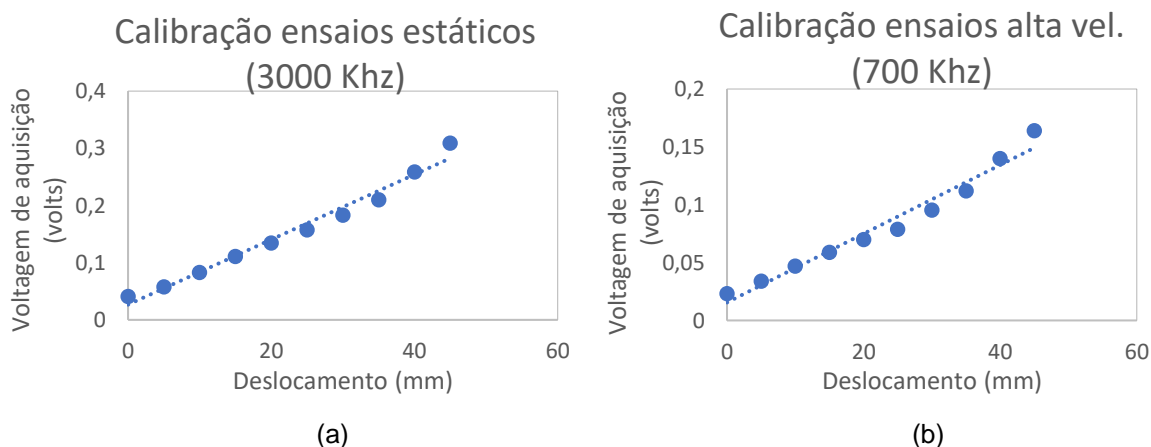


Figura 3.12. (a) Gráfico de deslocamento em função da voltagem da calibração de ensaios quase-estáticos; (b) Gráfico de deslocamento em função da voltagem da calibração de ensaios de alta velocidade.

Retificador de onda

A placa de aquisição de dados apenas lê sinais em corrente contínua (DC) e dado este entrave, foi necessário criar um retificador de corrente para converter o sinal de AC para DC. Foi dimensionada uma ponte de díodos com condensador e resistência em paralelo, esquematizado na figura 3.13.

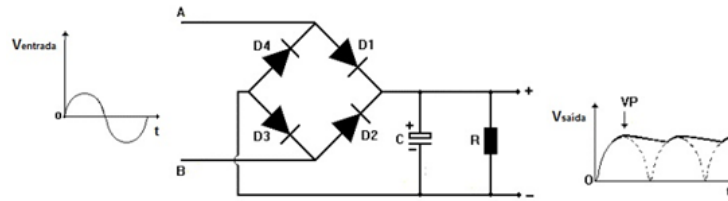


Figura 3.13. Circuito elétrico de uma ponte retificadora, com indicação do tipo de sinal à entrada e à saída.

A ponte de díodos usada, com terminais de silício, constituída por 4 díodos D1 a D4, foi escolhida por base no trabalho desenvolvido por Marques (2016). Esta ponte quando recebe o sinal alterado do gerador AC constituído por um sinal sinusoidal converte-o num sinal contínuo estabilizando devido à integração de um condensador neste circuito elétrico. A dificuldade da conceção deste circuito prende-se com a conjugação entre a ponte de díodos e o condensador para que à saída apresente um sinal suave com um tempo de resposta rápida.

Numa primeira aproximação ao desenvolvimento deste componente, utilizou-se um condensador de 100nF e uma resistência para proteger o sistema de eventuais sobrecargas. A sua utilização para a realização de ensaios de alta velocidade mostrou a necessidade de substituir o condensador por outro de capacidade de 1,2nF, com uma ponte de díodos igual à do primeiro retificador, tornando o sistema mais rápido a responder (figura 3.14). Nesta última ponte retificadora não existiu a necessidade da inclusão de uma resistência visto que ao testar os resultados foram satisfatórios. Ambos os retificadores são compostos por cabos conectores BNC para facilitar a ligação com outros componentes.



Figura 3.14. Pontes retificadoras: (a) Ponte para ensaios em regime quase-estático; (b) Ponte para ensaios em regime de alta velocidade.

Gerador de sinal

Para a alimentação das bobinas foi escolhido um gerador de sinais FeelTech® FY3200S Dual Channel (figura 3.15). Este gerador irá controlar a tensão e a frequência que alimentaram a bobine indutora em corrente alternada, AC. Este gerador é composto por dois canais, tem uma enorme variedade de tipos de onda que podem ser gerados com amplitude de 0 até 20V pico a pico com uma frequência entre os 0 e os 6MHz. Após a realização de várias experiências observou-se que tanto para os ensaios em condições quase-estáticas como em alta velocidade, a escolha do tipo de onda é a quadrática, traduzindo-se por uma melhor estabilidade e resultados mais aproximados com os previstos.

No que toca à tensão o valor de 20V foi também o escolhido, fazendo com que os sensores recebam corrente elétrica numa maior gama de valores. Finalmente em termos de frequência foram feitos inúmeros testes em ambas as condições de velocidades, concluindo que para ensaios em regime quase-estático a frequência ótima será de 3MHz enquanto que para os ensaios de alta velocidade será de 0,7MHz, sendo que a partir de cada um destes valores, o valor lido pelo conjunto dos sensores de deslocamento satura.



Figura 3.15. Gerador de sinais FeelTech® FY3200S Dual Channel.

3.3.3. Aquisição e processamento de sinais

Placa de aquisição de dados

Foi escolhida uma placa de aquisição de dados NI® USB-6251 (figura 3.16). Esta DAQ tem 24 entradas e saídas digitais, 16 entradas analógicas e 2 saídas analógicas. Este dispositivo oferece além das várias entradas e saídas analógicas e digitais, oferece também 2 contadores/temporizadores de 16 bits e funções de *trigger* digital. Esta placa foi escolhida por oferecer funções de aquisição de dados confiáveis numa variada gama de aplicações. Uma das suas particularidades é o facto que os componentes foram todos ligados em pares de terminais, positivo e negativo, ligados em modo diferencial, recebendo a diferença de potencial entre os dois terminais (ver anexo V). A nível de configuração no software *LabView*, foi definido o modo de aquisição de amostras contínuo, sendo que a base de amostras usada nos ensaios irá diferenciar se o regime do ensaio for estacionário ou de alta velocidade (ver anexo II).



Figura 3.16. Placa de aquisição de dados National Instruments® USB-6251.

Software

Recorreu-se ao software *LabView* desenvolvido pela National Instruments®, uma linguagem de programação por blocos, que consiste na união de blocos de comandos de ações sequencialmente, criando um fluxo de dados que determina um resultado. Este utiliza uma linguagem de programação por blocos, simples e intuitiva, que se adequa bastante ao que está a ser desenvolvido nesta presente dissertação. Para tal foi desenvolvido um programa que dá ao utilizador, duma maneira muito direta, dois gráficos: um para as duas forças, em baixo, e um para o deslocamento, em cima (figura 3.17).

Juntamente com os gráficos, existe um espaço destinado para nomear e gravar o ficheiro de formato .txt, bem como um botão de iniciação de gravação dos dados que ligará uma luz verde ao lado deste, que é ativado logo antes do ensaio. As configurações deste programa encontram-se em anexo.

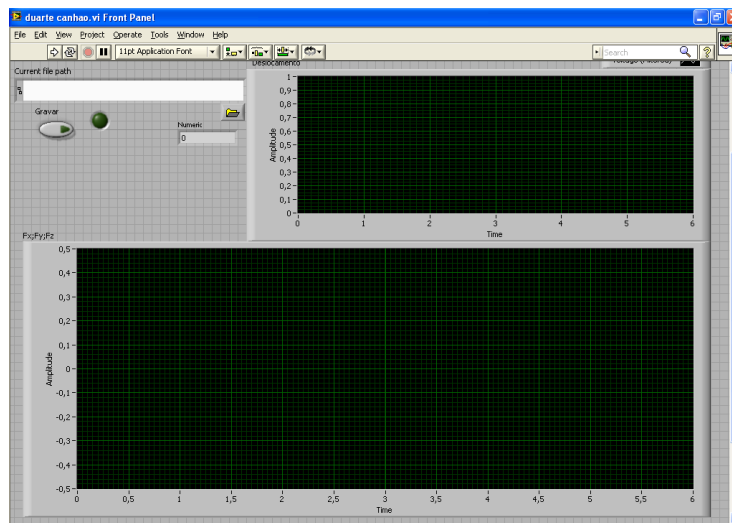


Figura 3.17. Interface do utilizador em LabView.

3.4. Ferramenta e fixação

3.4.1. Ferramenta de corte

Para este ensaio foi definido o uso de uma ferramenta de perfil quadrangular com pastilha de corte de carboneto de tungsténio (figura 3.18) e com um ângulo de ataque e de saída de 7° . Como é feita de um metal duro é adequada ao corte de materiais como o alumínio, sendo resistente à abrasão e conseguindo sustentar elevadas temperaturas de trabalho, além do mais que consegue preservar a aresta da face de ataque afiada mais facilmente que o resto dos materiais presentes em outras ferramentas (Rau, 2009). Esta ferramenta foi constantemente polida com lixa de polir de grão fino, nomeadamente 800 e depois 1200, em cada passagem. O polimento teve de ser cuidadoso e aplicado com muito pouca pressão, sempre com atenção à aresta de corte da ferramenta, sendo que ao passar a lixa nessa zona de forma consecutiva esta tornar-se à romba.

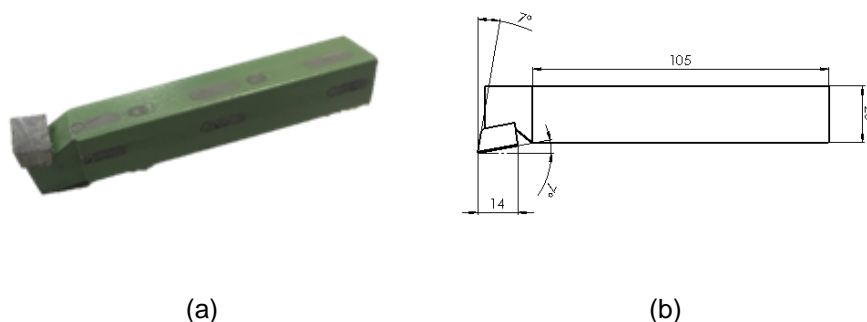


Figura 3.18. (a) Ferramenta de corte; (b) Desenho técnico da ferramenta.

3.4.2. Dispositivos de fixação

Dispositivo de fixação da ferramenta de corte

Para a fixação da ferramenta de corte foi utilizado um suporte desenvolvido pela Kistler® (figura 3.19 (a)). Este suporte consegue ser integrado facilmente na célula de carga através de vários furos coincidentes, mas por si só não era completo o suficiente para ser integrado com funcionalidade neste aparato experimental. Para tal recorreu-se a alguns componentes que permitissem um melhor ajustamento da ferramenta: uma placa metálica, uma barra metálica em “L” com um orifício para suportar um micrómetro e um conjunto de quatro cubos metálicos que permitissem a fixação da barra no suporte (figuras 3.19 (b), (c) e (d)).

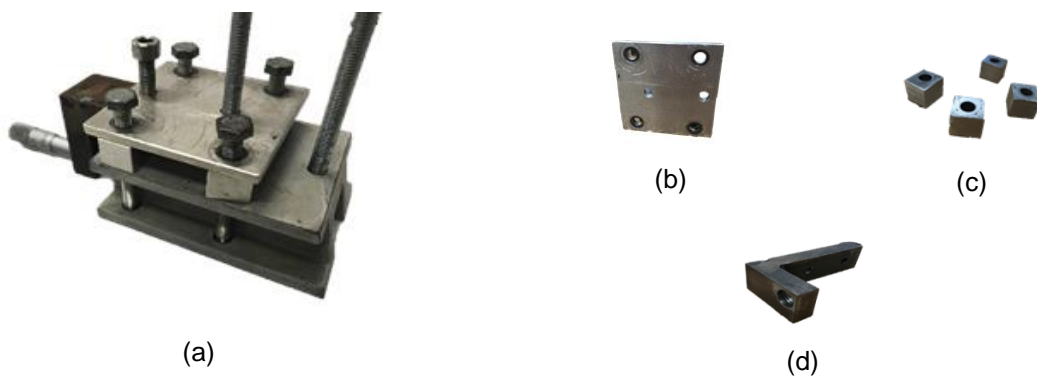


Figura 3.19. (a) Dispositivo de fixação; (b) Placa metálica; (c) Cubos; (d) Barra em L com furo para micrómetro.

Dispositivo de fixação do provete

A fixação do provete à guia móvel foi pensada da maneira a que fossem utilizados os furos incorporados nesta. A guia móvel é feita de aço e tem um comprimento de 480 mm e uma série de furos. Tendo atenção a isso, foi desenvolvido o dispositivo de fixação ilustrado na figura 3.20. Este suporte de fixação contém dois parafusos horizontais para garantir que o provete se mantenha imóvel e um parafuso vertical, para evitar um escorregamento devido à força exercida apenas na horizontal. Foi utilizado o mesmo aço que no resto da máquina-ferramenta. É possível notar que tanto este dispositivo como o dispositivo de fixação da ferramenta de corte são ajustáveis. O suporte tem 94 mm de comprimento e 32 mm de largura e o resto das suas dimensões pode ser consultada nos desenhos técnicos em anexo (ver anexo VII).

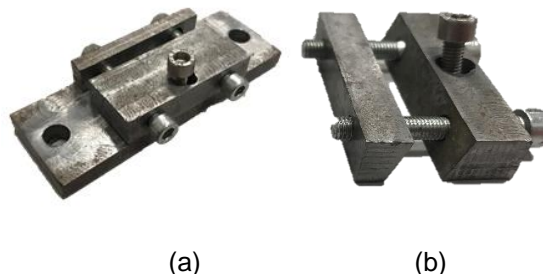


Figura 3.20. Dispositivo de fixação do provete: (a) Vista geral; (b) Detalhe peça de encosto.

3.5. Integração do aparato experimental

Dado que todos os componentes estão definidos e fabricados foi então montado o aparato experimental observado na figura 3.21. A máquina de ensaios está assente numa estrutura que está aparafusada ao piso, elevando ainda mais a sua rigidez e estabilidade. O suporte do atuador eletromagnético também está aparafusado ao piso em casos de disparo com elevada corrente induzida no disparo para não desalinhar com a guia.



Figura 3.21. Aparato experimental

Na figura 3.22 está desenhado o esquema do sistema desenvolvido. As ligações com um tom mais escuro representam os componentes que estão constantemente conectados à UPS.

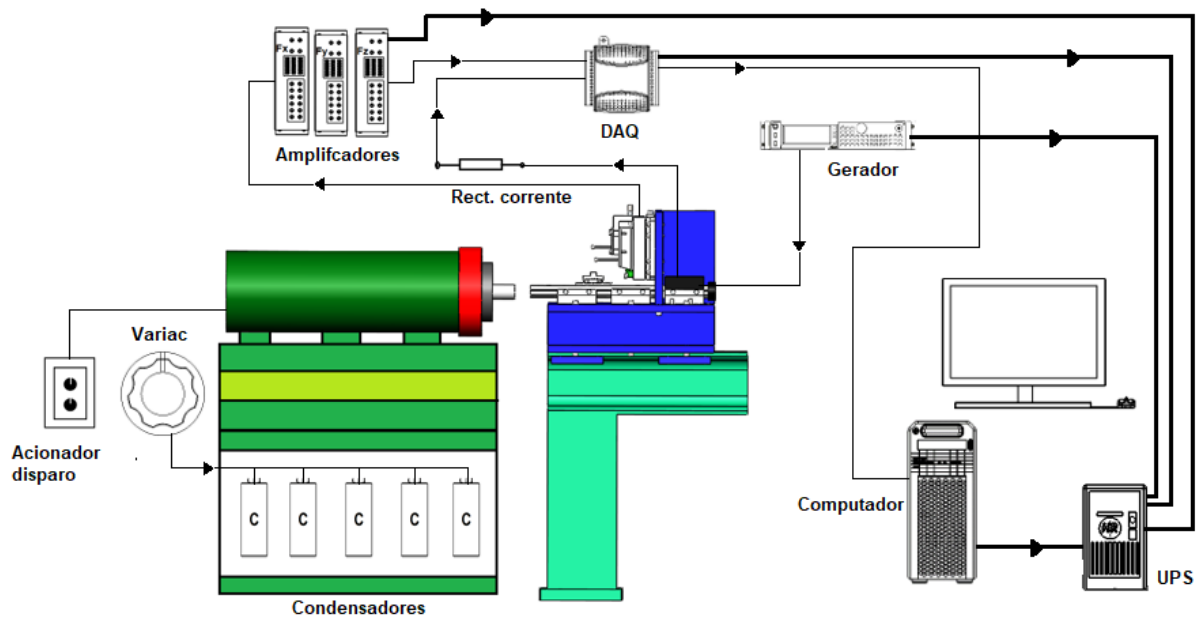


Figura 3.22. Esquema aparato experimental.

4. Métodos e Materiais

Este capítulo apresenta os materiais e a metodologia utilizada nos ensaios da presente dissertação. Por último é apresentado o plano de ensaios adotado.

