

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



**Otimização da utilização de ferramentas de corte
em fresagem CNC**

Pedro Arlindo Marinho Loureiro

Dissertação realizada no âmbito do
Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica
Ramo de Produção, Conceção e Fabrico

Orientador na empresa: Eng^o Fernando Jorge Silva
Orientador na FEUP: Prof. Abílio Manuel Pinho de Jesus

Julho de 2020

© Pedro Arlindo Marinho Loureiro, 2020

The unexamined life is not worth living.
- Sócrates

(Página propositadamente em branco)

Resumo

A presente dissertação apresenta um estudo realizado com o objetivo de otimizar a utilização de ferramentas de corte em fresagem CNC tendo sido elaborada, em ambiente empresarial, paralelamente com a atividade profissional do autor.

A análise realizada na empresa em questão, *Dinâmica Virtual - Serviços de Engenharia, Lda.*, partiu do desenvolvimento e implementação de um procedimento de registo do consumo das ferramentas de corte, que mais tarde permitiu concluir que o consumo de pastilhas em fresagem é muito superior ao de ferramentas monobloco. Analisando os padrões de desgaste das ferramentas e dos parâmetros de corte usados, concluiu-se que seria possível otimizar os parâmetros de corte das fresas de pastilhas quando aplicadas em operações de desbaste, no sentido do aumento da produtividade e da rentabilização do processo; e que a utilização das fresas monobloco poderia ser rentabilizada através de processos de afiação.

Para a otimização dos parâmetros de corte das fresas de pastilhas, recolheu-se toda a informação existente relativamente a ferramentas de corte, equipamentos, parâmetros de corte utilizados, metodologias de utilização das ferramentas e aspetos particulares da maquinagem utilizando os materiais específicos à produção local. Para além de se ter recorrido ao pessoal da empresa, consultou-se os fabricantes/fornecedores das ferramentas, de modo a obter informação com o maior detalhe possível. De seguida, recorreu-se a uma calculadora disponibilizada pela *Sandvik Coromant*, para perspetivar os parâmetros de corte ótimos, cujos valores simulados permitiram limitar o intervalo de parâmetros possíveis a aplicar em cada ferramenta. Para validar os valores simulados, realizaram-se testes de desgaste de pastilhas para comparar se o desgaste obtido experimentalmente correspondia a, aproximadamente, 0,2mm no flanco.

Após ter o grupo de parâmetros ótimos para cada ferramenta e para os dois materiais mais utilizados, executaram-se testes de maquinagem, submetendo cada ferramenta completa a diferentes tipos de operações de fresagem, de modo a analisar-se o seu comportamento no que toca a vibrações, potência de corte e acelerações/desacelerações. Os parâmetros de corte ótimos definidos permitiram aumentar as taxas de remoção de material de algumas fresas de pastilhas até 1000%, alcançando uma melhoria significativa na produtividade das operações de desbaste, rondando os 218% no panorama geral de maquinagem, e um balanço positivo estimado superior a 500€/mês.

No que toca às fresas monobloco, dado sofrerem um desgaste progressivo e expectável, a afiação das mesmas poderia rentabilizar a sua utilização, visto serem substituídas com desgastes muito reduzidos, possuindo ainda bastante potencial para maquinagem. Por serem revestidas com um material muito resistente (ex: nitreto de titânio) e integralmente constituídas por carboneto de tungsténio, o custo das mesmas é elevado, reforçando a necessidade deste estudo.

Assim sendo, as três fresas monobloco com maior representação na produção da empresa foram afiadas e revestidas. Por comparação com os dados recolhidos durante o período de análise do consumo de ferramentas e pelo curto período de testes realizado, concluiu-se que as ferramentas afiadas são vantajosas, tendo-se garantido um desempenho mínima de 81,6% a um custo de aproximadamente 41,5%, resultando num ganho mensal estimado de 20,84€. No final do período de testes, a ferramenta testada tinha ainda potencial para maquirar, pelo que os ganhos reais serão maximizados.

Todos os testes executados foram realizados na empresa em questão, sendo que também se recorreu a alguns recursos da FEUP para efetuar observações ao microscópio.

(Página propositadamente em branco)

Abstract

This dissertation presents a study aiming at optimizing the use of cutting tools in CNC milling, in a business environment, as it was developed simultaneously with the author professional activity.

The analysis built in the named company, *Dinâmica Virtual - Serviços de Engenharia, Lda.*, started by analyzing the tool consumption registration procedure that was developed and implemented. This procedure helped concluding that the tool's consumption in milling operations is higher for the insert tools than for the solid round tools. Analyzing the tools' wear patterns and the used cutting data, it was concluded that it would be possible to optimize the insert tools cutting data, aiming to increase productivity and profitability of roughing operations; and that the usage of solid round tools could be more profitable by sharpening them after replacement.

To optimize the insert tools cutting parameters, all the existing data related with the tools, cutting data, available equipment, tool's usage methodologies and machining aspects according to the used materials, was collected. Both company personnel and tool manufacturers/suppliers were regarded in order to get the most detailed possible information. Then it was used an online calculator, developed by *Sandvik Coromant*, to draw an optimum inserts' cutting data perspective, which the simulated values allowed to determine the possible cutting data interval to be applied on each tool. Wear tests using company equipment were done to validate the simulated values, by comparing the obtained wear with a reference value of 0,2mm flank wear.

After setting the optimal parameters, each tool was tested by operating under different milling types in order to analyze the presence of unexpected behaviors such as vibration, too high cutting forces or heavy accelerations/decelerations. The optimized cutting data allowed to increase the material removal rate of some tools up to 1000%, achieving a significant roughing operations productivity improvement using insert tools, around 218% in the whole machining spectrum, and an estimated profit above 500€ per month.

Relatively to the solid tools, as they showed a regular and progressive wear, sharpening process could make its usage more profitable, due to its replacement with little wear levels, while maintaining machining capabilities. As all of them are coated by a very resistant material (e.g. titanium nitride) and integrally built in tungsten carbide, their cost is high, bringing an even higher need of optimization.

