



Mestrado em Engenharia Mecânica

ACABAMENTO DE SUPERFÍCIES NA RECTIFICAÇÃO DE METAL DURO EM PUNÇÕES PARA PRENSAGEM DE PÓ

Relatório de Estágio apresentado para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, especialização em Construção e Manutenção de Equipamentos Mecânicos

Autor

Filipe André dos Santos Morais

Orientador

Pedro Miguel Soares Ferreira

Professor do Departamento de Engenharia Mecânica
Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

Supervisor

Eng.º. Daniel Amaral de Figueiredo

Palbit, S.A.

Coimbra, Abril de 2018

Aos meus pais, irmão e, em particular e com especial carinho, à minha sobrinha Carolina e ao meu sobrinho Simão.

“A criança portuguesa é excessivamente viva, inteligente e imaginativa. Em geral, nós outros, os Portugueses, só começamos a ser idiotas quando chegamos à idade da razão. Em pequenos temos todos uma pontinha de génio.”

Eça de Queiroz

AGRADECIMENTOS

Em forma da minha mais sincera gratidão por toda a ajuda e empenho prestados e paciência acumulada, gostava de agradecer a:

- Pedro Ferreira, orientador do estágio e docente no Departamento de Engenharia Mecânica do ISEC, pelo acompanhamento prestado e prontidão nas respostas às dúvidas colocadas. Durante o desempenho das minhas funções na Palbit, assim bem como na elaboração deste relatório, foram muitos os momentos em que recordei as suas aulas na disciplina de Tecnologias de Fabrico.

- Fernando Simões, docente no Departamento de Engenharia Mecânica do ISEC, pela maneira descontraída e cativante de transmitir o conhecimento, tanto em contexto de aulas como fora delas. Relembro com muita satisfação a abordagem pessoal realizada há alguns anos atrás, quando comecei a ponderar seriamente iniciar o mestrado em Engenharia Mecânica. O seu apoio e optimismo nesta aposta pessoal revelaram-se decisivos para a minha decisão.

- Daniel Figueiredo, Administrador Executivo e Engenheiro de Produto, Qualidade e Desenvolvimento da Palbit, pelo apoio e orientação ao longo de toda a execução do relatório e pela dedicação incondicional em explicar qualquer assunto ou tema relacionados com este trabalho ou sobre quaisquer outras matérias. Representou para mim um expoente de dedicação profissional e cordialidade ímpares.

- Leonardo Silva, chefe da secção da Ferramentaria da Palbit, pelos ensinamentos prestados e pela paciência e disponibilidade incansáveis. Respondeu sempre às múltiplas abordagens com cordialidade e espírito de ajuda, passando os conhecimentos e a informação necessários para a elaboração do presente relatório e para o bom desempenho das minhas funções na empresa. Guardo na memória os bons momentos passados e as pequenas conversas agradáveis partilhadas. Agradeço ainda toda a compreensão e flexibilidade demonstradas para os períodos de descanso necessários, tão importantes para a elaboração do presente documento.

RESUMO

A rectificação de superfícies é um processo de fabrico utilizado em situações onde a exigência do nível de acabamento seja superior e as tolerâncias apertadas. A necessidade de obter superfícies com rugosidades muito baixas, de acabamento muito fino, surge do carácter imprescindível de reduzir ao máximo o atrito entre as partes ou componentes de um sistema com movimento relativo entre eles. Em diversas realidades da indústria a rectificação apresenta-se como uma operação que ocorre após múltiplas outras e é necessária muita atenção para não haver acumulação de custos derivados de uma má execução. A par do rigor da execução, as tolerâncias encontradas para o acabamento apresentam igualmente um grau de exigência elevado. A rectificação de punções para a prensagem de pó – para obtenção de pastilhas de metal duro – é um processo com esta ordem de exigência. As superfícies de contacto das ferramentas de prensagem com o pó – punção inferior e superior, matriz e vareta móvel – têm influência directa no desgaste, vida útil e tempos de ciclo durante a utilização das mesmas. Esse efeito vai reflectir-se no menor ou maior custo de produção e manutenção da mesma. Desta forma, torna-se importante analisar e estudar os parâmetros e características do processo de rectificação e os respectivos níveis de acabamento, através da rugosidade, obtidos nas superfícies maquinadas. O presente relatório de estágio visou, desta forma, avaliar a variação do acabamento das superfícies dos punções em função de alguns parâmetros de maquinagem. A avaliação realizou-se primordialmente através da análise da rugosidade superficial dos punções maquinados.

Palavras-Chave: rugosidade, acabamento de superfícies, rectificação, mós

ABSTRACT

Surface grinding is a manufacturing process used in situations where a high finish level is required. The need to obtain surfaces with very low roughness, with superior finish, arises from the essential character of reducing the friction between the powder and the parts or components of a system with relative movement between them. In many industrial contexts grinding is an operation that occurs after multiple others processes and special carefulness is required to not accumulate unwanted costs due to poor execution. In addition to the extra accuracy during the execution procedures, tolerances usually used in the finishing comprise a very high degree of requirement too. The grinding of punches surfaces for hardmetal powder compacting – in order to obtain hardmetal inserts – is a process with this kind of requirements. The contact between the powder and the faces of the pressing tools – lower and upper punches, die and moving rod – have a direct influence on their wear and lifetime. This means the cost of a tool depends on its lifetime, becoming more expensive as it lasts less. In this way, it becomes important to analyse and study the parameters and characteristics of the grinding process and the respective finish levels obtained in the machined surfaces. This internship report is therefore intended to evaluate the variation of punch surface finish in function of some machining parameters. This evaluation is performed primarily through the surface roughness of the machined punches.

Keywords: roughness, surface finish, grinding, grinding wheels

ÍNDICE

RESUMO	VII
ABSTRACT	IX
ÍNDICE	XI
LISTA DE ABREVIATURAS	XIII
LISTA DE FIGURAS	XV
LISTA DE TABELAS	XIX
1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 - Enquadramento	1
1.2 - Objectivos e metodologias	4
1.3 - Estrutura do relatório	5
1.4 - A empresa PALBIT	6
2 - RECTIFICAÇÃO COMO TECNOLOGIA DE FABRICO	9
2.1 - Introdução	9
2.2 - Rectificação na Indústria	10
2.3 - Movimentos na Rectificação	13
2.4 - Categorias de Rectificação	14
2.4.1 - Rectificação Plana	15
2.4.2 - Rectificação Cilíndrica	17
2.5 - Retificação na PALBIT	18
2.5.1 - Metal Duro	20
2.5.1.1 - classes de metal duro	22
2.5.2 - Punções para Prensagem de Pó	24
3 - ACABAMENTO DE SUPERFÍCIES	27
3.1 - Estado da Superfície e Rugosidade	27
3.2 - Superfície Geométrica, Real e Efectiva	28

3.3 - Parâmetros de Rugosidade	30
3.4 - Rugosidades em Acabamento de Superfícies	31
3.5 - Considerações	33
4 - MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS	35
4.1 - Mós Utilizadas nos Ensaios	35
4.1.1 - Tamanho do Grão	37
4.1.2 - Concentração do Grão	40
4.1.3 - Grau da mó	41
4.1.4 - Especificações das Mós	42
4.2 - Equipamentos Utilizados	44
4.2.1 - Máquina de Rectificação IRD 400	44
4.2.1.1 - Motores lineares	45
4.2.1.2 - Spindles e Sistemas de Eixos	46
4.2.1.3 - Lubrificante de Refrigeração do Sistema	47
4.2.1.4 - Sistema de Fixação	48
4.2.2 - Rugosímetro TESA Rugosurf G10	50
4.3 - Determinação dos Parâmetros de Corte	53
4.3.1 - Mecanismo de Corte	53
4.3.2 - Parâmetros de corte	55
4.3.2.1 - Avanço por volta	55
4.3.2.2 - Oscilação	56
4.3.2.3 - Velocidade de corte	56
4.3.2.4 - Velocidade de rotação	57
4.3.2.5 - Outros factores	57
5 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS	59
5.1 - Introdução	59
5.2 - Análise Prévia das Variáveis no Acabamento de Superfícies	59
5.3 - Resultados obtidos	62
6 - CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	73
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75

LISTA DE ABREVIATURAS

ANSI – American National Standards Institute

ASME – American Society of Mechanical Engineers

CBN – *cubic boron nitride*

CNC – *computer numeric control*

DIN – Deutsches Institut für Normung

EDM – *electric discharging machining*

FEPA – Federation of European Producers of Abrasives

FFG – *form and finish grinding*

HRC – *Rockwell Hardness*

HSS – *high speed steel*

IDG – *inside diametral grinding*

ISO – International Organization for Standardization

JIS – Japanese Industrial Standards

MA – movimento de avanço

Maglev – *magnetic levitation*

MEC – movimento efectivo de corte

MC – movimento de corte

ODG – *outside diametral grinding*

Ra – rugosidade média

Rz – profundidade da rugosidade média

SRG – *stock removal grinding*

WC – carboneto de tungsténio

WC-Co – metal duro

W-EDM – *wire electrical discharge machining*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Resumo das operações mais relevantes para a execução de matrizes e punções	2
Figura 2 - Matriz básica do método aplicado	5
Figura 3 - Cartaz publicitário da Palbit da década de 70 (esq.) e página actual do sitio da internet (dir.) (Palbit, 2017).....	7
Figura 4 - Processo de corte por arranque de apara na fresagem (esq.) (Canadian Metal Working, 2017), no torneamento (cent.) (Direct Industry, 2017) e na rectificação (dir.) (Microtool, 2017).....	9
Figura 5 - Processo de corte por arranque de apara na furação (em cima, lado esquerdo) (Nuova Atelmec, 2015), na serragem (em cima, lado direito) (The Fabricator, 2017), na mandrilagem (em baixo, lado esquerdo) (Nuova Atelmec, 2015) e na roscagem (em baixo, lado direito) (The Fabricator, 2017)	10
Figura 6 - Os seis elementos do processo de rectificação (Marinescu, et al., 2007) (adapt.).....	12
Figura 7 - Movimentos principais no processo de rectificação (Davim, 2008).....	13
Figura 8 - Tipos base de rectificação (Marinescu, et al., 2007) (adapt.) (a) Rectificação plana periférica, (b) rectificação cilíndrica periférica, (c) rectificação plana facial (d) rectificação cilíndrica facial.....	14
Figura 9 - Rectificação plana com eixo horizontal e mesa deslizante (Engineersedge, 2017) (adapt.).....	15
Figura 10 - Rectificação plana com eixo horizontal e mesa giratória (Engineersedge, 2017) (adapt.).....	16
Figura 11 - Rectificação plana com eixo vertical e mesa deslizante (Engineersedge, 2017) (adapt.).....	16
Figura 12 - Rectificação plana com eixo vertical e mesa giratória (Engineersedge, 2017) (adapt.).....	17
Figura 13 - Rectificação cilíndrica externa e interna (Mechscience, 2015).....	18
Figura 14 - Exemplos de matrizes e punções para prensagem de pó (Palbit, 2017)	19
Figura 15 - Kit de prensagem de pó de metal duro. De cima para baixo: punção superior, matriz, punção inferior e vareta móvel	20
Figura 16 - Vários estados do metal duro (Singh, et al., 2012).....	21
Figura 17 - Designação das classes de metal duro segundo a ISO 513.	23
Figura 18 - Aplicações em função do tamanho de grão de WC e da ponderação de cobalto (Sandvik, 2008)	23
Figura 19 - Processo de prensagem de pó (Singh, et al., 2012)	25
Figura 20 - Superfícies de “deslizamento” entre punções, matrizes e varetas móveis (Palbit, 2017) (adapt.)	26
Figura 21 - Tipos de superfícies (ISEC - DEC, 2016)	28
Figura 22 - Rugosidade, ondulação e erro de forma (ISEC - DEC, 2016).....	29
Figura 23 - Rugosidade aritmética em função da linha média do perfil (Filho, 2011).....	30
Figura 24 – Rugosidade média em função do comprimento da amostragem (Gear Technology, 2015).....	31
Figura 25 - Rugosidades obtidas em função do processo de maquinagem (ISEC - DEC, 2016).....	32
Figura 26 - Diferentes formatos de pastilhas de metal duro (Maydown, 2017).....	33

Figura 27 - Linhas de corte em diferentes processos e padrão de corte da rectificação com o modelo IRD 400 (assinalado a vermelho).....	34
Figura 28 - Constituintes de uma mó abrasiva (Faria, 2007)	35
Figura 29 - Esboço da remoção de material através de partículas abrasivas.....	36
Figura 30 - Órgãos reguladores e normativos (DIN, alemã; FEPA, europeia; ANSI, norte americana e JIS, japonesa)	38
Figura 31 - Forma do grão e concentração (Agressive Grinding Service, Inc., 2013)	40
Figura 32 - Código associado à mó de 100 mm de diâmetro utilizada na IRD 400 1A1B 12D46M100BRB D100 T15 H60 X5 C/6.....	43
Figura 33 - Código do fabricante para a mó de 25 mm de diâmetro e grão D15: 1A1 25 12 3 12 D 15 SR 100 R806	43
Figura 34 - Rectificadora Danobat Overbeck IRD 400 e suas principais características (Danobat-Overbeck, 2016).....	44
Figura 35 - Tecnologia de transmissão por fuso de esferas e por motor linear (Sodick, 2017) (adapt.).....	45
Figura 36 - Disposição dos <i>turrets</i> na máquina.....	47
Figura 37 - Eixos utilizados pela IRD 400 – Vista de topo (Danobat-Overbeck, 2016) (adapt.).....	47
Figura 38 - Sistema de fixação Erowa padronizado (Erowa, 2017)	49
Figura 39 - Bucha e <i>pallet</i> Erowa (Erowa, 2017)	49
Figura 40 - TESA Rugosurf 10G (Tesa Technology, 2017)	50
Figura 41 - Utilização do dispositivo na medição da rugosidade de um furo e do interior de uma matriz.....	51
Figura 42 – Saída de dados em valores numéricos e em perfil gráfico no rugosímetro TESA (Tesa Technology, 2017).....	51
Figura 43 - Paralelismo entre a haste e a superfície.....	52
Figura 44 - Orientação correcta do apalpador em relação às estrias	52
Figura 45 - Mecanismo de remoção de material (Agressive Grinding Service, Inc., 2013) (adapt.)	53
Figura 46 - Perfil típico de tensões-deformações de um material dúctil e de um material frágil	54
Figura 47 - Perfil de tensão-deformação de um material quebradiço no processo de rectificação (Agressive Grinding Service, Inc., 2013) (adapt.).....	54
Figura 48 - Curso da mó na peça	58
Figura 49 - Brilhos obtidos por uma mó D15 (esq.), com Ra de 0,088 μm ; e uma mó D46 (dir). com Ra de 0,120 μm	60
Figura 50 - Dois acabamentos diferentes na mesma face (vista de microscópio 48x)	61
Figura 51 - Orientação de estrias com acabamento de mó de 4 mm e D126 (vista de microscópio 64x)	61
Figura 52 - Marcas na peça derivadas da vibração do sistema (vista de microscópio 28x)	62
Figura 53 - Mó utilizada na maioria dos processos de rectificação (D46).....	63
Figura 54 - Valores de Ra e Rz, variando a oscilação, para uma rotação de 6.000 rpm (31 m/s), um avanço de 2 $\mu\text{m}/\text{U}$ e uma velocidade de rotação da peça de 3 min^{-1}	64
Figura 55 - Valores de Ra e Rz, variando a oscilação, para uma rotação de 6.000 rpm (31 m/s), um avanço de 4 $\mu\text{m}/\text{U}$ e uma velocidade de rotação da peça de 3 min^{-1}	64
Figura 56 - Valores de Ra e Rz, variando a oscilação, para uma rotação de 6.000 rpm (31 m/s), um avanço de 6 $\mu\text{m}/\text{U}$ e uma velocidade de rotação da peça de 3 min^{-1}	65

Figura 57 - Valores de Ra e Rz, variando a oscilação, para uma rotação de 5.000 rpm (26 m/s), um avanço de 2 $\mu\text{m}/\text{U}$ e uma velocidade de rotação da peça de 3 min^{-1}	66
Figura 58 - Valores de Ra e Rz, variando a oscilação, para uma rotação de 4.000 rpm (21 m/s), um avanço de 2 $\mu\text{m}/\text{U}$ e uma velocidade de rotação da peça de 3 min^{-1}	66
Figura 59 - Valores de Ra e Rz, variando a oscilação, para uma rotação de 3.000 rpm (16 m/s), um avanço de 2 $\mu\text{m}/\text{U}$ e uma velocidade de rotação da peça de 3 min^{-1}	67
Figura 60 - Valores de Ra e Rz, variando a oscilação, para uma rotação de 2.000 rpm (16 m/s), um avanço de 2 $\mu\text{m}/\text{U}$ e uma velocidade de rotação da peça de 3 min^{-1}	67
Figura 61 - Valores de Ra e Rz, variando a rotação, para uma oscilação de 150 mm/min, um avanço de 2 $\mu\text{m}/\text{U}$ e uma velocidade de rotação da peça de 3 min^{-1}	68
Figura 62 - Valores de Ra e RzRa e Rz, variando a rotação, para uma oscilação de 200 mm/min, um avanço de 2 $\mu\text{m}/\text{U}$ e uma velocidade de rotação da peça de 3 min^{-1}	68
Figura 63 - Valores de Ra e Rz, variando a rotação, para uma oscilação de 250 mm/min, um avanço de 2 $\mu\text{m}/\text{U}$ e uma velocidade de rotação da peça de 3 min^{-1}	69
Figura 64 - Valores de Ra e Rz, variando a rotação, para uma oscilação de 300 mm/min, um avanço de 2 $\mu\text{m}/\text{U}$ e uma velocidade de rotação da peça de 3 min^{-1}	69
Figura 65 – Valores de Ra e Rz, variando a rotação da peça, para uma velocidade de corte de 6.000 rpm (31 m/s), um avanço de 2 $\mu\text{m}/\text{U}$ e uma oscilação de 250 mm/min.....	70
Figura 66 - Mó fina de grão D15 (diâmetro de 25 mm).....	70
Figura 67 – Valores de Ra e Rz, variando a rotação, para uma oscilação de 250 mm/min, um avanço de 2 $\mu\text{m}/\text{U}$ e uma rotação da peça de 3 min^{-1}	71
Figura 68 - Evolução da rugosidade Ra para diferentes processos e tecnologias de fabrico.	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades físicas e mecânicas do metal duro	21
Tabela 2 - Composição química e características físicas do metal duro - Norma ISO 513:2012 (Davim, 2008)...	24
Tabela 3 - Distâncias de <i>cut-off</i> (ISO 4288:1996, 1996) (adapt.)	31
Tabela 4 - Dureza típica de grãos abrasivos de alguns materiais através da realização do ensaio de dureza Knoop à temperatura ambiente (Marinescu, et al., 2007)	36
Tabela 5 - Nomenclatura dos sistemas de grãos de acordo com os vários órgãos reguladores (Technodiamant, 2017).....	38
Tabela 6 - Relação entre a dimensão dos grãos abrasivos e a rugosidade média obtida nas superfícies, segundo os padrões norte americanos (grãos de óxido de alumínio) (Jackson, 2011).....	39
Tabela 7 - Sugestão de utilização de mós de diamante para rectificação de metal duro (Technodiamant, 2017)	41
Tabela 8 - Graus de mós de rectificação (Agressive Grinding Service, Inc., 2013).....	42

1 - INTRODUÇÃO

1.1 - ENQUADRAMENTO

A elaboração do presente relatório de estágio compreende a última e derradeira etapa para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, na especialização de Construção e Manutenção de Equipamentos Mecânicos. A decisão pela vertente de um relatório de estágio na unidade curricular do segundo e último ano do mestrado, em detrimento das restantes opções, prendeu-se essencialmente pela ambição pessoal de aliar a componente curricular, imprescindível e incontornável para a realização académica, com a via profissional. Procurou-se, assim, dar seguimento pela via prática aos conhecimentos obtidos durante o 1º ano do mestrado, canalizando a estrutura teórica apreendida para a componente de trabalho. Desta forma, após a confluência de interesses comuns e posterior acordo protocolar com a Palbit, deu-se início ao estágio. Foi objectivo desenvolver um trabalho numa área que servisse não só de base à elaboração do actual relatório, mas que explorasse igualmente conceitos e processos que pudessem complementar o *know-how* da empresa.

Com o avançar de algum trabalho desempenhado e algumas ideias partilhadas, foi concluído que seria de interesse mútuo aprofundar o acabamento dado à superfície dos punções em metal duro pelo processo de rectificação cilíndrica, nomeadamente com o modelo IRD 400, equipamento fabricado pelo grupo Danobat-Overbeck. O nível de acabamento deste tipo de superfícies está intimamente ligada ao desempenho das ferramentas na secção de prensagem de pó de metal duro para a obtenção de pastilhas de corte e outros produtos.

O estágio decorreu essencialmente ao nível da cadeia de *shop floor* (chão de fábrica) da empresa, na secção da Ferramentaria. Esta secção enquadra-se como uma pequena fábrica dentro de outra. É daqui que saem todas as ferramentas utilizadas na secção de prensagem. Além da rectificação cilíndrica de metal duro através de mós abrasivas, contempla-se ainda o recurso a outras máquinas e tecnologias de fabrico, nomeadamente a electroerosão por fio (W-EDM), electroerosão por penetração (EDM) e fresagem CNC convencional e de alta precisão com mós abrasivas, entre outras. Na Palbit, de uma forma geral, a execução de ferramentas em metal duro passa por uma sequência de fases e processos distintos (Figura 1). Estes mesmos processos vão sendo aprofundados um pouco mais com o desenvolvimento do relatório.

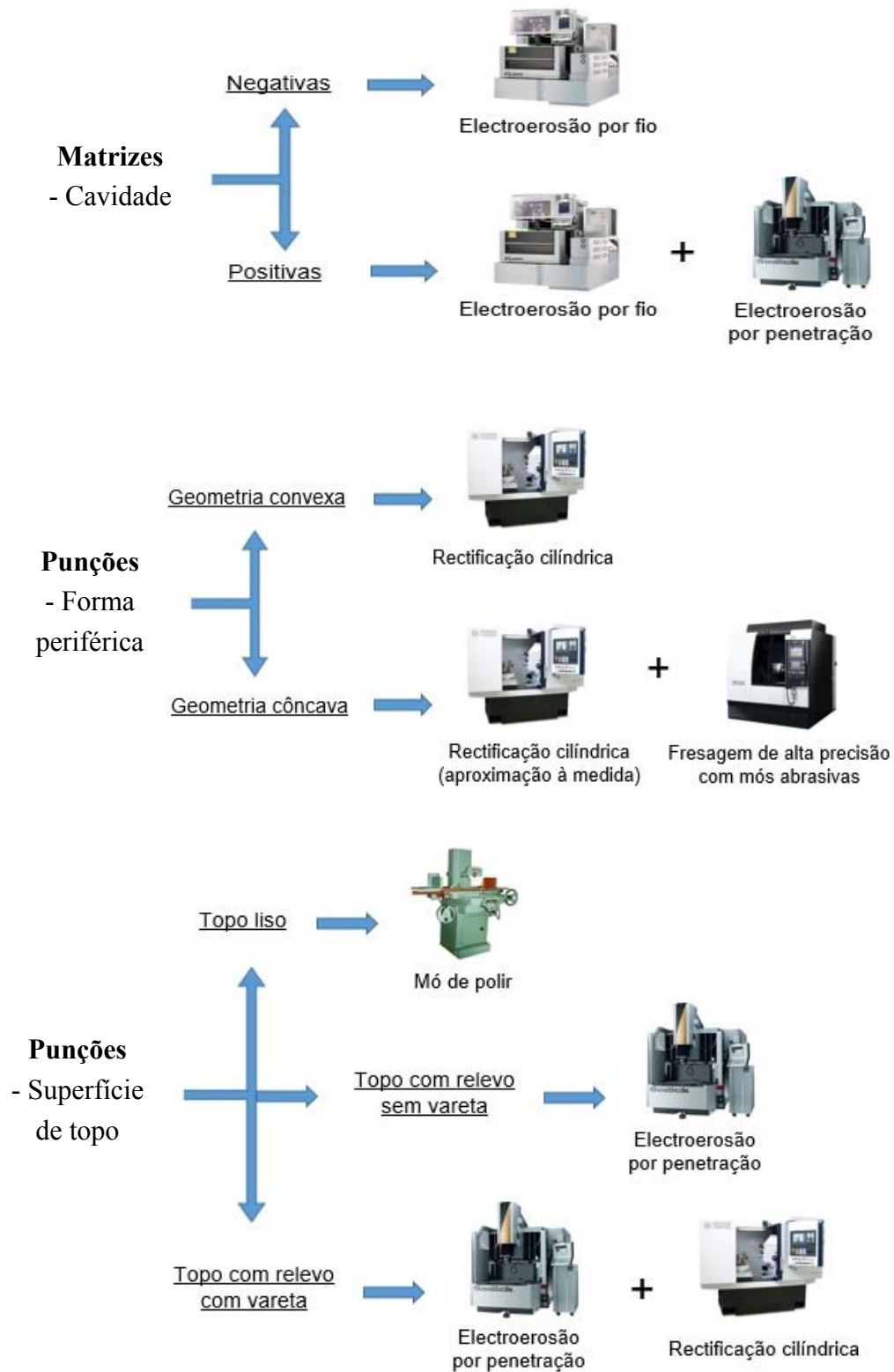


Figura 1 – Resumo das operações mais relevantes para a execução de matrizes e punções

Assim, e através da análise da Figura 1, é possível identificar quais os principais equipamentos que são usados no processo de fabrico das ferramentas de metal duro. Esses equipamentos são:

- Rectificadora cilíndrica periférica: realiza desbastes e dá acabamento aos punções com geometrias essencialmente convexas. Algumas geometrias côncavas são também trabalhadas, desde que os raios das curvas definidas não sejam inferiores ao raio da mó utilizada para a rectificação. A rectificação dos furos dos punções é feita igualmente com este tipo de equipamento, assim bem como o perfilamento das varetas dos punções. O equipamento utilizado para as operações foi o centro de rectificação CNC IRD 400, da Danobat-Overbeck, com tecnologia de motores lineares.
- Electroerosão por fio: é utilizada para o corte e acabamento do núcleo das matrizes. É utilizada igualmente para fazer aproximações às geometrias desejadas dos punções, sendo estes posteriormente rectificadas noutros equipamentos. Fora do contexto das ferramentas de prensagem, a electroerosão por fio executa ainda diversas geometrias em peças de metal duro e outros materiais. As máquinas utilizadas são das marcas Sodick e Fanuc.
- Electroerosão por penetração: utilizada para a execução da geometria positiva das matrizes, assim bem como o relevo e efeitos nos topos dos punções. Os eléctrodos usados são processados pelo centro de fresagem CNC de alta velocidade, da Makino. O equipamento de EDM utilizado é da marca Sodick.
- Fresagem CNC de alta precisão: rectifica as superfícies periféricas dos punções que não podem ser acabados na rectificadora cilíndrica; é responsável também pela criação de eléctrodos em ligas de cobre W-Cu (liga de cobre W) para serem posteriormente usados na electroerosão por penetração. Os equipamentos de fresagem são da marca Makino, sendo o modelo iQ300 utilizado para o acabamento de punções. Este modelo tem a função de *jig grinding*, que permite obter um nível de acabamento e rigor superiores.
- Outras rectificadoras: existem ainda outros dispositivos que executam trabalhos variados como a rectificação de varetas móveis, rectificação da base e topo das matrizes, polimento do topo das matrizes e de punções, assim bem como alguns trabalhos complementares.