4.1. Levantamento da espessura das aparas

O processo de obtenção das medidas das aparas é um processo demorado e que tem de ser feito com algum cuidado. Numa primeira tentativa as aparas foram todas medidas através de um paquímetro através de uma medição em cinco pontos da apara: duas medições nos dois extremos opostos e uma no meio da apara, calculando em seguida o comprimento médio com a média aritmética dos valores. Mas dado que a apara não tinha comprimento suficiente para o número de medições previstas, dado que o espaçamento entre medidas utilizando uma ferramenta manual as medições não seriam precisas o suficiente, tendo que optar por outra metodologia. Para tal, as aparas em primeiro lugar foram postas num microscópio todas exatamente na mesma posição para ter o melhor enquadramento possível com a ajuda de um papel milimétrico. Em seguida fez-se a obtenção da imagem para todas elas para depois as introduzir no software Autodesk® AutoCad 2019 em que é possível exportar uma imagem para o ambiente de trabalho do programa, criando uma escala global, que servirá de referência para a medição das espessuras das aparas (figura 4.1).

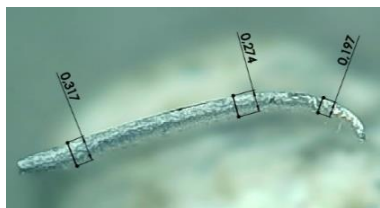


Figura 4.1. Apara dimensionada em AutoCad.

4.2. Materiais

O material utilizado para os ensaios de corte é um provete fabricado a partir de uma placa de alumínio AA1050 (figura 4.2). Este provete tem uma espessura de 5 mm. Os restantes desenhos técnicos do provete podem ser consultados em anexo (ver anexo VII). As propriedades deste material estão descritas na tabela 4.1. Este alumínio é largamente utilizado na indústria química, farmacêutica e alimentar em, por exemplo, recipientes de alumínio para comida. Este alumínio é usado em pequenos componentes de utensílios domésticos, alhetas de sistemas de refrigeração, chapas litográficas, refletores de lâmpadas e revestimento de cabos. As suas propriedades encontram-se na tabela 4.1.

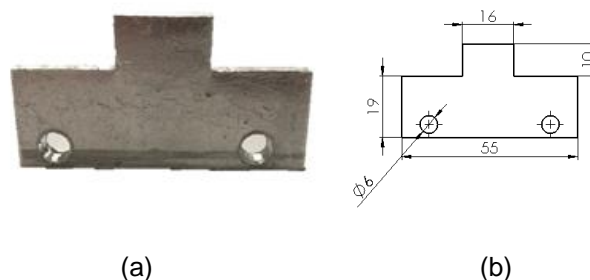


Figura 4.2. (a) Provete de alumínio; (b) Dimensões provete.

Tabela 4.1. Propriedades do alumínio AA1050.

Propriedades alumínio AA1050 (99,5%)							
Densidade p (g/cm ³)	HV	Tensão de cedência σ_y (Mpa)	Tensão de rotura σ_r (Mpa)	Módulo de Young (GPa)	Temperatura de fusão (°C)	Condutividade Térmica (W/m.K)	Tensão de corte k (MPa)
2.705	32	124	131	69	646	227	76

4.3. Lubrificação

Para a lubrificação do provete foi utilizada glicerina. Esta escolha prende-se com o facto desta glicerina não ter aditivos, ou seja, é um material praticamente puro e inerte, prevenindo a formação de pontos de soldadura no metal e até reações químicas. Uma das grandes vantagens é o facto de conseguir alcançar um controlo de um lubrificante, inerte, sem precisar de ter uma atmosfera controlada num sistema fechado, ficando assim com uma camada protetora aplicada localmente, protegendo melhor a superfície do provete. A glicerina foi aplicada em três sítios distintos: na superfície do provete a ser maquinada, na face de ataque e na face de saída da ferramenta. Esta aplicação foi efetuada através de uma seringa sem agulha, com glicerina contida no êmbolo.

4.4. Plano de ensaios

Estes ensaios são repetidos até existir uma repetibilidade e exatidão nos valores adquiridos no processo. Para tal foi criado um conjunto de manuais para o acionador eletromagnético, para a máquina de ensaios e para a aquisição de dados. Estes manuais podem ser consultados em anexo (ver anexos I, III e IV respectivamente). O plano de ensaios criado consiste em 4 casos de ensaios que são apresentados na tabela 4.2. Os ensaios em condições quase-estáticas foram efetuados com a ajuda de uma alavanca encostada diretamente na guia móvel. A geometria da ferramenta foi mantida constante ao longo desta dissertação ($\alpha = 7^\circ$ e $\sigma = 7^\circ$)

Tabela 4.2. Plano de ensaios.

Caso	Material	t_0 (mm)	Regime	Lubrificante
1	Alumínio	0,1	Quase- Estático	-----
		0,05		
		0,02		
2	Alumínio	0,1	Alta Velocidade	-----
		0,05		
		0,02		
3	Alumínio	0,1	Quase- Estático	Glicerina
		0,05		
		0,02		
4	Alumínio	0,1	Alta Velocidade	Glicerina
		0,05		
		0,02		

5. Ensaio Experimentais de Corte Ortogonal

Este capítulo apresenta os principais resultados da investigação obtidos a partir dos ensaios descritos anteriormente. Numa primeira parte são analisadas as forças de corte envolvidas no processo. Em seguida é analisada a influência da glicerina no corte do alumínio, tanto em condições quase-estáticas como em alta velocidade, analisando principalmente a variação das forças de corte e de atrito e a sua influência na morfologia da aparado.

5.1. Avaliação das forças envolvidas no processo

Nesta secção é efetuada uma análise às forças de corte e de penetração envolvidas no processo, em condições quase-estáticas e de alta velocidade.

5.1.1. Ensaio de corte em condições quase-estáticas

Numa primeira fase de ensaios, os provetes foram submetidos a um processo de corte em condições quase-estáticas e de alta velocidade. Para os ensaios em regime quase-estático a guia móvel deslocou-se a uma velocidade constante de valor médio de 2 m/min. Observa-se nas figuras 5.1, 5.2 e 5.3 a evolução da força de corte e da força de penetração, respetivamente, com o deslocamento. É possível observar que a força de corte é sempre superior à força de penetração ao longo destes ensaios em regime quase-estático.

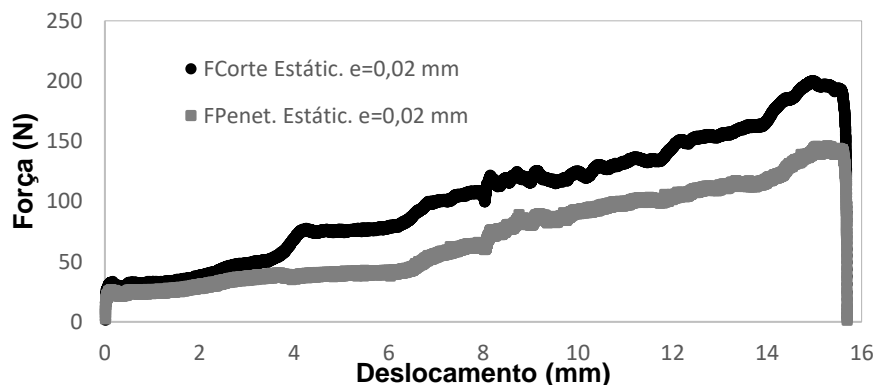


Figura 5.1. Forças de corte e de penetração resultantes de um ensaio a um provete de alumínio AA1050, para uma espessura de corte de 0.02 mm, em função do deslocamento, em regime quase-estático.

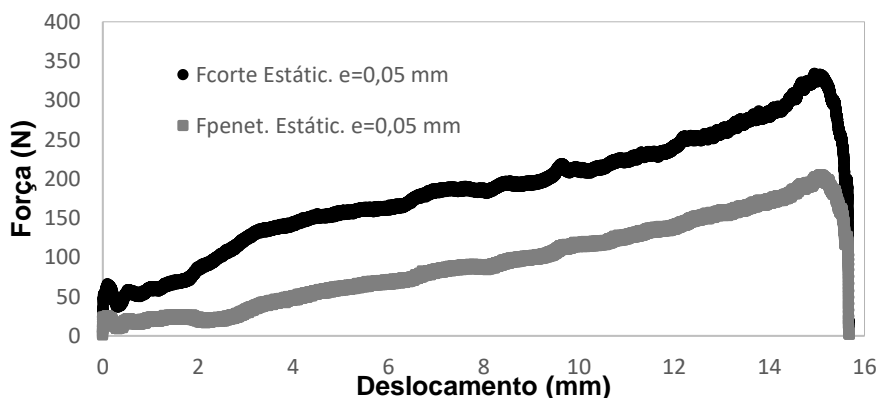


Figura 5.2. Forças de corte e de penetração resultantes de um ensaio a um provete de alumínio AA1050, para uma espessura de corte de 0.05 mm, em função do deslocamento, em regime quase-estático.

Nos dois primeiros casos (figura 5.1 e 5.2) para espessuras de 0,02 e 0,05 mm, existe uma subida acentuada da força até ao final do provete, onde decresce abruptamente. Estima-se que o processo se encontra numa fase transiente do corte ortogonal, não atingindo o regime quase estacionário, estabilizando o corte. A diferença de valores entre as forças de corte e penetração aumenta com a espessura. No caso do ensaio com uma espessura de corte de 0,1 mm ilustrado na figura 5.3 já ocorre uma estabilização das forças de corte. Este patamar de estabilização deverá estar relacionado com a espessura mais elevada de corte, promovendo um corte mais estável.

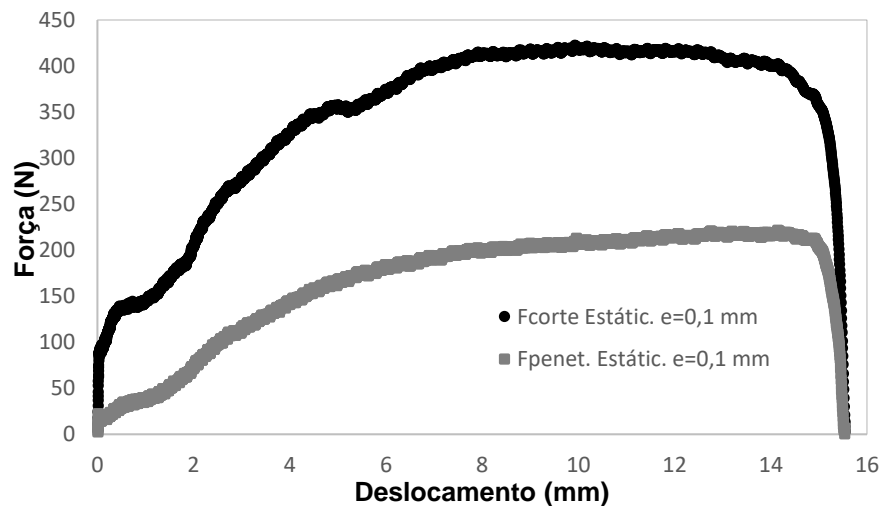


Figura 5.3. Forças de corte e de penetração resultantes de um ensaio a um provete de alumínio AA1050, para uma espessura de corte de 0.1 mm, em função do deslocamento, em regime quase-estático.

5.1.2. Ensaio de corte em regime de alta velocidade

Para a realização dos ensaios em alta velocidade foi utilizado o atuador magnético. Como já foi referido no capítulo anterior, este atuador será alimentado por um conjunto de condensadores que irão acumular energia para o posterior disparo do atuador.

Estes condensadores ao longo da presente dissertação apresentaram várias falhas na acumulação de energia, sendo que a dada altura, apenas três dos cinco condensadores iniciais funcionavam com regularidade. Dado esta dificuldade em não conseguir alimentar os cinco condensadores de igual forma, nem sempre foi possível parametrizar a velocidade de corte com o rigor pretendido, obrigando a uma repetição de ensaios exaustiva até alcançar velocidades semelhantes para as três espessuras de corte. Após inúmeros ensaios, foi conseguido estabelecer o valor de velocidade medio de 670 m/min (aproximadamente 40 km/h). O resultado destes ensaios pode ser observado nas seguintes figuras 5.4 e 5.5:

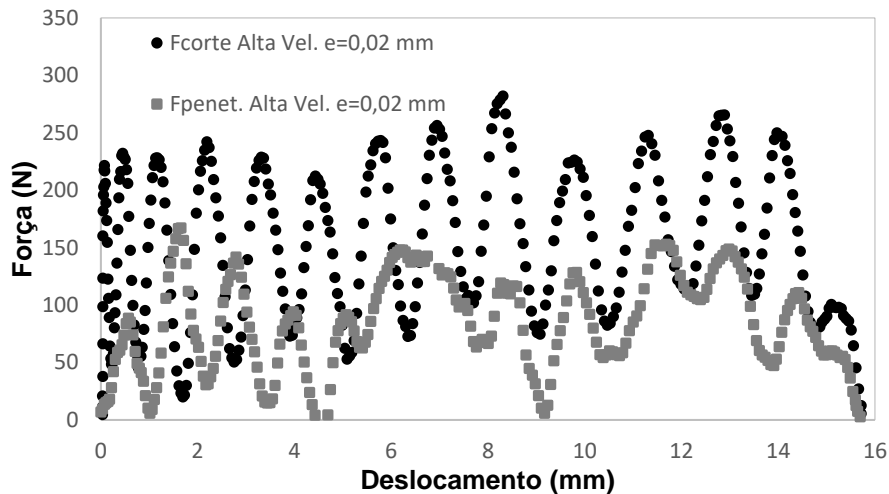


Figura 5.4. Forças de corte e de penetração resultantes de um ensaio a um provete de alumínio AA1050, para uma espessura de corte de 0.02 mm, em função do deslocamento, em regime de alta velocidade.

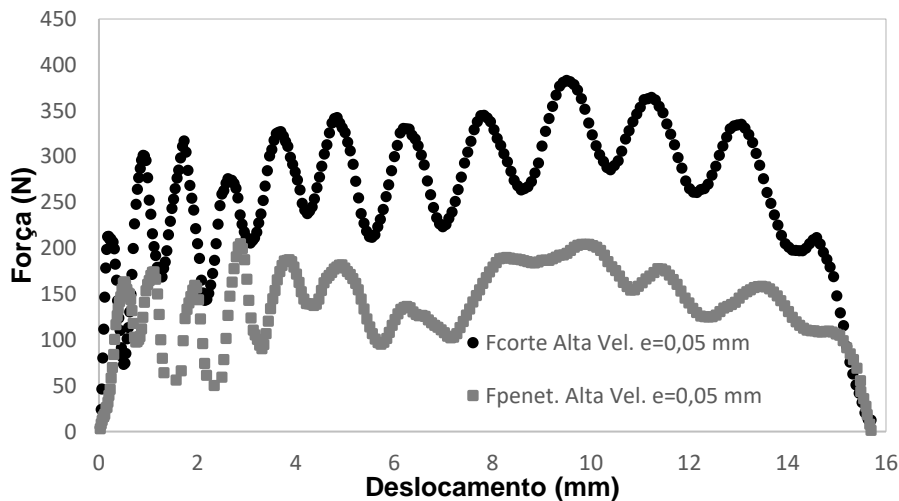


Figura 5.5. Forças de corte e de penetração resultantes de um ensaio a um provete de alumínio AA1050, para uma espessura de corte de 0.05 mm, em função do deslocamento, em regime de alta velocidade.

Nos ensaios de alta velocidade em alumínio, existe uma oscilação das forças de corte com uma certa amplitude. Esta característica é muito mais notória na força de corte do que na força de penetração, observando-se uma oscilação sinusoidal de frequência e amplitude constante para a força de corte. Esta amplitude vai diminuindo com o aumento da espessura de corte. Apesar da observação da componente oscilatória é também possível observar que o valor médio é constante, indiciando que o processo alcançou o regime estacionário. Quanto á força de penetração, esta tem um comportamento instável no corte dos primeiros 4 mm do provete, adquirindo uma oscilação um pouco mais constante a partir desse ponto. Ao observar a figura 5.6, no corte para uma espessura de 0.1 mm, é possível reparar na mesma assinatura de forças descrita anteriormente.

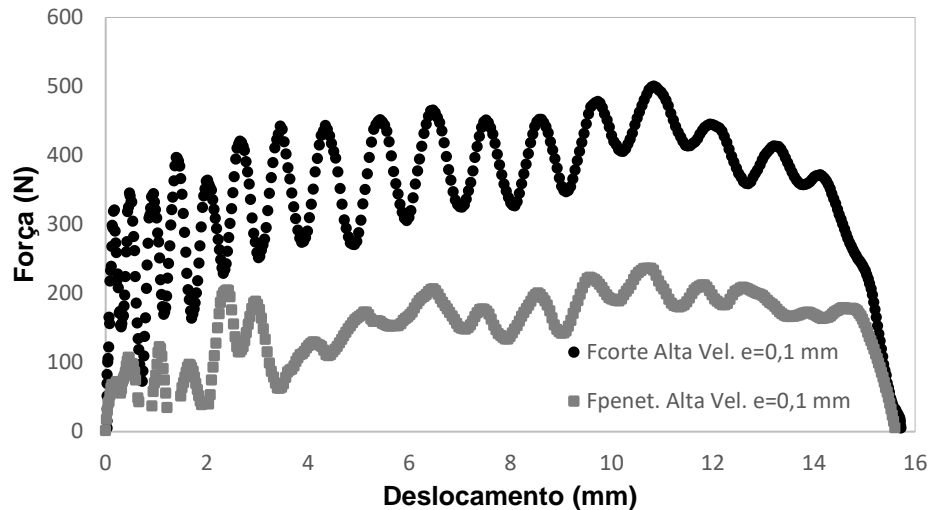


Figura 5.6. Forças de corte e de penetração resultantes de um ensaio a um provete de alumínio AA1050, para uma espessura de corte de 0.05 mm, em função do deslocamento, em regime de alta velocidade.