Thus, the 3 more relevant solid round tools were sharpened and coated. Comparing its desempenho after and before sharpening (based on the collected information about tools' consumption) and having the tests' results, its application came to be profitable, having ensured a 81,6% minimum desempenho at 41,5% of the cost, resulting in a monthly profit of 20,84€. In the end of the testing period, the tested tool had still the capacity of machining, meaning that the real profit will be higher than the previously mentioned.

All the executed tests were performed in the named company, although some FEUP resources were used to make microscopic observations.

(Página propositadamente em branco)

Agradecimentos

Agradeço à família, namorada e amigos e a todos aqueles que de alguma forma contribuíram positivamente para a elaboração deste trabalho e para o alcance desta última prova.

Um agradecimento especial:

- Ao Prof. Abílio de Jesus, que sempre se disponibilizou para transmitir a sua opinião e para marcar reuniões às mais variadas horas, ajudando em qualquer momento da elaboração desta dissertação e facultando recursos bibliográficos pertinentes;
- Ao Eng. Fernando Silva, por não limitar o acesso aos recursos da empresa e por flexibilizar o meu horário de trabalho em ocasiões pontuais para execução de testes inerentes ao estudo em causa, tanto nas instalações da entidade como na FEUP;
- Ao pessoal do departamento de produção, nomeadamente, José Cardoso, Pedro Barbosa e Alexandre Silva, por toda a cooperação, conhecimento e compreensão partilhados desde o início até ao fim do estudo. Reforço ainda que foram essenciais para a execução de todos os testes experimentais;
- À Marta Freitas, pela prontidão e vontade prestadas para ajudar em qualquer assunto administrativo ou logístico, sempre com boa disposição.

Por fim, deixo uma palavra de apreço aos meus colegas de curso, com os quais partilhei os mais variados momentos, levando grandes memórias para a vida.

Às Cabras
015

(Página propositadamente em branco)

Índice

1. Introdução.....	1
1.1. <i>Importância do tema abordado.....</i>	<i>1</i>
1.2. <i>Apresentação da empresa</i>	<i>1</i>
1.3. <i>Motivação e objetivos.....</i>	<i>4</i>
1.4. <i>Estrutura da dissertação.....</i>	<i>4</i>
2. Revisão bibliográfica	5
2.1. <i>Fresagem.....</i>	<i>5</i>
2.1.1. <i>Operações de fresagem</i>	<i>6</i>
2.1.2. <i>Parâmetros de corte.....</i>	<i>6</i>
2.2. <i>Ferramentas de corte</i>	<i>8</i>
2.2.1. <i>Geometria</i>	<i>8</i>
2.2.2. <i>Materiais</i>	<i>11</i>
2.2.3. <i>Vida da ferramenta.....</i>	<i>14</i>
2.3. <i>Economia de maquinagem</i>	<i>19</i>
2.3.1. <i>Estratégias de projeto.....</i>	<i>19</i>
2.3.2. <i>Estratégias de maquinagem</i>	<i>21</i>
2.3.3. <i>Seleção de parâmetros de corte</i>	<i>22</i>
2.3.4. <i>Afiação de ferramentas</i>	<i>28</i>
3. Diagnóstico inicial da empresa	29
3.1. <i>Materiais utilizados</i>	<i>29</i>
3.1.1. <i>Aço C1</i>	<i>29</i>
3.1.2. <i>Aço F10.....</i>	<i>30</i>
3.1.3. <i>Aço PM300</i>	<i>30</i>
3.1.4. <i>Aço C265</i>	<i>31</i>
3.1.5. <i>Liga de alumínio AL5083.....</i>	<i>31</i>
3.1.6. <i>Polióxido de Metileno (POM)</i>	<i>32</i>
3.2. <i>Equipamentos disponíveis</i>	<i>32</i>
3.3. <i>Ferramentas utilizadas</i>	<i>34</i>
3.4. <i>Tipos de fixação utilizados.....</i>	<i>35</i>
3.5. <i>Custos indiretos na substituição de ferramentas</i>	<i>36</i>

4. Registro do consumo de ferramentas	39
4.1. <i>Interpretação de resultados.....</i>	40
4.2. <i>Abordagem inicial dos resultados</i>	41
5. Otimização da utilização das pastilhas.....	43
5.1. <i>Estudo dos parâmetros a aplicar nos testes experimentais</i>	43
5.1.1. <i>Análise empírica</i>	45
5.1.2. <i>Determinação empírica da potência e binário de corte</i>	48
5.2. <i>Realização de testes práticos de maquinagem</i>	49
5.2.1. <i>Teste de determinação da potência de corte.....</i>	49
5.2.2. <i>Testes para verificação da vida das ferramentas.....</i>	50
5.2.3. <i>Testes de comparação de desgaste entre materiais</i>	54
5.2.4. <i>Estimativa do conjunto de parâmetros de corte otimizados e teste da sua aplicação em ferramentas com o número total de pastilhas</i>	57
5.3. <i>Determinação de parâmetros ótimos para os diferentes materiais</i>	61
5.4. <i>Aplicação de parâmetros nos centros de maquinagem</i>	63
5.5. <i>Balço relativo à proposta de novos parâmetros de corte</i>	64
5.5.1. <i>Ganhos de produção</i>	64
5.5.2. <i>Visão geral de ganhos</i>	66
5.5.3. <i>Redução de custos por aumento da taxa de remoção de material e aumento da produtividade.....</i>	67
5.5.4. <i>Retorno do investimento nos testes.....</i>	68
6. Otimização da utilização das fresas monobloco.....	69
6.1. <i>Afiação das ferramentas substituídas</i>	70
6.2. <i>Avaliação das ferramentas afiadas.....</i>	71
6.2.1. <i>Testes</i>	73
6.3. <i>Balço.....</i>	74
7. Conclusões e Trabalhos futuros	75
7.1. <i>Conclusões</i>	75
7.2. <i>Trabalhos futuros.....</i>	76
Referências bibliográficas.....	78
Anexos	80