Relativamente aos processos e tecnologias referidos anteriormente, somente será dada ênfase ao processo de retificação, uma vez que é sobre esta tecnologia que se desenvolve o trabalho explanado nas linhas seguintes. No entanto, algumas tecnologias irão ser abordadas superficialmente em alguns momentos deste trabalho para um melhor enquadramento da ideia principal.

1.2 - OBJECTIVOS E METODOLOGIAS

Durante a realização do estágio foi preocupação constante a procura de conhecimentos gerais sobre alguns processos de fabrico utilizados na fábrica da Palbit, em particular na secção da Ferramentaria. Desta forma, seria possível ler todo o processo de fabrico e assimilar a execução de ferramentas de corte e outras no seu todo. Por outro lado, dentro da secção, foi dedicada particular atenção à rectificação de punções com a rectificadora cilíndrica IRD 400, porque além de contemplar na íntegra as minhas funções e obrigações como funcionário da empresa, permitiu-me obter conhecimentos específicos na área da rectificação – incontornáveis para a realização do relatório de estágio – e ao mesmo tempo compreender uma série de mecanismos e parâmetros desta tecnologia de fabrico. Desta forma, o objectivo do estágio assentou na análise da variação do nível de acabamento das superfícies em metal duro dos punções para prensagem em função de alguns factores, parâmetros e condições no processo de rectificação. A análise do acabamento conseguido nas variadas superfícies dos punções surgiu, assim, como linha mestra e orientadora do trabalho realizado.

Um das formas mais utilizadas para a compreensão do nível de acabamento de uma superfície é a sua rugosidade média, Ra. A par de uma inspecção visual cuidada, estes mecanismos serviram para caracterizar o acabamento conseguido nas peças trabalhadas. O método de trabalho contemplou as seguintes etapas:

- Maquinagem de punções na rectificadora IRD 400, da Danobat-Overbeck, com variação de determinadas características de corte e parâmetros específicos do processo;
- Inspecção visual das superfícies obtidas, dando especial atenção às linhas de corte deixadas nas peças, ao seu brilho e marcas de vibração;
- Medição da rugosidade média (Ra) das superfícies através do rugosímetro Rugosurf 10G, da marca Tesa Technology;
- Observação microscópica e registo digital das superfícies com o microscópio e sistema de medição multissensorial Vertex 251hc, da marca Micro-Vu Corporation.

As maquinagens realizadas envolveram dois tipos de procedimentos. No primeiro, executado com a mó mais convencional, de grão mais grosso, e amplamente mais utilizada (Figura 2), fez-se variar gradualmente os vários parâmetros e condições de cort,. No segundo, realizado com uma mó de grão mais fino, foi focado e atendido a avaliações de resultados apenas com as variáveis posicionadas nos seus valores máximos e mínimos, e não com valores intermédios. Esta opção prendeu-se com uma lógica de evolução da rugosidade semelhante à da mó anterior. A qualidade de um produto, neste caso, o acabamento superior dado às superfícies aparece como o cruzamento ideal entre as diversas variáveis.



Figura 2 - Matriz básica do método aplicado

1.3 - ESTRUTURA DO RELATÓRIO

O documento desenvolve-se através de seis capítulos e a sua estrutura permite um seguimento orientado das matérias abordadas. Desta forma, no primeiro capítulo é efetuado o enquadramento ao documento e qual a vertente do estágio, estrutura-se o relatório e apresenta-se a empresa onde decorreu o estágio. No capítulo dois aborda-se a rectificação como tecnologia de fabrico no processo de maquinagem de corte por arranque de apana, procurando-se dar ênfase às suas principais aplicações na indústria, quais os tipos de rectificação que existem e o como esta tecnologia é aplicada na empresa Palbit. É ainda abordado neste capítulo o metal duro e as suas aplicações em termos de prensagem do pó metal duro e quais as ferramentas que são usadas para a sua produção (os punções). O acabamento das superfícies, as rugosidades que são obtidas pelos processos de fabrico gerais, as ferramentas, as características e variáveis de corte no mecanismo de rectificação e as geometrias encontradas são abordadas no capítulo três. No capítulo quatro procede-se à explicação dos materiais e do estudo experimental desenvolvido, procura-se analisar as diversas variáveis que influenciam o acabamento das superfícies e a sua directa aplicação e desempenho no processo de prensagem. Os resultados obtidos do estudo experimental são apresentados no capítulo cinco. Finalmente, no capítulo seis, referem-se os

apontamentos finais, descrevem-se globalmente as conclusões principais do trabalho e indicam-se alguns aspectos de podem ser explorados em trabalhos futuros.

1.4 - A EMPRESA PALBIT

A Palbit, S.A. é uma sociedade anónima do sector da metalomecânica, situada no concelho de Albergaria-a-Velha, que tem como principais atividades o desenvolvimento, a produção e comercialização de produtos/ferramentas em metal duro, materiais ultraduros e aço. Apresenta-se no mercado como um fornecedor de soluções de ferramentas em metal duro, com mais de 50 anos de experiência no setor. Atualmente, com cerca de 200 colaboradores e um volume de negócios anual de cerca de 15 milhões de euros, a Palbit procura investigar, desenvolver e produzir ferramentas da mais alta qualidade, disponibilizando uma vasta gama de soluções para os seus clientes.

Recuando mais de um século, a empresa vê as suas origens remontar ao ano de 1916, período pleno da Primeira Grande Guerra. Na altura, designada por Minas e Metalurgia, a empresa tinha por objecto a extracção e comercialização de minério, através de uma concessão de exploração das minas da Galena, Palhal. No início da década de 40 passou a fazer parte do Grupo SAPEC, facto que derivou da concessão de exploração de electricidade que detinha, e iniciou igualmente a exploração de outras minas do grupo. Abriram portas, então, à produção de ferramentas para pedreiras e de peças anti desgaste. Aproximadamente dez anos depois, em 1952, inicia a produção de ferramentas de corte em metal duro, após a instalação de linhas de produção de pós de tungsténio (Palbit, 2017). A partir de 2002, ano em que a empresa sofreu um MBO, *management buy out*, começam a despertar os primeiros indícios daquilo que viria a ser uma franca recuperação tecnológica e financeira. As dificuldades que atravessava até então, deram lugar a um caminho sólido a nível nacional e internacional. O trilhar de um rumo firme e orientado para o futuro só foi possível através de uma aposta clara no investimento em inovação e tecnologia.



Figura 3 - Cartaz publicitário da Palbit da década de 70 (esq.) e página actual do sitio da internet (dir.) (Palbit, 2017)

Actualmente a Palbit actua em três áreas principais de negócio, nomeadamente:

- Ferramentas de corte por arranque de apara para toda a indústria (pastilhas para suporte de fresagem, fresas e suportes para operações de torneamento, *grooving*, corte de canal e roscagem, etc.)
- Produtos anti desgaste (feiras, mandris, punções, matrizes, contactos eléctricos, etc.)
- Produtos de metal duro incorporado no aço para a indústria mineira (barrenas, enraideiras, bits, etc.) e pedreiras (bujardas, cinzéis, lâminas, etc.)

Apesar do universo mineiro ter sido, no passado longínquo, o despoletador de tudo aquilo que a Palbit é nos dias de hoje, o volume de negócios dos produtos relacionados com minas e pedreiras representa menos de 8 % do total facturado. Por outro lado, e no que respeita a ferramentas de corte, a empresa ombreia hoje em dia com os maiores *players* mundiais na produção de pastilhas em metal duro. Fornece produtos para a indústria automóvel, de moldes e matrizes, indústria aeroespacial, ferroviária, metalomecânica e outras e exporta para mais de 60 países em todo o mundo. A empresa detém duas filiais no continente americano, uma no Brasil e outra no México, com a designação de Palbit - Comércio de Ferramentas, Lda. e Palbit MX, SA, respectivamente.

A empresa engloba em si um alto valor acrescentado, muito vincado, com grande componente tecnológica, permitindo-lhe cumprir requisitos de tolerância extremamente apertados com grande qualidade. Tem igualmente implementado um sistema de controlo de qualidade que acompanha todas as fases do processo produtivo, certificado pela ISO 9001:2008 e NP 4457:2007, salvaguardando a excelência do produto final. Juntamente com todos os pergaminhos de produção e vias traçadas para futuro, funcionando paralelamente e alimentando

a excelência, os avanços e as apostas no sistema IDI – Investigação, Desenvolvimento e Inovação – têm-se revelado como parte da espinha dorsal da estrutura empresarial.

2 - RECTIFICAÇÃO COMO TECNOLOGIA DE FABRICO

2.1 - INTRODUÇÃO

O corte por arranque de apra é um processo tecnológico que engloba uma série de tecnologias de fabrico, tendo por base a alteração da forma, volume e superfície de uma peça através da remoção de material não necessário, levando à formação de apra. É um dos processos mais amplamente utilizados na indústria metalomecânica e apesar de ter começado a ser estudado no séc. XIX, só a partir da 2ª Guerra Mundial se tornou globalizado e fortemente utilizado. Actualmente, o universo das tecnologias de fabrico por corte por arranque de apra engloba variados processos e mecanismos. Alguns dos processos de corte mais utilizados e estudados dentro do universo da produção industrial passam pela fresagem, torneamento e rectificação (Figura 4).



Figura 4 - Processo de corte por arranque de apra na fresagem (esq.) (Canadian Metal Working, 2017), no torneamento (cent.) (Direct Industry, 2017) e na rectificação (dir.) (Microtool, 2017)

Contudo, existem outros métodos de corte, tais como a furação, serragem, mandrilagem e roscagem com ferramenta cortante, que têm igualmente uma abrangência de utilidade bastante significativa e preponderante no ramo da produção (Figura 5).



Figura 5 - Processo de corte por arranque de apara na furação (em cima, lado esquerdo) (Nuova Atelmec, 2015), na serragem (em cima, lado direito) (The Fabricator, 2017), na mandrilagem (em baixo, lado esquerdo) (Nuova Atelmec, 2015) e na roscagem (em baixo, lado direito) (The Fabricator, 2017)

2.2 - RECTIFICAÇÃO NA INDÚSTRIA

A rectificação é um processo de maquinagem de corte por arranque de apara que emprega uma mó abrasiva, movida a alta velocidade, para remover matéria de um material menos duro. Também costuma ser designada por maquinagem por abrasão. A ferramenta de revolução pode trabalhar sobre peças em movimento ou fixas e os seus movimentos de translação obedecem a trajectórias controladas e definidas. Esta tecnologia tem sido empregue em processos de produção por mais de 100 anos, embora os primeiros indícios de um processo arcaico tenham sido estudados no período neolítico. A falta de ferramentas tecnológicas na altura leva-nos a concluir que os procedimentos estivessem limitados a simples operações manuais. Em 1860 foi patenteado um dispositivo de rectificação de uma mó de pedra por Altschenere. Já dentro do séc. XX, a rectificação despontou verdadeiramente como processo de fabrico moderno. Seguiram-se publicações nas primeiras décadas sobre o assunto, por Alden e Guest, que levaram a arte da rectificação até uma base científica (Marinescu, et al., 2007).

A ferramenta de corte (a mó) pode ter velocidades de corte entre os 10 m/s e 100 m/s, ou mesmo superiores, e é constituída por grãos de materiais duros ou muito duros, que definem a

capacidade de corte e que são ligados por um aglomerante. Os espaços vazios entre um material e outro designam-se por poros. Actualmente, a rectificação apresenta-se na indústria moderna como uma tecnologia de fabrico por corte por arranque de apra muito particular e está altamente desenvolvida para atender a requisitos de produtos e processos muito específicos. Nos dias de hoje a maioria das máquinas são controladas por CNC com movimentos sincronizados para a execução de formas complexas sem a intervenção manual do operador e muitos dispositivos englobam algoritmos para compensar o desgaste da ferramenta de corte.

O avanço da tecnologia e o aumento da velocidade de corte na rectificação têm permitido ao longo dos últimos anos aumentar imenso as taxas de remoção de material num factor de dez vezes no último século, sendo que em alguns casos num valor superior. Se não, vejamos, passámos de taxas de $30 \text{ mm}^3/\text{s}$ para $300 \text{ mm}^3/\text{s}$ e onde estas taxas de remoção de material são consideradas hoje como taxas associadas a materiais facilmente rectificáveis.

Também o campo dos abrasivos empregues na rectificação tem evoluído de igual forma, apoiada no desenvolvimento de superabrasivos como o CBN, *cubic boron nitride* (nitreto cúbico de boro), e diamantes abrasivos, tanto de origem natural como sintética (Marinescu, et al., 2007). Outros materiais como o carboneto de silício e óxido de alumínio são igualmente usados em procedimentos menos exigentes no que respeita à dureza do material trabalhado. Alguns exemplos de sectores que trabalham dentro destas circunstâncias são a indústria dos cerâmicos, dos vidros, dos quartzos e igualmente a indústria do metal duro (WC-Co). É um processo de maquinagem que, devido à sua precisão e níveis de acabamento alcançados, se encontra muito perto do fim na cadeia de produção, onde é exigido o cumprimento de tolerâncias muito apertadas no produto acabado. Pela sua ordem na cadeia de produção, torna-se um processo muito crítico, onde é necessário um controlo apertado na operação. Daqui deriva que qualquer erro durante a maquinagem pode colocar em causa o trabalho realizado anteriormente, levando a uma acumulação de custos. Este tipo de tecnologia é alimentado por três grandes requisitos essenciais, ou necessidades, incontornáveis para a obtenção da qualidade final do produto:

- Rigor geométrico, dimensional e o acabamento superior nas superfícies das peças acabadas, com tolerâncias microscópicas na ordem dos $0,002 \text{ mm}$ e rugosidades médias na ordem dos $0,1 \text{ }\mu\text{m}$ ou mesmo inferiores;
- Altas taxas de remoção de material, que torna a rectificação como um processo competitivo e com altas taxas de produtividade e de alta qualidade;
- Maquinagem de materiais muito duros, a par das duas circunstâncias mencionadas acima, a rectificação surge como a principal tecnologia de fabrico para a maquinagem e acabamento de materiais duros e muito duros, como é o caso do WC-Co – exceptuam-se aqui as tecnologias de electroerosão por não se enquadrarem nos processos de corte por arranque de apra e por não terem tempos de maquinagem competitivos para este fim.

Atendendo ao facto das taxas de remoção de material realizadas pelo processo de rectificação serem reduzidas, são aconselhadas espessuras de excesso de material, em termos produtivos, entre os 0,15 mm e os 0,5 mm, sendo importante que as maquinagens prévias de aproximação à geometria final compreendam algum nível de rigor médio, na ordem das décimas de milímetro.

Segundo Marinescu (2007) e Shawn (1996) o processo de rectificação assenta em seis elementos (Figura 6) e compreendem dois tipos de regimes, variando em função do objectivo pretendido:

- Rectificação para atender primordialmente à remoção de material - SRG – *stock removal grinding*;
- Rectificação para tratamento da forma e acabamento – FFG – *form and finish grinding*.

O primeiro regime atende fundamentalmente ao desbaste das peças a serem maquinadas, onde a quantidade de material a ser retirado e o tempo são os principais factores a ter em conta. Aqui, as solicitações de produção levam a que a rectificação e limpeza da ferramenta de corte não sejam preocupações de primeira linha, até porque o desgaste das mós é extremamente elevado. No segundo regime a necessidade abrangida é de uma ordem diferente, privilegiando-se o rigor geométrico e o acabamento superficial. Para isto acontecer, existem cuidados constantes na limpeza e rectificação das mós abrasivas para remoção dos grãos deteriorados e restos de material que aderiram à superfície da ferramenta de corte (Faria, 2007).

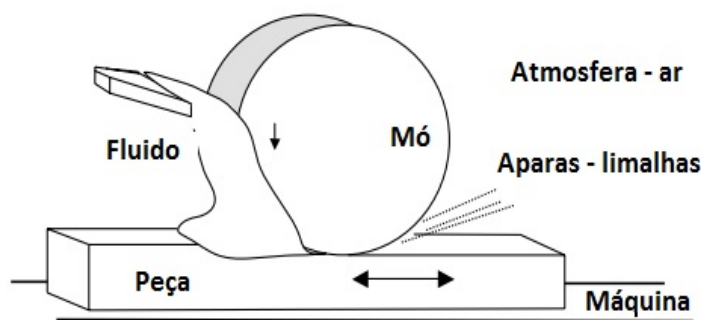


Figura 6 - Os seis elementos do processo de rectificação (Marinescu, et al., 2007) (adapt.)

2.3 - MOVIMENTOS NA RECTIFICAÇÃO

De acordo com Davim (2008), na rectificação, assim bem como em quase todos os processos de corte por arranque de apra, existem dois tipos de movimento. Os movimentos principais, os que promovem a formação da apra, e os movimentos auxiliares, os que não intervêm directamente na criação da mesma. Os movimentos principais (Figura 7) designam-se por:

- Movimento de corte (MC), que é o movimento entre a peça e a ferramenta que origina somente uma única remoção de apra durante uma rotação ou curso, mas que por si só não permite que novas porções de material a remover sejam retiradas;
- Movimento de avanço (MA), que é o movimento entre a peça e a ferramenta e que proporciona, juntamente com o movimento de corte, um levantamento repetido ou contínuo da apra;
- Movimento efectivo de corte (MEC), que é o movimento composto pelos dois movimentos anteriores.

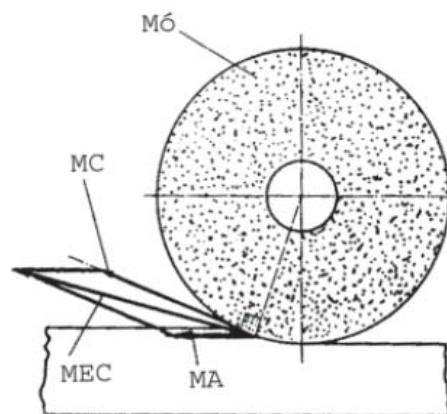


Figura 7 - Movimentos principais no processo de rectificação (Davim, 2008)

Dentro dos movimentos auxiliares, ou seja, aqueles que não participam na formação da apra definem-se:

- Movimento de penetração (profundidade de corte), que é o movimento entre a peça e a ferramenta e que determina a espessura da camada de material a ser retirada.
- Movimento de posicionamento que é o movimento entre a peça e a ferramenta, com o qual a ferramenta, antes da operação de maquinagem é aproximada da peça.

Podemos ainda considerar o movimento de ajuste como sendo o movimento de compensação do desgaste. Contudo, a sua definição perde-se um pouco pelos dois movimentos anteriores (Davim, 2008).

2.4 - CATEGORIAS DE RECTIFICAÇÃO

Apesar de haver uma multiplicidade grande no que respeita às formas e mecanismos de rectificação, segundo Marinescu (2007), o universo de aplicações desta tecnologia parte de quatro tipos base de rectificação (Figura 8):

- Rectificação plana periférica (a);
- Rectificação cilíndrica periférica (b);
- Rectificação plana facial (c);
- Rectificação cilíndrica facial (d).

A divisão anterior tem por base a área de contacto da mó com a peça, ou seja, se é a face plana ou a periferia da mó que executa a abrasão, e com o tipo de movimento a que a peça está sujeita, ou seja, se executa movimentos rectilíneos ou se roda em torno de um eixo. Por outro lado, há denominações mais simplistas que podem resumir a rectificação a duas categorias principais:

- Rectificação plana;
- Rectificação cilíndrica.

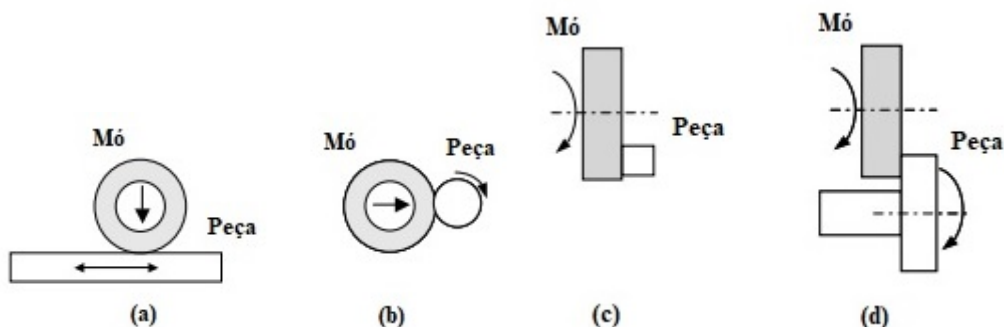


Figura 8 - Tipos base de rectificação (Marinescu, et al., 2007) (adapt.) (a) Rectificação plana periférica, (b) rectificação cilíndrica periférica, (c) rectificação plana facial (d) rectificação cilíndrica facial

2.4.1 - RECTIFICAÇÃO PLANA

A rectificação plana é utilizada para produzir superfícies planas, tendo por princípio a rotação da mó em torno de um eixo e a peça de trabalho é montada numa mesa de movimento alternado ou rotativo, sendo esta colocada em contacto com mó para se proceder à rectificação. No entanto neste tipo de rectificação através da variação do tipo de eixo de trabalho da mó e o tipo de movimento da mesa é possível dividi-la em quatro tipos de sistemas de rectificação plana, ou seja:

- Eixo horizontal da mó e mesa deslizante (recíproca);
- Eixo horizontal da mó e mesa giratória;
- Eixo vertical da mó e mesa deslizante (recíproca);
- Eixo vertical da mó e mesa giratória.

Relativamente aos sistemas de fixação das peças a maquinar, estas podem ser fixas à mesa através de sistemas de buchas e mandris idênticos aos utilizados normalmente no torneamento ou na fresagem (entre outros), no entanto o sistema mais comum de fixação é pelo efeito magnético.

- O sistema de rectificação plana com eixo horizontal da mó e mesa deslizante (recíproca) é o tipo mais utilizado em operações de rectificação e está disponível em vários tamanhos para acomodar peças grandes ou pequenas. A mó de rectificação está montada num eixo horizontal; a peça a maquinar está montada sobre uma mesa horizontal, normalmente magnética, que anda para trás e para a frente à medida que entra em contacto com a mó, proporcionando a abrasão e a remoção de material. Para proporcionar o trabalho em toda a área da peça, existe um eixo ortogonal ao movimento básico de translação da mesa (Figura 9).

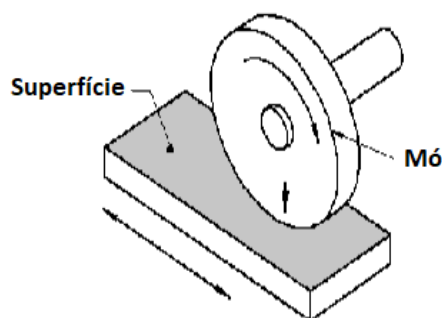


Figura 9 - Rectificação plana com eixo horizontal e mesa deslizante (Engineersedge, 2017) (adapt.)

- Na rectificação com eixo horizontal da mó e mesa giratória, a mó é montada horizontalmente e a mesa roda 360°, com a peça a maquinar a estar fixa através de magnetização. O corpo da mó move-se através da peça de trabalho para fornecer os movimentos de corte helicoidais ou radiais (Figura 10).

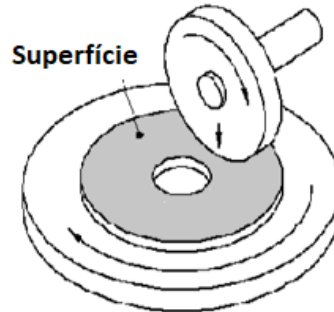


Figura 10 - Rectificação plana com eixo horizontal e mesa giratória (Engineersedge, 2017) (adapt.)