Foi feita uma análise às superfícies maquinadas dos provetes para uma análise dos fenômenos relativos ao ensaio. Na figura 5.7 é possível observar as marcas deixadas na face do provete após um ensaio de corte a alta velocidade. Estas marcas parecem estar correlacionadas com o aparecimento de oscilações nas forças envolvidas no processo. A ferramenta quando avança pelo material comprime-o na zona de deformação, resultando em encruamento e acumulação de dano. Quando o dano acumulado ultrapassa um determinado limite crítico ocorre a rotura, repetindo-se ao longo do comprimento do provete.

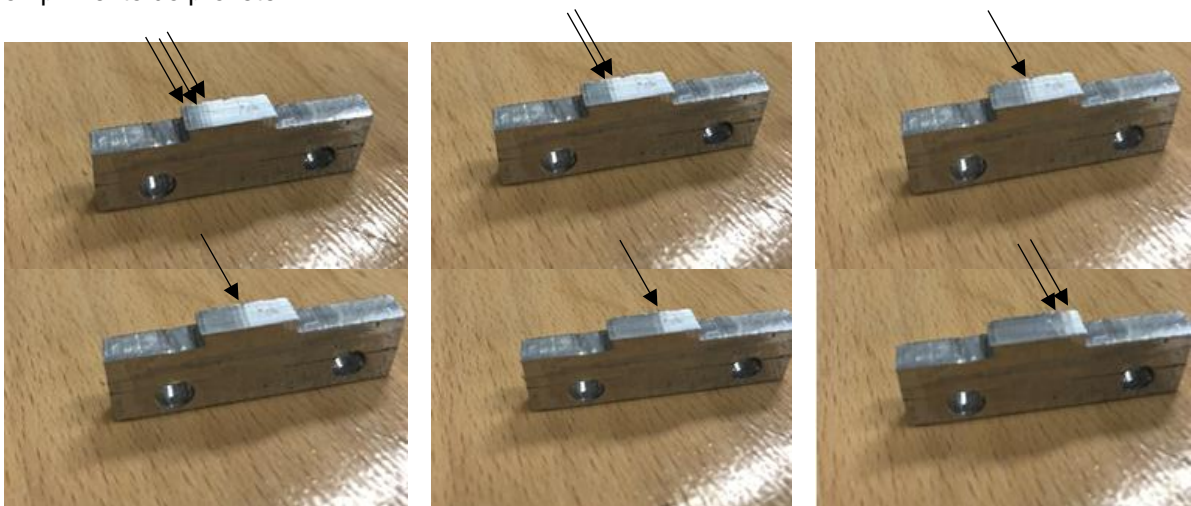


Figura 5.7. Captura fotográfica sequencial da face do provete maquinado após um ensaio em condições de alta velocidade.

Uma outra análise à superfície do provete foi feita após um ensaio em regime quase-estático. Esta observação ilustrada na figura 5.8 está coerente com a evolução das forças de corte e penetração. O provete apresenta uma face lisa e ausente de marcas observadas nos ensaios em alta velocidade.



Figura 5.8. Captura fotográfica sequencial da face do provete maquinada após um ensaio em condições estáticas.

Para confirmar o regime estacionário do corte foi utilizado um provete de geometria semelhante e de igual espessura de 5 mm, mas com 48 mm de comprimento. Na figura 5.9 está representada a evolução das forças de corte e penetração em condições de alta velocidade para uma espessura de corte de 0,1 mm, com e sem lubrificação. Esta alteração não resultou num “patamar” de estabilidade, ausente de oscilações, a partir de uma certa espessura de corte, concluindo que as oscilações são inevitáveis no corte a alta velocidade para este material.

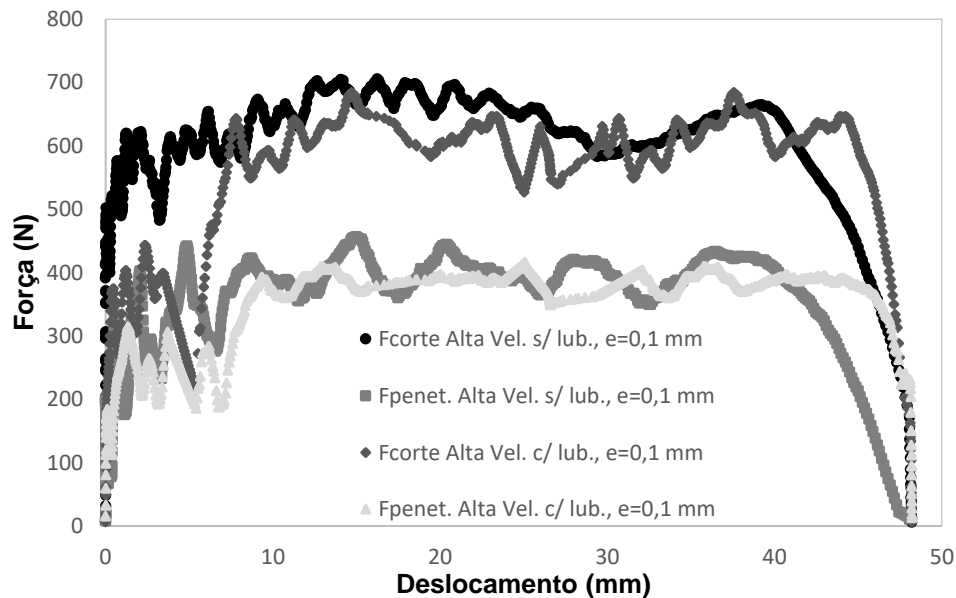


Figura 5.9. Forças de corte e de penetração resultantes de um ensaio a um provete de alumínio AA1050 com e sem lubrificação, para uma espessura de corte de 0.1 mm, em função do deslocamento, em regime de alta velocidade.

Após uma análise dos gráficos para os ensaios em condições quase-estáticas e de alta velocidade é possível notar que a força média, tanto de corte como de penetração, são mais elevadas nos ensaios em alta velocidade do que em regime quase-estático, uma vez que a tensão de escoamento do material aumenta com a velocidade, sendo que o alumínio AA1050 é um material dúctil quando deformado em condições quase-estáticas, mostrando um comportamento mais frágil quando a velocidade de deformação aumenta. A força de corte média situa-se nos 346,83 N para uma espessura de 0,1 mm, 230,28 N para uma espessura de 0,05 mm e 117,88 para 0,02 mm, em condições quase-estacionárias, enquanto que para condições de alta velocidade a força de corte média situa-se nos 349,51 N, 264,5 N e 149,80 N para as espessuras de 0,1, 0,05 e 0,02 mm respetivamente, registando um aumento de

1, 12 e 21% de força de uma condição de velocidade para a outra, sendo que quanto maior for a espessura de corte do material, menor será a diferença de forças envolvidas.

5.2. Tribologia do processo

Nesta seção é estudada a influência da utilização da glicerina nas forças de corte e na morfologia da apara.

5.2.1. Lubrificação em condições quase-estáticas

Foram realizados ensaios com a utilização de glicerina como lubrificante. É possível observar na figura 5.10 as curvas têm todas uma subida acentuada. Os gráficos estão de acordo com os obtidos sem lubrificante, excetuando o gráfico das forças para uma espessura de corte de 0,1 mm, que com a adição de glicerina, não atingiu um patamar de estacionaridade, como se pode comprovar no caso sem lubrificação. As forças de corte diminuem com a utilização de glicerina. Nos ensaios com espessuras de corte de 0,1 e 0,05 mm, as forças de corte decrescem com a utilização de glicerina a uma taxa na ordem dos 3% e 4%, respectivamente, enquanto que para a espessura mais baixa de 0,02 mm, existe uma redução das forças de corte na ordem dos 20%. Os ensaios quase-estáticos têm uma velocidade de corte de 2 m/min. Num tom mais escuro estão representadas as forças de corte e de penetração para uma espessura de corte de 0.02 mm. No tom intermédio de preto estão representadas as forças de corte e penetração para uma espessura de corte de valor de 0.05 mm. Finalmente no tom mais claro estão representadas as forças de corte e penetração para uma espessura de corte de 0.1 mm.

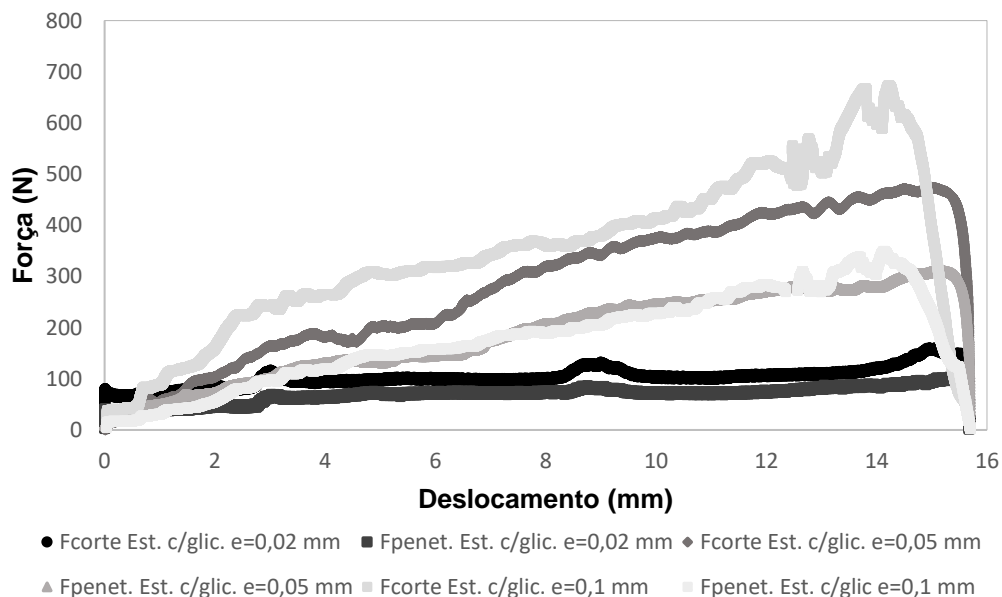


Figura 5.10. Forças de corte e de penetração resultantes de um ensaio a um provete de alumínio AA1050 com lubrificação, em função do deslocamento, em regime de alta velocidade.

5.2.2. Lubrificação em condições de alta velocidade

Os ensaios em condições de alta velocidade foram inúmeras vezes repetidos até encontrar uma velocidade de 670 m/min (cerca de 40 km/h) para que os resultados sejam comparáveis. Como é

possível observar nas figuras 5.11 e 5.12 tanto a força de corte como a de penetração apresentam perfis menos consistentes e repetíveis ao longo do corte quando a lubrificação está presente no processo.

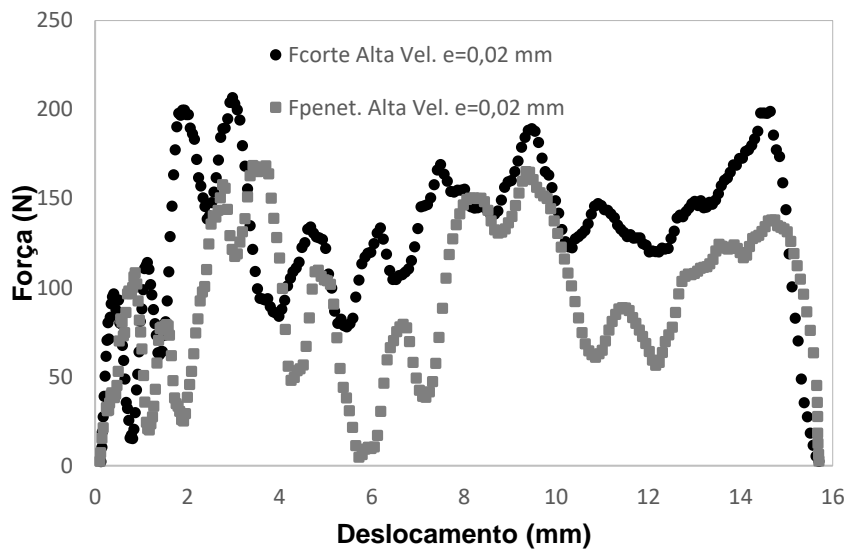


Figura 5.11. Forças de corte e de penetração resultantes de um ensaio a um provete de alumínio AA1050, para uma espessura de corte de 0.02 mm com lubrificante, em função do deslocamento, em regime de alta velocidade.

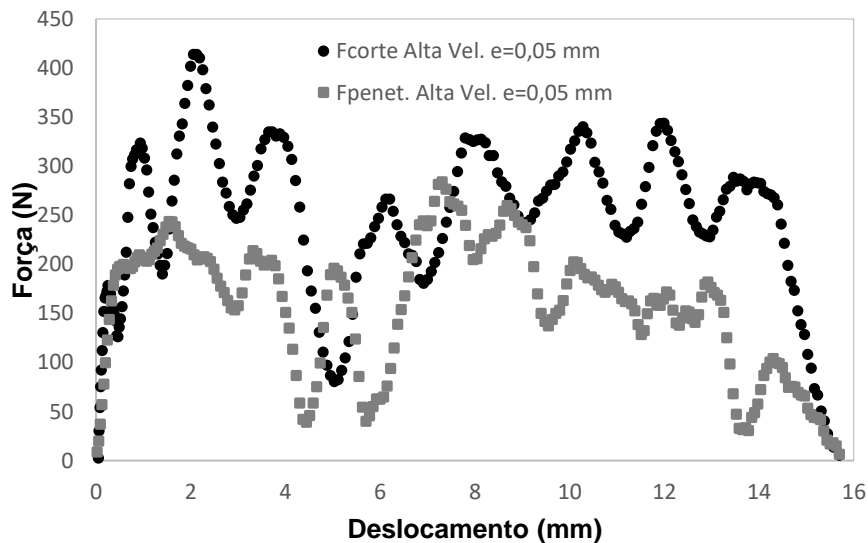


Figura 5.12. Forças de corte e de penetração resultantes de um ensaio a um provete de alumínio AA1050, para uma espessura de corte de 0.05 mm com lubrificante, em função do deslocamento, em regime de alta velocidade.

É de notar que embora a evolução das forças ao longo do deslocamento não seja tão padronizada como os ensaios sem lubrificante, as forças de corte diminuem com adição de glicerina. No ensaio para uma espessura de 0.02 mm existe um decréscimo das forças de corte na ordem dos 17% e nos ensaios com espessura de 0.05 mm o valor está na ordem dos 8%. Analisando a influência da glicerina no ensaio com espessura de corte de 0.1 mm na figura 5.13 observa-se que as forças de corte diminuem na ordem dos 4%.

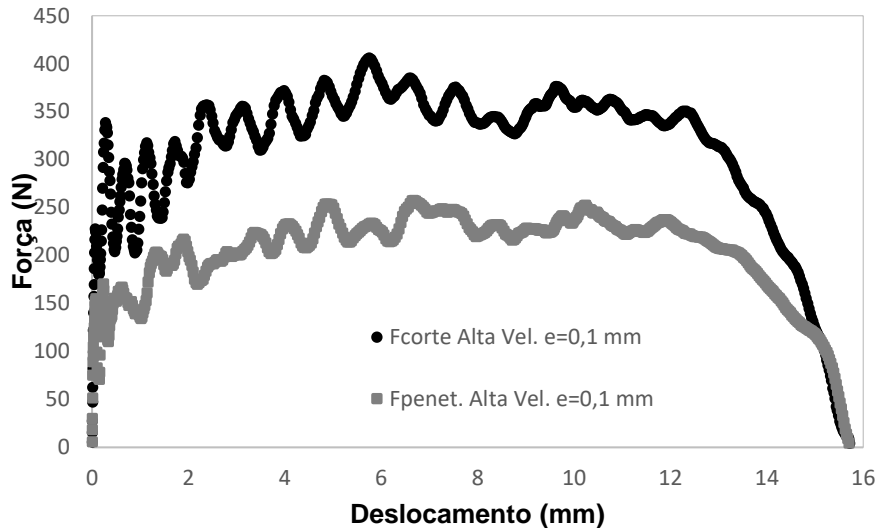


Figura 5.13. Forças de corte e de penetração resultantes de um ensaio a um provete de alumínio AA1050, para uma espessura de corte de 0.1 mm com lubrificante, em função do deslocamento, em regime de alta velocidade.

A figura 5.14 apresenta a evolução das forças de corte em função da espessura de corte, para as condições quase-estáticas e de alta velocidade, com e sem lubrificação. Ao fazer uma análise ao gráfico é possível notar que a evolução das forças de corte é semelhante entre as mesmas condições de velocidade. Ao efetuar uma linha de tendência em cada uma das condições a serem analisadas, consegue-se compreender que essa reta tem um declive bastante aproximado entre os ensaios em condições quase-estáticas e também em condições de alta velocidade, resultando numa evolução algo linear de forças de corte entre cada regime de velocidade.