Lista de figuras

Figura 1 - Logótipo da <i>Dinâmica Virtual</i>	1
Figura 2 - Exemplos de peças maquinadas na empresa	2
Figura 3 - Equipamento LTA	2
Figura 4 - Equipamento LPM-P	3
Figura 5 - Pilar produzido pela MFC.	3
Figura 6 - Equipamento MFC.....	4
Figura 7 - Métodos de fresagem.....	5
Figura 8 - Fresagem periférica.	6
Figura 9 - Fresagem de topo.....	6
Figura 10 - Parâmetros de corte principais da fresagem periférica.....	7
Figura 11 - Parâmetros geométricos de uma fresa de topo monobloco	9
Figura 12 - Tipos de fresas.....	9
Figura 13 - Ilustração das formas de ponta das fresas	9
Figura 14 - Ilustração da relação entre velocidade de escoamento de apra e a componente axial da força de corte	10
Figura 15 - Sistema de codificação ISO de pastilhas	11
Figura 16 - Diagrama comparativo dos materiais constituintes das ferramentas de corte	12
Figura 17 - Crescimento do grão na microestrutura dos revestimentos consoante a espessura ..	13
Figura 18 - Influência da velocidade de corte na vida da ferramenta	15
Figura 19 - Representação gráfica em escala logarítmica da Lei de Taylor aplicada num caso específico	16
Figura 20 - Curvas típicas de vida da ferramenta com declives (n) variáveis	17
Figura 21 - Diagrama ilustrativo da relação entre a velocidade de corte, o avanço e o tipo de desgaste.	23
Figura 22 - Representação gráfica tempo-velocidade de corte num processo de maquinagem...	25
Figura 23 - Representação gráfica custos de maquinagem-velocidade de corte num processo de corte	26
Figura 24 - Representação gráfica da influência do avanço no custo de produção	27
Figura 25 - Centros de maquinagem.....	32
Figura 26 - Placa multi-furo presente na CNC3, com prensa de aperto acoplada	33

Figura 27 - Tipo de cone ISO40 usado na empresa.	35
Figura 28 - Exemplo de saco para recolha de ferramenta substituída.....	39
Figura 29 - Fotografias de pastilhas substituídas.	41
Figura 30 - Exemplos de fresas monobloco substituídas.....	41
Figura 31 - Exemplo de apresentação de um gráfico T-Vc fornecido pela calculadora da velocidade de corte	44
Figura 32 - Método para cálculo das constantes da <i>Lei de Taylor</i> com base em informação da calculadora da <i>Sandvik Coromant</i>	46
Figura 33 - Gráficos de potência e binário da CNC3	49
Figura 34 - Exemplo da disposição do teste para verificação de vida das ferramentas	52
Figura 35 - Especificação da zona observada ao microscópio.....	53
Figura 36 - Teste nº 1 com disco 13	53
Figura 37 - Teste nº 2 com disco 13	53
Figura 38 - Teste nº 3 com disco 13	54
Figura 39 - Teste nº 1 com disco 25	54
Figura 40 - Teste nº 2 com disco 25	54
Figura 41 - Teste nº 3 com disco 25	54
Figura 42 - Teste nº 4 com disco 13	56
Figura 43 - Teste nº 5 com disco 13	56
Figura 44 - Teste nº 4 com disco 25	56
Figura 45 - Teste nº 5 com disco 25	56
Figura 46 - Teste nº 6 com disco 13	57
Figura 47 - Teste nº 6 com disco 25	57
Figura 48 - Teste nº 7 com disco 25	57
Figura 49 - Modelo utilizado para execução do teste da aplicação de parâmetros nos discos completos.	59
Figura 50 - <i>Setup</i> do teste executado com a ferramenta completa nº 38.....	60
Figura 51 - Curvas de potência e de binário de corte estimadas para as CNC1 e CNC2.	64
Figura 52 - Fresa monobloco analisada após utilização (ferramenta nº 17)	70
Figura 53 - Fresa monobloco analisada após utilização (ferramenta nº 16)	71
Figura 54 - Fotografias comparativas entre ferramentas novas e afiadas.....	73
Figura 55 - Ferramenta nº21.....	74

Lista de tabelas

Tabela 1 - Grupos ISO dos carbonetos sinterizados aplicados em pastilhas de corte	14
Tabela 2 - Valores típicos da constante <i>C</i> da <i>Lei de Taylor</i> para diferentes combinações matéria-prima/material da ferramenta	16
Tabela 3 - Valores típicos do expoente <i>n</i> da <i>Lei de Taylor</i> para ferramentas de diferentes materiais	16
Tabela 4 - Tipos de desgaste/falha	18
Tabela 5 - Estratégias de desenvolvimento de peças que otimizam a maquinagem.	19
Tabela 6 - Problemas e respetivas causas num processo de maquinagem	21
Tabela 7 - Designação dos materiais utilizados de acordo com diferentes normas	29
Tabela 8 - Propriedades físicas e mecânicas a 20°C do aço C1.	30
Tabela 9 - Propriedades físicas e mecânicas a 20°C do aço F10 (após TT)	30
Tabela 10 - Propriedades físicas e mecânicas a 20°C do aço PM300 (após TT).	31
Tabela 11 - Propriedades físicas e mecânicas a 20°C do aço C265 (após TT)	31
Tabela 12 - Propriedades físicas e mecânicas a 20°C do Al5083	32
Tabela 13 - Propriedades físicas e mecânicas a 20°C do POM	32
Tabela 14 - Características dos centros de maquinagem.	33
Tabela 15 - Tempos e custos associados a operações inerentes à substituição de ferramentas.....	37
Tabela 16 - Constantes <i>n</i> e <i>C</i> da <i>Lei de Taylor</i> baseados em informação da calculadora da <i>Sandvik Coromant</i>	47
Tabela 17 - Resultados empíricos para as velocidades de corte ótimas.	48
Tabela 18 - Resultados do teste de determinação da potência de corte com a ferramenta nº37 usando o aço F10.....	50
Tabela 19 - Dados de corte usados nos testes para verificação da vida das ferramentas e desgastes de flanco resultantes.	53
Tabela 20 - Dados de corte usados nos testes para comparação de desgastes de flanco usando o aço PM300 e respetivos desgastes resultantes.....	55
Tabela 21 - Novos dados de corte usados nos testes para comparação de desgastes de flanco usando o aço PM300 e respetivos desgastes resultantes.....	56