- O processo de rectificação com eixo vertical da mó e mesa deslizante (recíproca) é particularmente adequado para a maquinagem de peças longas e estreitas. O material é removido com a face da mó rectificadora e o trabalho é realizado sob a mó. O cabeçote da ferramenta, como acontece na maioria dos outros rectificadores de superfície, move-se verticalmente para controlar a profundidade de corte, enquanto a mesa se move lateralmente, realizando a alimentação cruzada (Figura 11).

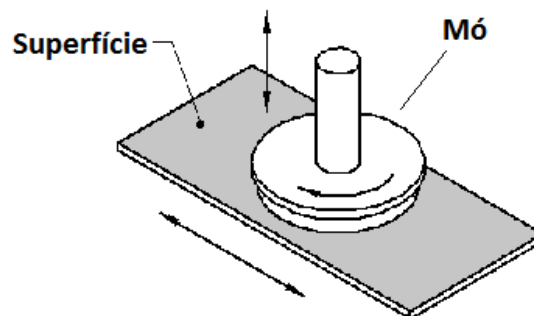


Figura 11 - Rectificação plana com eixo vertical e mesa deslizante (Engineersedge, 2017) (adapt.)

No sistema de rectificação plana com o eixo vertical da mó e mesa giratória, a rectificação é capaz de cortes pesados e altas taxas de remoção de metal. As máquinas verticais do eixo usam o copo, o cilindro, ou as mós segmentadas. Muitas são equipados com vários eixos para diferentes tipos de acabamento. Podem ser igualmente utilizadas para o polimento de peças e, além de poderem ter os dois eixos de rotação da mó e da peça na direcção vertical, podem ter também os dois eixos na horizontal (Figura 12).

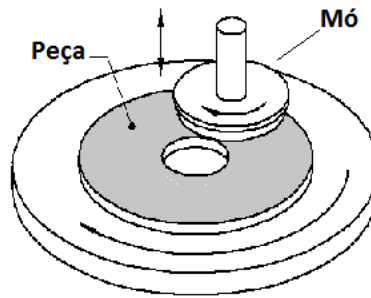


Figura 12 - Rectificação plana com eixo vertical e mesa giratória (Engineersedge, 2017) (adapt.)

2.4.2 - RECTIFICAÇÃO CILÍNDRICA

A rectificação cilíndrica (Figura 13) é usada para a maquinagem de superfícies onde a peça a trabalhar roda sobre um eixo de rotação fixo. Podem ser rectificadas geometrias cilíndricas e excêntricas, em elipse, ovais, e peças como virabrequins e fusos. Através da sincronização de eixos é possível trabalhar qualquer tipo de geometria, inclusivamente as geometrias com ângulos, da mesma forma que uma cilíndrica. Este processo é definido por englobar quatro especificidades:

- A peça tem de estar em constante movimento (rotação);
- A mó tem de estar em rotação continuada;
- O avanço da mó é realizado com aproximação e afastamento da peça;
- A peça e a mó trabalham em direcções transversas (para a mesma direcção dos eixos rotativos).

Existem dois tipos primordiais de rectificação cilíndrica, havendo outros que derivam destes com as devidas particularidades. Assim, temos:

- Rectificação radial interna – IDG - *inside diametral grinding*;
- Rectificação radial externa – ODG - *outside diametral grinding*.

Apesar dos avanços da mó poderem ser feitos manualmente em algumas máquinas, os dispositivos mais avançado são actualmente controlados por tecnologia CNC e permitem níveis de rigor e acabamento superiores, desde as indústrias de ferramentas de corte e abrasivos, passando pela indústria automóvel e às mais diversas aplicações militares.

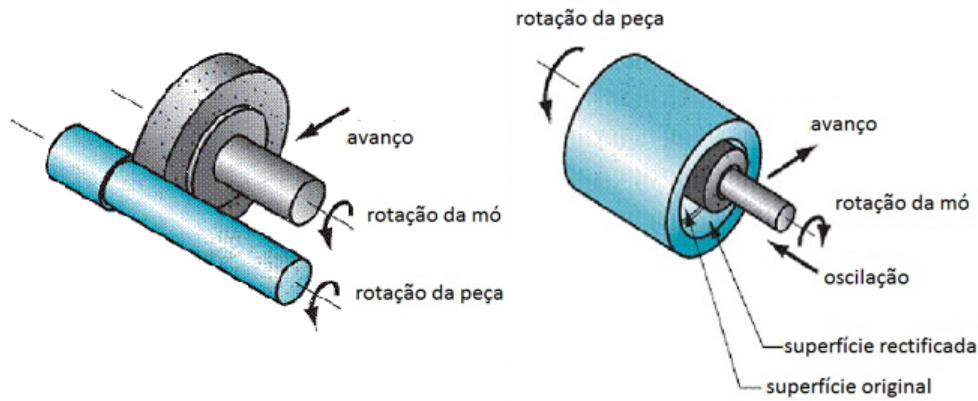


Figura 13 - Rectificação cilíndrica externa e interna (Mechscience, 2015)

A máquina rectificadora modelo IRD 400 utilizada pela Palbit na rectificação de punções é uma evolução de larga escala tecnológica deste tipo de processos. Executa tanto rectificação interna como externa de peças com geometrias cilíndricas ou outros tipos de geometrias, podendo variar os ângulos de rotação dos eixos da peça e da mó.

2.5 - RETIFICAÇÃO NA PALBIT

Quando abordamos a tecnologia da rectificação de superfícies no âmbito da execução de ferramentas para prensagem de pó falamos essencialmente na maquinagem de metal duro. O metal duro, material sinterizado e derivado de misturas pulverulentas de carboneto de tungsténio e cobalto (podendo conter níquel em detrimento do cobalto, principalmente em indústrias envolvidas no universo alimentar, pela razão do cobalto ser considerado um material tóxico), é amplamente utilizado em processos de prensagem. Além de ter uma tensão de cedência superior à do aço, a dureza deste material permite reduzir o desgaste da ferramenta, quando comparado com ferramentas de aços, aumentando o tempo de vida da mesma e reduzindo custos de manutenção e de substituição. Apesar da sua fragilidade, não sofrendo grandes deformações plástico-elásticas, é um material com alta resistência mecânica, o que permite suportar grandes tensões de compactação na prensagem. Tem igualmente uma capacidade elevada de suportar altas temperaturas sem sofrer danos. Contudo, é pelas suas capacidades de resistência ao desgaste que o metal duro é amplamente utilizado nos processos de prensagem.

As ferramentas de prensagem utilizadas na Palbit são constituídas geralmente por quatro elementos. Esses elementos são: a matriz, o punção inferior, o punção superior e uma vareta móvel que, dependendo do tipo de pastilhas a prensar, nem sempre é utilizada. Na Figura 14 é possível visualizar alguns tipos de matrizes e punções para a prensagem de pó que a palbit produz.



Figura 14 - Exemplos de matrizes e punções para prensagem de pó (Palbit, 2017)

Todas as partes dos elementos que sofrem desgaste, incluindo as superfícies que poderão entrar em contacto umas com as outras durante a prensagem, são em metal duro. A matriz é feita em aço temperado mas o núcleo é executado em metal duro (pontualmente existem matrizes apenas em aço temperado pelas características e dimensões particulares das pastilhas). Os punções têm igualmente a base em aço temperado mas a estrutura de contacto na prensagem é em metal duro. As varetas móveis são também em metal duro. A Figura 15 tipifica em corte os elementos para prensagem de pó.

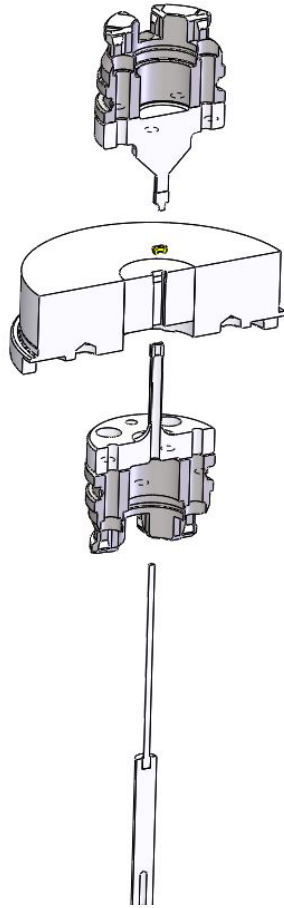


Figura 15 - Kit de prensagem de pó de metal duro. De cima para baixo: punção superior, matriz, punção inferior e vareta móvel

2.5.1 - METAL DURO

As principais aplicações do metal duro na indústria passam pela fabricação de equipamentos, ferramentas de corte, pastilhas para fresas e tornos, abrasivos, peças e ferramentas de desgaste, brocas para pedreiras e múltiplas aplicações militares.

Após a prensagem do pó, a peça – designada por “verde” – vai passar pelo processo de sinterização. Aqui, o material sofre um aumento de temperatura até aos 1300 °C/1600 °C, dependendo do grau do carboneto de tungsténio. A estas temperaturas o cobalto funde e difunde-se entre os grãos, servindo de elemento aglutinador (Figura 16). Os fornos utilizados para a sinterização são normalmente contíguos e caracterizam-se por três zonas de operação: pré-aquecimento, manutenção da temperatura e resfriamento. Todos estes processos têm temperaturas, pressões e tempos de processo altamente bem definidos e controlados para um

resultado calculado. Durante a sinterização, os pós prensados, os “verdes”, podem perder até 40 % do volume inicial, ou em torno de 16 % a 22 % das suas dimensões lineares (Moro & Auras, 2007).

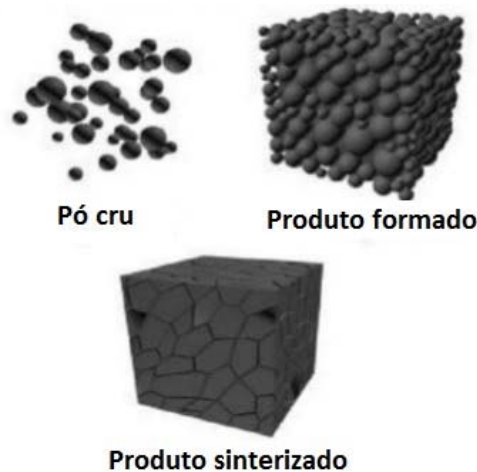


Figura 16 - Vários estados do metal duro (Singh, et al., 2012).

Após a sinterização é obtido um material de elevada dureza e densidade, com capacidades elevadas na resistência ao desgaste e capaz de suportar altas temperaturas sem sofrer alterações no seu desempenho. Na Tabela 1 apresentam-se as principais propriedades mecânicas do metal duro.

Tabela 1 – Propriedades físicas e mecânicas do metal duro

	Valor mínimo	Valor máximo	Unidades (S.I.)
Densidade	10,5	14,9	
Módulo de Young	400	685	Gpa
Coeficiente de Poisson	0,20	0,25	
Dureza (HV10)	910	1950	
WC _{médio}	0,1	6,0	μm
Co	5,0	25,0	%
Tenacidade à fractura	9,00	13,80	MPa.m ^{1/2}
Tensão de ruptura transversa	370	530	MPa

Apesar do carboneto de tungstênio (WC) poder apresentar-se só, pode também encontrar-se associado a outros carbonetos, tais como o carboneto de titânio (TiC), carboneto de tântalo

(TaC), carboneto de vanádio (V₄C₃ ou o carboneto de nióbio (NbC) (Davim, 2008). A mistura pulverulenta de carboneto de tungstênio com cobalto é caracterizada essencialmente por dois parâmetros: a granulometria e a quantidade de cobalto. Na granulometria podemos encontrar dois tipos de pó: o pó granulado, mais grosseiro, e o pó atomizado, mais fino. Os vários pós, ou misturas de pós, utilizados na Palbit são feitos recorrendo a matéria granulométrica de 0,8 - 1,5 - 3 - 6 µm de diâmetro.

Segundo Pires (2011), os pós finos são utilizados na optimização da microestrutura, tendo por isso um contributo marcante nas propriedades mecânicas e de resistência ao desgaste do metal duro. A procura de materiais com graus submicrométricos de WC-Co (tamanho de grão de WC de aproximadamente 0,8 µm) tem vindo a crescer rapidamente, principalmente devido às novas tecnologias de processamento de ligas metálicas, as quais requerem materiais com propriedades melhoradas. A produção de graus submicrométricos de WC-Co possui algumas dificuldades de processamento, devido ao tamanho de grão reduzido de WC, à alta área superficial das partículas de pó, que favorece a oxidação, ao difícil ajuste do teor de carbono e ao crescimento anormal de grão de WC durante a sinterização (Pires, 2011).

Da mistura de um grão de maiores dimensões com uma percentagem elevada de cobalto obtêm-se peças com maior resistência ao choque. Por outro lado, um grão mais fino e uma percentagem menor de cobalto leva os elementos fabricados a resistirem mais ao desgaste, ganhando uma dureza superior. É da ponderação entre estes dois parâmetros que nascem peças e ferramentas para fazer face a um número imenso de aplicações (Valsider, 2009).

2.5.1.1 - CLASSES DE METAL DURO

As classes de metal duro encontram-se divididas em agrupamentos, de acordo com o tipo de material a que se destinam maquinar (Figura 17), sendo essas denominações enquadradas pela norma ISO 513:2012.

P	Aço (P)
M	Aço Inoxidável (M)
K	Ferro Fundido (K)
N	Alumínio (N)
S	Ligas de Titânio e Resistentes a Altas Temperaturas (S)
H	Materiais Endurecidos (H)

Figura 17 - Designação das classes de metal duro segundo a ISO 513.

Na Figura 18, apresenta-se a ponderação de cobalto e o tamanho que o grão de carboneto de tungstênio deve ter em função da sua aplicação.

Entre as classes mais duras podemos encontrar o P10, K01, K05, K10, enquanto nas classes menos duras temos o P50, o M40 e o K40, com altos teores de cobalto (Tabela 2). Assim, de acordo com a ISO 513:2012, a letra designa o tipo de material a ser maquinado e a aplicação a que se destina e o número representa a dureza e a tenacidade do metal duro. Nos Estados Unidos, por exemplo, é utilizada a escala C-x, que pode variar de C-1 a C-14, em função de requisitos semelhantes aos padrões ISO 513:2012 (Lacalle, et al., 2011). Na Palbit são utilizados dois tipos de classes para a execução das ferramentas em metal duro. É utilizado o grau PH0715-SP para os punções e o grau PH0920 para os núcleos das matrizes, mais duro (como complemento, o aço utilizado para as ferramentas é da classe X40CrMoV5-1, e a dureza HRC do aço dos punções anda no intervalo 47-51, enquanto que o das matrizes varia entre 50 e 53)

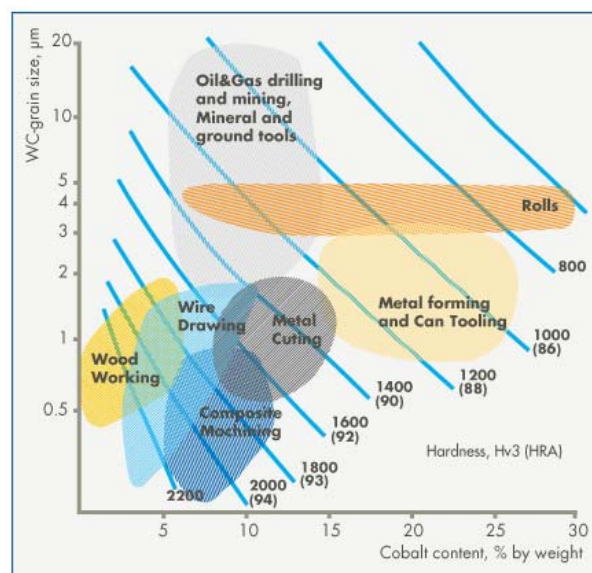


Figura 18 - Aplicações em função do tamanho de grão de WC e da ponderação de cobalto (Sandvik, 2008)

Tabela 2 - Composição química e características físicas do metal duro - Norma ISO 513:2012 (Davim, 2008)

Designação	Composição química aproximada (%)			Características Físicas (Mecânicas)				
	WC	TiC + TaC	Co	Massa Vol. [g/cm ³]	Dureza Vickers [HV]	Tensão Rotura Transversa [MPa]	Mód. Young [GPa]	Coef. Dilatação Térmica [x10 ⁻⁶ /K]
P01	30	64	6	7,2	1500	750	-	-
P10	55	36	9	10,4	1600	1400	5,2	6,5
P20	76	14	10	11,9	1500	1500	5,4	6,0
P25	73	19	8	12,5	1500	1700	5,5	6,0
P30	82	8	10	13,0	1450	1700	5,6	5,5
P40	77	12	11	13,1	1400	1800	5,6	5,5
P50	70	14	16	12,9	1300	2000	5,2	5,5
M10	84	10	6	13,1	1650	1400	5,8	5,5
M20	82	10	8	13,4	1550	1600	5,6	5,5
M30	81	10	9	14,4	1450	1800	5,8	5,5
M40	78	7	15	13,5	1300	2000	5,5	5,5
K01	93	2	5	15,0	1750	1200	6,3	5,0
K05	92	2	6	14,6	1700	1350	6,3	5,0
K10	92	2	6	14,8	1650	1500	6,3	5,0
K20	91,5	2,5	6	14,8	1550	1700	6,2	5,0
K30	89	2	9	14,5	1450	1900	-	5,5
K40	88	-	12	14,3	1300	2100	5,8	5,5

De referir ainda que existem actualmente outros materiais com durezas interessantes para maquinar outros materiais. Um exemplo disso é o HSS (*high speed steel*). Este tipo particular de aço costuma apresentar durezas semelhantes ao metal duro. Contudo, apresenta algumas debilidades a nível da alteração das suas características relativamente a altas temperaturas. Para 700 °C, peças em HSS perdem até 85 % da sua dureza, enquanto se forem de metal duro têm a sua dureza reduzida em 40 a 45 % (FB Techno, 2015).

2.5.2 - PUNÇÕES PARA Prensagem de Pó

Os punções utilizados na prensagem do pó de metal duro podem fazer dezenas de milhares de ciclos de prensagem, ou mesmo centenas de milhares, sem terem de ser substituídos ou reparados. Da mesma forma, obtemos semelhante observação para as matrizes e para as varetas, estas últimas, quando existam. Apesar do metal duro ter uma dureza superior, quando

comparado com os metais, as suas partes também sofrem desgaste (que seria muito maior no caso de outros materiais). Assim, após inúmeros ciclos de trabalho, é normal a geometria dos punções e das matrizes ficarem alteradas, com arestas e raios desgastados e aumento respectivo das folgas entre matriz e punção. Na Figura 19 apresenta-se de forma esquemática o processo de prensagem de pó.

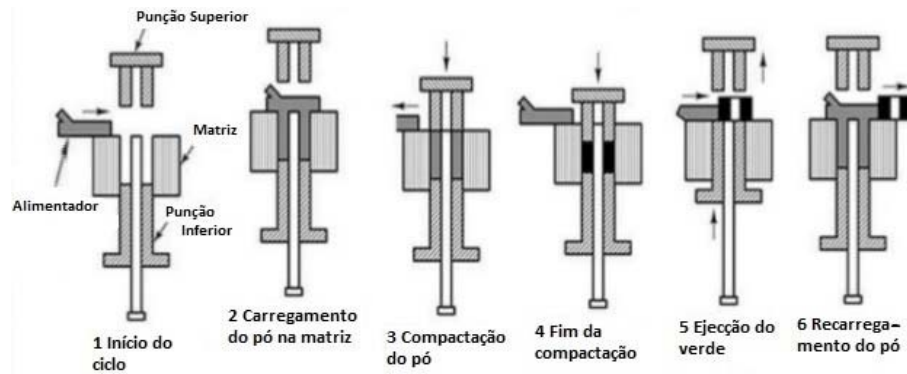


Figura 19 - Processo de prensagem de pó (Singh, et al., 2012)

As superfícies de “deslizamento” (Figura 20) entre os punções e as matrizes representam toda a área que é rectificadas, tanto pelo modelo IRD 400, como pela iQ300, da Makino. São estas áreas que podem vir a acumular pó de metal duro durante o processo de prensagem, podendo levar o sistema a colapsar (“gripar”), e às quais interessa dar um acabamento superior no sentido de prolongar o tempo de vida útil de cada uma das partes do sistema.

De salientar que as superfícies dos punções, matrizes e varetas nunca chegam efectivamente a entrar em contacto umas com as outras. Trabalham sempre dentro das folgas previstas para cada um dos elementos. Temos, por exemplo, que a cavidade de uma matriz é maior do que os punções que vão trabalhar nela. Geralmente esse desfazamento entre dimensões ronda os 10 a 15 μm por lado. É a largura da folga com que a ferramenta trabalha.

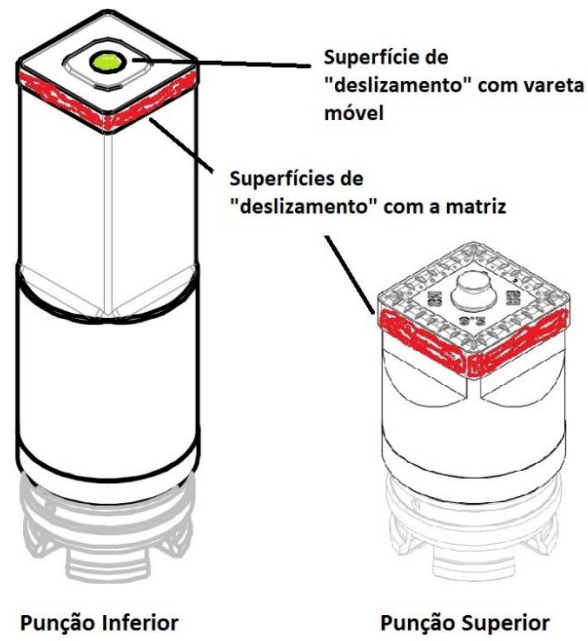


Figura 20 - Superfícies de “deslizamento” entre punções, matrizes e varetas móveis (Palbit, 2017) (adapt.)

3 - ACABAMENTO DE SUPERFÍCIES

3.1 - ESTADO DA SUPERFÍCIE E RUGOSIDADE

As superfícies dos componentes mecânicos maquinados apresentam sempre irregularidades. Algumas dessas irregularidades podem ser observados à vista desarmada, ou seja, macroscopicamente. As restantes só podem ser observadas ao nível microscópico. Essas irregularidades (sulcos, ou marcas) resultam da acção que a ferramenta produziu na superfície da peça. Por forma a poder-se aferir o estado da superfície usa-se a grandeza designada por rugosidade superficial. A rugosidade superficial pode ser definida como o conjunto de pequenas saliências (picos) e reentrâncias (vales) que caracterizam uma superfície.

Em termos tribológicos, podemos afirmar que cada estado de superfície é adequado ao tipo de função que exerce no sistema mecânico. O estado de superfície é da maior importância no desempenho de um sistema e pode influenciar directamente funcionalidades tais como:

- Qualidade do deslizamento (atrito seco e viscoso);
- Resistência à corrosão, ao desgaste e à fadiga;
- Materialização dos ajustamentos apertados;
- Resistência oferecida ao escoamento de fluidos e lubrificantes;
- Qualidade da aderência de revestimentos;
- Condução térmica e eléctrica;
- Leitura óptica;
- Vedação estática e dinâmica;
- Aparência (estética).

Algumas destas utilizações passam pelos movimentos dos pistões nos cilindros de um motor, movimento entre veios e mancais, o movimento das esferas num rolamento, o deslizamento de fluidos em tubos, o atrito entre o casco de um navio e a água, o atrito entre o disco e as pastilhas no processo de travagem de um automóvel, superfícies utilizadas para reflexão de luz, entre inúmeras outras aplicações onde haja contacto e movimento relativo entre superfícies (Tavares, 2012)

Dependendo do resultado final e dos efeitos desejados, umas vezes é de interesse reduzir ao máximo o atrito entre partes, reduzindo ao máximo a rugosidade, noutras será importante aumentar o atrito, aumentando a rugosidade entre componentes do sistema.

3.2 - SUPERFÍCIE GEOMÉTRICA, REAL E EFECTIVA

As definições mais utilizadas para entender o estado das superfícies são: a superfície geométrica, a superfície real e a superfície efectiva (Figura 21). A superfície geométrica apresenta-se como sendo a geometria ideal, ou perfeita, de projecto, sem quaisquer tipo de erros de forma ou de acabamento (sejam eles macro ou microgeométrico). Superfície real é aquela que se define com desvios no acabamento e caracteriza a fronteira entre o corpo e o espaço envolvente. Já a superfície efectiva é o resultado das análises realizadas por dispositivos de medição, tais como rugosímetro e perfilógrafos, e onde se revelam alterações de nível microscópico.