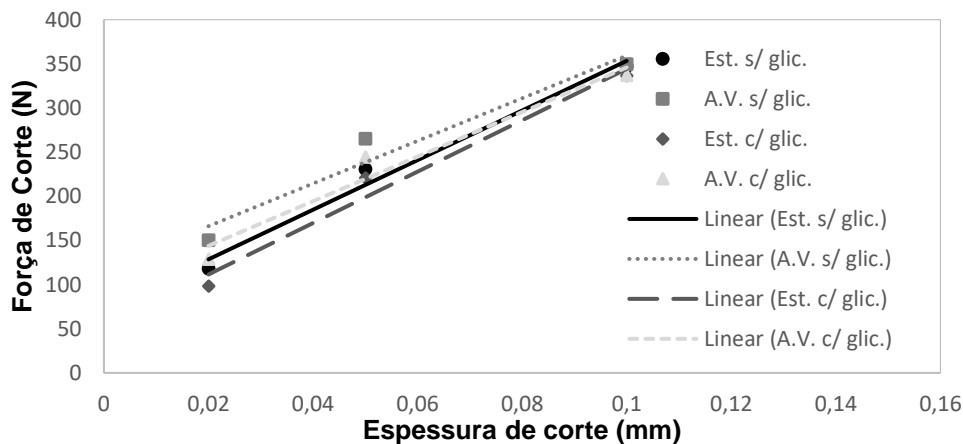


Figura 5.14. Forças de corte para alumínio AA1050 em função da espessura de corte para diferentes condições de velocidade, com e sem lubrificação.

A representação gráfica das forças de corte facilita o estudo da influência dos parâmetros envolvidos no processo, contudo, não permite uma correlação direta entre a pressão específica de corte e a espessura do material a maquinar. Assim sendo, faz sentido apresentar a evolução da pressão específica de corte k_s através da equação (5) em função da espessura da secção de corte como um indicador da eficiência do mecanismo de arranque de aparas. A pressão específica de corte define-se como uma força por unidade de superfície, também denominada de potência específica de corte, ou seja, a potência consumida por unidade de volume de material cortado na unidade de tempo- É possível

observar na figura 5.15 o comportamento típico deste indicador que aumenta com a diminuição da espessura de corte, sendo que o seu valor absoluto diminui com a adição de lubrificante, quer em condições estáticas ou de alta velocidade. É de notar que este valor é praticamente igual em qualquer das condições para uma espessura de corte de 0.1 mm.

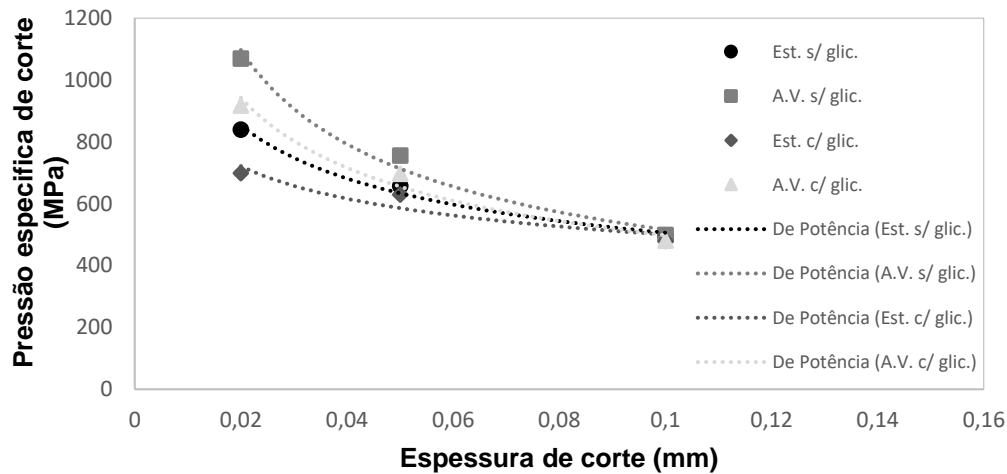


Figura 5.15. Pressão específica de corte para alumínio AA1050 em função da espessura de corte para diferentes condições, com e sem lubrificação

5.2.3. Análise das aparas resultantes do processo

Na figura 5.16 é possível observar a formação da apara num ensaio de corte em condições quase-estáticas para o alumínio AA1050. Estas imagens podem ser comparadas com o trabalho realizado por Cordeiro (2010) ilustrado na figura 5.17. Observa-se nesta imagem a formação da apara praticamente a meio do corte, em que a face da apara em contacto com a face de ataque da ferramenta tem um aspeto brilhante, enquanto o outro lado da face da apara apresenta várias “camadas”, resultado do escoamento livre (não condicionado) da superfície exterior da apara.

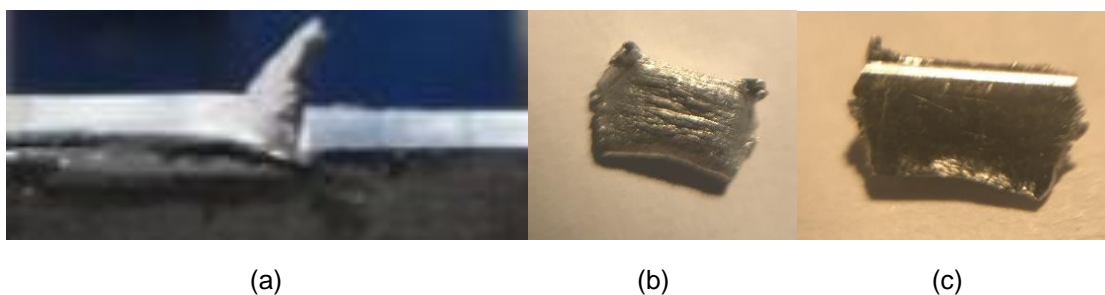


Figura 5.16. a) Formação de apara na face do provete; b) Face da apara adjacente ao material; c) Face da apara adjacente à face de ataque da ferramenta

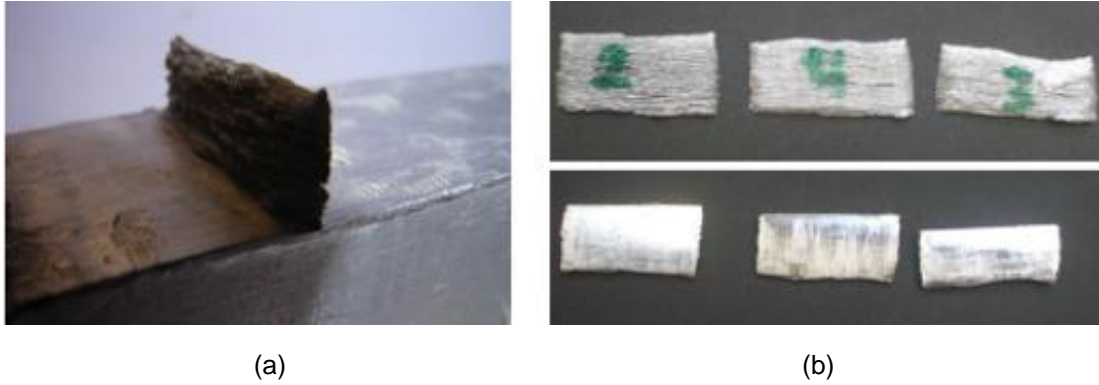


Figura 5.17. Processo de formação de apra presente em Cordeiro (2010): a) Formação da apra na face do provete; b) Em cima: face da apra adjacente ao material; Em baixo: face da apra adjacente à ferramenta de corte.

Após cada ensaio as aparas foram recolhidas. Para uma medição rigorosa, foi utilizado o microscópio presente no laboratório M3. Na figura 5.18 é mostrado o processo de medição das aparas.

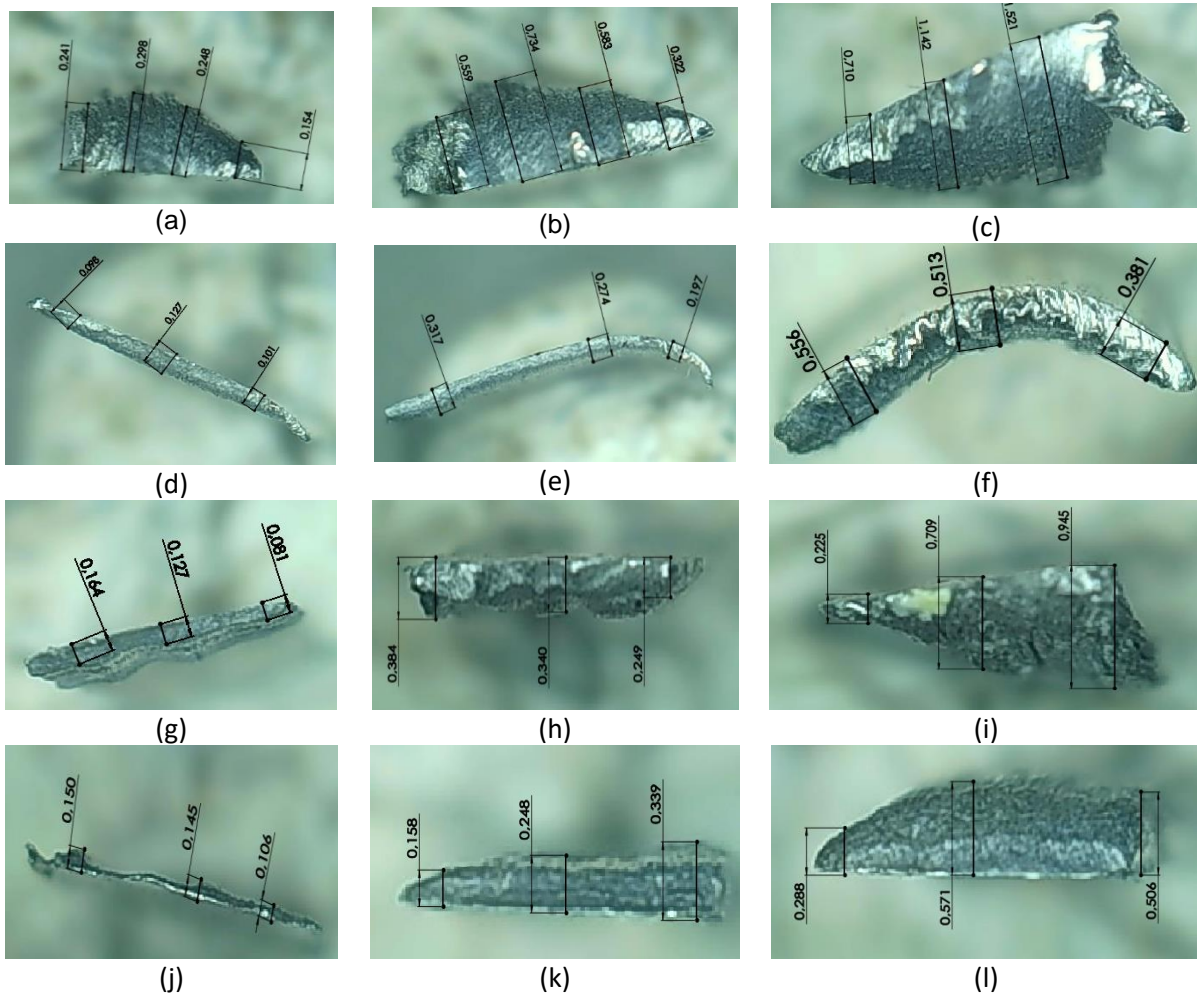


Figura 5.18. Diferentes aparas resultantes dos ensaios de corte em alumínio AA1050: a) Ensaio Est. s/ glic. ($e=0,02\text{mm}$); b) Ensaio Est. s/ glic. ($e=0,05\text{mm}$); c) Ensaio Est. s/ glic. ($e=0,1\text{mm}$); d) Ensaio A.V. s/ glic. ($e=0,02\text{mm}$); e) Ensaio A.V. s/ glic. ($e=0,05\text{mm}$); f) Ensaio A.V. s/ glic. ($e=0,1\text{mm}$); g) Ensaio Est. c/ glic. ($e=0,02\text{mm}$); h) Ensaio Est. c/ glic. ($e=0,05\text{mm}$); i) Ensaio Est. c/ glic. ($e=0,1\text{mm}$); j) Ensaio A.V. c/ glic. ($e=0,02\text{mm}$); k) Ensaio A.V. c/ glic. ($e=0,05\text{mm}$); l) Ensaio A.V. c/ glic. ($e=0,1\text{mm}$)

Para uma melhor compreensão e análise das aparas resultantes do processo de corte foi efetuado um estudo do grau de encalhe R_c descrito na equação (1).

O grau de encalque define-se pela razão de compressão da apara. Se o grau de encalque é elevado para um dado material a ser testado, significa que o grau de deformação plástica é igualmente elevado. A apara sofre uma deformação plástica que se traduz no aumento da espessura. Ao analisar a figura 5.19 podemos observar que o grau de encalque é mais elevado em condições quase-estáticas e menor em condições de alta velocidade. No ensaio em condições quase-estáticas sem glicerina os valores do grau de encalque andam a volta de 11, um valor bastante elevado devido a elevada compressão da apara ao ser removida. Este resultado parece indicar um coeficiente de atrito elevado entre o material da apara e a face de ataque da ferramenta. Assim, para a apara começar a escorregar é necessário aumentar a carga tangente à face de ataque, combinando um aumento da espessura e rigidez da apara e da própria componente tangencial da força de corte.

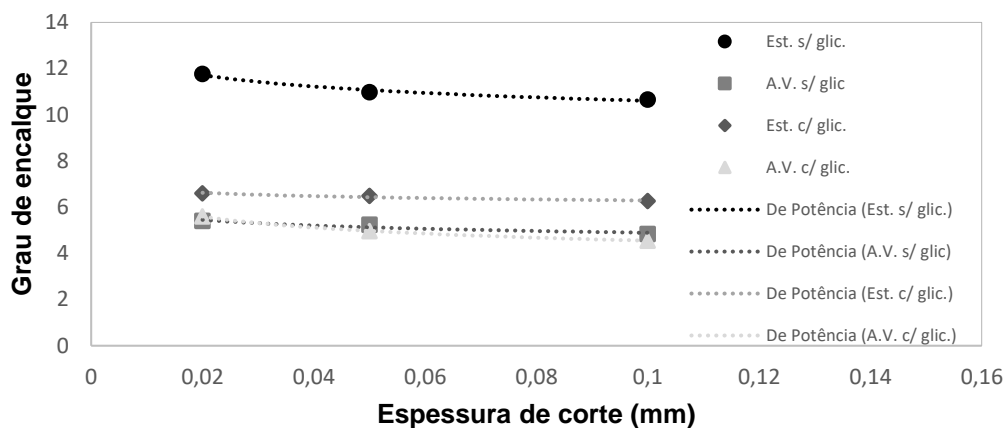


Figura 5.19. Grau de encalque do alumínio AA1050 em função da espessura de corte para diferentes condições, com e sem lubrificação.

Para as restantes condições de corte o grau de encalque R_c encontram-se entre 4,5 e 6,5, em acordo com o trabalho desenvolvido por Cordeiro (2010) em ensaios de corte ortogonal em provetes de alumínio AA1050 que resultaram em graus de encalque a rondar o valor de 7, para um provete com 20 mm de largura em condições estáticas. Outras experiências foram executadas nesta máquina de ensaios desenvolvida pelo autor com provetes de alumínio AA1050 em condições de alta velocidade resultaram também em graus de encalque de valores entre 4 e 6 (Campos J., Coelho J., 2019), concluindo que os elevados valores de grau de encalque são característicos deste material em estudo.

Na figura 5.20 encontra-se descrito o ângulo de corte ϕ através da equação (2). Este ângulo provém de uma linha que separa claramente as regiões de material deformado e não deformado, em que acima dessa linha o material já está deformado, formando a apara pelas tensões de corte aplicadas segundo aquela direção. O plano de corte está inclinado de um ângulo de corte ϕ relativamente à direção de corte. Quando a força de corte desce o ângulo de corte aumenta, logo ao adicionar lubrificante ao processo o ângulo de corte deve aumentar, como se pode comprovar na figura 5.20.

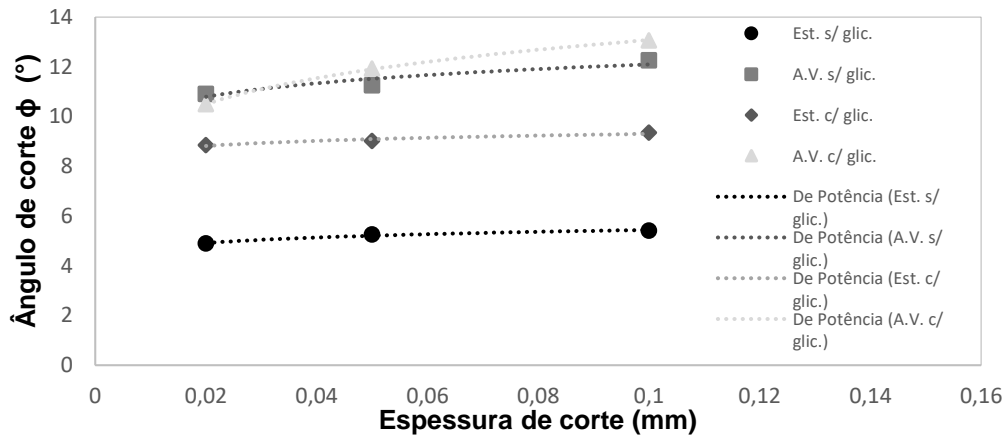


Figura 5.20. Ângulo de corte do alumínio AA1050 em função da espessura de corte para diferentes condições, com e sem lubrificação.