Tabela 22 - Parâmetros otimizados, aplicados em fresas com uma pastilha, que maximizam a produtividade em operações de desbaste em F10.....	58
Tabela 23 - Parâmetros escolhidos para os testes de ferramentas com o número total de pastilhas.....	60
Tabela 24 - Resultados qualitativos dos testes com fresas completas.....	60
Tabela 25 - Parâmetros finais a aplicar nas pastilhas para maquinagem de F10.....	61
Tabela 26 - Dados simulados para cálculo da razão entre velocidades de corte para diferentes durezas.....	62
Tabela 27 - Parâmetros finais a aplicar nas pastilhas para maquinagem de PM300.....	63
Tabela 28 - Estimativa de valores de N e V_f a aplicar na maquinagem de Al5083 e POM.....	63
Tabela 29 - Ganhos por unidade de volume baseados nos parâmetros de corte otimizados.....	66
Tabela 30 - Representação de cada aço usado na empresa.....	67
Tabela 31 - Ganhos semanais estimados em função das pastilhas mais utilizadas.....	68
Tabela 32 - Ganhos semanais contabilizando o aumento da produtividade.....	68
Tabela 33 - Aferição dos gastos inerentes à execução dos testes.....	69
Tabela 34 - Comparação dimensional de fresas monobloco antes e após afiação.....	73
Tabela 35 - Análise de custos de utilização das ferramentas afiadas.....	75
Tabela 36 - Estimativa do ganho financeiro obtido pela afiação das fresas monobloco mais utilizadas na empresa.....	75

Abreviaturas e Símbolos

Lista de abreviaturas

CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CAM	<i>Computer Aided Manufacturing</i>
CBN	<i>Cubic Boron Nitride</i> - Nitreto cúbico de boro
CNC	Controlo numérico computadorizado
CVD	<i>Chemical Vapor Deposition</i> - Deposição química na fase de vapor
ECG	<i>Electrochemical grinding</i> - Retificação eletroquímica
FCVA	<i>Filtered Cathodic Vacuum Arc</i> - Arco catódico filtrado em vácuo
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
HB	Dureza <i>Brinell</i>
HRC	Dureza <i>Rockwell C</i>
HSS	<i>High speed steel</i> - Aço rápido
PACVD	<i>Plasma Assisted Vapor Deposition</i> - Deposição assistida por plasma na fase de vapor
PCD	<i>Polycrystalline Diamond</i> - Diamante policristalino
PVD	<i>Physical Vapor Deposition</i> - Deposição física na fase de vapor
RPM	Rotações por minuto
ShD	Dureza <i>Shore D</i>
TT	Tratamento térmico
WC	Carboneto de tungsténio
W.NR.	<i>World number</i> - Número mundial de identificação de um material

Lista de símbolos

V_c	Velocidade de corte
π	Número de Pi
f_z	Avanço por dente
N	Frequência de rotação em rotações por minuto
Q	Taxa de remoção de material
V_f	Velocidade de avanço
z	Número de dentes da ferramenta
a_p	Profundidade de corte / Largura de corte
a_e	Penetramento de trabalho
T	Vida da ferramenta

(Página propositadamente em branco)

1. Introdução

1.1. Importância do tema abordado

Segundo um artigo publicado pelo jornal *Expresso* em 2019 [1], a indústria metalomecânica e metalúrgica representa 18% do PIB nacional, com um peso de mais de 30% das exportações nacionais, tendo vindo a ser fundamental para o crescimento económico do país. No entanto, existe a necessidade de uma melhoria contínua em todos os aspetos, adaptando-se às novas soluções tecnológicas que estão em constante desenvolvimento.

A fresagem é um processo de fabrico para obtenção de peças através da remoção de material por arranque de aparas. É um dos processos que permite maior complexidade geométrica, sendo que nos dias de hoje existem diversas ferramentas e equipamentos que permitem reproduzir as mais variadas formas, mesmo em zonas de difícil acesso. Este processo é de elevada importância para a indústria produtora, estimando-se que cerca de 15% dos componentes mecânicos disponíveis mundialmente passem por um processo de maquinagem.

O objetivo das empresas do setor é o de conciliar a produtividade pretendida com o menor custo de produção possível, mantendo a qualidade requerida, pois estes dois fatores influenciam em grande parte a sua competitividade no mercado.

Neste estudo, pretende-se otimizar a utilização das ferramentas de corte em fresagem CNC, dado ser o método de fabrico dominante na empresa em questão, que é apresentada na Secção seguinte, constituindo uma grande parcela dos custos no desenvolvimento de projetos.

1.2. Apresentação da empresa

Fundada em 2009, pelo Eng. Fernando Silva, a empresa Dinâmica Virtual - Serviços de Engenharia, Lda. (ver logótipo na Figura 1) desenvolve máquinas industriais em diversos setores da metalomecânica, sendo que o seu foco tem sido na construção de equipamentos de produção de escadas e escadotes, onde cerca de 80% da sua produção é exportada. Estando já presente em indústrias de diversos países, ultimamente, a empresa procura inserir-se na indústria dos produtos de descanso, desenvolvendo equipamentos para a produção de estrados de camas, estruturas metálicas para móveis, entre outros, e em desenvolver equipamentos tecnológicos para tecnologias recentes, tais como a do rebite autoperfurante aplicado em ligações mecânicas permanentes (união de chapas, perfis extrudidos, entre outros).



Figura 1 - Logótipo da *Dinâmica Virtual*.