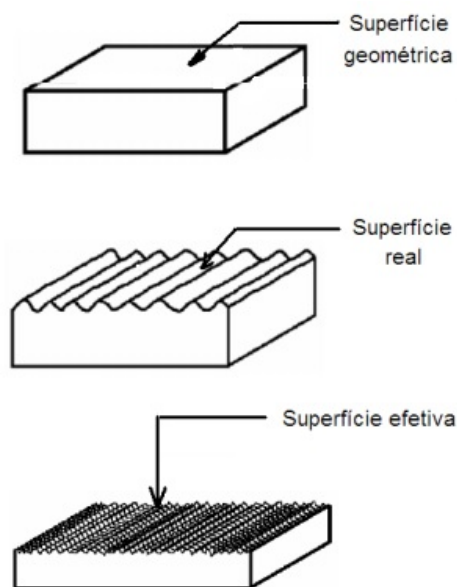


Figura 21 - Tipos de superfícies (ISEC - DEC, 2016)

A rugosidade superficial apresenta-se como o resultado directo da tecnologia de fabrico empregue, da máquina e da ferramenta utilizadas e do tipo de acabamento e parâmetros manipulados. Desta forma, temos que a qualidade e estado de uma superfície pode variar de três formas distintas (Figura 22):

- Erro de forma (ou desvio de forma) – representa a direção geral dos componentes da textura. Erros de forma revelam erros de carácter macro geométrico e podem ser lidos com instrumentos de medição convencionais, tais como paquímetros e micrómetros.

- Ondulação (ou textura secundária) – conjunto das irregularidades causadas por vibrações ou deflexões do sistema de produção. É o conjunto das irregularidades repetidas em ondas de comprimento bem maior que sua amplitude. A frequência destas ondas é pequena.
- Rugosidade (ou textura primária) - conjunto das irregularidades causadas pelo processo de produção, que são as impressões deixadas pela ferramenta na peça (ISEC - DEC, 2016). É o conjunto das irregularidades repetidas em ondas de comprimento semelhantes à sua amplitude. A frequência destas ondas são bastantes elevadas.

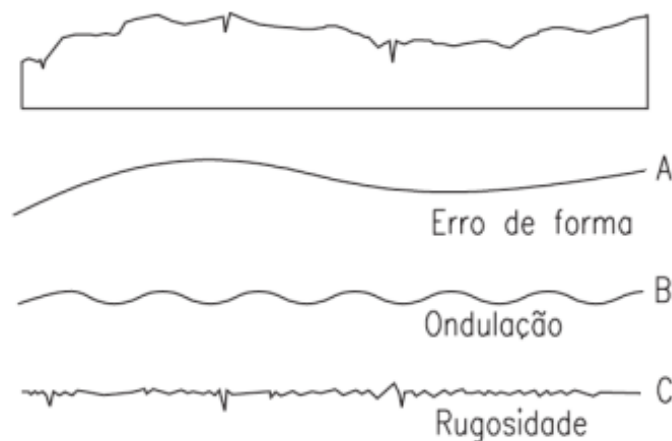


Figura 22 - Rugosidade, ondulação e erro de forma (ISEC - DEC, 2016)

Para a medição da rugosidade, esta deve ser separada da ondulação e dos desvios macrogeométricos. Esta separação é realizada através da filtragem. Um filtro de rugosidade separa o perfil de rugosidade dos demais desvios de forma. O comprimento de onda do filtro, chamado de *cut-off*, determina o que deve passar e o que não deve passar. O sinal da rugosidade apresenta altas frequências (pequenos comprimentos de onda) e as ondulações e demais erros de forma apresentam sinais com baixas frequências (altos comprimentos de ondas). Os rugosímetros utilizam, assim, filtros que deixam passar os sinais de altas frequências e eliminam os sinais de baixa frequências. Quando se mede a rugosidade, o instrumento mostrará o perfil da peça composto da rugosidade e da ondulação.

3.3 - PARÂMETROS DE RUGOSIDADE

Existem múltiplos indicadores e parâmetros como forma de obtermos a rugosidade de uma superfície. Entre os mais conhecidos destacam-se a rugosidade média e a profundidade da rugosidade média. A rugosidade média, R_a (*roughness average*), representa a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas, y_i , dos pontos do perfil de rugosidade (Figura 23). É dos parâmetros mais estipulados para a medição da rugosidade de superfícies e é dos mais utilizados no campo da engenharia, sendo usado na maioria dos processos de fabrico. Fornece uma descrição muito efectiva da variação na altura das irregularidades das superfícies. Tem a desvantagem de não informar sobre a máxima deformação obtida. Algumas vezes, este parâmetro é designado de AA (*arithmetic average*) ou por CLA (*center line average*). As unidades de rugosidade vêm em micrómetros, μm .

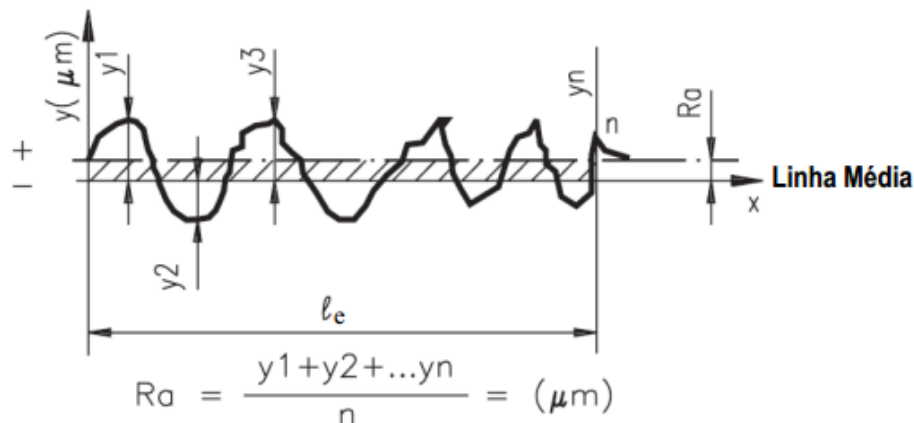


Figura 23 - Rugosidade aritmética em função da linha média do perfil (Filho, 2011)

A profundidade da rugosidade média, R_z , é o valor médio aritmético da profundidade pontual da rugosidade em comprimentos de amostragem consecutivos. Deve ser assumido como um parâmetro que serve como complemento ao R_a , sendo que em alguns casos o R_z é designado igualmente sob a forma de R_y . Na Figura 24, apresenta-se, a rugosidade média em função do comprimento da amostragem, onde l_e é o comprimento da amostragem (*cut-off*), l_m é comprimento total da avaliação e l_t é a distância total percorrida pelo apalpador. Todos estes valores estão definidos na norma ISO 4288:1996. Na Tabela 3 apresentam-se os valores do comprimento da amostragem que a norma recomenda.

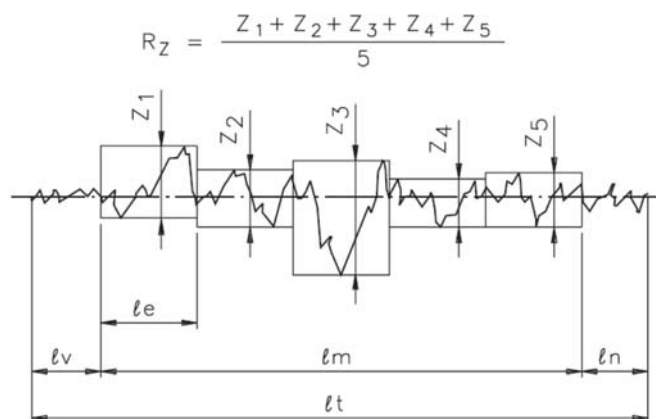


Figura 24 – Rugosidade média em função do comprimento da amostragem (Gear Technology, 2015)

Durante as medições executadas no rugosímetro foi utilizado maioritariamente o *cut-off* de 0,8 mm. Por vezes, a opção pelo *cut-off* de 0,25 mm prendeu-se com a análise em superfícies obtidas por processos que não a rectificação com a IRD 400, com acabamentos muito finos e espelhados.

Tabela 3 - Distâncias de *cut-off* (ISO 4288:1996, 1996) (adapt.)

Cut-off recomendado (ISO 4288:1996)				
Perfis periódicos	Perfis não periódicos		Cut-off	Comprimento da amostragem
Distância [mm]	R_z [μm]	R_a [μm]	l_e	l_t
> 0,013 - 0,04	to 0,1	to 0,02	0,08	0,08/0,4
> 0,04 - 0,13	> 0,1 - 0,5	> 0,02 - 0,1	0,25	0,25/1,25
> 0,13 - 0,4	> 0,5 - 10	> 0,1 - 2	0,8	0,8/4
> 0,4 - 1,3	> 10 - 50	> 2 - 00	2,5	2,5/12,5
> 1,3 - 4,0	> 50	> 10	8	8/40

3.4 - RUGOSIDADES EM ACABAMENTO DE SUPERFÍCIES

Um dos objectivos dos trabalhos de acabamento das superfícies dos punções por rectificação consiste em reduzir a sua rugosidade superficial. Com isto reduz-se uma possível fixação de pó

nessas superfícies, afectando o mínimo possível as alterações da densidade dos compactos por acção das forças de atrito com a ferramenta e maximizando a qualidade do movimento dos punções no interior da matriz. Visa-se, assim, criar as melhores condições para as ferramentas de prensagem nos movimentos cíclicos do processo de prensagem. Temos que quanto mais grosseiro for o acabamento das superfícies, mais pó vai depositar nas paredes do punção, correndo o risco de, em última instância, o sistema matriz-punção colapsar. As irregularidades apresentadas nas superfícies das peças maquinadas variam em grandeza, orientação e grau. Estas características sofrem alterações em função de alguns factores, entre os quais:

- Imperfeição nos mecanismos das máquinas-ferramenta;
- Altas frequências das vibrações no sistema peça-máquina;
- Estado e desgaste da ferramenta em uso;
- Heterogeneidade e plasticidade do material trabalhado;
- Métodos e tratamentos na obtenção da peça.

A rugosidade superficial obtida pelos processos de maquinagem é relação directa do acabamento das superfícies obtido pelos variados processos e máquinas-ferramenta. A relação entre os valores da rugosidade média, Ra, e o tipo de maquinagem e tecnologia que as obteve está expressa em inúmeras tabelas. A Figura 25 indica-nos alguns valores de rugosidades obtidos em função do processo de maquinagem utilizado.

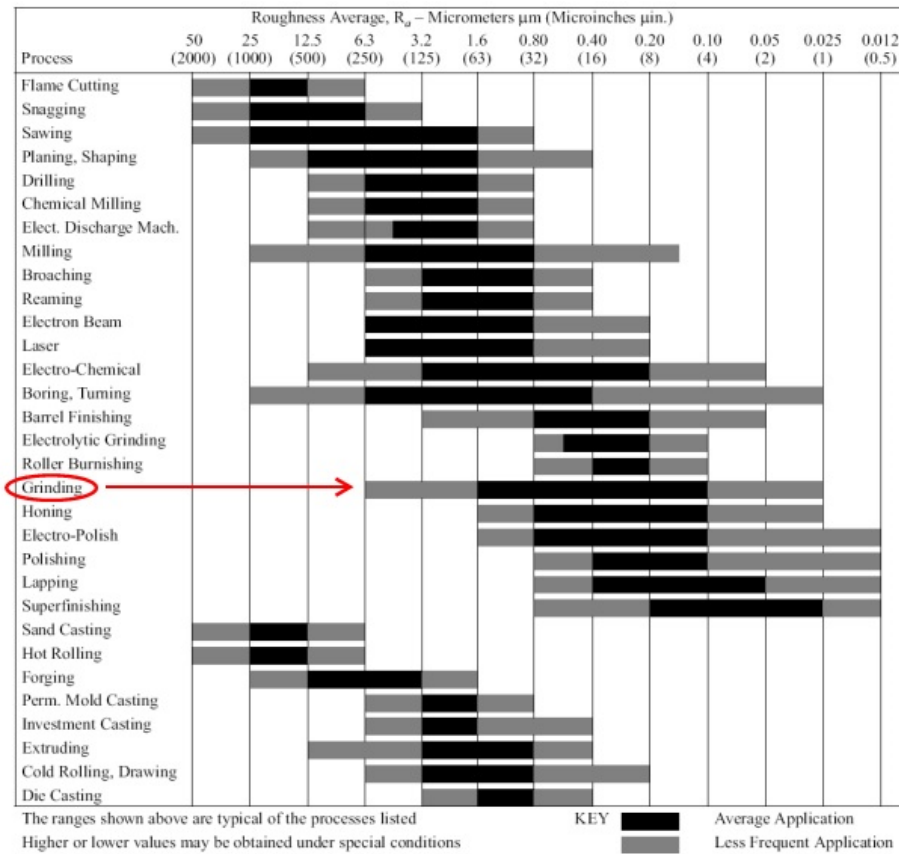


Figura 25 - Rugosidades obtidas em função do processo de maquinagem (ISEC - DEC, 2016)

3.5 - CONSIDERAÇÕES

As diferentes formas e geometrias das pastilhas prensadas (Figura 26) surgem de uma geometria igual e caracterizada nas ferramentas de prensagem, respectivamente nos punções superiores e inferiores. A matriz acompanha a mesma forma e geometria dos punções para confinar o pó e dar corpo às pastilhas prensadas.



Figura 26 - Diferentes formatos de pastilhas de metal duro (Maydown, 2017).

A rectificação das paredes laterais de cada um dos punções que dão origem a cada um dos tipos de pastilhas torna-se um processo único e particularmente específico. Como referido anteriormente, o cruzamento das linhas de rectificação varia com a oscilação e tem influência na rugosidade obtida. Quanto mais cruzadas forem as marcas deixadas, melhor vai ser o acabamento. Contudo, por outro lado, a não definição de um alinhamento preponderante e vincado na superfície leva a dificuldades na orientação da ponteira do rugosímetro aquando da medição da superfície (Figura 27).

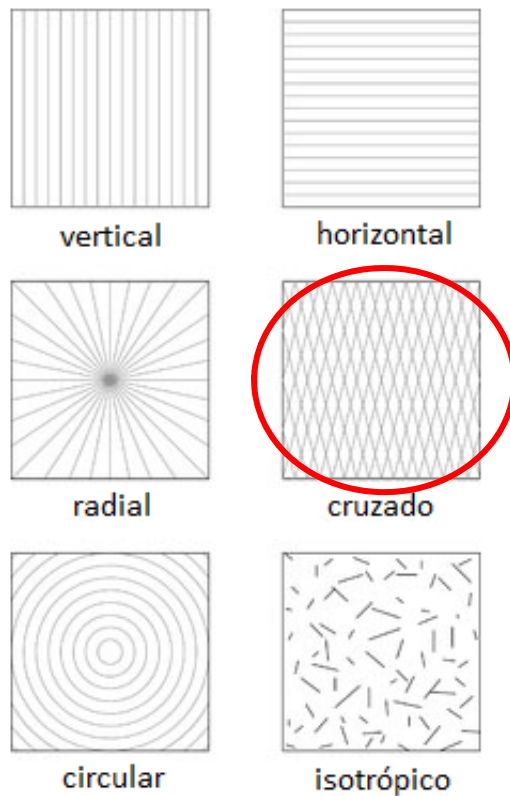


Figura 27 - Linhas de corte em diferentes processos e padrão de corte da rectificação com o modelo IRD 400 (assinalado a vermelho)

4 - MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS

4.1 - MÓS UTILIZADAS NOS ENSAIOS

Uma mó abrasiva para rectificação é constituída pela estrutura de suporte, composto de ligação (aglomerante), grãos abrasivos e poros (espaços vazios entre o aglomerante e os grãos). As mós de resina e diamantes, ou resina e CBN – *cubic boron nitride*, nitreto cúbico de boro, material análogo ao diamante e são os abrasivos mais utilizados actualmente. Quando falamos de abrasivos, referimo-nos mais propriamente aos grãos de abrasão, um dos elementos constituintes de uma mó (Figura 28).

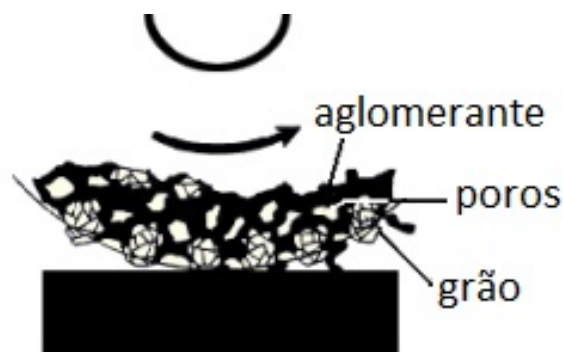


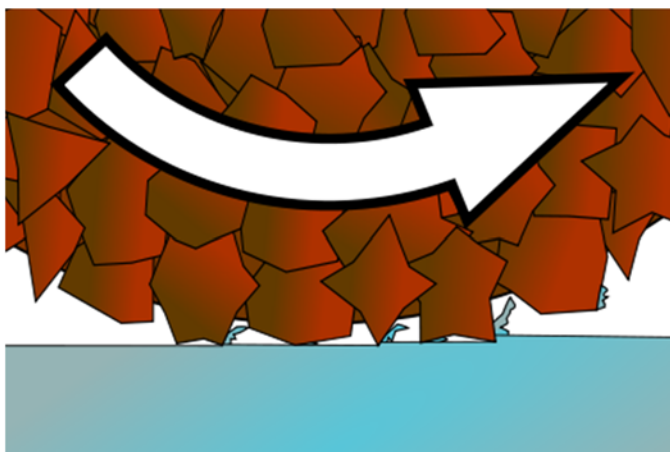
Figura 28 - Constituintes de uma mó abrasiva (Faria, 2007)

Além de grãos de diamante ou CBN, podemos ter outros tipos de materiais, tais como carboneto de silício e óxido de alumínio. A dureza destes materiais pode ser observada na Tabela 4 e representa um valor médio e aproximado, pois dentro do mesmo material podem haver variações significativas, dependendo da forma e dimensão do grão.

Tabela 4 - Dureza típica de grãos abrasivos de alguns materiais através da realização do ensaio de dureza Knoop à temperatura ambiente (Marinescu, et al., 2007)

Tipo de Abrasivo	Unidades [GPa]
Diamante	56 – 102
Nitreto de boro cúbico	42 – 46
Carboneto de silício	≅ 24
Óxido de alumínio	≅ 21

Na rectificação de materiais (Figura 29), é de importância extrema que a dureza dos grãos abrasivos seja maior do que a dureza da peça/material a ser rectificado. Ao contrário da dureza definida em laboratório e à temperatura ambiente, quando temos a decorrer o processo de rectificação, o contacto entre os grãos da mó e a peça proporciona subidas de temperatura de várias centenas de graus Celsius. Com o aumento de temperatura temos uma diminuição da dureza dos materiais, em geral. É factor incontornável que a dureza do material abrasivo continue superior ao da peça maquinada a altas temperaturas. A 1.000 °C, por exemplo, a dureza da maioria dos materiais abrasivos é reduzida aproximadamente para metade. Acontece que, assim como a dureza do abrasivo diminui, também diminui a da peça rectificada. Salienta-se que, a altas temperaturas o CBN tem comportamentos mais estáveis pela sua dureza ser menos afectada (Marinescu, et al., 2007). Por outro lado, o comportamento e desempenho de uma mó abrasiva não depende somente da dureza dos seus grãos abrasivos. O modo de desgaste da mó, seja por desgaste por atrito, por microfracturas ou macrofracturas, vai influenciar a estabilidade e a evolução do processo e se progressivamente levam, ou não, à perda de eficiência da mó, à desagregação de partes ou mesmo ao seu colapso total.

**Figura 29** - Esboço da remoção de material através de partículas abrasivas

Do mesmo modo que o material dos grãos abrasivos influencia o resultado da rectificação, também o material ligante tem a sua importância no comportamento da mó. Este pode ser à base de ligas de plástico, resinóides, ligas metálicas, cerâmicas, entre outros. A função primordial do ligante é conservar a coesão dos grãos abrasivos até que estes tenham perdido as suas capacidades de corte. A porosidade da mó tem de ser igualmente tal que permita a deslocação do fluido e a remoção eficiente das aparas resultantes. De um modo geral, as mós com estrutura em ligas metálicas sólidas são utilizadas na rectificação de vidro e cerâmicos, enquanto as mós em ligas metálicas porosas, ligas resinóides ou cerâmicas são essencialmente utilizadas para a rectificação de metal duro e aços endurecidos (Technodiamant, 2017). Da ponderação cuidada entre os diferentes tipos de constituintes das mós, suas características e qualidades, resulta um tipo muito específico de rectificação. Essa rectificação engloba factores como o tempo despendido no processo, directamente dependente das taxas de remoção de material, o tipo de material a maquinar, o rigor na obtenção de geometrias com tolerâncias apertadas, o acabamento da superfície obtida, temperatura de contacto e estabilidade da mó. É, pois, de salientar, que cada sistema de rectificação tem as suas características próprias e adaptadas a cada produto final (Marinescu, et al., 2007). Sendo assim a rectificação de materiais cerâmicos, vidros, quartzos e carbonetos podem ser usadas mós com ligas resinóides de diamante. Se pretender-se retificar aços endurecidos, aços-ferramenta, aços inoxidáveis ou ferros fundidos já se devem usar mós com ligas resinóides de CBN (Action Superabrasive, 2016).

4.1.1 - TAMANHO DO GRÃO

O tamanho do grão (número do grão, grãos de diamante ou de nitreto de boro cúbico) assim bem como as suas designações e concentrações são parâmetros que estão regulados na Norma DIN 848-1. A par do documento normativo DIN, a Europa obedece aos padrões europeus (European Standards) regidos pelo organismo FEPA (Federation of European Producers of Abrasives) que traz uma linha orientadora no enquadramento deste universo. Por outro lado, nos Estados Unidos vigoram os padrões americanos (American Standards), regulados pela ANSI (American National Standards Institute) e a ASTM (American Society for Testing and Materials). Já no Japão o órgão que efetua a regulamentação é o JIS (Japanese Industrial Standards) (Figura 30).



Figura 30 - Órgãos reguladores e normativos (DIN, alemã; FEPA, europeia; ANSI, norte americana e JIS, japonesa)

Os milhares de grãos abrasivos que constituem a mó são classificados segundo um número que representa o número de malhas por polegada linear que os grãos atravessam quando são sujeitos a processos de peneiração, a ensaios de granulometria. Existem quatro grupos de tamanho de grão, nomeadamente o tamanho grosso, médio, fino e muito fino (Education Discussion, 2017). Assim, seguindo os padrões americanos, se tivermos um número de malha elevado, significa que temos grãos muito finos, enquanto um número baixo de malha representa um tamanho grande de grão abrasivo. Transpondo o tipo de registo existente para o contexto europeu, encontramos o número do grão directamente relacionado com o tamanho efectivo dos grãos utilizados na mó. Na Tabela 5 observamos a correlação existente entre a nomenclatura em vigor nos Estados Unidos da América e a utilizada no continente europeu. Aqui, ela é regida pelos padrões FEPA ou da DIN.

Tabela 5 - Nomenclatura dos sistemas de grãos de acordo com os vários órgãos reguladores (Technodiamant, 2017)

µm	DIN 848	FEPA-STANDARD	US-MESH	µm
1250				1190
1000	D 1100	D 1182 D 1181	16/18	1000
800	D 900	D 1001	18/20	850
800	D 700	D 852 D 851	20/25	710
630	D 550 D 500	D 711	25/30	600
500	D 450	D 602 D 601	30/35	500
400	D 427 D 426	D 427 D 426	35/40	425
315	D 350	D 356	40/45	355
315	D 280 D 250	D 301	40/60 45/50	300
250	D 220	D 252 D 251	50/60	250
200	D 180 D 150	D 213	60/80 60/70	212
160	D 140	D 181	70/80	180
125	D 110 D 100	D 151	80/100 80/100	150
100	D 90	D 126	100/120 100/120	125
80	D 65 D 70	D 107	120/140 120/140	106
63	D 55	D 91	140/170 140/170	90
50	D 45 D 50	D 76	170/200 170/200	75
40	D 35 D 30	D 64	200/230 200/230	63
32	D 25	D 54	230/270 230/270	53
25		D 46	270/325 270/325	45
		D 35	325/400 325/400	38
		D 30	500/600 500/600	32
		D 25		25
		D 15		20
				10

Nos processos de rectificação executados pela IRD 400, da Palbit, são utilizadas mós de grão D46, segundo a designação da FEPA, o que corresponderia ao grão 325/400 nos EUA. Este grão tem a dimensão menor superior a 46 μm . Desta forma, encontramos nos grãos abrasivos grossos o número compreendido no intervalo 16/24 – dimensões superiores a 710 μm ; para abrasivos médios o intervalo 36/60 – dimensões entre 212 e 600 μm ; para abrasivos finos o número entre 80/120 – para dimensões entre 180 e 125 μm ; e grãos muito finos no intervalo 140/600 – para grãos com dimensões abaixo dos 106 μm . Temos, assim, que o grão utilizado na mó de maior dimensão da rectificadora, neste caso uma mó de 100mm de diâmetro, engloba-se dentro dos grãos muito finos (D46).

Para a selecção da dimensão do grão das mós abrasivas há que ter em consideração a existência de três tipos de regime de rectificação: desbaste, acabamento e acabamento fino (por vezes também ultra-fino). Desta forma, a escolha de uma dimensão específica de grão influencia directamente o nível de rugosidade obtida nas superfícies trabalhadas. Para Jackson (2011), as orientações gerais para uma rectificação de alta performance exigem malhas de 40-60 para rectificação de desbaste, malhas de 60-100 para acabamentos e malhas de 100-320 (ou maiores) para acabamentos finos. Na Tabela 6 apresenta-se a relação entre a dimensão dos grãos abrasivos e a rugosidade média obtida nas superfícies, segundo os padrões norte americanos (grãos de óxido de alumínio). Importa referir que estes valores apenas respeito ao acabamento conseguido pela variação do tamanho do grão, mas a rugosidade de uma superfície maquinada é influenciada por muitos outros factores, tais como o tipo e processo de rectificação.