Numa última fase é analisado o coeficiente de atrito μ . Na figura 5.21 é apresentada a evolução do coeficiente de atrito (obtido através do modelo de Coloumb descrito na equação (13)) em função da espessura de corte para diferentes regimes de velocidade, com e sem lubrificante. Os resultados obtidos neste alumínio demonstram que o coeficiente de atrito tende a baixar com o aumento da espessura, independentemente da atmosfera ou condição de velocidade. Estes resultados também mostram que com a adição de glicerina, o coeficiente de atrito aumenta, o que não é obvio numa primeira observação. As forças de corte com a adição de lubrificante diminuem, mas numa proporção menor do que a proporção a que as forças de penetração aumentam com esta adição de lubrificante. Ao adicionar glicerina, a apara sofre um maior enrolamento, diminuindo a área de contacto na face de ataque, promovendo um melhor escoamento nesta face. No entanto, não houve redução do contacto na face de saída da ferramenta. Nesta face de saída não há forma de alterar o escoamento do material pois este escoar como um corpo rígido, nomeadamente, a superfície maquinada do provete sólido. No cálculo do atrito dado pelo rácio entre forças de corte e de penetração assume-se que apenas os fenómenos na face de ataque estão a ser contabilizados, desconsiderando-se os que ocorrem na face de saída. Este cálculo, com base nesta suposição, demonstra que o coeficiente de atrito virtualmente aumenta.

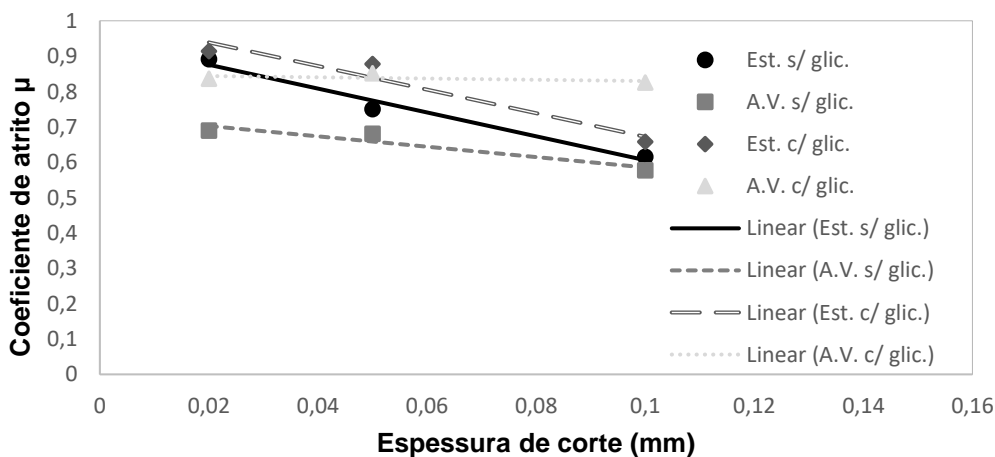


Figura 5.21. Coeficiente de atrito do alumínio AA1050 em função da espessura de corte para diferentes condições, com e sem lubrificação.

É possível observar na figura 5.21 que o coeficiente de atrito em condições quase-estáticas aumenta em média 9% com a adição de glicerina enquanto que em condições de alta velocidade aumenta cerca de 30 %. Este tipo de fenómeno foi também observado ao efetuar ensaios de corte ortogonal na máquina desenvolvida pelo autor com um lubrificante típico de laboratório à base de teflon, obtendo valores de aumento de coeficiente de atrito na ordem dos 10% para um provete de alumínio AA1050 com a mesma espessura do utilizado pelo autor e de comprimento de 48 mm (Campos J., Coelho J., 2019).

É conhecido que a velocidade com que as ferramentas atuam sobre o material têm influência nos esforços envolvidos no processo de fabrico assim como na resistência mecânica final do componente estrutural fabricado. Neste sentido interessa que a caracterização mecânica dos materiais considere a taxa de deformação como um parâmetro a definir para os ensaios mecânicos.

O gráfico da figura 5.22 mostra a influência da taxa de deformação nas curvas de escoamento para o alumínio e para a liga comercialmente pura AA1050. Nestas é possível observar que a tensão de escoamento aumenta com a velocidade de deformação num valor que ronda os 50 % para uma taxa de deformação nos $10^4 s^{-1}$ em relação aos ensaios quase-estáticos. Porém, a análise deste mesmo gráfico é difícil para uma gama intermédia da velocidade de deformação devido à ondulação da curva de escoamento característica das máquinas de ensaios gravíticas (martelos de queda) (Gregório, 2017). Conclui-se assim que o alumínio se comporta de diferente maneira aquando velocidades de deformação diferentes.

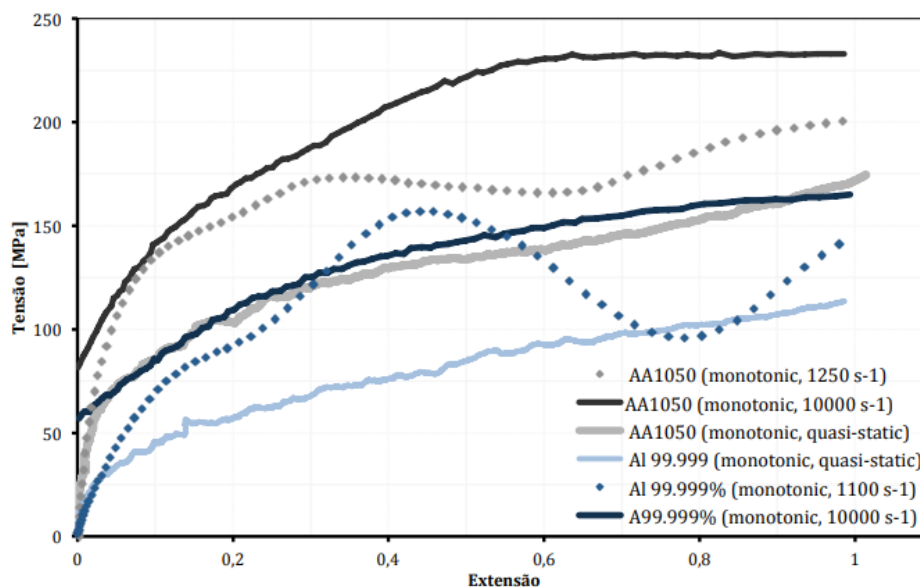


Figura 5.22. Evolução da curva de escoamento plástico para o Alumínio puro e para a liga comercialmente pura AA1050 em diferentes taxas de deformação (Gregório, 2017).

6. Conclusões e Perspetivas de Trabalhos Futuros

Este capítulo sumariza as principais conclusões e contribuições da presente dissertação, concluindo com uma nota para perspetivas de trabalhos futuros a serem consideradas pelos próximos alunos que pretendam revisitar este tema de investigação.

6.1. Conclusões

O presente trabalho tentou contribuir para o desenvolvimento de um aparato experimental que permitisse realizar ensaios de corte ortogonal em condições laboratoriais controladas, capaz de controlar e parametrizar diversas variáveis do corte por arranque de apara. A este desenvolvimento junta um estudo da influência da velocidade de corte e da utilização da lubrificação no corte do alumínio AA1050.

Numa primeira fase de conceptualização da máquina de ensaios esta foi desenhada com o objetivo de garantir uma elevada rigidez para suportar cargas externas aplicadas sem a sua cedência ou vibração, visando sempre o paralelismo e ortogonalidade entre os vários componentes constituintes, procurando suprimindo a existência de folgas, desalinhamentos, momentos e empenos. Foi efetuado um estudo às ligações aparafusadas da máquina que mostrou que a máquina consegue suportar elevadas cargas externas. Durante cada ensaio, os desníveis da superfície maquinada foram sempre medidos recorrendo a um relógio comparador, onde era possível observar que quando existiam rondavam no máximo o valor de 3 μm , valor de uma ordem de grandeza menor que a espessura de corte mais baixa ensaiada, concluído que a ferramenta se encontrava devidamente fixa. Este valor de rugosidade pode ter influência nos ensaios de corte, sendo que apenas um conjunto de passagens de lixa de grão pela face do provete depois de cada ensaio pode não ser suficiente para o correto acondicionamento da ferramenta. A oscilação frequente das forças de penetração no início de cada ensaio pode estar relacionada com algumas vibrações provenientes da estrutura da máquina. A dificuldade em obter condições de velocidade constante devido ao mau funcionamento dos condensadores foi uma dificuldade apenas ultrapassada pela repetibilidade de ensaios. Numa aproximação mais científica, os sucessivos ensaios efetuados ao longo desta dissertação apontam que os ensaios são mais equiparáveis quando efetuados de uma espessura maior para uma menor, pois existe mais homogeneidade de material quanto maior for a espessura alcançada. É também de notar que o histórico do material removido não se extingue numa só passagem pelo provete, sendo que um melhor acondicionamento é necessário. O alumínio AA1050 em condições de alta velocidade apenas exhibe evoluções de força estáveis a partir de uma espessura de 0,1 mm, apresentando sempre oscilações. Numa tentativa de estabilização das oscilações, um provete com 48 mm foi submetido a um ensaio de corte, apresentando novamente oscilações de força ao longo do seu comprimento, concluindo ser uma característica intrínseca ao material. Ao observar as aparas resultantes do processo, o arranque de apara do provete de alumínio AA1050 é efetuado através do encruamento e acumulação de dano na superfície do provete, em que este dano acumulado, quando ultrapassa um certo limite, ocorre a rotura dos elementos, concluindo que este material não se comporta aproximadamente como um material rígido-perfeitamente plástico, não corroborando os postulados do corte ortogonal. O uso de glicerina

como lubrificante neste processo resultou num aumento do coeficiente de atrito na ordem dos 9 e 30%, para condições quase-estáticas e de alta velocidade, respetivamente, devido ao aumento das forças de penetração numa razão maior que a do decréscimo das forças de corte. Este facto foi também comprovado por outros ensaios nesta máquina que demonstraram que para o mesmo material, recorrendo a outro lubrificante, registaram-se aumentos do coeficiente de atrito na ordem dos 10%, para condições de alta velocidade.

6.2. Perspetivas de trabalhos futuros

Relativamente ao aparato experimental, este deve estar sujeito a constantes melhorias que permitam um melhor funcionamento para o qual foi projetado. Para uma rigidez ainda mais elevada, o próximo passo passaria pela soldadura das placas entre si, promovendo uma ligação com maior rigidez que a ligação aparafusada.

A realização dos ensaios de corte foi por vezes acompanhada de falhas técnicas como o mau aperto da ferramenta de corte, bem como por vezes o mau aperto do dispositivo de fixação do provete, resultando num ensaio menos conseguido que por vezes acarretava uma danificação na face do provete. Para a retificação dos ensaios menos conseguidos, um novo ensaio era efetuado para retificar a face do provete, concluindo que um pequeno centro recondicionamento e limpeza da ferramenta poderia ser instalado na própria máquina de ensaios num dos espaços junto à guia móvel.

A dificuldade em obter velocidades constantes de corte devido às falhas constantes dos condensadores foi um dos desafios desta dissertação, aconselhando uma revisão à placa de circuito elétrico para um apuramento do funcionamento dos seus componentes.

Devido à elevada velocidade de corte, as aparas eram projetadas para fora da área de trabalho, sendo que o seu levantamento foi um dos grandes obstáculos nesta dissertação, sendo que a introdução de um pequeno compartimento amovível diminuiria a área de projeção das aparas.

A observação por microscópio das aparas não apresenta uma resolução suficientemente boa para uma cotagem rigorosa das aparas. O facto de os ensaios terem sido feitos com algum espaçamento levou a que a medição das aparas não fosse sequencial, sendo que o foco de observação da lente ter sido ajustado para cada um dos casos, não havendo um padrão geral de focagem ao longo de todas as medições para uma comparação macroscópica rigorosa.

O facto de o alumínio AA1050 não apresentar um comportamento rígido-perfeitamente plástico impossibilita o estudo do corte ortogonal de uma maneira rigorosa em condições de alta velocidade, sendo que não foi efetuado nenhum tratamento térmico que eliminasse o encruamento e as tensões residuais de modo a se aproximar mais ao comportamento de um material desejado para este tipo de análise.

7. Referências

- Agarwal A., Lang J., *Foundations of Analog and Digital Electronic Circuits*, Morgan Kaufmann, 2005.
- Ali M.K., *A sensor for measuring surface shear stresses in metal forming*, Queen`s University, Canada, 2001.
- Bay N., *Friction and Adhesion in Metal forming and Cold Welding*, Technical University of Denmark, Institute of Manufacturing Engineering, D. Tech. Thesis, MM. No. 85.43,1985.
- Besson J., *Theatre des instrumens mathematiques et mecanique*, 1578.
- Biringuccio V., *De La Pirotechnia*, Senato Veneto, Venice, Italy, 1540; English Trans. by C. S. Smith and M. T. Gnudi, The American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, New York, 1942, pp. 308–312.
- Bowden F.P., Tabor D., *Friction and Lubrication of Solids*, Oxford Clarendon Press, Oxford, 1964
- Brown E.D., Owens R.S., Booser E.R., *Friction of Dry surfaces*, ASME, New York, 1969.
- Campos J., Coelho J., *Comunicação particular*, IST, Lisboa, 2019
- Cangundo E., *Avaliação experimental da condição tribológica no processo de corte por arranque de avara*, IST, Lisboa, 2009.
- Carilho J., *Avaliação experimental da força de atrito durante o processo de corte por arranque de avara*, IST, Lisboa, 2007.
- Childs T.H.C., Maekawa K., *Computer aided simulation of chip flow and tool wear*, Wear 139, 1990.
- Cordeiro D., *Avaliação Numérica e Experimental de Tensões Residuais*, IST, Lisboa, 2010.
- Cristino V., *Experimental Assessment of Analytical Solutions for Orthogonal Metal Cutting*, IST, Lisboa, 2007.
- Fernandes J., *A importância do oxigénio no comportamento tribológico do corte por arranque de avara*, IST, Lisboa, 2017.
- Gregório A., *Ensaio de Impacto e Elevadas Velocidades de Deformação*, IST, Lisboa, 2017.
- Holler, F. James, Skoog, Douglas A. & Crouch, Stanley R., *Principles of Instrumental Analysis (6th ed.)*, Cengage Learning, 2007, pp. 9.
- Industry Report, *Metal Cutting Machine (MCM) Market Size, 2018-2025*, Aug 2017.
- Kato, S., Yamaguchi, Y. e Yamada, M., *Stress distribution at the interface between chip and tool in machining*, Trans ASME J. Eng. Ind. 948, 683-689, 1972.
- Lee E. H., Shaffer B.W., *Theory of plasticity applied to a problem of machining*, J. appl. Mech., Trans. ASME, vol. 73, 405-413, 1951.

Marinov V., *Manufacturing Processes for Metal Products*, Kendall/Hunt Publishing, Dubuque, IA, 2008.

Marques O., *Estudo dos efeitos de escala na resistência mecânica das ligas AA1050 e AA1085*, IST, Lisboa, 2016.

Myers D., *Surfaces, Interfaces, and Colloids, Principles and Applications*, Willey Global Education, New York, 1999.

Merchant M.E., *J. Applied Physics.*, vol. 66, 168-170, 1944.

Naysmith J, Remarks on the introduction of the slide principle in tools and machines employed in the production of machinery, in: R. Buchanan, Ed., *Practical Essays on Millwork and Other Machinery*, 3rd edn., John Weale, London, U.K., 1841.

Noble D., *Forces of Production: A Social History of Industrial Automation*, Transaction Publishers, 2011.

Pereira J., *Análise Experimental e Modelação Numérica do Mecanismo de Formação de Apra em condições de corte ortogonal*, IST, Lisboa, 2009.

Ponting C., *World History, A New Perspective*, Pimlico Publications, ISBN 0-7126-6572-2, 2000.

Prosser R. D., *Widia, its development and shop applications*, *ASME Trans.*, 1929.

Rau P. N., *Manufacturing Technology Volume 2: Metal Cutting and Machine Tools*, Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, McGraw-Hill Offices, New Delhi, 2009.

Reintjes J. F., *Numerical Control: Making a New Technology*, Oxford University Press, Oxford, U.K., 1991.

Roe J. W., *English and American Tool Builders*, Yale University Press, New Haven, CT, 1916; Reprinted by Lindsay Publications, Bradley, IL, 1987.

Rolt L. T. C., *Tools for the Job*, Batsford, London, U.K., 1965; Reissued by HSMO Press, London, 1986.

Rosenhain W., Sturney A.C., *Proc. Inst. Mech. Engrs. Lab.*, vol.1, 141, 1925.

Santos S., *Influência dos principais parâmetros de corte na geometria da apra*, IST, Lisboa, 2005.

Schey J.A., *Tribology in metalworking; friction lubrication and Wear*, ASM, 1983.

Shirakashi T., Usui E., *Friction characteristic on tool face in metal machining*, *J Jpn Precis Eng*, 1973.

Soldon N. C., *John Wilkinson, 1728–1808: English Ironmaster and Inventor*, Edwin Mellon Press, Lewiston, NY, 1998, pp. 99–109.

Steeds W., *A History of Machine Tools 1700–1910*, Clarendon Press, Oxford, U.K., 1969.

Winer W.O., Cheng H.S., *Film thickness, contact stress and surface temperatures*, *Wear Control Handbook*, M.B. Peterson and W.O. Winer, Ed., ASME, 81-141, 1980.

Woodbury R. S., *History of the Lathe*, Society for the History of Technology, Cleveland, OH, 1961.