Ainda na área da maquinaria industrial, esta entidade desenvolve equipamentos especiais consoante a necessidade do cliente, seguindo sempre o conceito de chave na mão.

Dentro de portas, nasce todo o projeto mecânico, hidráulico e pneumático, sendo produzidas grande parte das peças integrantes dos equipamentos recorrendo a processos de maquinagem (exemplos apresentados na Figura 2), à exceção de itens standard. É ainda desenvolvida toda a vertente de automação e eletrificação, sendo todo o conjunto montado e testado antes de ser entregue ao cliente.

A estrutura empresarial divide-se na administração e nos departamentos de projeto, produção, montagem e de automação. No departamento de projeto, os recursos informáticos disponíveis permitem o desenvolvimento, simulação e avaliação das soluções implementadas, bem como o cruzamento de dados na rede interna, os quais auxiliam a consulta do histórico da empresa nos mais diversos tópicos.

Os equipamentos disponíveis na empresa operam seis materiais distintos usando fresagem, furação, retificação e torneamento. Estes são capazes de produzir peças com dimensões máximas de 1050x600x600 mm e com a complexidade permitida por um equipamento de 3 eixos.

De seguida, apresentam-se alguns dos equipamentos/projetos desenvolvidos pela empresa recorrendo, entre outros, a processos de maquinagem:

- **Linha transfer automática para deformação de peças (LTA)**

O equipamento LTA (ver Figura 3) é capaz de deformar peças em arame metálico, de forma automática. Está preparado para trabalhar 4 arames em simultâneo, pelo que o tempo de ciclo é inferior a 3 segundos. A alimentação e ativação do modo automático são feitas pelo operador.

Este conceito de equipamento pode ser aplicado em diversas operações de processamento de arame, adaptando-se as ferramentas nele existentes à função requerida.

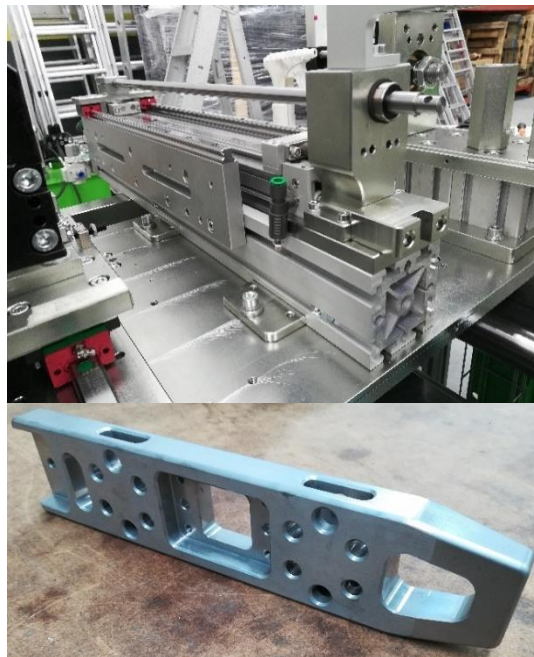


Figura 2 - Exemplos de peças maquinadas na empresa.



Figura 3 - Equipamento LTA.

- **Máquina automática para produção de escadas com linha de corte de degrau (LPM-P)**

A LPM-P (ver Figura 4) é um dos produtos mais recentes da empresa e é capaz de produzir escadas em alumínio com comprimentos entre 1500 e 6000 mm e larguras entre 300 e 650 mm. Em cada ciclo, a máquina é alimentada com 2 perfis extrudidos onde é efetuada a furação, inserção do degrau, expansão e rebordeamento. De notar que o degrau é cortado à medida e na quantidade necessária, numa unidade de corte localizada na lateral do equipamento, que executa o corte a partir de uma barra de até 6000 mm.



Figura 4 - Equipamento LPM-P.

- **Máquina automática para produção de pilares para estrutura de andaimes (MFC)**

A MFC (ver Figura 6) é mais um dos projetos da empresa que consiste num equipamento capaz de furar e cravar pilares para estrutura de andaimes (ver Figura 5), de forma automática. A máquina é carregada com dezenas de tubos, pelo operador, e é capaz de operar tanto com aço como com alumínio. Com um tempo de ciclo de 14 segundos, o material montado é extraído automaticamente.



Figura 5 - Pilar produzido pela MFC.

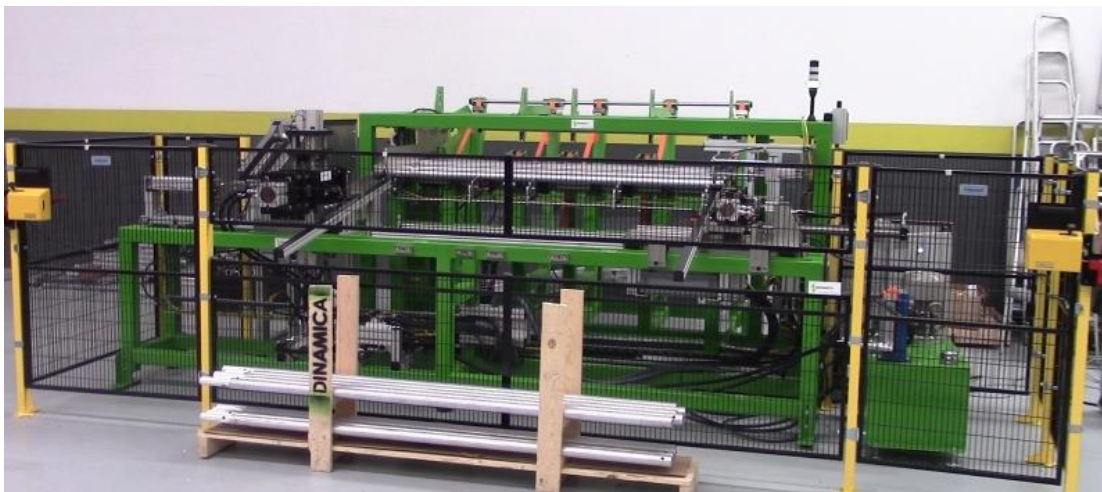


Figura 6 - Equipamento MFC.