Tabela 6 - Relação entre a dimensão dos grãos abrasivos e a rugosidade média obtida nas superfícies, segundo os padrões norte americanos (grãos de óxido de alumínio) (Jackson, 2011)

Surface Roughness, Ra [μm]	Abrasive grain size (U.S. mesh size)
0,7 – 1,1	46
0,35 – 0,7	60
0,2 – 0,4	80
0,17 – 0,25	100
0,14 – 0,2	120
0,12 – 0,17	150
0,1 – 0,14	180
0,08 – 0,12	220

Os punções maquinados na IRD 400 sofrem diferentes condições de rectificação dentro do mesmo processo de maquinagem. Desde o desbaste mais grosseiro, onde são utilizadas taxas de remoção elevadas, até ao acabamento mais fino e mais rigoroso, tudo realizado com a mesma mó. A mó utilizada, com grão D46, ou equivalente a 325/400, permite realizar as várias etapas, variando apenas o avanço da ferramenta na peça. Isto é possível porque em termos médios as

peças apresentam um excesso de material na ordem dos 0,5 mm ou menos. De forma geral, são utilizadas mós com grãos mais grosseiros para rectificações mais agressivas, onde se privilegia a remoção de material, e grãos mais finos para quando as exigências de acabamento e o rigor dimensional são superiores (Figura 31).

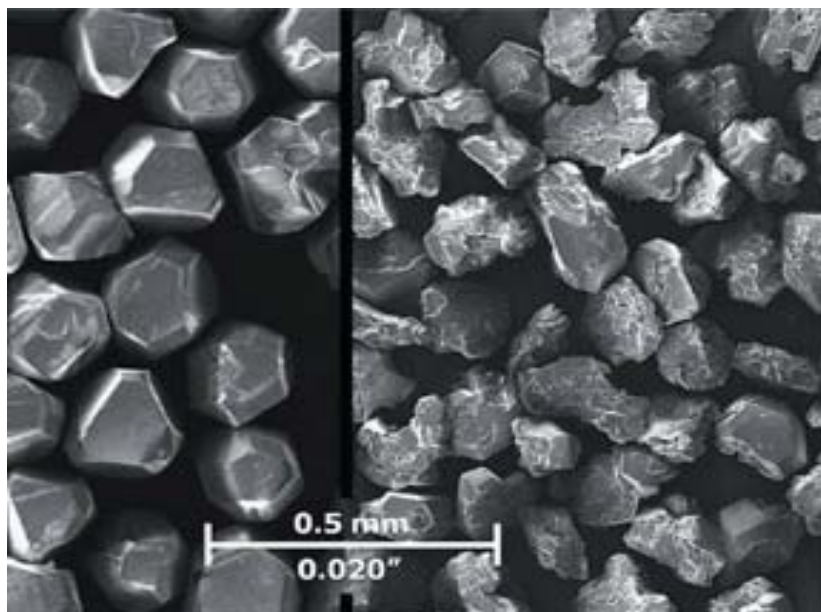


Figura 31 - Forma do grão e concentração (Agressive Grinding Service, Inc., 2013)

4.1.2 - CONCENTRAÇÃO DO GRÃO

Geralmente, para a obtenção de altas taxas de remoção de material de metal duro ou aço endurecido, são selecionadas concentrações entre 75 a 125 (Tabela 7). Quando os requisitos passam por bons acabamentos de superfície, as concentrações são inferiores, assim bem como a dimensão dos grãos abrasivos de diamante, ou CBN (Technodiamant, 2017).

Tabela 7 - Sugestão de utilização de mós de diamante para rectificação de metal duro (Technodiamant, 2017)

Tipo de maquinagem	FEPA mós	Pré rectificação			Rectificação fina			Lapidação		
		FEPA grão	concentração		FEPA grão	concentração		FEPA grão	concentração	
rectificação manual	6A2 11A2	M	D 151 D 181 D 213	100	M	D 76 D 91 D 107	50	M	D 46 D 54 D 30	40
cortadores, escareadores, etc, em ferramentas de rectificação universais	11A2 12A2 11V9	M K	D 151 D 181 D 213 D 107 D 126	100	M K	D 76 D 91 D 46 D 54 D 64	75 75	K	D 30 D 46 D 54	40-50
perfis de rectificação em rectificadoras de perfil	1EE1 1E1Q	M	D 107 D 126 D 151 D 181 D 213	100-125	K	D 46 D 54 D 64 D 76 D 91	75-100	K	D 30 D 46 D 54	75
cortadores, plainas e serras para trabalhos em madeira	4A2 6A2 11A2 11V9 12A2 15A2	K	D 107 D 126 D 151 D 181 D 213	100-125	K	D 46 D 54 D 64 D 76 D 91	75-100	K	D 10 D 15 D 30	50
rectificação plana e cilíndrica	1A1 14A1	K	D 107 D 126 D 151 D 181 D 213	100	K	D 46 D 54 D 64 D 76 D 91	75	K	D 7 D 10 D 15 D 30	25-50
rectificação interna	1A1 1A1W	M	D 151 D 181 D 213	150	M K	D 107 D 126	150 100	K	D 30 D 46 D 54 D 64	75-100

M = ligas metálicas
K = ligas resinosas

4.1.3 - GRAU DA MÓ

O grau de uma mó de rectificação representa a dureza com que os grãos são seguros à mó e está relacionado com o tipo de liga e processo de fabrico da própria mó. Não se refere à dureza dos grãos abrasivos. O grau é definido por uma letra do alfabeto e os termos *soft* (suave), *medium* (médio) ou *hard* (duro) referem-se à resistência que a liga oferece para o desagregamento dos

grãos abrasivos. Uma mó a partir da qual os grãos abrasivos sejam facilmente “desalojados” é designada de *soft* e leva a que os novos grão sejam expostos mais rapidamente. Uma mó que prenda os grãos de forma mais segura é designada de *hard* e significa que mantém os grãos intactos durante mais tempo, apresentando uma dureza e uma capacidade de corte maiores. O grau do vínculo pode ser classificado em três categorias.

Tabela 8 - Graus de mós de rectificação (Agressive Grinding Service, Inc., 2013)

<i>Soft</i>	A	B	C	D	E	F	G	H		
<i>Medium</i>	I	J	K	L	M	N	O	P		
<i>Hard</i>	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z

4.1.4 - ESPECIFICAÇÕES DAS MÓS

Os códigos associados às mós de rectificação têm uma interpretação própria e normalmente têm um significado muito específico. A maioria dos fabricantes de mós especificam nos seus produtos o tipo e o tamanho do grão, a dureza da mó, estrutura e a ligação. Por outro lado, apesar das informações fornecidas serem comuns, não existe um padrão no que respeita à forma e à organização como essa informação é registada nos códigos. Cada fabricante tem o seu próprio método de identificação mas algumas regras têm de ser seguidas neste universo.

A especificação de uma mó de rectificação pode ser, por exemplo, “A60-I10-VS”, comum, por exemplo, nos Estados Unidos da América. Aqui, o “A” designa o tipo de grão, óxido de alumínio, neste caso, 60 representa a dimensão do grão utilizado, “I” é a dureza relativa, “10” o tipo de estrutura da mó e o “VS” é específico da empresa fabricante, que aqui significa que é uma liga vitrificada. Outro exemplo passa pela especificação “97C80 +F/-G-B11-DC”, onde o “97C” é o tipo de grão (aqui, o “C” indica que os grãos serão, provavelmente, de carboneto de silício), “80” indica o tamanho do grão, “+F/-G” remete para uma mó de dureza intermédia, “-B11” é o tipo de liga e “DC” diz respeito a processos sofridos pela mó, tais como ranhuras, furos ou porosidade induzida (Georgia Grinding Wheel, 2008). Na Figura 32 apresenta-se um exemplo de um código de uma mó usada na IRD 400.

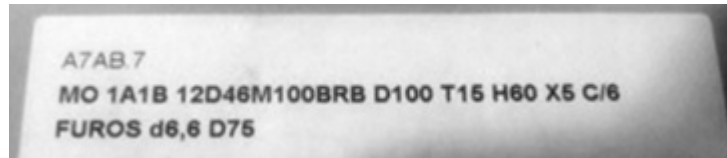


Figura 32 - Código associado à mó de 100 mm de diâmetro utilizada na IRD 400 1A1B 12D46M100BRB D100 T15 H60 X5 C/6

Como complemento do que foi referido atrás, observamos que as designações das mós variam muito de fabricante para fabricante, até de país para país. Apesar de haverem algumas especificidades que são comuns e semelhantes às variadas designações, como a dimensão dos grãos, o significado concreto de cada um dos códigos só poderá ser definido através da consulta dos catálogos ou cadernos técnicos de cada um dos fabricantes (Figura 33).



Figura 33 - Código do fabricante para a mó de 25 mm de diâmetro e grão D15: 1A1 25 12 3 12 D 15 SR 100 R806

Na designação D46, a letra “D” informa que os grãos são de diamante (*diamond*). Se, por outro lado, o elemento abrasivo fosse de CBN, a letra correspondente seria a letra “B”, de boro (*boron*) (FEPA - Federation of European Producers of Abrasives, 2017).

4.2 - EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

4.2.1 - MÁQUINA DE RECTIFICAÇÃO IRD 400

Para a rectificação dos punções em metal duro a Palbit dispõe de uma máquina da empresa/grupo Danobat Overbeck, da série IRD 400. A grande maioria dos trabalhos de rectificação são realizados neste dispositivo, embora algumas peças com geometrias particulares – principalmente com raios interiores apertados – sejam realizadas em fresadoras CNC mais pequenas, nomeadamente da marca Makino.

A IRD 400 (Figura 344) é designada de *Internal, External & Radius Grinding Machine*, ou seja, é uma rectificadora cilíndrica que executa rectificação interna e externa de peças. O denominador comum em todas as peças é que elas possuem o mesmo centro de rotação, sendo ele o centro da bucha de fixação da mesma. Pode igualmente ser designada por rectificadora cilíndrica interna de precisão. Contudo, além de executar rectificações internas de peças com geometrias radiais (acabamento/rectificação de furos em punções, p. ex.), executa igualmente rectificações externas em periferias, nomeadamente em peças com geometrias não radiais. Tem, por isso, uma versatilidade enorme na maquinagem de ferramentas de prensagem, não tendo praticamente limite algum em peças de raios convexos. Os limites prendem-se apenas com as dimensões e cargas máximas suportadas pela máquina.

A fixação das peças, punções, centradores ou outros tipos de elementos, é realizada através do sistema Erowa, por meio de uma bucha a ar comprimido. O sistema Erowa é, aliás, o sistema de fixação padronizado adoptado pela Palbit e é o veio comum entre a secção da Ferramentaria, onde se executam os punções e as matrizes, e a secção das Prensas, onde se dá forma às variadas pastilhas de corte.



TECHNICAL CHARACTERISTICS		IRD-400
Internal grinding diameter	in	7.8
"B" Axis swivelling range	°	+95/-15
Work swing	in	15.7
Workpiece weight	lb	150/375
X and Z Axis stroke	in	15.7/17.7

Figura 34 - Rectificadora Danobat Overbeck IRD 400 e suas principais características (Danobat-Overbeck, 2016)

Das várias aplicações e potencialidades da máquina IRD 400, os processos mais amplamente utilizados pela Palbit passam pela rectificação de superfícies externas dos punções de prensagem, superior e inferior, e na rectificação de superfícies internas, nomeadamente as paredes dos furos dos punções, onde funciona a vareta móvel. A estabilidade, rigidez e precisão do sistema é garantido por uma mesa de granito natural, com aproximadamente 3.000 kg, e pela utilização de *electrospindles* cuidadosamente montados em ambientes controlados (Danobat-Overbeck, 2016).

4.2.1.1 - MOTORES LINEARES

A transmissão de potência para os movimentos axiais da IRD 400 é realizado através da tecnologia de motores lineares. O princípio de funcionamento de um motor linear assenta igualmente no princípio de elctromagnetismo, onde a atracção magnética, derivada de uma corrente eléctrica, provoca o movimento entre partes do sistema (rotor e estator). Assim, um motor linear é um motor de indução eléctrica que produz movimento linear em vez de movimento rotativo. Contrariamente a um motor rotativo convencional, onde o rotor gira dentro do estator, neste caso, o estator funciona como uma placa aberta, “desenrolada” e lisa e o rotor desloca-se sobre ela em movimento rectilíneo. Este tipo de tecnologia tem vindo a ser utilizada e desenvolvida no campo da maquinagem CNC durante as últimas três décadas, embora as primeiras intenções remontem a fins do séc. XIX., principalmente associadas aos transportes por levitação magnética (*maglev – magnetic levitation*). Na maioria das tecnologias e processos de fabrico industriais o motor linear tem ganho algum campo em relação a tecnologias mais utilizadas e convencionais, como o fuso de esferas (Figura 355).

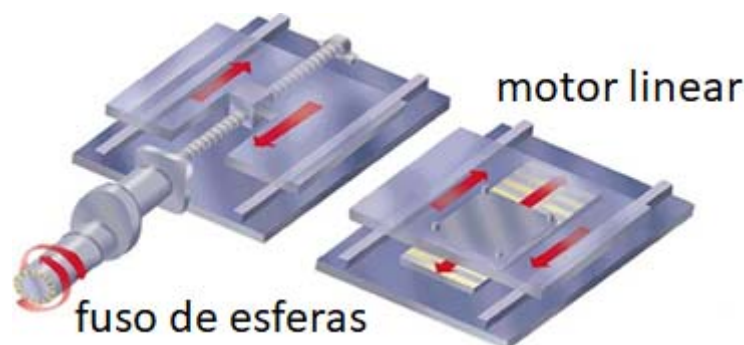


Figura 35 - Tecnologia de transmissão por fuso de esferas e por motor linear (Sodick, 2017) (adapt.)

O sistema de transmissão de um motor linear assenta na resposta dada por *encoders* e uma escala linear de posicionamento. Além disso, a transmissão de potência é dinâmica, permitindo movimentos de translação da ferramenta altamente precisos e rigorosos. Contrariamente aos sistemas de fuso, os motores lineares baseados em placas magnéticas não sofrem de erros derivados das folgas entres componentes mecânicos, da acumulação de resíduos nas superfícies do fuso. Outras vantagens dos motores lineares encontram-se designadas a seguir:

- Sistema de controlo de alta velocidade e alta aceleração;
- Resposta rápida em função da ausência de atrasos no controlo de movimento;
- Alta precisão e alta capacidade de repetibilidade;
- Transmissão directa, sem correias, acoplamentos e perdas de movimento;
- Ausência de vibração nos eixos;
- Gera menos perdas de energia;
- Mecanismos simples e fáceis de montar;
- Manutenção muito reduzida ou inexistente (Sodick, 2017).

Este tipo de tecnologia não se encontra presente apenas na rectificadora IRD 400, faz parte igualmente de outras máquinas da Ferramentaria, tais como as máquinas de *EDM*, tanto por fio como por penetração, da Sodick, e também da iQ300, da Makino.

4.2.1.2 - SPINDLES E SISTEMAS DE EIXOS

A máquina está equipada com 4 cabeçotes/*turrets* dispostos ortogonalmente em forma de cruz (Figura 366). A disposição actual da máquina utilizada na empresa contempla uma mó de 100 mm para rectificações externas, duas mós de diâmetro reduzido, 2,5 mm e 4 mm, para rectificações internas, e uma sonda para medições e execução do “zero peça”. Durante a última manutenção realizada à máquina pela Danobat-Overbeck, aproveitou-se e substituiu-se a mó de rectificação interna de 2,5 mm por uma de 25 mm para trabalhos de rectificação externa. Manteve-se o mesmo *spindle*, com a possibilidade de aplicar a mesma rotação máxima. Além dos quatro *spindles* funcionarem sobre dois eixos ortogonais no plano horizontal, o eixo X1 e o eixo Z1, o sistema pode trabalhar também com a rotação fornecida por um eixo vertical, o eixo B1, para a selecção das ferramentas (Figura 377).

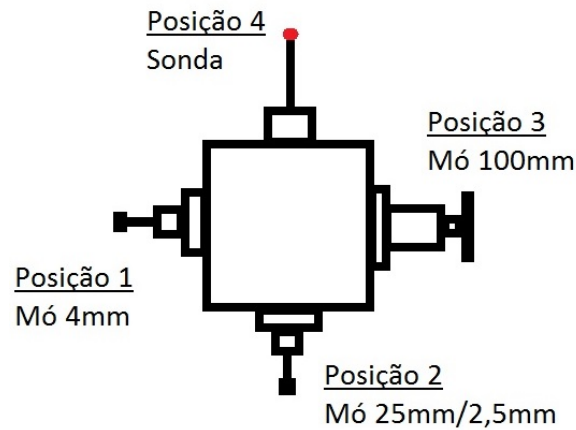


Figura 36 - Disposição dos *turrets* na máquina

A base de trabalho, a cabeça de suporte da peça, tem igualmente liberdade de trabalhar sobre um eixo de rotação integrado vertical, o eixo B0, além da rotação fornecida à peça através do eixo de rotação C0. Em suma, a rectificadora trabalha, assim, com 5 eixos sincronizados:

- 2 eixos de translação: eixo X1 e eixo Z1;
- 3 eixos de rotação: eixo B0, eixo C0 e eixo B1.

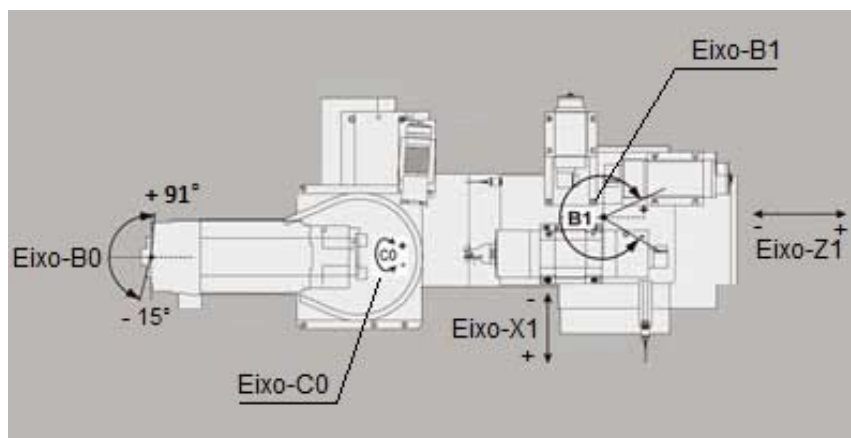


Figura 37 - Eixos utilizados pela IRD 400 – Vista de topo (Danobat-Overbeck, 2016) (adapt.)

4.2.1.3 - LUBRIFICANTE DE REFRIGERAÇÃO DO SISTEMA

Durante o processo de maquinagem, aproximadamente 97 % da energia mecânica do sistema é convertida em energia térmica (Lacalle, et al., 2011). Desta forma, resulta que 80 % do calor é

gerado na zona de trabalho, onde 75 % é eliminado pela remoção da aparta formada, 5 % concentra-se na peça maquinada, 18 % produz-se no interface ferramenta-aparta e os restantes 2 % resultam do interface ferramenta-peça. Durante o processo de rectificação uma mistura fluída é injectada na zona de trabalho (zona de contacto entre a ferramenta e a peça) por uma mangueira flexível e tem como principais funções:

- Arrefecimento das partes em contacto: reduzindo o atrito entre elas e dissipando o calor;
- Limpeza: removendo os contaminantes e o material retirado das peças para minimizar a criação de pasta de rectificação;

Na IRD 400, a refrigeração da zona de trabalho é realizada através de uma emulsão à base de água com aditivos concentrados de óleo. A adição de outro componente à água prende-se principalmente com a capacidade de inibir, ou retardar, a formação de oxidação nas partes. Este tipo de emulsões são o suficiente para funcionar devidamente com mós diamantadas, que é o caso daquilo que acontece na rectificação com a IRD 400. Contudo, em certos sistemas e máquinas, as mós utilizadas têm os grãos de CBN, *cubic boron nitride* e nestes casos é aconselhado o uso integral de óleo sintético. O uso exclusivo de óleo aumenta consideravelmente o tempo de vida da mó de CBN (Toolgal, 2017). Contudo, existem ainda outros tipos de fluídos como pastas, géis, mistos e gases (nitrogénio líquido e CO₂).

O sistema de recirculação do fluído contempla a passagem do mesmo por uma folha de filtro com a obrigação de reter os resíduos de metal duro removidos da peça – partículas de pó – e as desagregações dos grãos da mó, sendo posteriormente reintroduzido dentro da máquina. As características de escoamento do fluído de refrigeração podem igualmente ser adaptadas com vista a obter os melhores efeitos. Neste caso temos que a velocidade de saída do fluído tem de ser adaptada à velocidade periférica da ferramenta utilizada, assim bem como a ponteira de injeção do fluído no sistema tem de ser apenas e só ligeiramente maior do que a pista (largura) da mó. É, desta forma, muito importante que a refrigeração aconteça, mesmo que em condições reduzidas e deficitárias, em detrimento de não existir refrigeração de todo. Este último cenário comportaria danos severos para a mó abrasiva e para as peças de metal duro trabalhadas (Toolgal, 2017).

4.2.1.4 - SISTEMA DE FIXAÇÃO

O sistema de fixação das peças (punções e outras) na rectificadora IRD 400 adopta o sistema padronizado da Erowa e é comum em outras secções da Palbit (Figura 38). É um dos veios de

ligação entre as máquinas e dispositivos da secção da ferramentaria e a secção das prensas. Com a adopção do mesmo sistema de fixação para as diferentes máquinas envolvidas reduzem-se as margens de erro na compatibilização entre máquinas e diminuem-se os tempos de preparação e fixação da ferramenta nos diversos equipamentos envolvidos.



Figura 38 - Sistema de fixação Erowa padronizado (Erowa, 2017)

Tanto os punções como as matrizes, assim bem como outros dispositivos auxiliares (necessários muitas vezes para a maquinagem de peças mais particulares, principalmente na electroerosão por fio), funcionam nos mesmos moldes. Apesar do corpo das ferramentas, punções e matrizes, ser fabricados na Palbit, existe uma série de acessórios que compatibiliza posteriormente a utilização das ferramentas nos sistemas de fixação.

O sistema base consiste numa bucha, contemplada e fixa na base da máquina, e das peças que vão funcionar fixadas nessa bucha (Figura 3939). O aperto e estabilização da peça na bucha pode ser realizado por via manual, com um aperto de uma chave, ou através de um sistema pneumático, sendo activado e desactivado por válvulas.

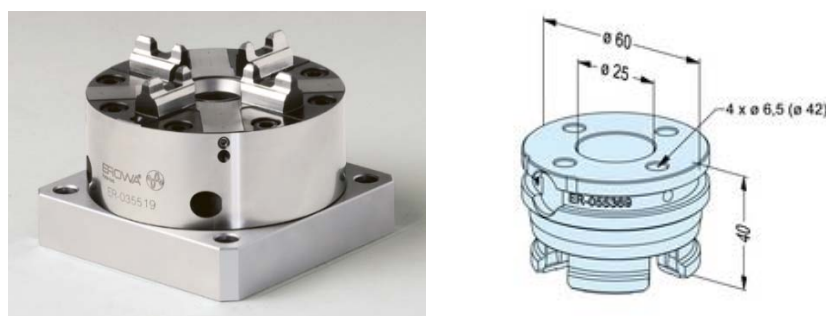


Figura 39 - Bucha e *pallet* Erowa (Erowa, 2017)

Na IRD 400 e nas fresadoras CNC de alta precisão o aperto é feito por via pneumática mas nas restantes máquinas da ferramentaria, nomeadamente na electroerosão por fio e na electroerosão por penetração, ele é realizado por aperto manual. Isto prende-se com o facto das máquinas que provocam vibrações (com ferramentas de alta rotação) poderem preservar o nível de aperto durante o processo de maquinagem. Tanto num caso como noutro, o que acontece é que as esferas da bucha vão ser comprimidas contra um espigão colocado na peça, fazendo com que a peça seja puxada e se comprima contra a bucha. Todas as medidas, geometrias de encaixe e de ajuste das partes constituintes do sistema são garantidas a nível micrométrico pela empresa fornecedora Erowa.

4.2.2 - RUGOSÍMETRO TESA RUGOSURF G10

Para a medição da rugosidade dos vários acabamentos efectuados pela rectificadora IRD 400 foi utilizado o rugosímetro Rugosurf G10, da empresa suíça TESA Technology (Figura 40). Este dispositivo serve de apoio à secção de Metrologia e do Controlo e é utilizado frequentemente para aferição do nível de acabamento e rugosidade das mais variadas peças executadas pelos mais variados processos. Importa referir que durante as medições executadas no rugosímetro foi utilizado maioritariamente o *cut-off* de 0,8 mm. Por vezes, a opção pelo *cut-off* de 0,25 mm prendeu-se com a análise em superfícies obtidas por processos que não a rectificação com a IRD 400, com acabamentos muito finos e espelhados.



Figura 40 - TESA Rugosurf 10G (Tesa Technology, 2017)

Durante a realização das análises à rugosidade das superfícies dos punções, e paralelamente, foram feitos igualmente alguns ensaios a outras superfícies. Essas superfícies são:

- Paredes de furos recitificados pela IRD 400;
- Paredes internas de matrizes, executadas tanto pela electroerosão de fio como de electroerosão por penetração;
- Topos de matrizes polidos por uma rectificadora facial;
- Superfícies acabadas pela fresadora de precisão da Makino, e outras superfícies.