Anexos

A.I – Manual do Utilizador – Aquisição de dados

A.II – Programa LabView

A.III – Manual do Utilizador – Atuador Eletromagnético

A.IV – Manual do Utilizador – Procedimento para CAA

A.V – Documentos Técnicos e Equipamentos

A.VI – Ligações Aparafusadas

A.VII – Desenhos Técnicos

A.I - Manual de aquisição de dados



- 1) Ligar o computador e o ecrã
- 2) Ligar a placa de aquisição de dados
- 3) Ligar os dois últimos módulos do amplificador – Figura 1
- 4) Ligar o gerador de sinais e colocar uma onda quadrada (SQRT), carregando no botão WAVE, e usar o botão PARM para marcar 20 V e 700 Hz, regulando os valores com a roda – Figura 2
- 5) No computador, ir à pasta “Duarte Tese” abrir o programa “duarte canhao”
- 6) Depois disto, recomenda-se esperar meia hora antes de realizar o ensaio
- 7) Imediatamente antes de realizar o ensaio na máquina, colocar o botão em “reset”, e depois fazer “operate” nos dois módulos da direita do amplificador – Figura 3
- 8) No programa, escolher a diretoria (carregar na pasta amarela) e pressionar no botão de “gravar”
- 9) Quando se acender a luz verde, o sistema de aquisição de dados está pronto a registar – Figura 4



Figura 1

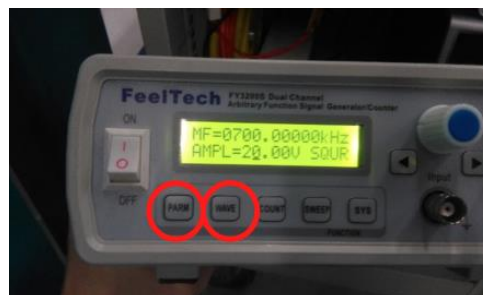


Figura 2



Figura 3

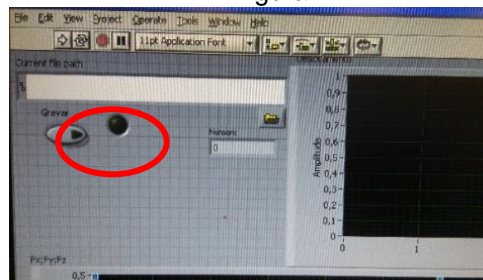


Figura 4

A.II – Programa LabView

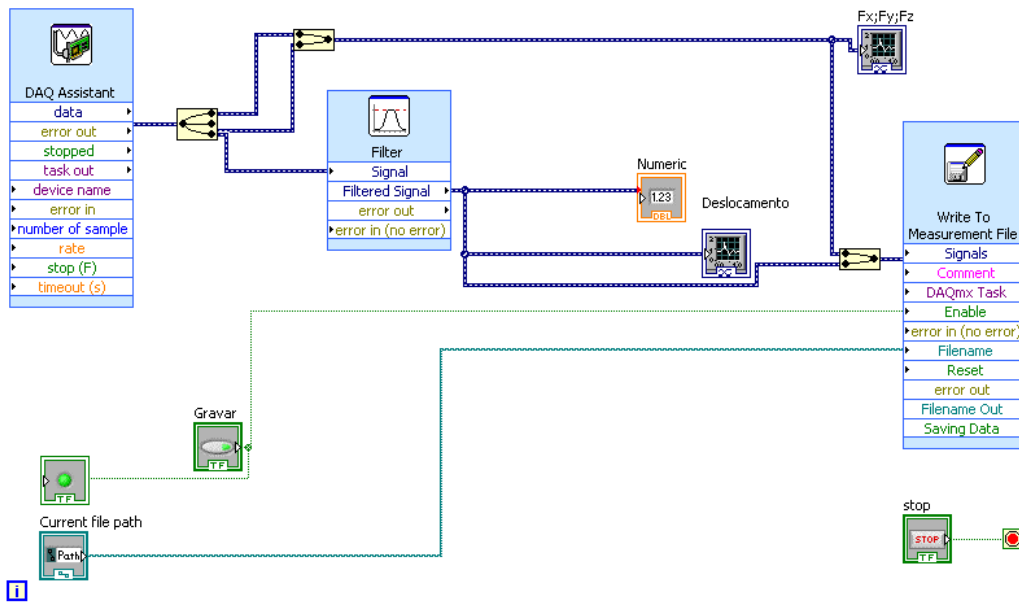


Figura 1. Diagrama de blocos LabView.

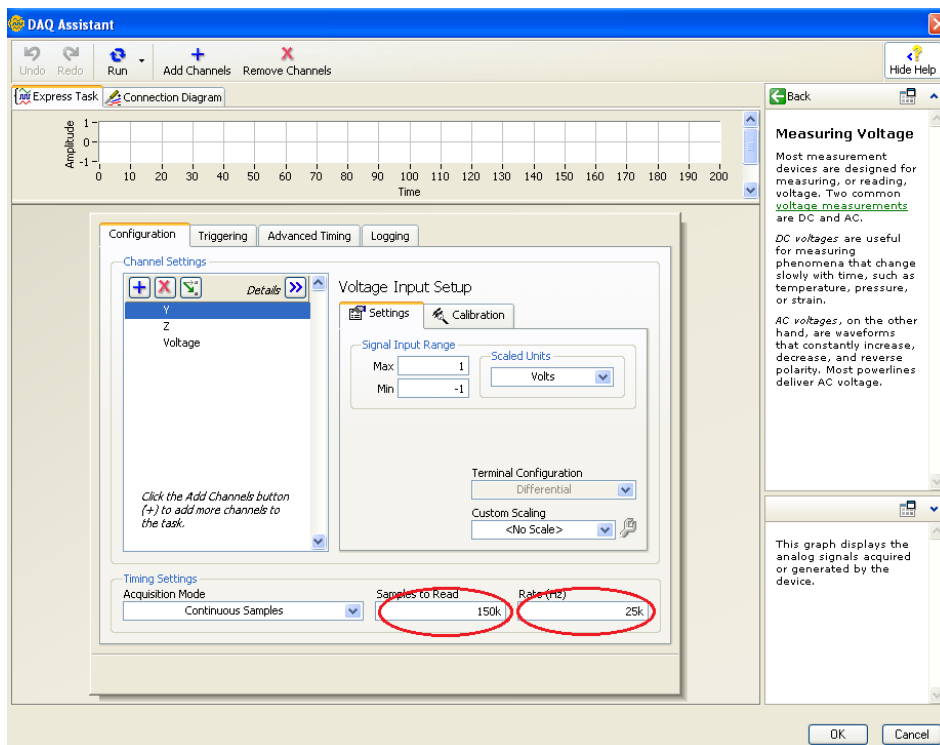


Figura 2. Definições LabView para regime de alta velocidade.

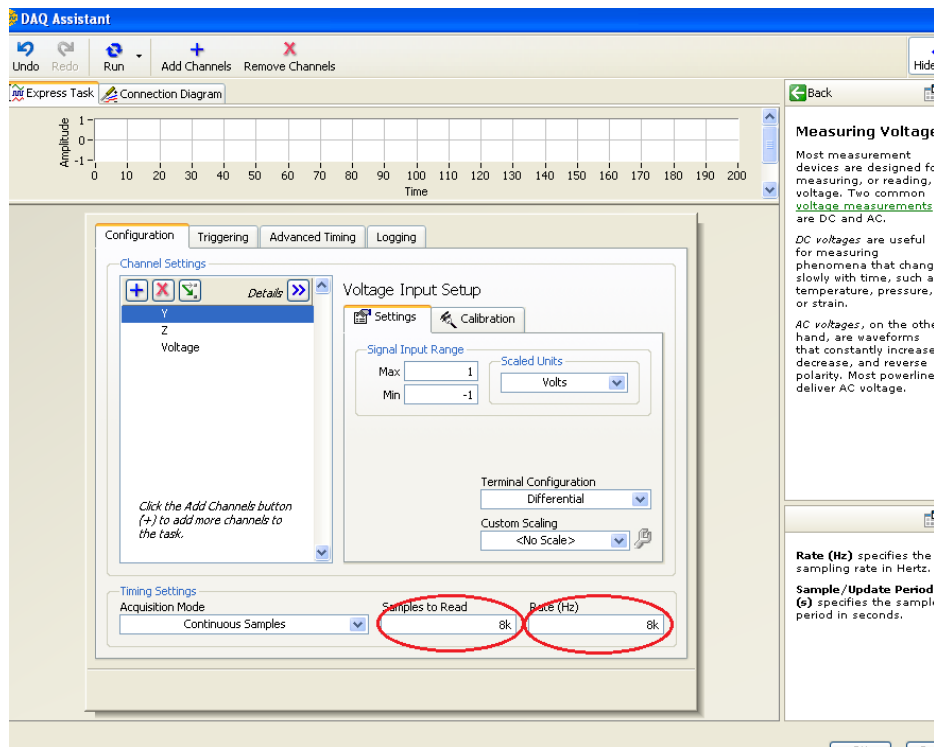


Figura 3. Definições LabView para regime estático.

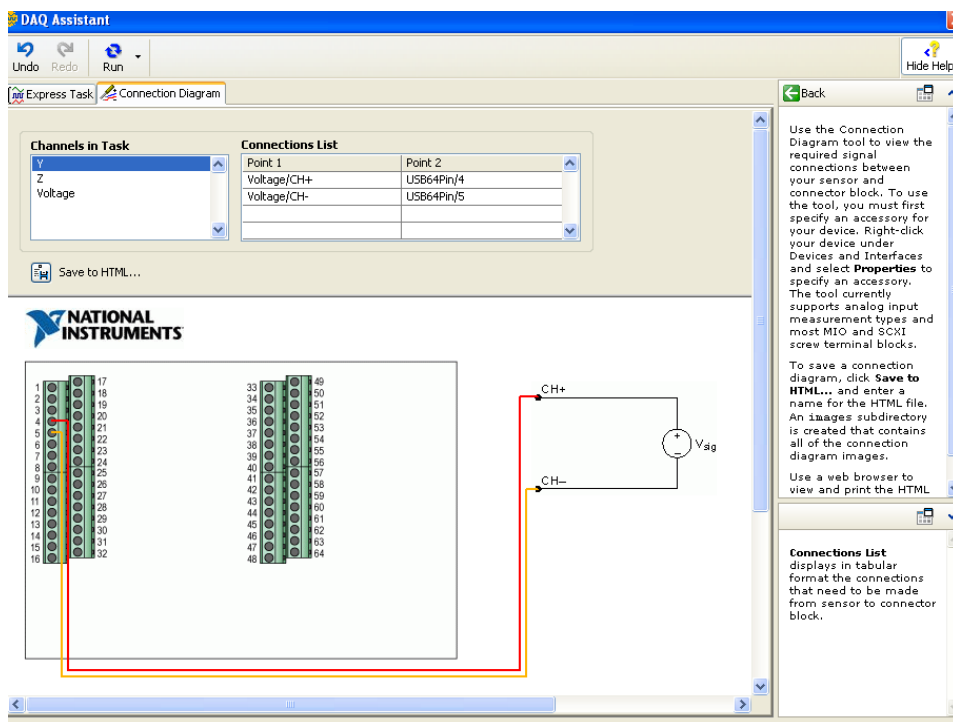


Figura 4. Diagrama de ligações da DAQ para força realizada em yy.

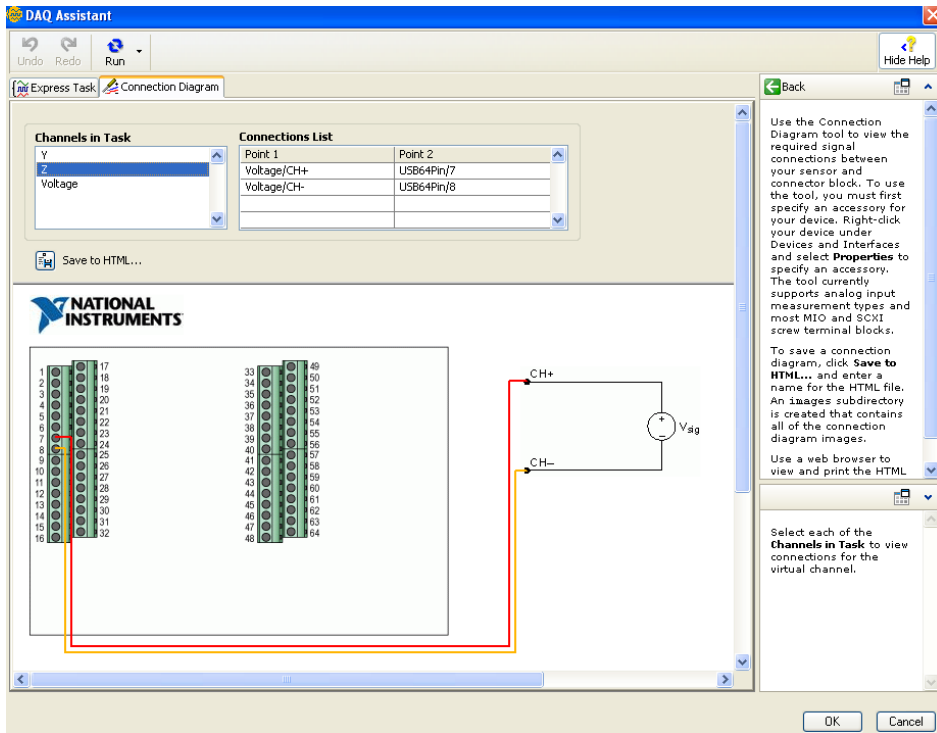


Figura 5. Diagrama de ligações da DAQ para força realizada em zz.

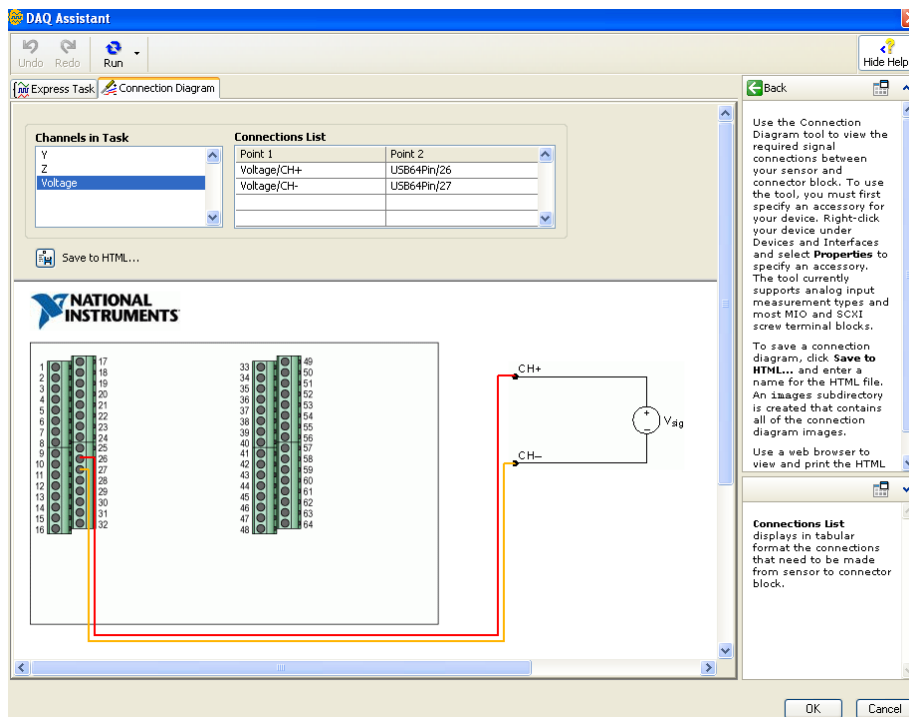
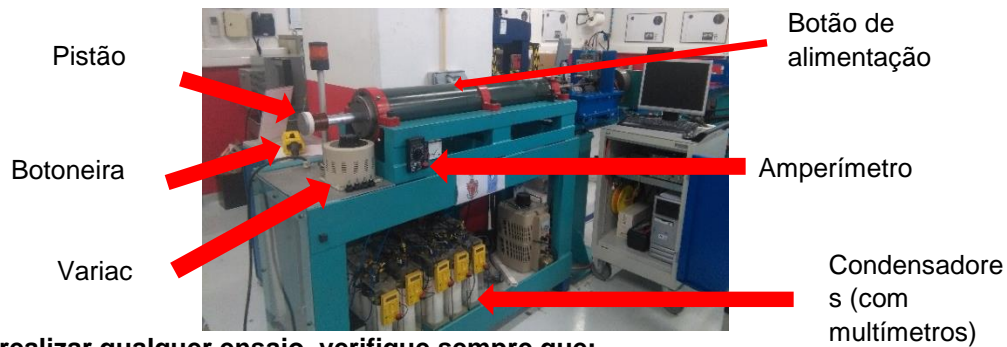


Figura 6. Diagrama de ligações da DAQ para deslocamento realizado.