1.3. Motivação e objetivos

O tema de “Otimização da utilização de ferramentas de corte em fresagem CNC” surgiu da identificação de um gasto de ferramentas de corte anormal na empresa em questão. Nesse momento, entendeu-se que seria proveitoso, tanto para o autor como para a empresa, fazer uma análise detalhada do consumo e utilização das ferramentas de corte em fresagem CNC, tendo como objetivo chegar a uma estratégia final que otimize a utilização das mesmas.

Até à data de início do estudo, as ferramentas de corte utilizadas na empresa tinham sido selecionadas pelo trio operadores-fornecedores-administração para uma utilização transversal à maquinagem de todos os materiais habitualmente usados nos projetos da empresa, visando alcançar uma produtividade e vida da ferramenta aceitáveis. Visto que esta a seleção de ferramentas tem sido realizada numa base muito empírica, procura-se fazer um estudo mais aprofundado de forma a concluir se as ferramentas estão a ser utilizadas da melhor forma ou se existem melhores opções que aumentem a rentabilidade da produção da empresa.

O desenvolvimento da presente dissertação será feito em paralelo com a atividade profissional do autor, que ocupa um cargo de desenvolvimento de projeto na entidade acolhedora. Apesar do tema não estar diretamente ligado à sua função do autor, é essencial que o aspeto abordado no título do trabalho seja analisado, de modo a que se consiga tirar o máximo de proveito dos processos de fabrico presentes na entidade, resultando numa evolução tanto do autor, por aplicar os conhecimentos estudados ao longo do curso, como para a empresa por usufruir de uma análise mais específica num ponto tão importante. De notar que o conhecimento detalhado dos processos e técnicas de fabrico praticados internamente permite projetar componentes ótimos em torno dos recursos disponíveis, bem como traçar estratégias de produção melhoradas, trazendo grandes vantagens a nível institucional.

1.4. Estrutura da dissertação

A presente dissertação iniciar-se-á com a apresentação de uma revisão bibliográfica (Capítulo 2) em torno da fresagem, abordando aspetos gerais do processo e dando especial ênfase às ferramentas e parâmetros de corte. Visto tratar-se de um processo de otimização, serão estudados tópicos relativos à economia de maquinagem, visando resumir possíveis estratégias a adotar no processo de implementação de melhorias no processo de fresagem.

No Capítulo 3, será apresentado um diagnóstico inicial da empresa, dando a conhecer os materiais utilizados, equipamentos disponíveis, ferramentas de corte e tipos de fixação utilizados, e custos indiretos na substituição de ferramentas. O conhecimento destes tópicos será fundamental para a otimização proposta tendo em conta a atividade da empresa.

Conhecidos os recursos internos e registado o consumo de ferramentas durante um período definido, no Capítulo 4, interpretar-se-á os resultados e será elaborada a abordagem a tomar dos mesmos, tendo em conta os objetivos propostos.

Separando as ferramentas de corte pela sua solução construtiva, nomeadamente ferramentas monobloco ou de pastilhas, apresentam-se os procedimentos adotados para otimização da utilização de cada uma delas (Capítulos 5 e 6, respetivamente), expondo e justificando cada passo adotado no desenrolar do estudo, incluindo testes executados e comparações em relação às políticas aplicadas aquando do início do estudo. No final de cada tópico, apresentar-se-á o balanço dos resultados obtidos.

Por fim, no Capítulo 7, concluir-se-á o trabalho fazendo um apanhado de todos os pontos conseguidos com o estudo, nomeadamente ganhos, produtividade resultante e metodologias de trabalho estudadas durante o desenvolvimento da dissertação, que podem ser vantajosas à atividade da empresa.

2. Revisão bibliográfica

Neste Capítulo, apresenta-se uma contextualização geral dos pontos teóricos relacionados com o trabalho, nomeadamente a fresagem, mostrando-se aspetos correlacionados com o princípio de remoção de aparas, com a economia de maquinaria e com as ferramentas de corte.

2.1. Fresagem

A fresagem é um processo de fabrico de obtenção de peças através da remoção de material por arranque de aparas usando uma ferramenta multicortante: a fresa. Podem-se produzir peças numa panóplia de materiais (metal, madeira, termoplásticos, entre outros) e com diferentes complexidades geométricas, consoante o número de eixos motores do equipamento.

Este processo envolve a utilização de uma fresadora manual ou com comando numérico computadorizado (CNC). Em ambas, a matéria prima é fixa na mesa e a unidade de corte é suportada e orientada de modo a interceptar o material a maquinar.

Entre outros parâmetros, as fresadoras são caracterizadas pelo número de eixos motores, ou seja, pelo número de movimentos independentes de translação e/ou rotação em x, y e z. Quanto maior o número de eixos motores, maior a complexidade possível de peças a produzir e o custo do equipamento.

Numa fresadora CNC, a unidade de corte é composta por um alimentador automático de ferramentas (carrossel ou tambor - nº de ferramentas inferior a 30, serpentina - nº de ferramentas superior a 30) e pela bucha onde são acoplados os cones porta-ferramenta. Quanto à matéria prima, esta pode ser fixada à mesa com recurso a prensas de aperto, gabarits específicos, paletes, bases multi-furo, munhões, entre outros.

A interseção entre a ferramenta de corte e a matéria prima pode acontecer de duas formas básicas distinguidas pela direção do eixo da ferramenta em relação à superfície maquinada, conduzindo aos métodos de fresagem ilustrados na Figura 7.