Em todos os ensaios realizados o filtro utilizado na medição da rugosidade foi o filtro Gaussiano. O filtro Gaussiano é recomendado pela ISO 11562-1996 e pela norma ASME B46-1995 para a determinação da linha média em superfícies e metrologia. Na Figura 41 demonstra-se a utilização do rugosímetro na medição da rugosidade média das paredes de um furo de um punção e nas paredes da cavidade de uma matriz.



Figura 41 - Utilização do dispositivo na medição da rugosidade de um furo e do interior de uma matriz

Os parâmetros que o rugosímetro apresenta podem ser configurados pelo utilizador e vão desde o Ra, R_z, R_q, RMS, R_p, R_t. Para além dos parâmetros anteriores, é ainda possível obter-se o perfil de rugosidade. Na Figura 42, apresenta-se sob a forma de imagem o resultado que é visível no display do rugosímetro TESA Rugosurf G10, onde é possível visualizar os valores dos parâmetros medidos e o perfil da rugosidade.

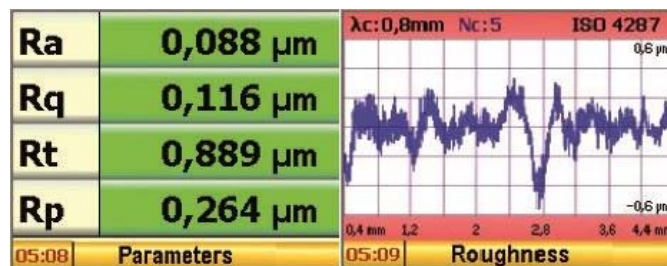


Figura 42 – Saída de dados em valores numéricos e em perfil gráfico no rugosímetro TESA (Tesa Technology, 2017)

Importa referir que, para se proceder à medição de uma rugosidade é necessário realizar um conjunto de procedimentos de forma a efetuar a medição de forma correcta. Sendo assim os procedimentos são:

- Preparação da Superfície: antes de proceder à medição da rugosidade de uma superfície temos de garantir uma condição essencial para a boa leitura da informação, a horizontalidade da superfície. A ponteira do rugosímetro e o apalpador fazem pressão contra a peça e as pequenas saliências da ponteira apenas permitem medir adequadamente a superfície se esta estiver desempenada e em relativo estado de horizontalidade. Esta análise é realizada apenas por inspecção visual.
- Paralelismo da ponteira: outra condição que tem de ser devidamente garantida é o paralelismo entre a haste da ponteira e a superfície a ser analisada. Desta forma garantimos que apenas a ponteira toca na superfície a medir e que está ortogonal à mesma (Figura 43).
- Direcção e orientação da medição: a colocação da ponteira e a orientação do varrimento executado pelo apalpador é um factor que influencia a natureza dos resultados. Desta forma, interessa que a linha varrida pelo apalpador seja perpendicular às estrias predominantes na superfície da peça (Figura 44).



Figura 43 - Paralelismo entre a haste e a superfície

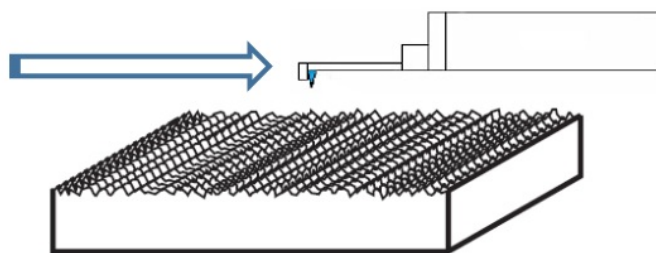


Figura 44 - Orientação correcta do apalpador em relação às estrias

4.3 - DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE CORTE

4.3.1 - MECANISMO DE CORTE

No universo industrial os materiais frágeis e quebradiços englobam um espectro alargado como o metal duro, a família dos cerâmicos avançados, onde se incluem o carboneto de silício, o nitreto de silício, o óxido de alumínio, a zircónia, a alumina endurecida com zircónia (ZTA, *zirconia toughened alumina*), o carboneto de boro e o PCD (*polycrystalline diamond*). No campo da engenharia, os materiais frágeis são aqueles que não exibem (ou têm muito pouca) deformação plástica antes do processo de fissuração iniciar (Agressive Grinding Service, Inc., 2013). Quando um material frágil é trabalhado por um processo de rectificação, ele não apresenta deformação plástica à medida que o grão de diamante remove material. Da mesma forma, ele não conduz igualmente a um perfil de tensão residual, típico de um material dúctil. Em vez disso, o material vai quebrar, deixando microfissuras que irão permanecer como danos subsuperficiais (Figura 455). Podemos afirmar que um dos pontos fulcrais para a rectificação de materiais frágeis passa por minimizar as fissuras subsuperficiais, obedecendo aos parâmetros de rectificação que alcançarão as taxas desejadas de remoção de material, o acabamento dado à superfície e a precisão dimensional final.

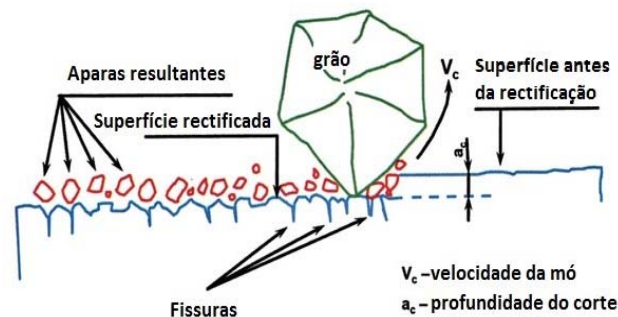


Figura 45 - Mecanismo de remoção de material (Agressive Grinding Service, Inc., 2013) (adapt.)

Em inúmeras abordagens aos processos de fabrico, e mesmo de uma forma um pouco generalizada, a rectificação não é enquadrada dentro do universo dos processos de corte por arranque de avara. Por outro lado, há conteúdos que englobam a rectificação num tipo muito particular de corte por arranque por avara. Contudo, e como referido um pouco atrás, o resultado sobranste da rectificação de materiais, dúcteis ou frágeis, são precisamente aparas. Acontece que a dimensão das aparas resultantes da rectificação de um material quebradiço, como o WC-Co,

é muito pequena. Isso é conseguido através da criação de microfissuras e da remoção subsequente das aparas pelos grãos consecutivos.

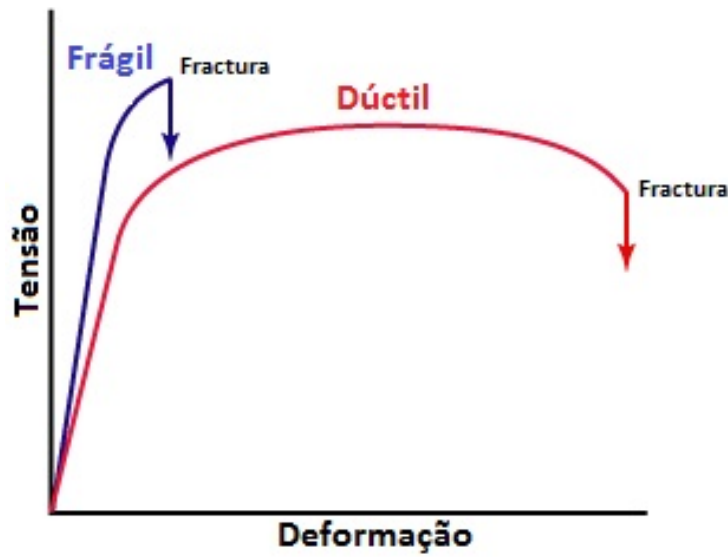


Figura 46 - Perfil típico de tensões-deformações de um material dúctil e de um material frágil

O perfil de distribuição de tensões na rectificação de um material dúctil não é aplicado ao material frágil rectificado, como o metal duro (Figura 46). Qualquer tensão de tração induzida pela expansão térmica restringida, derivada das altas temperaturas resultantes do contacto entre ferramenta e peça, resulta em microfissuração sob a superfície rectificada, sendo o seu perfil de deformação diferente (Figura 47).

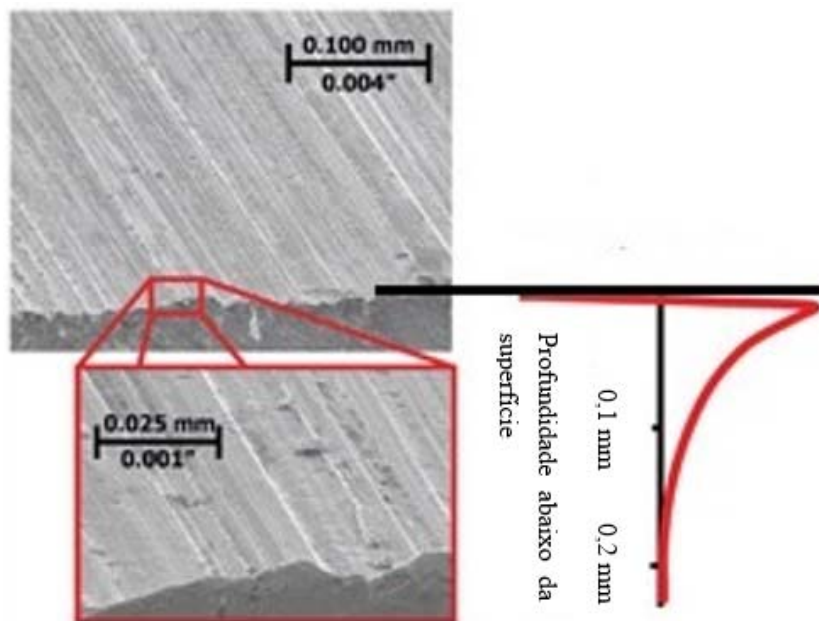


Figura 47 - Perfil de tensão-deformação de um material quebradiço no processo de rectificação (Agressive Grinding Service, Inc., 2013) (adapt.)

Na rectificação de superfícies com mós abrasivas temos de avaliar e ter em conta algumas considerações como a forma e o material dos grãos abrasivos, a sua dimensão e concentração, o tipo de ligação da mó, a profundidade de corte, a oscilação, o curso da mó na peça, o tipo de lubrificante. Desta maneira, é fundamental ponderar acertadamente todas as variáveis e fazer a escolha certa quando rectificamos materiais frágeis e quebradiços como o metal duro. Não é de todo incomum resultarem danos de diferentes magnitudes, alguns muito severos mesmo, tanto para a peça trabalhada como para a mó utilizada, ou mesmo para ambos, quando as escolhas não são idealizadas nem previstas da melhor forma. Uma questão que se levanta é que os danos provocados em materiais como o metal duro nem sempre são visíveis à vista desarmada. Muitas vezes, na fase de rectificação, criam-se microfissuras indetectáveis, e que são propagadas quando as peças são sujeitas a cargas e tensões durante o processo de prensagem. Daqui, resultam falhas prematuras nos processos operativos.

4.3.2 - PARÂMETROS DE CORTE

4.3.2.1 - AVANÇO POR VOLTA

Durante o tempo de rectificação da peça na máquina esta passa por diferentes estágios de maquinagem, sofrendo diferentes tipos de avanços da ferramenta até a peça trabalhada alcançar a medida desejada. Assim, e na grande maioria dos processos de rectificação utilizados na Palbit com o modelo IRD 400, existem três fases diferentes da remoção de material em excesso nas peças trabalhadas: o desbaste, o acabamento e o micro acabamento, ou acabamento fino.

No desbaste costumam ser utilizadas avanços na ordem dos 20 a 25 μm por volta da peça na bucha. Este ciclo é utilizado até obtermos uma aproximação de 100 μm (p. ex.) da medida desejada. O acabamento abrange avanços até 12 μm por volta até a medição se encontrar a 50 μm do desejado (tarefa realizada automaticamente pela máquina de rectificação). Já o micro acabamento tem alimentações na ordem dos 5 μm por volta até se obter a medida final. Os valores indicados são aproximadamente os utilizados na maioria das rectificações realizadas na Palbit, de acordo com taxas de produção médias.

Há que ter em atenção que o termo “avanço” utilizado na rectificação da IRD 400 é diferente do avanço na fresagem, por exemplo. Enquanto o avanço na rectificadora é estipulado em μm por rotação (volta) da peça ($\mu\text{m}/U$) e representa o que a ferramenta de corte penetra na peça a cada volta completa da bucha, por outro lado, na fresagem, nomeadamente na fresagem de precisão realizada pela iQ300, da Makino, a velocidade de avanço indica-nos a velocidade a

que a ferramenta se desloca ao longo do perímetro da peça (mm/min). Não esquecer que na fresagem a peça está estática, enquanto é a ferramenta que orbita em redor da mesma. No que respeita à influência que cada estágio tem no acabamento dado à superfície, vemos que apenas o ciclo de micro acabamento vai influenciar essa superfície, pois trabalha a jusante dos anteriores sendo estilo de rectificação que vai caracterizar a rugosidade obtida.

4.3.2.2 - OSCILAÇÃO

A oscilação de uma ferramenta de corte é a velocidade do movimento longitudinal, ao longo da direcção do eixo principal da peça, com que ela percorre a secção da mesma, em movimentos cíclicos, nos dois sentidos opostos. Na rectificação praticada durante os trabalhos realizados essa velocidade variou entre 100 mm/min a 400 mm/min, dependendo muito do tipo de peça que se está a processar. Peças muito delgadas exigem oscilações menores do que peças mais robustas. A oscilação é responsável ainda por contribuir para uma maior ou menor vibração no sistema. Peças rectificadas muito esbeltas, ferramentas (mós) frágeis ou com defeitos na zona de corte podem potenciar as vibrações existentes. *Spindles* com folgas no alinhamento são também responsáveis pela potenciação de marcas de vibrações.

4.3.2.3 - VELOCIDADE DE CORTE

A velocidade de corte designa a velocidade a que a ferramenta (ou a sua superfície de contacto) se desloca em relação à peça. Esta pode ser analisada em metros por segundo (m/s) ou em rotações por minuto (rpm). As expressões seguintes são equivalentes e relacionam as variáveis, apresentando-as em função da velocidade de corte em m/s e rpm, respectivamente:

$$v = \frac{n\pi d}{60} \quad \text{ou} \quad n = \frac{60v}{\pi d}$$

- v: velocidade de corte (m/s)
- n: velocidade de rotação (rpm)
- d: diâmetro da mó (m)

Ao analisarmos duas mós com diâmetros diferentes, uma com 100 mm e outra com 25 mm, concluímos rapidamente que para uma mesma velocidade de rotação, de 10.000 rpm, p. ex., vamos ter diferentes velocidades de corte, em m/s. Assim, teremos uma velocidade de 52 m/s, para a mó de 100 mm, e de 13 m/s, para a mó de 25 mm de diâmetro.

Durante os ensaios e processos de maquinagem na IRD 400, as velocidades variaram entre:

- Mó de 100 mm: 10 m/s (2.000 rpm) e 36 m/s (6.000 rpm)
- Mó de 25 mm: 13 m/s (10.000 rpm) e 98 m/s (75.000 rpm)

4.3.2.4 - VELOCIDADE DE ROTAÇÃO

A velocidade de rotação da peça maquinada foi um parâmetro igualmente analisado na obtenção da rugosidade superficial. Durante a maioria das maquinagens executadas os punções rectificadores variaram a sua rotação em função do regime de rectificação utilizado. Sendo assim, no caso das rectificações de desbaste adoptou-se uma rotação na bucha de 6 rpm, enquanto os regimes posteriores de acabamento e acabamento fino a bucha tinha velocidades na ordem de 4 e 3 rpm, respectivamente. Importa referir que, somente o acabamento fino, o último regime, portanto, vai traduzir a rugosidade obtida. As velocidades adoptadas e analisadas deste regime variaram entre a 1 e 6 rpm da peça.

4.3.2.5 - OUTROS FACTORES

Durante os ensaios realizados os parâmetros anteriores foram analisados de forma detalhada, no entanto foi dado foco à variação dos parâmetros e da resposta do processo de rectificação ao acabamento das peças trabalhadas. Sabemos que existem alguns factores que, não entrando directamente na análise, foram igualmente responsáveis pela variação de rugosidade. Muitas vezes, esta variação não foi linear ou correlacionada com parâmetros bem definidos. Assim, evidenciou-se que o percurso executado pela mó na peça durante a oscilação influenciou o padrão de corte da ferramenta na superfície rectificadora, e a sua rugosidade respectiva (Figura 48).

Por outro lado, o estado da mó é um factor que influenciou igualmente a qualidade do acabamento, tendo-se verificado que as superfícies trabalhadas com uma mó rectificada apresentam acabamentos superiores. Com o passar do tempo, a mó desgasta-se e tende a adoptar perfis variados que influenciam o corte linear na peça. Da mesma forma os grãos começam a ficar danificados e deixam de ter o poder abrasivo inicial. Isto leva a que o sistema de corte entre em vibração, derivado das excentricidades provocadas pelos defeitos da mó, e transmita essas vibrações à superfície da peça através de ondulações visíveis naturalmente. Daí, a importância da ferramenta utilizada ser rectificada regularmente.

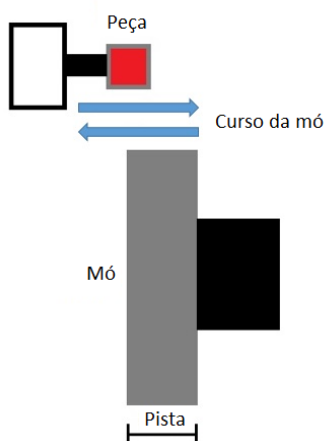


Figura 48 - Curso da mó na peça

5 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS

5.1 - INTRODUÇÃO

No seguimento das funções desempenhadas na Palbit, foram realizados vários processos de rectificação para avaliar o nível de acabamento nos punções maquinados. Como analisado anteriormente, o acabamento das superfícies do corpo dos punções tem influência directa no desempenho das prensas e no tempo de vida das ferramentas utilizadas. Os movimentos cíclicos da passagem dos punções no interior da matriz criam desgaste ao longo do tempo, desgaste esse que é tanto mais acentuado quanto maior for o atrito entre as superfícies. Este atrito é influenciado, entre outros factores, pelo pó que se concentra nas paredes dos punções e da matriz e que cria dificuldade ao movimento relativos das peças. Interessa, desta maneira, reduzir a quantidade de pó acumulado, reduzindo, para isso, a rugosidade média das superfícies ao mínimo, levando a qualidade do acabamento para níveis superiores.

Os diversos ensaios levados a cabo passaram por rectificar múltiplas superfícies de punções, tanto inferiores, como superiores, fazendo variar alguns parâmetros de corte e registando a rugosidade obtida após o fim do processo. A maioria dos ensaios foram executados durante o turno de trabalho e os registos e análises realizados na sequência das peças concluídas. Além da variação dos parâmetros de corte, tais como a velocidade de rotação da mó, a oscilação da ferramenta e a alimentação (*feed*), foram analisados outros factores que poderiam, ou não, influenciar o acabamento das superfícies. Foram avaliadas igualmente rugosidades em função do tipo de grão da mó, o facto de trabalharmos com uma mó nova ou uma já perto do seu fim de vida, por exemplo.

5.2 - ANÁLISE PRÉVIA DAS VARIÁVEIS NO ACABAMENTO DE SUPERFÍCIES

Além dos parâmetros de rugosidade obtidos através da medição com rugosímetro, uma análise visual no acabamento dado pelos dois tipos de mó permite fazer uma distinção rápida e

imediate. O brilho obtido pela mó com grão D15 é muito superior ao da mó D46, aproximando-se do acabamento tipo espelhado, comum na fresagem com a Makino iQ300 (Figura 49).

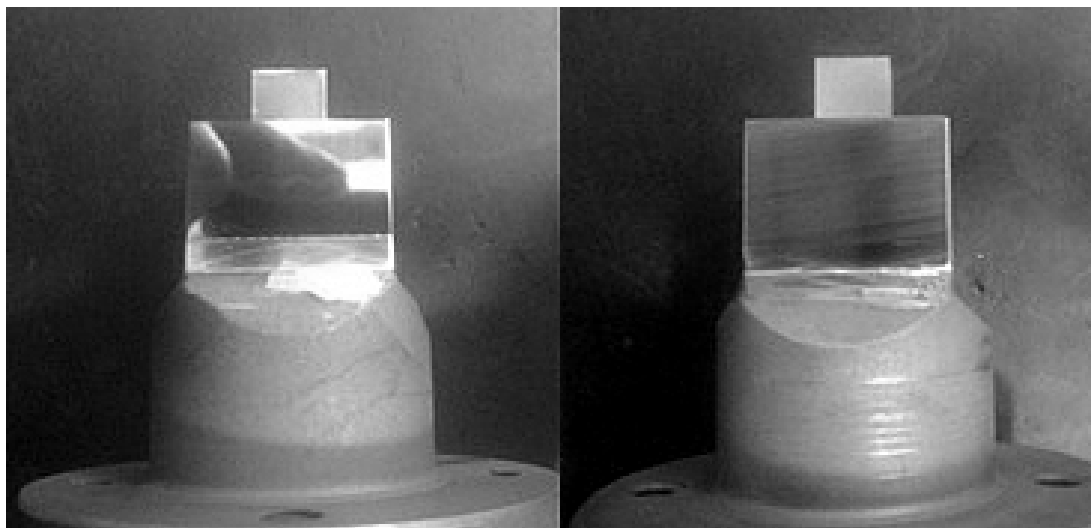


Figura 49 - Brilhos obtidos por uma mó D15 (esq.), com Ra de 0,088 μm ; e uma mó D46 (dir). com Ra de 0,120 μm

Contudo, e apesar da diferença no acabamento obtido ser visualmente superior com a mó de 25 mm (D15), no que respeita às rugosidades obtidas o ganho já não é tão evidente. Mesmo assim, a diminuição da rugosidade da superfície foi um facto (menos 26 %). A variação da orientação das estrias de rectificação é mais evidente numas superfícies do que noutras. Isto deve-se essencialmente à geometria das peças acabadas e traduz-se na menor ou maior dificuldade em fazer as medições da rugosidade adequadas. Dessa dificuldade resulta uma obtenção de resultados que pode variar muito e torna-se difícil assumir uma rugosidade padronizada de cada geometria.

Um dos ensaios realizados consistiu em obter na mesma superfície de um punção dois acabamentos diferentes realizados com mós diferentes. Para isso, rectificou-se uma superfície com a mó mais grosseira, de grão D46, e no ciclo seguinte utilizou-se a mó mais fina e de grão D15. Na Figura 5050 apresentam-se os dois acabamentos com recurso ao microscópio, sendo possível verificar que para obter o efeito desejado foram realizadas aproximações muito suaves e sucessivas da mó mais fina – na ordem dos 2 μm – com variações de rotação da peça de alguns segundos, de modo a obter uma parte de uma face com um acabamento e a outra parte com outro.

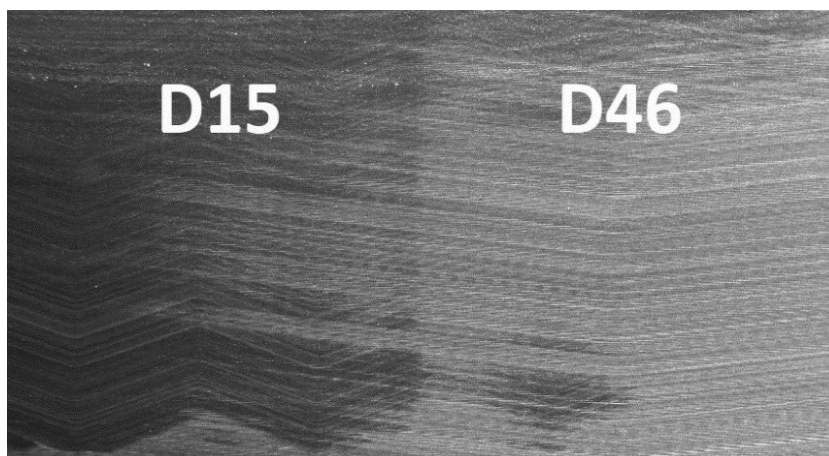


Figura 50 - Dois acabamentos diferentes na mesma face (vista de microscópio 48x)

Os ensaios foram realizados na sua totalidade com a mó D46 e a mó D15. No entanto, a título pontual e experimental, foi realizado um ensaio com a mó de 4 mm, normalmente utilizada para rectificação de furos. O processo/ciclo de rectificação foi adaptado para a execução de uma periferia e configurado para uma mó de 4 mm de diâmetro. Após a execução do *setup* adequado, foi iniciado o ciclo. A mó utilizada era constituída por grão D126 e o resultado obtido foi visivelmente grosseiro, com sulcos bem vincados (Figura 51).

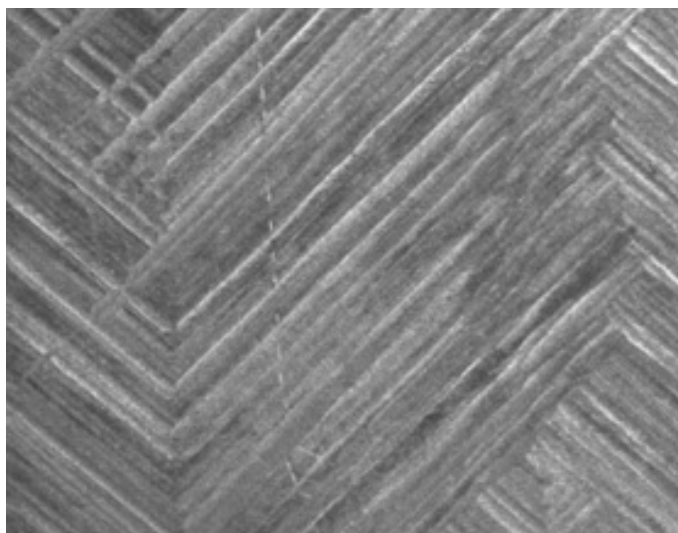


Figura 51 - Orientação de estrias com acabamento de mó de 4 mm e D126 (vista de microscópio 64x)

Este ensaio teve uma velocidade de corte de 70.000 rpm (15 m/s) e a bucha uma velocidade de 4 min⁻¹. Se executássemos a rectificação de um furo com a programação normal para a mó utilizada, teríamos a bucha a rodar a uma velocidade de 600 min⁻¹ (neste processo, a ferramenta

desloca-se em profundidade apenas o necessário para cumprir o avanço desejado, e não para cumprir a geometria periférica), tendo-se obtido rugosidades R_a na ordem dos $0,9 \mu\text{m}$.