A.III – Manual do atuador eletromagnético



Antes de realizar qualquer ensaio, verifique sempre que:

- A barra metálica está alinhada com a marca de 15cm da régua – Figura 1
- O pistão está com a marca vermelha voltada para cima e a ponta metálica a 85cm do canhão – Figura 2
- Girar a roda dos multímetros acoplados aos condensadores para a primeira posição – Figura 3
- Verificar que os cond. estão descarregadas (isto é, os multímetros apresentam valores residuais)

Para realizar um ensaio nesta máquina é necessário:

- 1) Pressionar o botão de alimentação – Figura 4
- 2) Na botoneira, rodar o botão de carga para a posição 1 – Figura 5
- 3) Rodar o potenciômetro do Variac até atingir +/- 3A de corrente elétrica para carregar os cond. (verificar esta intensidade da corrente elétrica no amperímetro e que os cond. estão a carregar)
- 4) A corrente vai descendo à medida que os cond. carregam, pelo que se deve repetir o passo 3 sucessivamente até estarem com a tensão desejada (ATENÇÃO: nunca ultrapassar os 4A de corrente nem os 500V nas baterias) – Figura 6
- 5) Quando os condensadores estiverem carregados, rodar o Variac para a posição nula e o botão de carga para a posição 0
- 6) Para efetuar o ensaio, rodar o botão de descarga para a posição 1
- 7) Por fim, rodar o botão de descarga para a posição 0



Figura 1



Figura 2



Figura 3



Figura 4



Figura 5



Figura 6

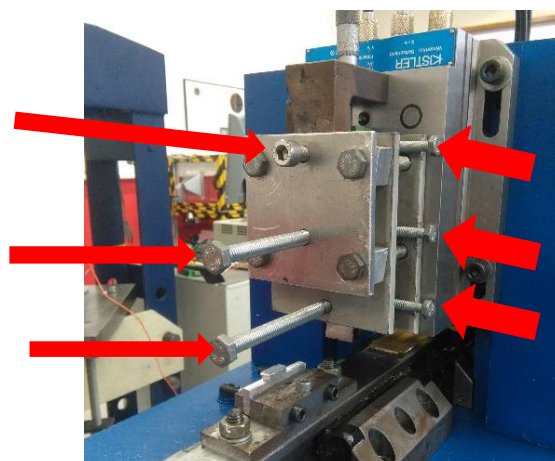
A.IV – Manual para o processo de corte por arranque de apara



- 1) Verificar que a ponta da ferramenta está ao mesmo nível do topo do provete
- 2) Ajustar o parafuso no topo do aparato até tocar na parte de cima da ferramenta



- 3) Soltar a ferramenta, desaparafusando os 6 parafusos indicados na figura (ATENÇÃO: ao mesmo tempo que se desaperta o último parafuso, deve se segurar na ferramenta por baixo, para evitar que esta caia e se danifique)



- 4) Descer mais um pouco o parafuso referido no passo 2 na medida pretendida para a espessura (NOTA: no eixo vertical deste parafuso leem-se milímetros e no eixo circular leem se as décimas de milímetro)
- 5) Subir a ferramenta até tocar no parafuso, e voltar a aparafusar os parafusos

A.V – Documentos técnicos e equipamentos

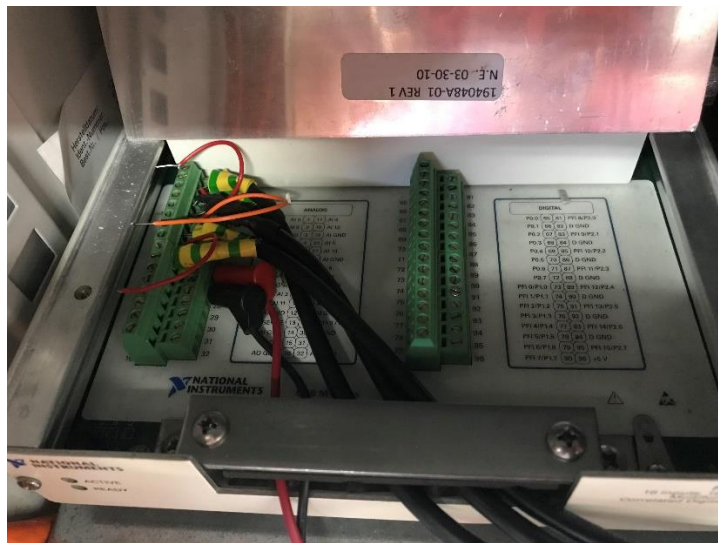


Figura 1. Ligações de força e deslocamento na DAQ

Force

KISTLER
measure. analyze. innovate.

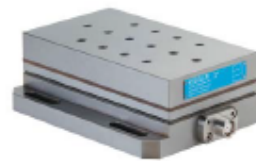
Multicomponent Dynamometer

Type 9257B

-5 ... 10 kN, Top Plate 100x170 mm

Quartz three-component dynamometer for measuring the three orthogonal components of a force. The dynamometer has a great rigidity and consequently a high natural frequency. Its high resolution enables the smallest dynamic changes in large forces to be measured.

- Universal applicable
- For cutting force measurements
- Stable and reliable



Description

The dynamometer consists of four three-component force sensors fitted under high preload between a baseplate and a top plate. Each sensor contains three pairs of quartz plates, one sensitive to pressure in the z direction and the other two responding to shear in the x and y directions respectively. The force components are measured practically without displacement.

The outputs of the four built-in force sensors are connected inside the dynamometer in a way to allow multicomponent measurements of forces and moments to be performed. The eight output signals are available at the 9-conductor flange socket.

The four sensors are mounted ground-insulated. Therefore ground loop problems are largely eliminated.

The dynamometer is rustproof and protected against penetration of splashwater and cooling agents. Together with the connecting cable Type 1687B5/1689B5 and Type 1677A5/1679A5 it corresponds to the protection class IP67.

A special thermal isolation coating is integrated in the top plate which renders the dynamometer largely insensitive to temperature influences.

Application Examples

- Dynamic and quasistatic measurement of the three orthogonal components of a force
- Measuring cutting force when turning, milling, grinding etc. In conjunction with the calibrated partial ranges the high sensitivity and low threshold allow exact measurements on small tools and when grinding.
- Measurements on scale models in wind channels

Technical Data

Range	F_x, F_y, F_z	kN	-5 ... 5 ^a
	F_x for F_x and $F_x \times 0.5 F_x$	kN	-5 ... 10 ^b
Calibrated partial range 1	F_x, F_y	N	0 ... 500
	F_x	N	0 ... 1 000
Calibrated partial range 2	F_x, F_y	N	0 ... 50
	F_x	N	0 ... 100
Overload	F_x, F_y, F_z	kN	-7.5/7.5
	F_x for F_x and $F_x \times 0.5 F_x$	kN	-7.5/15
Threshold		N	<0.01
Sensitivity	F_x, F_y	pC/N	~7.5
	F_z	pC/N	~3.7
Linearity, all ranges		%FSO	±1
Hysteresis, all ranges		%FSO	±0.5
Cross talk		%	±2
Rigidity	c_x, c_y	kN/µm	>1
	c_z	kN/µm	>2
Natural frequency	$f_n(x, y, z)$	kHz	~3.5 ^c
Natural frequency	$f_n(x, y)$	kHz	~2.3 ^d
(mounted on flanges)	$f_n(z)$	kHz	~3.5 ^e
Operating temperature range		°C	0 ... 70
Capacitance	F_x, F_y, F_z	pF	~220
Insulation resistance (20 °C)	Ω		>10 ¹¹
Ground insulation	Ω		>10 ¹²
Protection class EN60529			IP67 ^f
Weight		kg	7.3
Clamping area	mm		100x170
Connection			Fischer flange, 9 pol. neg.

^a Application of force inside and max. 25 mm above top plate area

^b Range for turning, application of force at point A

^c With connecting cable types 1687B5, 1689B5, 1677A5, 1679A5

^d Without tool holder type 3402

This information corresponds to the current state of knowledge. Kistler reserves the right to make technical changes. Liability for consequential damage resulting from the use of Kistler products is excluded.

©2009, Kistler Group, Talachstrasse 22, 8408 Winterthur, Switzerland
Tel. +41 52 224 11 11, Fax +41 52 224 14 14, info@kistler.com, www.kistler.com

Figura 2. Datasheet da célula de carga Kistler®

A.VI – Ligações Aparafusadas

Neste anexo, serão apresentadas as fórmulas e definições aplicadas na parte da análise da rigidez da máquina de ensaios encontradas no capítulo 4. Toda esta informação pode ser encontrada no capítulo 8 “Screws, Fasteners, and the Design of Nonpermanent Joints” do livro *Shigley’s Mechanical Engineering Design, 10th Edition, McGraw-Hill, 2015*.

- Carga de prova F_p :

$$F_p = S_p * A_t$$

Em que A_t é a Área de Corte, em mm^2 , e S_p é a Resistência de Prova, em MPa .

- Pré-Carga F_i :

$$F_i = \begin{cases} 0,75 * F_p, & \text{ligações não permanentes} \\ 0,9 * F_p, & \text{ligações permanentes} \end{cases}$$

- Fator de segurança de resistência do parafuso n_p (Verificação à resistência):

$$n_p = \frac{F_p - F_i}{C * F_{sep}}$$

- Fator de separação n_{sep} (Verificação à separação):

$$n_{sep} = \frac{F_i}{(1 - C) * F_{sep}}$$

- Fator de corte n_{corte} (Verificação ao corte):

$$n_{corte} = \frac{F_i - (1 - C) * F_{sep}}{\frac{F_{corte}}{f_m}}$$

- Fator global n_{global} (Verificação à separação e corte combinados):

$$n_{global} = \frac{F_i}{F_{sep} * (1 - C) + \frac{F_{corte}}{f_m}}$$

- Força direta aplicada ao parafuso $F_{parafuso}$:

$$F_{parafuso} = \frac{F_{ext}}{N_{parafusos}}$$

- Força indireta aplicada no parafuso $F'_{parafuso}$:

$$F'_{parafuso} = \frac{M_{S_i}}{\sum S_i^2} = F_{sep}$$

- Força resultante no parafuso $F_{resultante}$:

$$F_{resultante}^2 = F_{parafuso}^2 + F_{parafuso}'^2 + 2 * F_{parafuso} * F_{parafuso}' * \cos(\alpha) = F_{corte}$$

- Rigidez efetiva estimada do parafuso k_b :

$$k_b = \frac{A_d * A_t * E}{A_d * l_t + A_t * l_d}$$

- Rigidez efetiva dos membros k_m :

$$k_m = \frac{0.5774 * \pi * E * d}{2 * \ln\left(5 * \frac{0.5774 * l + 0.5 * d}{0.5774 * l + 2.5 * d}\right)}$$

- Constante da rigidez de ligação C :

$$C = \frac{k_b}{k_b + k_m}$$

- Elongamento δ da ligação aparafusada:

$$\delta = \frac{P_{parafuso}}{k_b}, \text{ em que } P_{parafuso} = C * F_{sep}$$

- Fator de segurança de Pugsley n :

$$n = n_{sx} * n_{sy}$$

Characteristic ^a		B =				
		vg	g	f	p	
A = vg	C =	vg	1.1	1.3	1.5	1.7
		g	1.2	1.45	1.7	1.95
		f	1.3	1.6	1.9	2.2
		p	1.4	1.75	2.1	2.45
A = g	C =	vg	1.3	1.55	1.8	2.05
		g	1.45	1.75	2.05	2.35
		f	1.6	1.95	2.3	2.65
		p	1.75	2.15	2.55	2.95
A = f	C =	vg	1.5	1.8	2.1	2.4
		g	1.7	2.05	2.4	2.75
		f	1.9	2.3	2.7	3.1
		p	2.1	2.55	3.0	3.45
A = p	C =	vg	1.7	2.15	2.4	2.75
		g	1.95	2.35	2.75	3.15
		f	2.2	2.65	3.1	3.55
		p	2.45	2.95	3.45	3.95

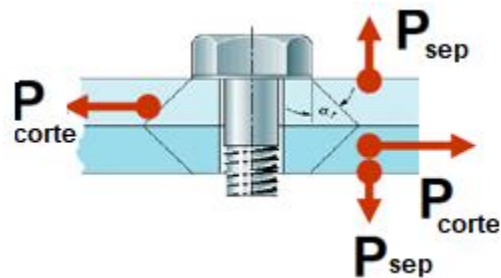
^a vg = very good, g = good, f = fair, and p = poor.
 A = quality of materials, workmanship, maintenance, and inspection.
 B = control over load applied to part.
 C = accuracy of stress analysis, experimental data, or experience with similar parts.

(a)

Characteristic ^a		D =		
		ns	s	vs
E =	ns	1.0	1.2	1.4
	s	1.0	1.3	1.5
	vs	1.2	1.4	1.6

^a vs = very serious, s = serious, and ns = not serious
 D = danger to personnel.
 E = economic impact.

(b)



(c)

Figura 1. a) Coeficiente n_{sx} para A B e C pelo método de Pugsley; b) Coeficiente n_{sy} para D e E pelo método de Pugsley; c) Representação esquemáticas das forças envolvidas de corte e separação.

- A – Boa qualidade dos materiais (good)
- B – Bom controlo nas cargas aplicadas no processo (good)
- C – Existência de dados experimentais em processos similares (good)
- D – Não apresenta perigo para utilizadores ou terceiros (not serious)
- E – Impacto económico na escolha dos componentes (serious)

Tabela 1. Características das ligações aparafusadas escolhidas

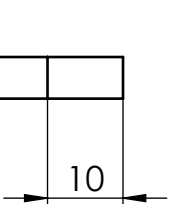
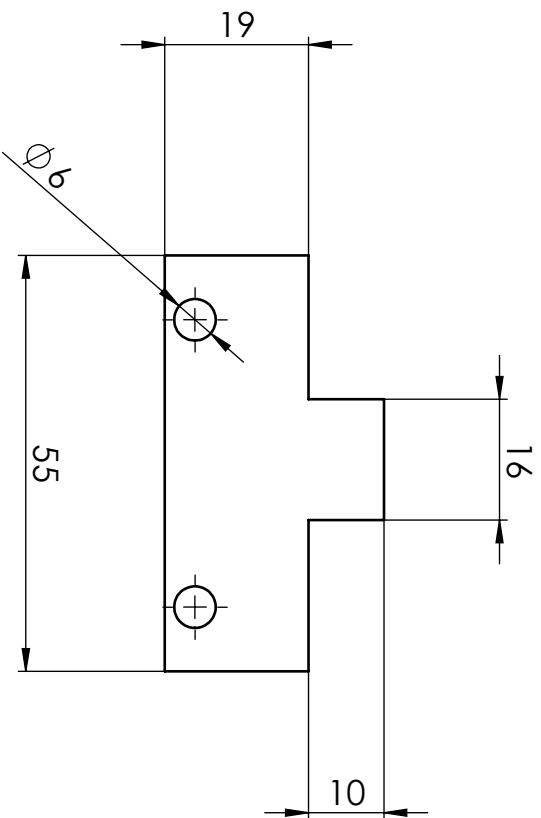
Tipo	Diâmetro d (mm)	Passo p (mm)	Área de corte A_t (mm ²)	Área não roscada A_d (mm ²)	Coefficiente de atrito f_m
M8	8	1,25	36,6	50,265	0,2
M10	10	1,5	58,0	78,53	0,2

Tabela 2. Características da classe dos parafusos escolhidos

Classe	Resistência de Prova S_p (MPa)	Resistência à Cedência S_y (MPa)	Módulo de Young E (GPa)
8.8	600	660	207

A.VII – Desenhos Técnicos

Esta página foi deixada intencionalmente em branco.