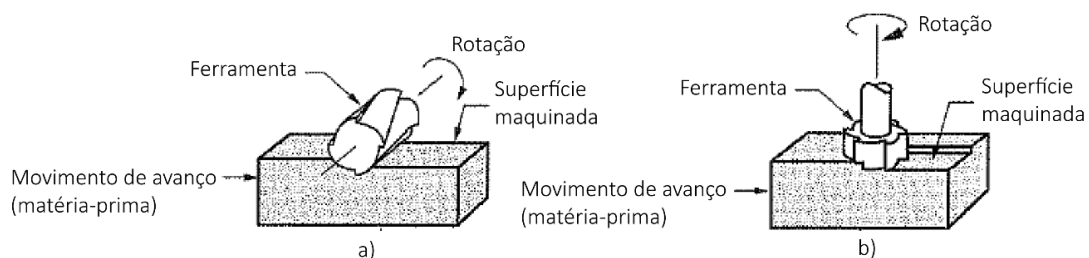


Figura 7 - Métodos de fresagem: a) periférica ou cilíndrica; b) de topo ou frontal (adaptado de [2]).

2.1.1. Operações de fresagem

A fresagem pode ser realizada segundo diferentes operações, como ilustrado na Figura 8 e Figura 9, de acordo com os métodos de fresagem periférica e de topo, respetivamente.

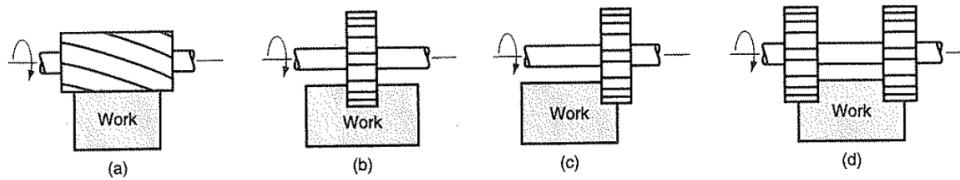


Figura 8 - Fresagem periférica: a) facejamento, b) abertura de canal, c) fresagem lateral, e d) fresagem de contorno [2].

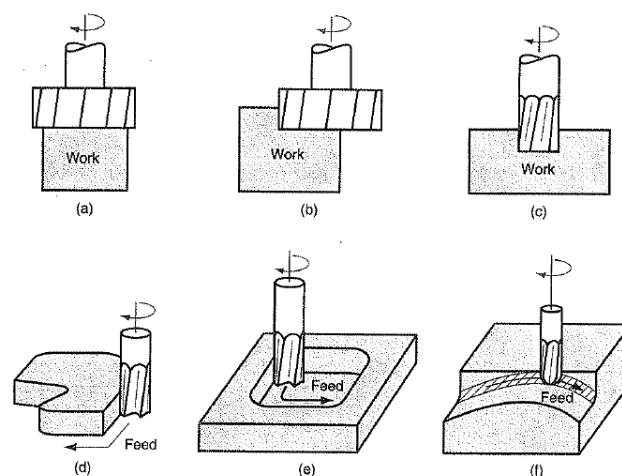


Figura 9 - Fresagem de topo: a) facejamento, b) facejamento parcial, c) fresagem frontal de canal, d) fresagem lateral de contorno*, e) fresagem de caixa, e f) fresagem de superfície 3D [2].

*a profundidade de corte é menor do que a espessura da peça

2.1.2. Parâmetros de corte

Os parâmetros de corte são um conjunto de dados que caracterizam o movimento relativo do par ferramenta-peça a maquinar, durante uma operação de maquinagem.

Existem diversos parâmetros que caracterizam o corte, no entanto apenas alguns deles são recomendados pelos fabricantes/fornecedores de ferramentas, dado que os restantes resultam de operações de cálculo entre estes e as propriedades geométricas da ferramenta.

A velocidade de corte, o avanço por dente, o penetramento de trabalho e a profundidade ou largura de corte constituem os parâmetros recomendados pelo fabricante/fornecedor e situam-se em intervalos de valores aconselhados para maquinar determinados materiais, com ou sem fluido de corte. De notar que existem ferramentas específicas para cada tipo de corte e ferramentas que conseguem executar diferentes tipos de corte, pelo que possuem grupos de parâmetros de corte para cada método distinto. Por fim, existem ainda ferramentas indicadas para operações de desbaste, acabamento ou ambos, pelo que os parâmetros deverão ser devidamente ajustados.

Operações de desbaste, como o próprio nome indica têm o objetivo de remover uma grande quantidade de material, pelo que são caracterizadas por velocidades de avanço e penetramentos altos, com velocidade de corte baixa. Por outro lado, as operações de acabamento são caracterizadas exatamente pelos valores inversos dos parâmetros de corte.

Na Figura 10, ilustram-se os parâmetros de corte em função do tipo de fresagem.

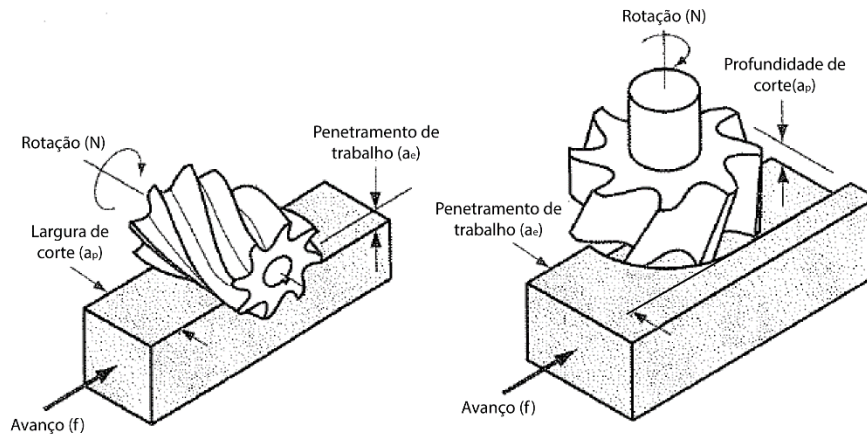


Figura 10 - Parâmetros de corte principais da fresagem periférica (à esquerda) e frontal (à direita) (adaptado de [2]).