Durante alguns procedimentos de rectificação, por vezes, constatou-se que o acabamento dos punções apresentava algumas marcas transversais nas faces (Figura 522). Este tipo de marcas, ou sulcos, derivam da vibração no sistema e podem acontecer por várias razões:

- Oscilação elevada da ferramenta;
- Esbelteza elevada da peça;
- Deficiência na actuação do *spindle*;
- Velocidade da bucha desadequada.

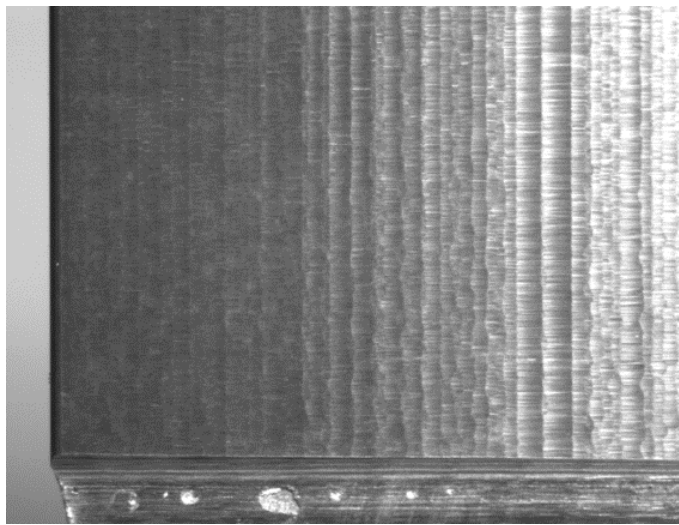


Figura 52 - Marcas na peça derivadas da vibração do sistema (vista de microscópio 28x)

5.3 - RESULTADOS OBTIDOS

Dos inúmeros ensaios e medições realizados durante o decorrer do estágio este foram organizados em tabelas de dados de entradas simples. Para cada ensaio foram registadas dez medições da rugosidade, em áreas diferentes da superfície rectificada – respeitando sempre a perpendicularidade entre o sentido das estrias o apalpador do rugosímetro. Das medições obtidas, foram excluídos os valores extremos e realizada a média dos restantes valores. Esses dados, representados pela média dos resultados de cada ensaio, foram traduzidos em gráficos de linhas. Embora a construção gráfica tenha sido feita apenas com recurso a pontos,

marcadores, estes foram ligados por segmentos de rectas. Desta forma, a leitura da evolução dos resultados torna-se mais fácil e interpretativa.

Como referido anteriormente, a estrutura da análise dos dados passou por estudar a variação da rugosidade de uma superfície maquinada através da variação de um conjunto de parâmetros. Para cada ensaio realizado, os parâmetros avaliados mantinham-se fixos, à excepção de um, que ia variando. Foi possível, desta forma, perceber a influência directa de determinado parâmetro na evolução da rugosidade média. Os gráficos que de seguida se vão apresentar foram elaborados contendo a variação de um dos parâmetros no eixo das variáveis independente (eixo das abcissas), a rugosidade obtida no eixo das variáveis dependentes (eixo das ordenadas) e os restantes parâmetros (os fixos) encontram-se definidos no topo do gráfico.

Relativamente aos ensaios realizados, a maior parte das rugosidades obtidas foram obtidas na rectificação com a mó de grão D46 e diâmetro 100 mm (Figura 533). Isto prendeu-se por esta ser a mó mais amplamente utilizada nos processos de rectificação com a IRD 400. No entanto também foram realizados ensaios com uma mó de grão D15 e diâmetro 25 mm.

Para ambos os ensaios, os valores utilizados nos parâmetros variáveis estenderam-se entre limites sensatos e relativamente eficientes. Desta forma, os estudos poderão abranger um gama de variáveis e valores perfeitamente enquadrados dentro de uma rotina de trabalho.

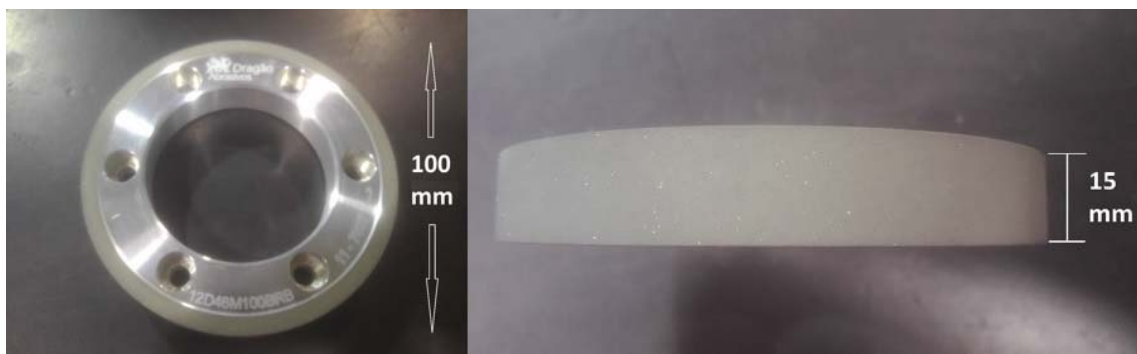


Figura 53 - Mó utilizada na maioria dos processos de rectificação (D46)

Os primeiros gráficos (Figura 544 a Figura 566) abordam a variação da oscilação da ferramenta em função de várias taxas de alimentação (o avanço da ferramenta contra a superfície a rectificar). As taxas foram de 2, 4 e 6 $\mu\text{m}/\text{Ue}$ a oscilação de 150, 200, 250 e 300 mm/min.

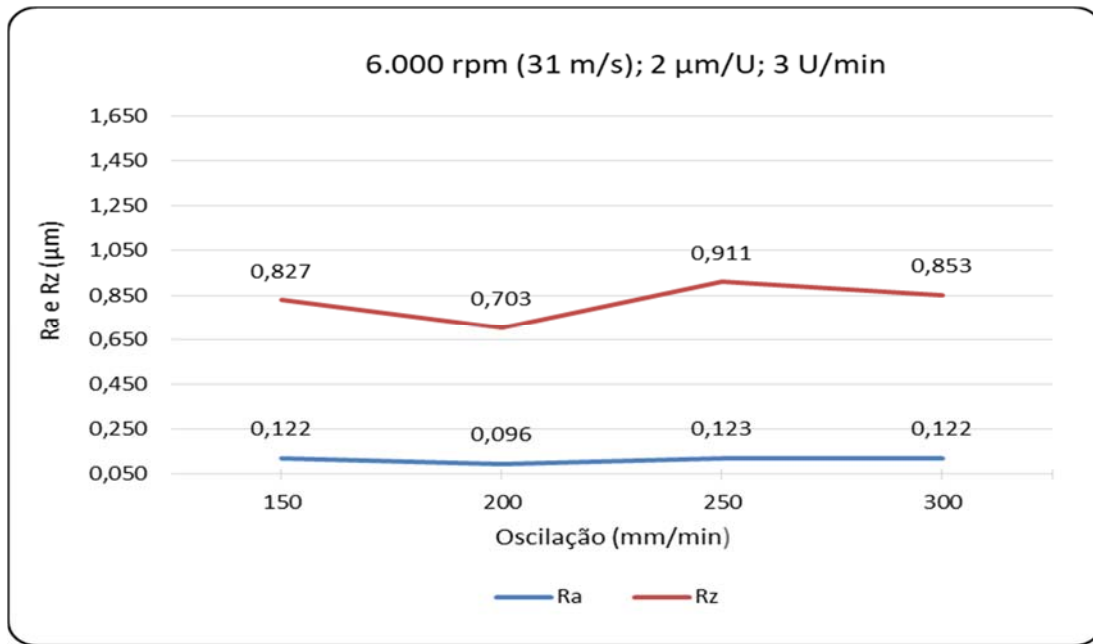


Figura 54 - Valores de Ra e Rz, variando a oscilação, para uma rotação de 6.000 rpm (31 m/s), um avanço de 2 μm/U e uma velocidade de rotação da peça de 3 min⁻¹

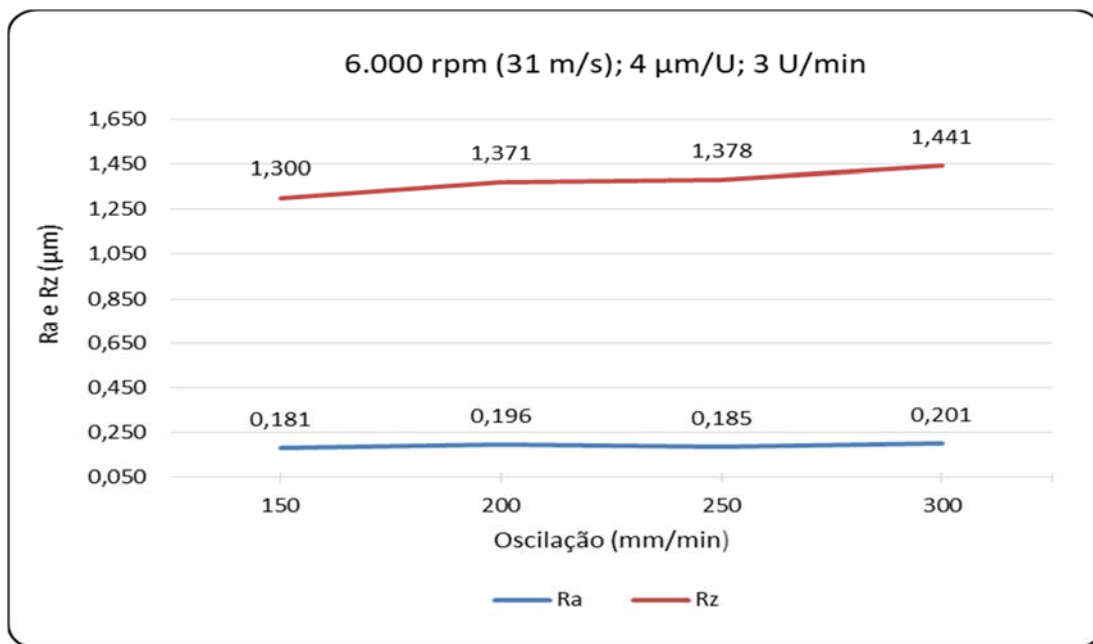


Figura 55 - Valores de Ra e Rz, variando a oscilação, para uma rotação de 6.000 rpm (31 m/s), um avanço de 4 μm/U e uma velocidade de rotação da peça de 3 min⁻¹

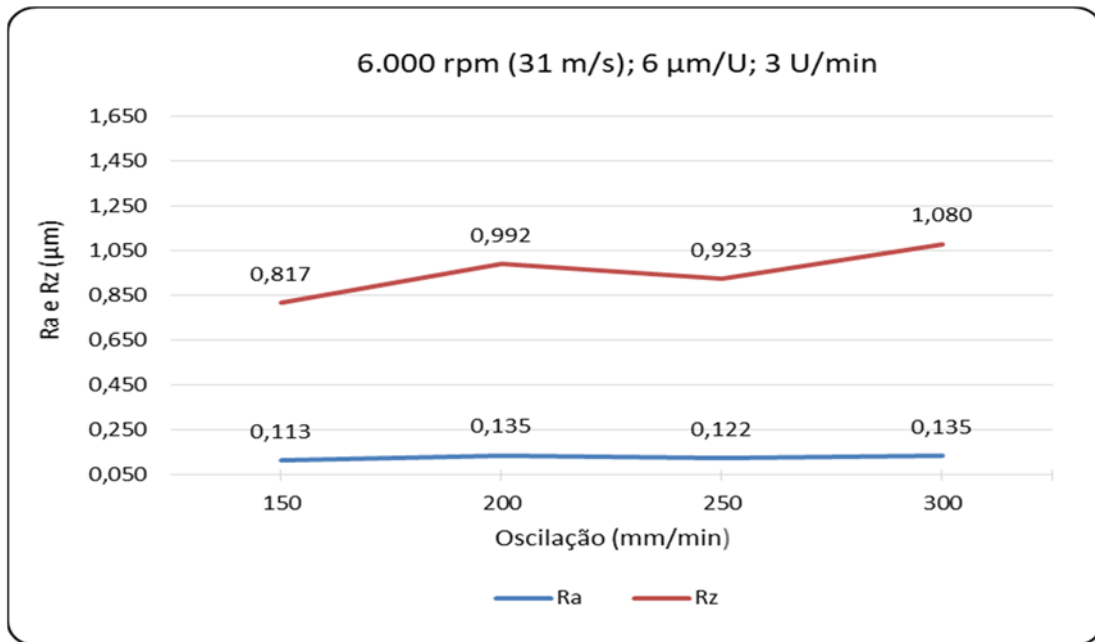


Figura 56 - Valores de Ra e Rz, variando a oscilação, para uma rotação de 6.000 rpm (31 m/s), um avanço de 6 $\mu\text{m}/\text{U}$ e uma velocidade de rotação da peça de 3 min^{-1}

Após a variação do avanço, em $\mu\text{m}/\text{U}$, fez-se variar a velocidade de corte com rotações de 5.000, 4.000, 3.000 e 2.000 rpm (nomeadamente 26, 21, 16 e 10 m/s, respectivamente), sendo que a oscilação continuou a ser o parâmetro que variou. Os valores obtidos de Ra e Rz para as referidas condições de análise são apresentados na Figura 577, Figura 5858, Figura 5959 e Figura 600.

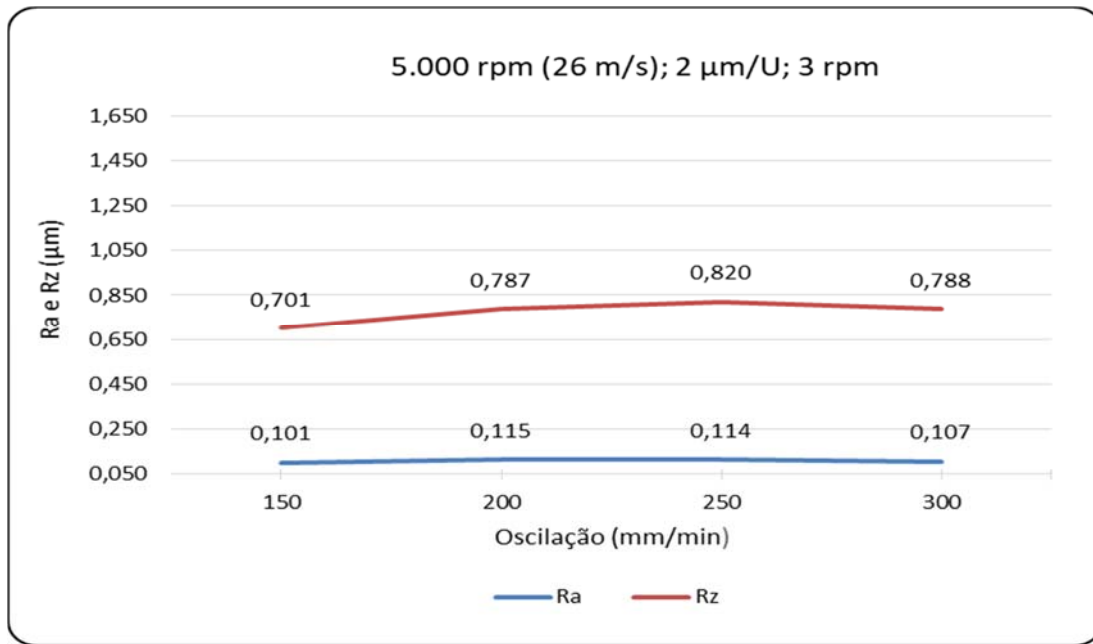


Figura 57 - Valores de Ra e Rz, variando a oscilação, para uma rotação de 5.000 rpm (26 m/s), um avanço de 2 μm/U e uma velocidade de rotação da peça de 3 min⁻¹

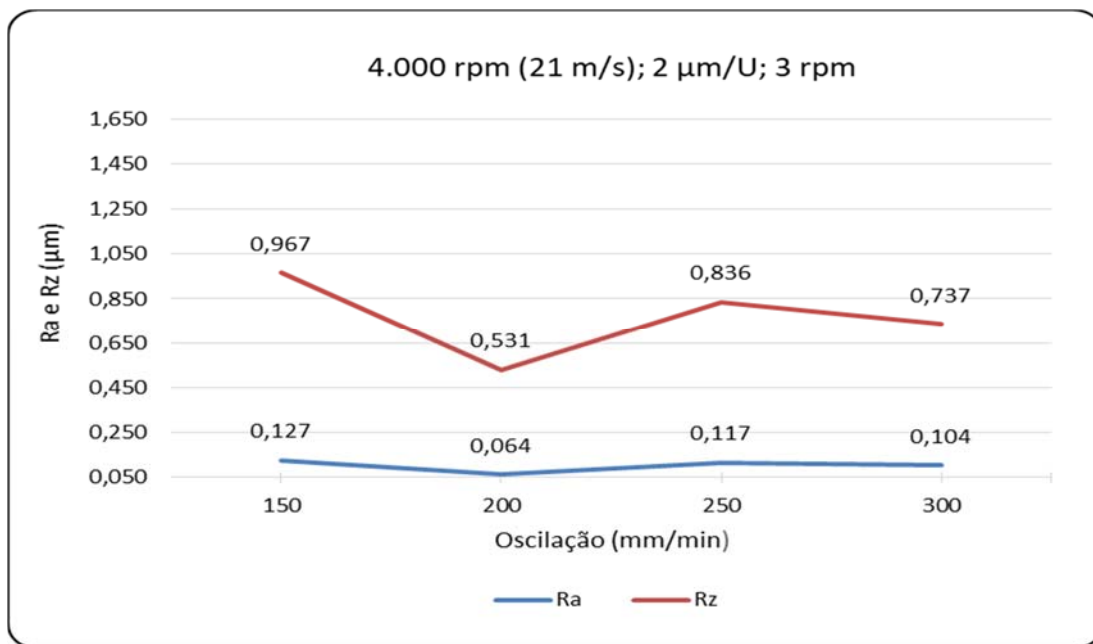


Figura 58 - Valores de Ra e Rz, variando a oscilação, para uma rotação de 4.000 rpm (21 m/s), um avanço de 2 μm/U e uma velocidade de rotação da peça de 3 min⁻¹

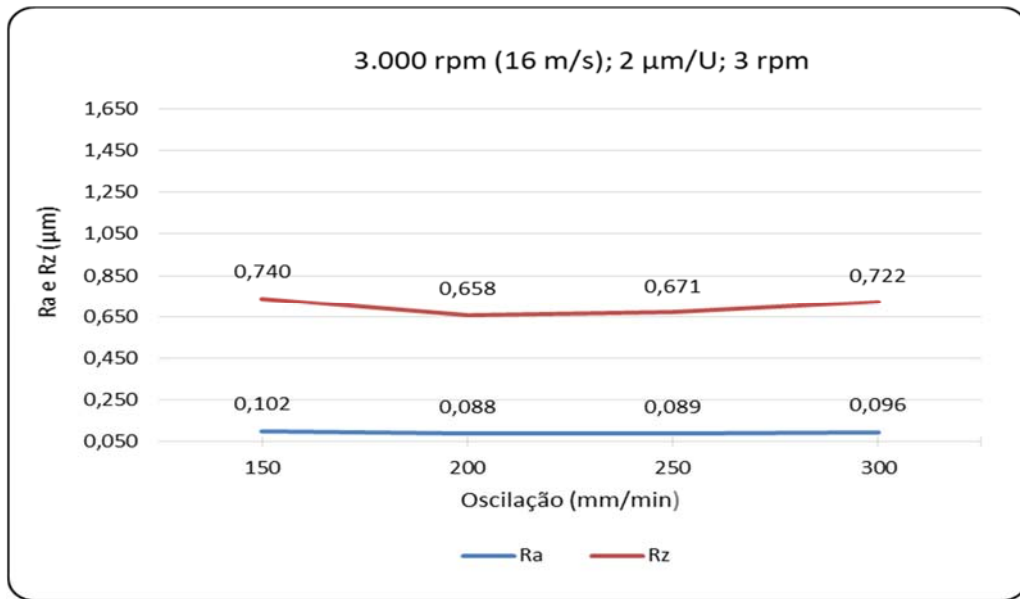


Figura 59 - Valores de Ra e Rz, variando a oscilação, para uma rotação de 3.000 rpm (16 m/s), um avanço de 2 $\mu\text{m}/\text{U}$ e uma velocidade de rotação da peça de 3 min^{-1}

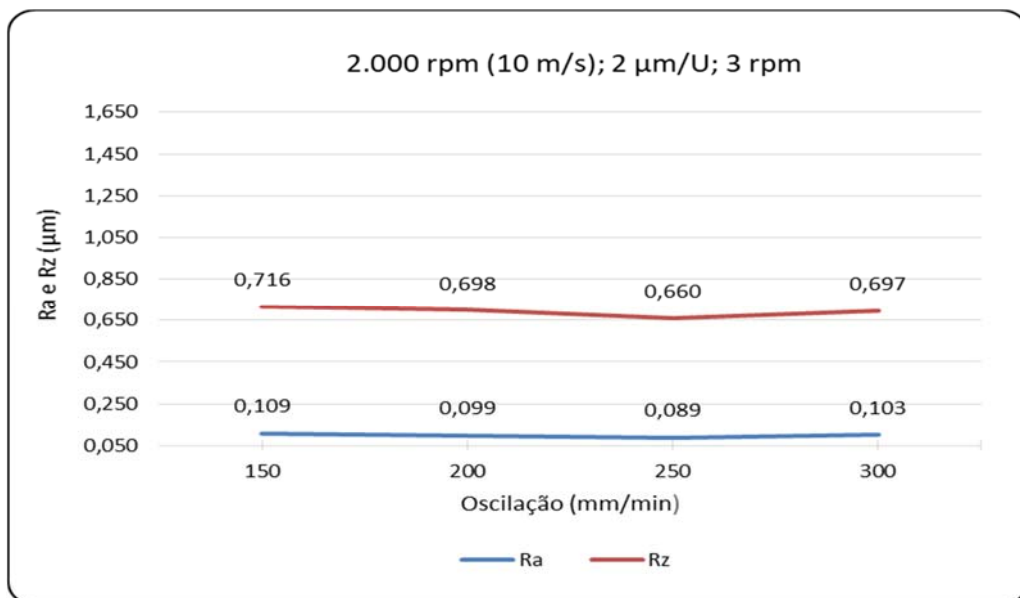


Figura 60 - Valores de Ra e Rz, variando a oscilação, para uma rotação de 2.000 rpm (16 m/s), um avanço de 2 $\mu\text{m}/\text{U}$ e uma velocidade de rotação da peça de 3 min^{-1}

Analisando as figuras anteriores verifica-se que não existe uma grande influência nos valores da rugosidade em função do aumento da oscilação, nas condições analisadas, ressalvam-se, no entanto, os valores obtidos no ensaio para uma velocidade de corte de 4.000 rpm, onde os valores de Rz apresentam um comportamento ligeiramente diferente dos anteriores. Nos ensaios

seguintes e com oscilações de 150, 200, 250 e 300 mm/min, fez-se variar a velocidade de rotação da ferramenta, de 2.000 a 6.000 rpm e procedeu-se à determinação dos valores de Ra e Rz. Relativamente a estes ensaios, tanto a taxa de alimentação como a velocidade de rotação da peça mantiveram-se constantes. Os valores obtidos são apresentados na Figura 611, Figura 622, Figura 633 e Figura 644, respectivamente.