Escola
X·X

Material:

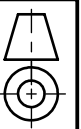
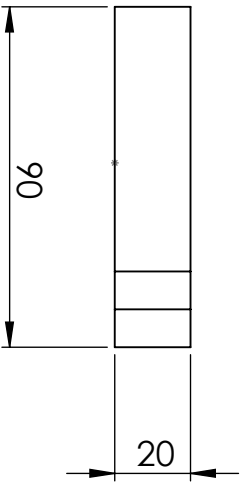
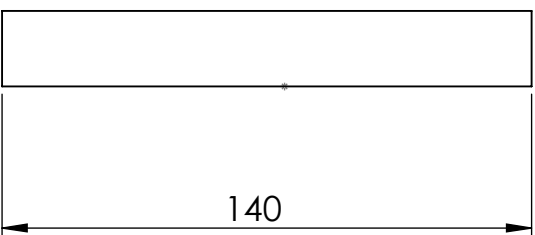
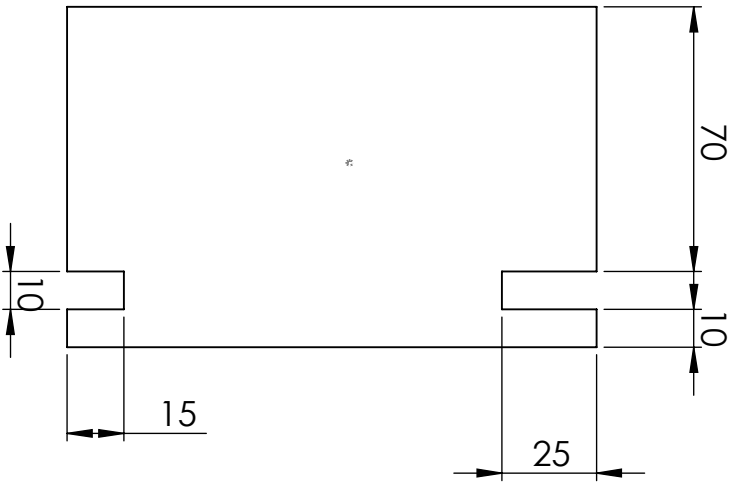
Tolerância Geral:

Acabamentos:

Desenho	Rubrica	Data
Verificou		28/05/2019
Projectou		28/05/2019
Fabricou		

Nome: Duarte Andrade		n.º 67770	
Curso:		Turno:	
Proveite			
Folha	Desenho n.º	Folha	Peso: Revisto:
A4	MOXL01X-001	1	





Escala
X:X

Material:

Tolerância Geral:

Acabamentos:

Notas:

Descrição	Rubrica	Data
Desenhou		28/05/2019
Verificou		28/05/2019
Projectou		
Fabricou		

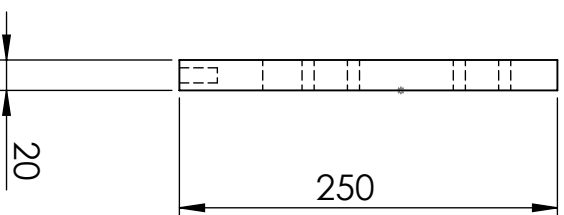
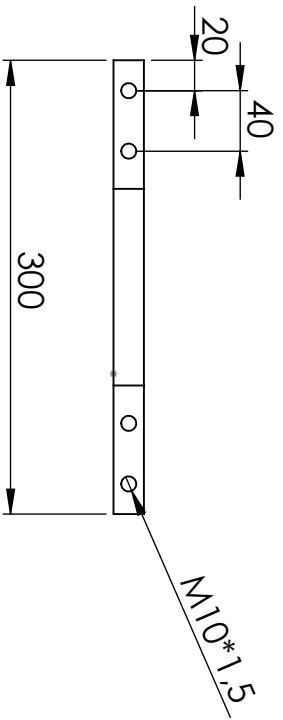
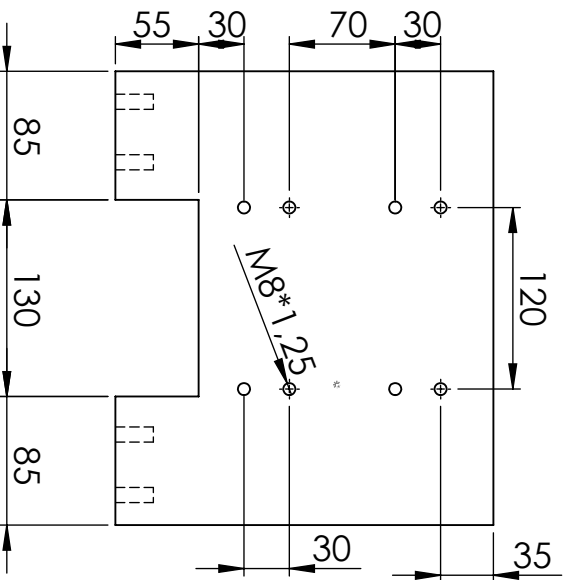


Nome: Duarte Andrade n.º 67770

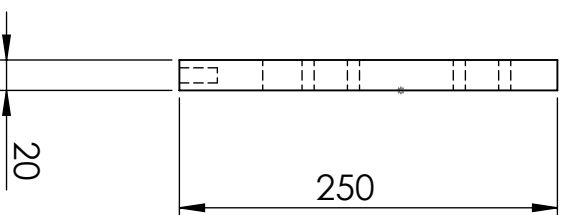
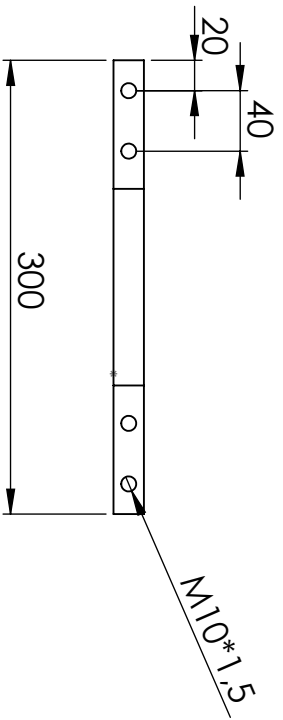
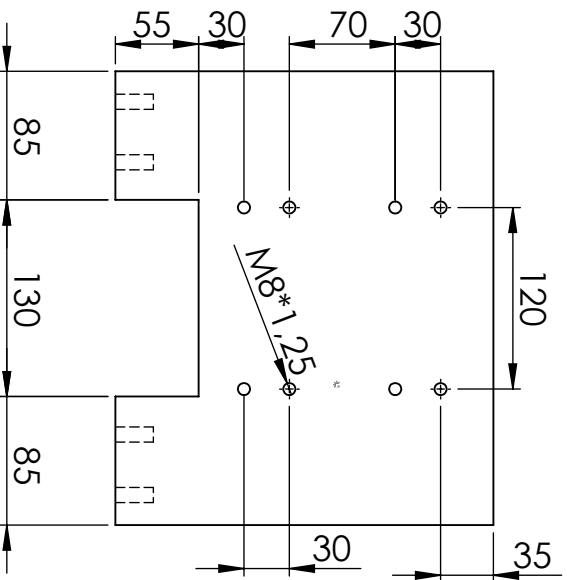
Curso: Turno:

Placas apoio
máq. à estrutura (x4)

Folha	Desenho n.º	Folha	Peso:	Revisão:
A4	MOXL01X-001	1		

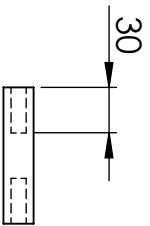
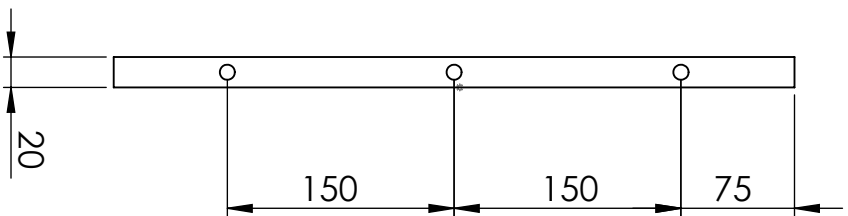
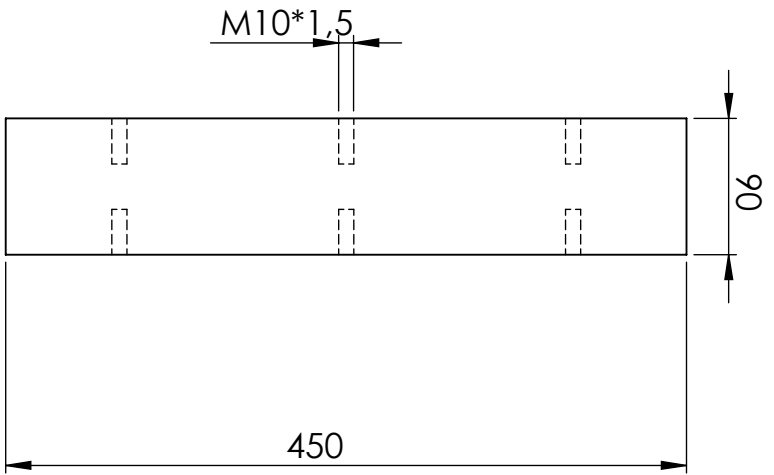


		Escola				
X:X						
Material:	Desenhou	Rubrica	Data			
	Verificou		28/05/2019			
	Projectou		28/05/2019			
Tolerancia Geral:	Fabricou					
Notas:						
Adequamentos:						
Placa central de apoio ferr. corte		Folha	Desenho n.º	Folha	Peso:	Revisão:
		A4	MOXL01X-001	1		
Nome: Duarte Andrade Curso:		n.º 67770 				



		Escola		
X:X				
Material:	Desenhou	Rubrica	Data	
	Verificou		28/05/2019	
	Projectou		28/05/2019	
Tolerancia Geral:	Fabricou			
Adornamentos:	Notas:			
Placa central de apoio ferr. corte		Nome: Duarte Andrade		n.º 67770
		Curso:		Turno:
Folha	Desenho n.º	Folha	Peso:	Revisão:
A4	MOXL01X-001	1		



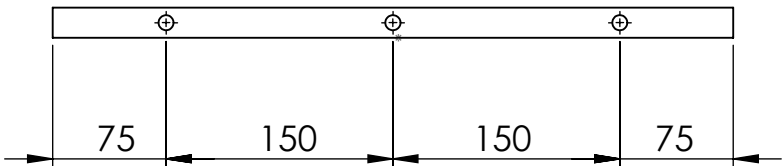
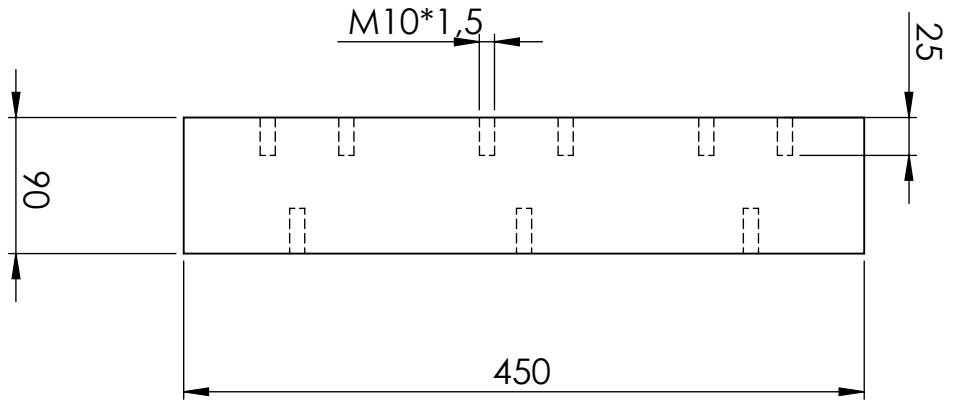
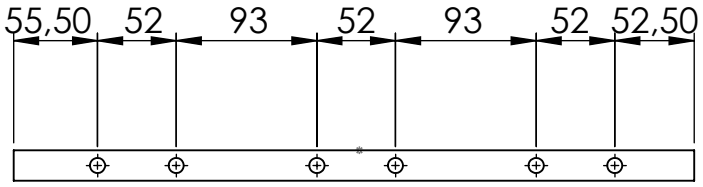


	Escola	
	X·X	
Material:	Desenhou	
	Verificou	
Tolerância Geral:	Projectou	
	Fabricou	
Acabamentos:	Notas:	

	Rubrica	Data
		28/05/2019
		28/05/2019

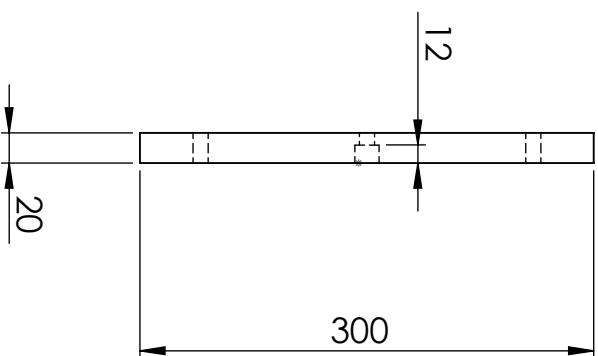
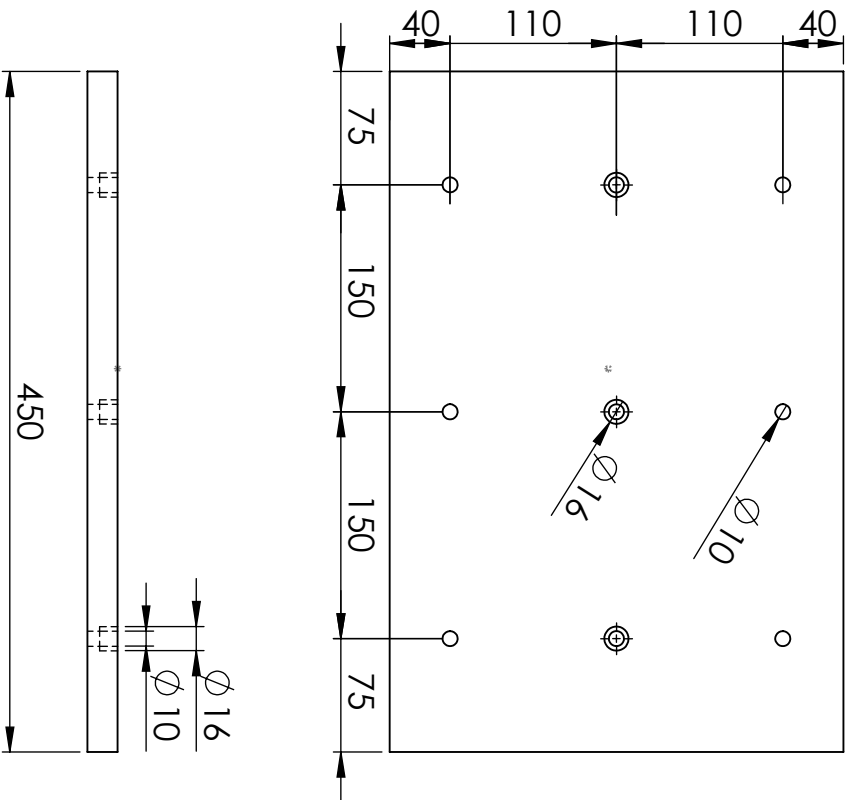
Placa lateral vertical de suporte (x2)			
Nome: Duarte Andrade		n.º 67770	
Curso:		Turno:	
Folha	Desenho n.º	Folha	Paso: Revisto:
A4	MOXL01X-001	1	





		Escola			
X:X					
Material:		Desenho		Data	
		Verificou		28/05/2019	
		Projectou		28/05/2019	
		Fabricou			
Tolerancia Geral:		Notas:			
Acabamentos:					
<p>Nome: Duarte Andrade</p> <p>Curso: Placa central vertical de suporte</p> <p>Turno: nº 67770</p>					
Folha	Desenho n.º	Folha	Peso:	Revisão:	
A4	MOXL01X-001	1			





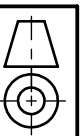
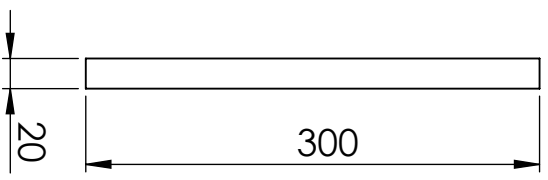
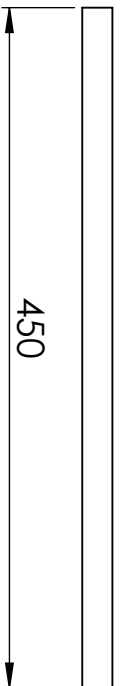
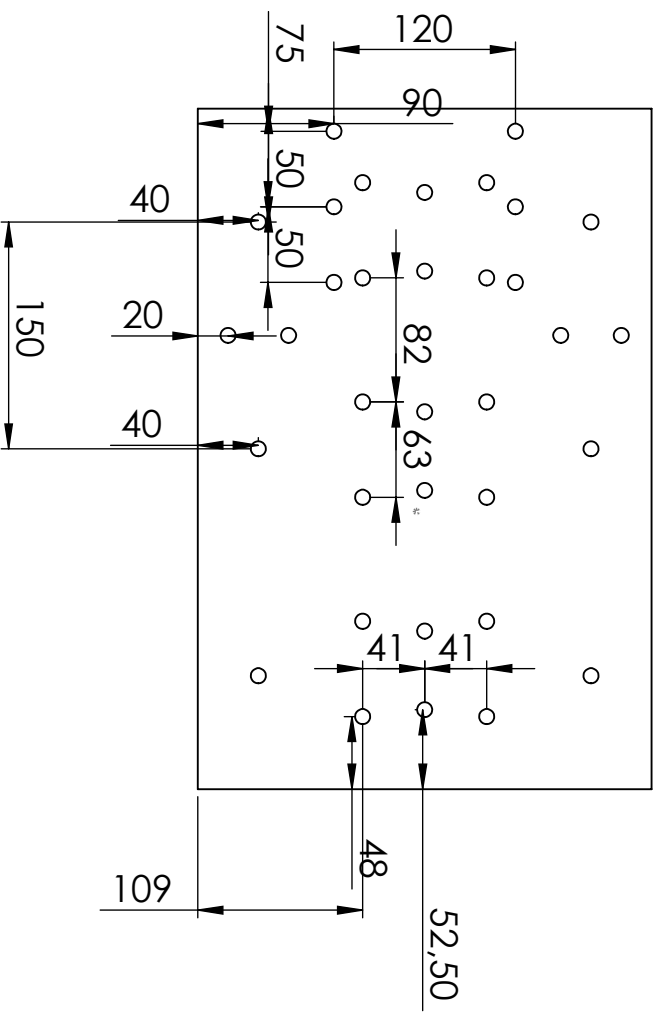
	Escala	X:X
	Material:	
Tolerancia Geral:	Notas:	
Acabamentos:		

Desenhado	Rubrica	Data
Verificado		28/05/2019
Projetado		28/05/2019
Fabricado		

Nome: Duarte Andrade nº 67770		
Curso:		

Base inferior		
Folha	Desenho n.º	Folha
A4	MOXL01X-001	1
Peso:	Revisão:	





Escola
X: X

Desenho	Rubrica	Data
Verificou		28/05/2019
Projectou		28/05/2019
Fabricou		

Material:
Tolerancia Geral:
Notas:

Achabamentos:

TECNICO
L.P.A.L.º

Nome: Duarte Andrade n.º 67770
Curso: Turno:

Base principal

Folha	Desenho n.º	Folha	Peso:	Revisão:
A4	MOXL01X-001	1		