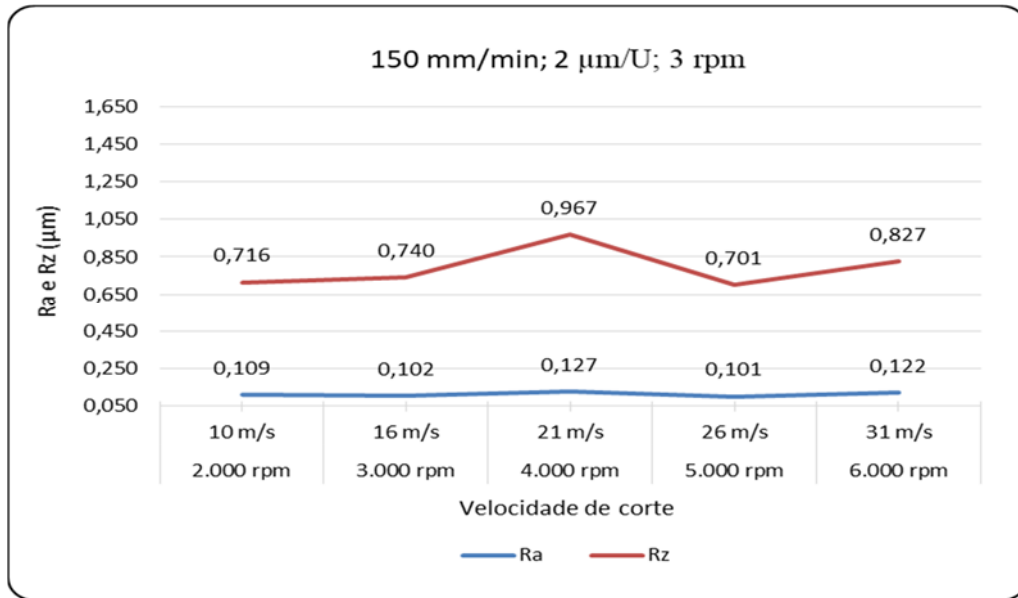


Figura 61 - Valores de Ra e Rz, variando a rotação, para uma oscilação de 150 mm/min, um avanço de 2 μm/U e uma velocidade de rotação da peça de 3 min⁻¹

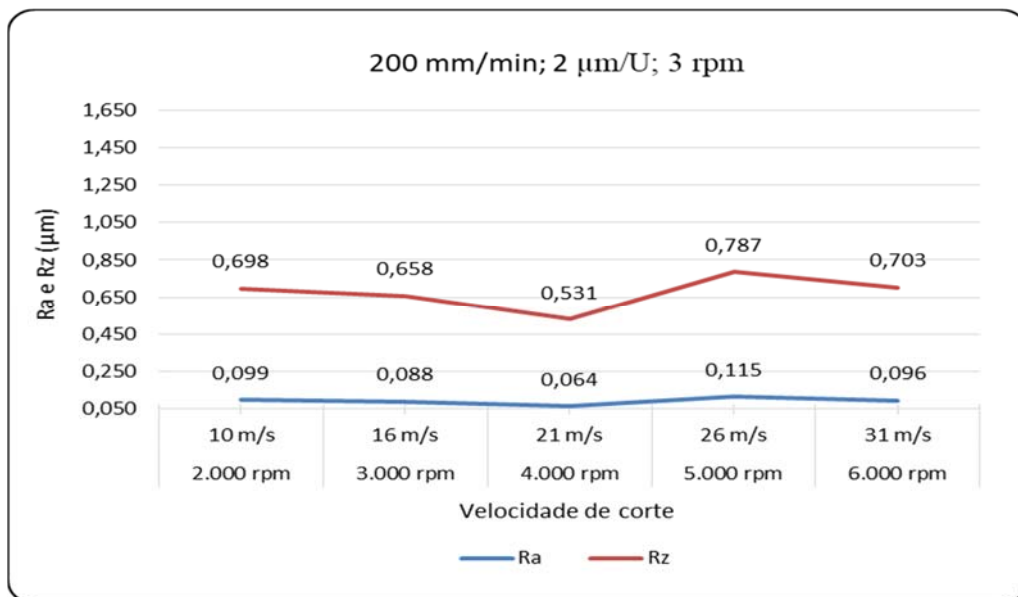


Figura 62 - Valores de Ra e RzRa e Rz, variando a rotação, para uma oscilação de 200 mm/min, um avanço de 2 μm/U e uma velocidade de rotação da peça de 3 min⁻¹

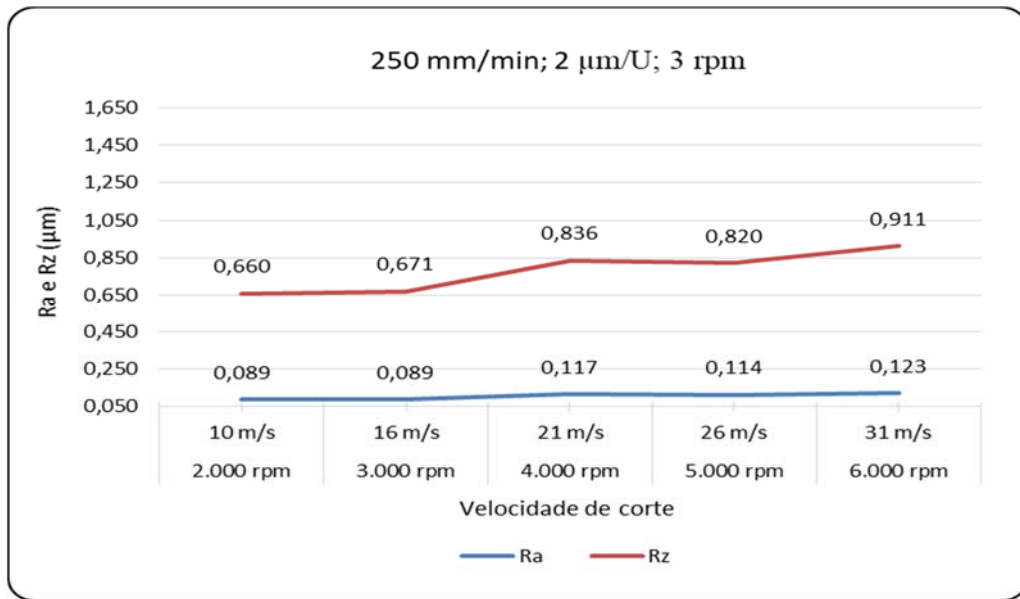


Figura 63 - Valores de Ra e Rz, variando a rotação, para uma oscilação de 250 mm/min, um avanço de 2 $\mu\text{m}/\text{U}$ e uma velocidade de rotação da peça de 3 min^{-1}

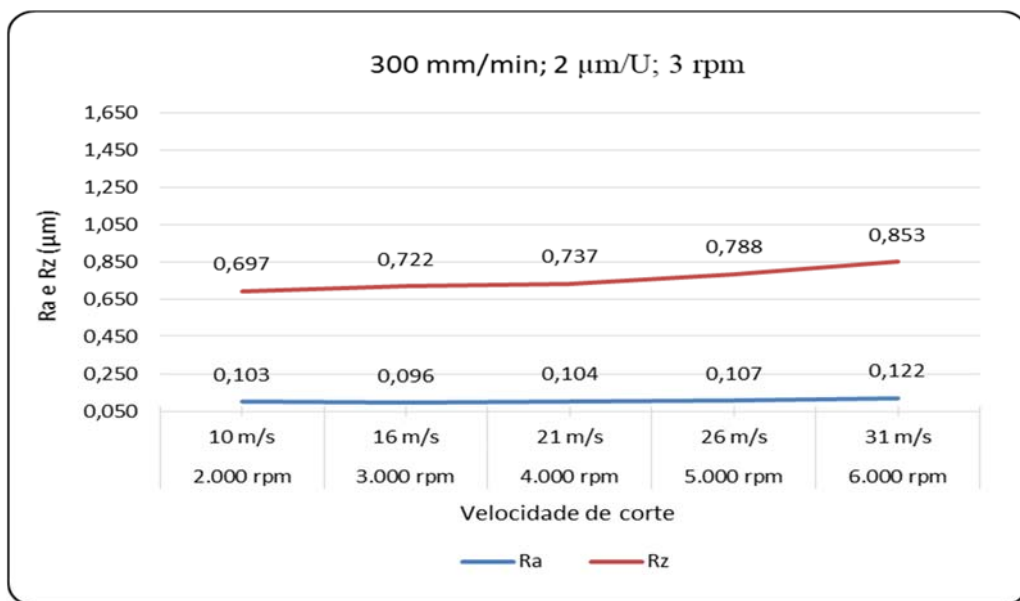


Figura 64 - Valores de Ra e Rz, variando a rotação, para uma oscilação de 300 mm/min, um avanço de 2 $\mu\text{m}/\text{U}$ e uma velocidade de rotação da peça de 3 min^{-1}

Analisando as figuras anteriores verifica-se que não existe uma grande influência nos valores da rugosidade em função do aumento da rotação da mó, nas condições analisadas, apesar de o valor da rugosidade ir aumentando como aumento da velocidade de corte. Por último, para avaliar qual a influência que a rotação da peça teria nos valores da rugosidade Ra e Rz, procedeu-se à variação da rotação da peça, desde 1 rpm a 6 rpm, mantendo-se os restantes

parâmetros constantes. Na Figura 65 apresenta-se a evolução que ocorreu nos valores de Ra e Rz aquando da variação a rotação da peça.

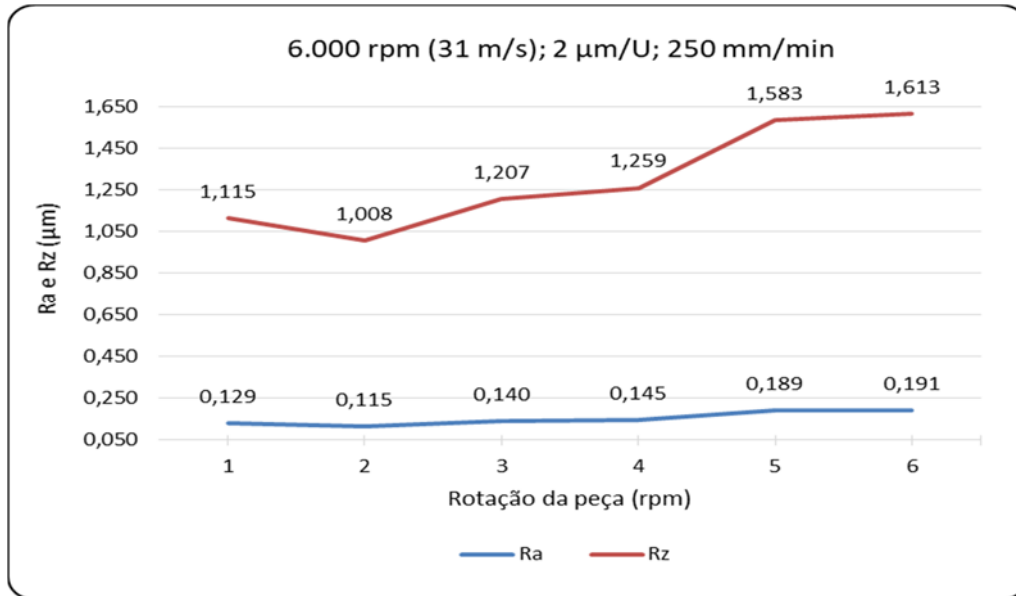


Figura 65 – Valores de Ra e Rz, variando a rotação da peça, para uma velocidade de corte de 6.000 rpm (31 m/s), um avanço de 2 μm/U e uma oscilação de 250 mm/min.

Analisando a Figura 65 verificamos que o valor de Ra varia ligeiramente com o aumento da velocidade de rotação da peça, sendo acompanhado pelo valor de Rz, que aumenta igualmente.

Por fim, fizeram-se alguns ensaios com uma mó de grão D15, de diâmetro 25 mm, fazendo variar a velocidade de corte e mantendo os restantes parâmetros constantes (oscilação de 250 mm/min, avanço de 2 μm/U e rotação da peça de 3 rpm). As velocidades de rotação conseguidas com a mó de 25 mm foram muito superiores aos ensaios anteriores, variando esta entre as 10.000 e as 75.000 rpm (entre os 13 m/s e os 100 m/s, respectivamente). Esta mó é utilizada apenas para dar a última rectificação, com material em excesso na ordem dos 20 a 50 μm., sendo uma ferramenta de desgaste muito rápida (Figura 666).

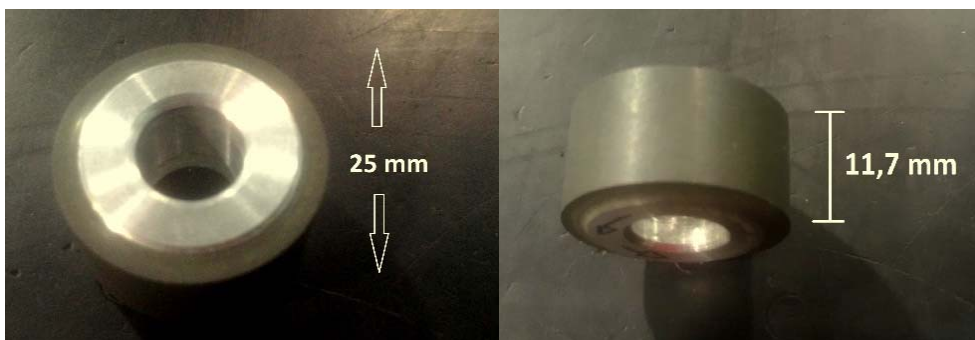


Figura 66 - Mó fina de grão D15 (diâmetro de 25 mm).

Na Figura 67 apresenta-se a evolução dos valores de Ra e Rz, que se obtiveram para a mó de grão D15 e diâmetro de 25 mm, relativamente aos parâmetros referidos anteriormente.

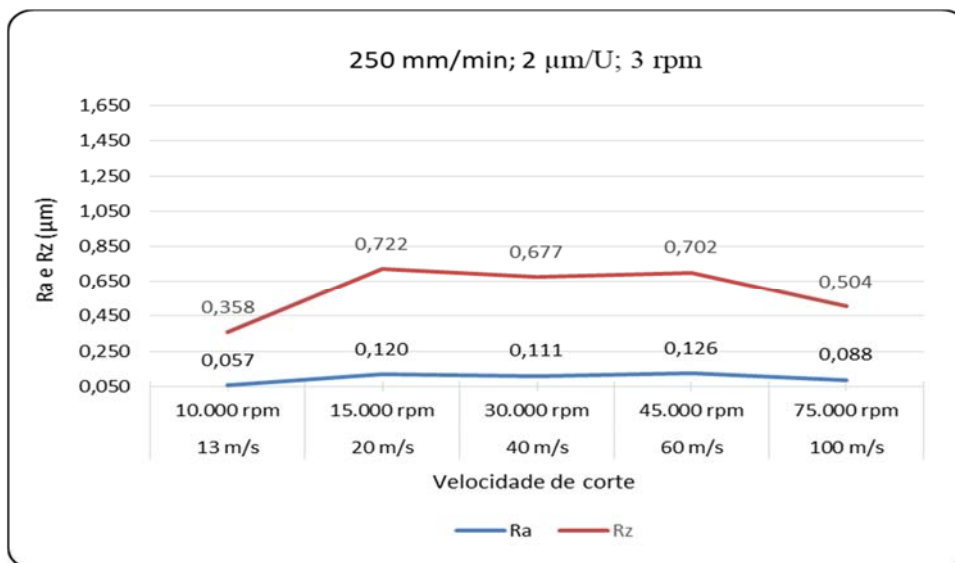


Figura 67 – Valores de Ra e Rz, variando a rotação, para uma oscilação de 250 mm/min, um avanço de 2 µm/U e uma rotação da peça de 3 min⁻¹

Analisando os valores anteriores verifica-se que tanto o valor de Ra e Rz tende a aumentar com o aumento da velocidade de corte até um valor máximo e depois tende a diminuir de forma abrupta. A título comparativo, e porque ao longo do estágio, foram realizadas paralelamente várias medições de rugosidade em superfícies acabadas por diferentes processos e por diferentes máquinas. Na Figura 68 apresentam-se essas medições que percorrem vários acabamentos, do mais fino e mais bem acabado, até ao mais grosseiro e de acordo com o processo produtivo.

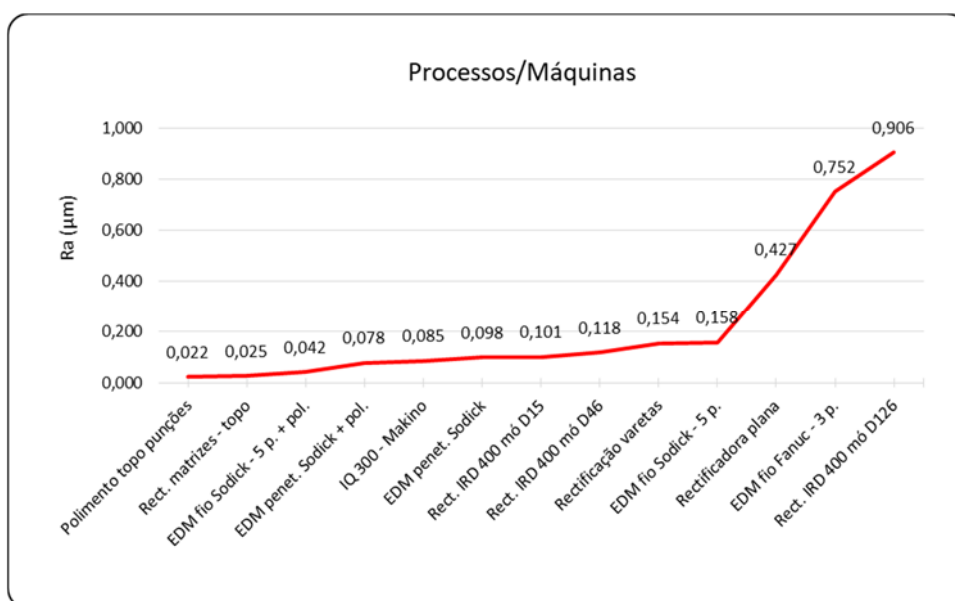


Figura 68 - Evolução da rugosidade Ra para diferentes processos e tecnologias de fabrico.

6 - CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Após a realização dos diferentes ensaios, no domínio dos variados parâmetros e factores, é possível assumir a influência de cada uma destas variáveis no resultado final, ou seja o acabamento superficial das peças concluídas.

- Existe uma relação directa entre a velocidade de corte da ferramenta, a sua oscilação e taxa de alimentação e o acabamento conseguido nas superfícies dos punções. Contudo, o facto de as marcas de rectificação deixadas pela mó terem orientações cruzadas, tornou os resultados da medição da sua rugosidade um pouco mais aleatórios. Foi comum encontrar R_a de 0,130 μm e 0,090 μm na mesma superfície, consequência da dificuldade de colocar a ponteira alinhada devidamente e de forma ortogonal com as estrias da superfície. Os melhoramentos conseguidos foram efectivos mas não de uma forma constante e vincada. Obtiveram-se melhores resultados com oscilações na ordem dos 200 mm/min, avanço de 2 $\mu\text{m}/U$ e rotação da mó de 5.000 rpm, ou 26 m/s, aproximadamente.
- A geometria das peças trabalhadas teve uma influência acentuada na rugosidade e varia muito de acordo com o percurso que a mó faz nessa mesma superfície. O circuito percorrido ao longo da peça pela ferramenta e a sua localização aquando da revolução do punção origina o maior ou menor cruzamento de estrias, marcas de corte. Daqui resulta que estrias mais vincadas têm valores muito diferentes de R_a , caso meçamos no sentido das estrias ou em sentido perpendicular. Se o padrão for claramente cruzado, então obtemos valores de R_a mais coerentes e menos díspares, e normalmente mais baixos.
- Na rectificação plana facial, realizada para o topo das matrizes e executada nouro dispositivo, a padrão de corte é radial e aqui, independentemente da orientação da medição da rugosidade média, os valores variam muito pouco, na ordem de 0,005 μm . Já na rectificação plana periférica, onde o sentido do corte está bem acentuado, é possível definir muito bem o alinhamento da ponteira do rugosímetro em função das linhas de corte.
- Por outro lado, o maior ou menor curso da mó na peça revelou-se um parâmetro vincado para a variação do acabamento superficial, na medida que é responsável pelas linhas de corte na peça. A geometria da mesma acaba por ter uma influência

igualmente importante pois também define o padrão de corte, assim bem como a oscilação.

- O impacto mais significativo na alteração do acabamento conseguido deu-se quando o grão da mó passou de um D46, na mó de 100 mm, para um D15, com a mó de 25 mm. Existiram melhorias significativas no acabamento, principalmente no aspecto visual, tornando as superfícies mais brilhantes e espelhadas.
- Um dos factores mais importantes a ter em conta é que tem de haver um equilíbrio entre o tempo de maquinagem e os resultados obtidos e desejados. Não é exequível, do ponto de vista económico, ter acabamentos superiores de tal forma que a peça demore duas vezes mais de tempo a ser concluída – com taxas de alimentação baixas ou oscilações muito reduzidas, por exemplo. Desta forma, foram recolhidos resultados entre uma gama de variações aceitáveis.
- Seria possível uma fiabilidade maior na obtenção dos resultados se, por exemplo, a forma e geometria dos punções maquinados fosse sempre a mesma. Ora, tal não foi possível, nem tão pouco enquadrado, pois as maquinagens foram sendo realizadas e analisadas atendendo às solicitações das ordens de fabrico da empresa e dentro das minhas obrigações profissionais.

Seria interessante alguns trabalhos futuros passarem pelo estudo do acabamento em superfícies de metal duro em função da variação do grau do metal duro. Outra ordem de estudo poderia passar pela análise da rugosidade superficial variando amplamente o tamanho e concentração do grão das mós utilizadas - este relatório baseou-se em acabamentos derivados do grão D46 e D15. Poderiam ser englobados tamanhos de grão intermédios ou mesmo superiores a D46. O tamanho D15 encontra-se actualmente entre os tamanhos mais finos que existem no mercado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Action Superabrasive, 2016. *Resin Bond Diamond vs. Resin Bond CBN Grinding Wheels*. [Online] Available at: <https://www.actionsuper.com/>

Aggressive Grinding Service, Inc., 2013. *Grinding brittle materials*. [Online] Available at: <http://www.aggressivegrinding.com/>

Canadian Metal Working, 2017. *Canadian Metal Working*. [Online] Available at: <http://www.canadianmetalworking.com/>

Dandong Fuding Engineering Machinery, 2007. *Machining surface finish chart, comparator, method, degree, Ra, Rz, RMS*. [Online] Available at: <http://www.iron-foundry.com/>

Danobat-Overbeck, 2016. [Online] Available at: <http://www.danobatoverbeck.de>

Davim, J. P., 2008. *Princípios da maquinagem*. s.l.:Publindústria.

Davim, J. P., 2011. *Machining of hard materials*. Aveiro: Springer.

Direct Industry, 2017. *Direct Industry*. [Online] Available at: <http://www.directindustry.com/>

ebah, 2013. *Rugosidade*. [Online] Available at: <http://www.ebah.com.br/>

Education Discussion, 2017. *Grain Size, Grade and Structure of Grinding Wheel*. [Online] Available at: <https://www.educationdiscussion.com/>

Engineersedge, 2017. *Engineersedge*. [Online] Available at: <https://www.engineersedge.com/>

Erowa, 2017. [Online] Available at: <http://www.erowa.com/de/startseite.html>

Faria, I. M. A. M. d., 2007. *Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica*. Instituto Superior Técnico: s.n.

FB Techno, 2015. *Hard Metal - Tungsten Carbide*. [Online] Available at: <http://www.fb-tecno.com/>

FEPA - Federation of European Producers of Abrasives, 2017. *Abrasive grains*. [Online] Available at: <https://www.fepa-abrasives.com/>

- Filho, A. P., 2011. *Rugosidade superficial*. Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, s.n.
- Gear Technology, 2015. *Surface Roughness Measurements of Cylindrical Gears and Bevel Gears on Gear Inspection Machines*. [Online] Available at: <https://www.geartechnology.com/>
- Georgia Grinding Wheel, 2008. *Grinding wheel and abrasive basics*. [Online] Available at: <https://www.georgiagrindingwheel.com/>
- ISEC - DEC, 2016. *Apontamentos das aulas teórico-práticas*. s.l.:s.n.
- ISO 4288:1996, 1996. s.l.:s.n.
- Jackson, M. J., 2011. Grinding and finishing processes. Em: *Modern machining technology*. USA: s.n.
- Lacalle, L. L. d., Lamikiz, A., Fernández de Larrinoa, J. & Azko, I., 2011. Advanced cutting tools. Em: *Machining of hard materials*. s.l.:s.n.
- Marinescu, I. D. et al., *Handbook of machining with grinding wheels*. s.l.:CRC Press. 2007.
- Maydown, 2017. [Online] Available at: <http://www.maydown.co.uk/>
- Mechscience, 2015. *Cylindrical Grinding*. [Online] Available at: <http://www.mechscience.com/cylindrical-grinding/>
- Microtool, 2017. [Online] Available at: <http://www.microtool.com/>
- Moro, N. & Auras, A. P., 2007. *Processos de fabricação*. Florianópolis: s.n.
- Nuova Atelmec, 2015. *Machining works*. [Online] Available at: <http://www.nuovaatelmec.com/>
- Palbit, 2017. *Palbit*. [Online] Available at: <http://www.palbit.pt/pt/>
- Pires, F. d. S., 2011. *Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia dos Materiais*. Universidade de Aveiro: s.n.
- Sandvik, 2008. *allaboutcementedcarbide*. [Online] Available at: <http://www.allaboutcementedcarbide.com>
- Sharma, V. et al., s.d. s.l.:s.n.
- Shawn, M. C., *Principles of Abrasive Processing*. Oxford: Clarendon Press. 1996.
- Singh, S. P. et al., 2012. Shoolini University: s.n.

Sodick, 2017. *Linear motor technology*. [Online] Available at: <http://www.sodick.co.in/>

Tavares, J. M. R. S., 2012. *CFAC - Concepção e fabrico assistidos por computador*. s.l.:s.n.

Technodiamant, 2017. *Grinding Wheels Brochure*. [Online] Available at: <http://www.technodiamant.nl/>

Tesa Technology, 2017. [Online] Available at: <http://www.tesatechnology.com/>

The Fabricator, 2017. *Improving metal cutting productivity*. [Online] Available at: <http://www.thefabricator.com/>

Toolgal, 2017. *Grinding Wheels Catalogue*. [Online] Available at: <http://www.toolgal.com/>

Valsider, 2009. [Online] Available at: <http://www.valsider.com/en/>