A velocidade de corte (v , m/min) depende do diâmetro exterior da ferramenta (D , mm). Esta relaciona-se com a frequência de rotação da bucha (N , rot/min), usando a seguinte expressão:

$$N = \frac{1000V_c}{\pi D} \quad (1)$$

A velocidade de avanço (V_f , mm/min) resulta da contabilização do avanço por dente (f_z , mm/dente), do número de dentes (z) e da frequência de rotação, através da fórmula:

$$V_f = f_z z N \quad (2)$$

A taxa de remoção de material (Q , mm³/min) depende da profundidade ou largura de corte (a_p , mm), do penetramento de trabalho (a_e , mm) e da velocidade de avanço, sendo definida do modo seguinte:

$$Q = a_p a_e V_f \quad (3)$$

O tempo de maquinagem (T_m , min) é função da distância percorrida (L , mm) e da velocidade de avanço e pode ser calculado através da fórmula:

$$T_m = \frac{L}{V_f} = \frac{\pi D L}{1000 V_c f} \quad (4)$$

Para remover a peça, a ferramenta tem de ultrapassar os esforços impostos pelo material sobre a mesma, relacionando-se com a espessura da peça [3]. Quanto maior for a resistência e dureza do material, maior é a resultante das forças sobre a ferramenta.

Para vencer os esforços de corte, a máquina ferramenta tem de dispor de potência de corte (P_c , kW) que se pode exprimir do seguinte modo [4]:

$$P_c = \frac{a_p a_e V_f K_c}{60 * 10^6} \quad (5)$$

onde K_c (MPa) é a pressão específica de corte, característica do material, da sua dureza e da espessura média da apanha (h_m , mm).

Assim sendo, as fresadoras têm de possuir uma potência (P_g) superior à potência de corte, tendo em conta o rendimento do equipamento (η) que depende principalmente do tipo de transmissão do cabeçote:

$$P_g = \frac{P_c}{\eta} = \frac{a_p a_e V_f K_c}{60 * 10^6 * \eta} \quad (6)$$

Outro parâmetro característico das fresadoras é o binário de corte (M_c , Nm):

$$M_c = \frac{P_c * 30 * 10^3}{\pi N} \quad (7)$$

2.2. Ferramentas de corte

As ferramentas de corte usadas nos processos de fresagem são desenvolvidas para produzir peças através da remoção de apanha, por rotação da mesma, no caso da fresagem.

As ferramentas de fresagem dividem-se em dois grandes grupos caracterizados pela sua solução construtiva:

- **Ferramentas monobloco** - arestas de corte e corpo da ferramenta constituem uma só peça. Assim sendo, toda a ferramenta tem a mesma constituição e pode-se fazer um revestimento da zona de corte, de modo a melhorar o desempenho da operação. Podem ser constituídas em aço rápido (HSS) ou metal duro e são afiáveis.
- **Insertos / pastilhas** - são peças montadas no corpo da ferramenta, desenvolvidas com o objetivo de minimizar os custos inerentes ao desgaste da ferramenta. Nesta situação, consegue-se ter ferramentas de grande dimensão, sem ser necessário um grande custo na produção do corpo central (suporte) que é reutilizável. Neste tipo de ferramentas, as pastilhas são construídas em materiais especializados para corte (ex: carboneto de tungsténio e cobalto), enquanto que o suporte é constituído por um aço ligado.

2.2.1. Geometria

A geometria das ferramentas é bem distinta consoante a solução construtiva, pelo que são facilmente identificáveis, mesmo possuindo elementos de geometria comuns. Tanto num caso como noutro, é possível encontrar canais internos para a passagem de fluido de corte aquando da maquinagem, que nos casos recomendados, é usado para melhorar o processo de remoção de apanha.

2.2.1.1. Ferramentas monobloco

As ferramentas monobloco surgiram com o nascimento da tecnologia de fresagem, no século XIX, e têm vindo a ser desenvolvidas ano após ano. O aparecimento das ferramentas em aço rápido revolucionou a tecnologia e desde então cresceu muito rapidamente.

Como o próprio nome indica, as ferramentas monobloco constituem um só corpo e são desenvolvidas para fresagem de topo, lateral ou de canto (combinação de ambas). Na grande parte dos casos, as fresas são capazes de operar nos três tipos de maquinagem, sendo apenas necessário ajustar os parâmetros de corte, dado que as forças envolvidas são distintas.

As fresas monobloco são principalmente caracterizadas pelo seu diâmetro, número de hélices, forma de ponta, altura de trabalho e haste de fixação, como ilustrado na Figura 11.

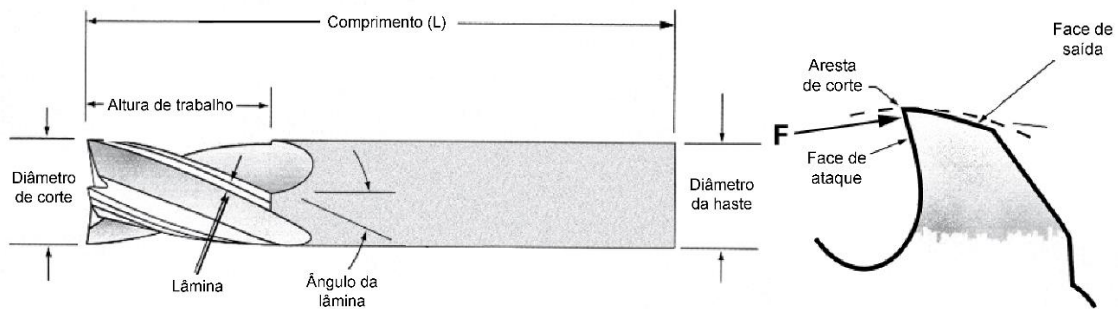


Figura 11 - Parâmetros geométricos de uma fresa de topo monobloco (adaptado de [5]).

A geometria da ferramenta de corte está diretamente ligada à operação de fresagem que é capaz de executar, pelo que existem diversos tipos de fresas monobloco (ver Figura 12). As mais comuns realizam fresagem de topo e as lâminas/ hélices podem tomar inclinações até 60° , dependendo da operação que realizam, como será abordado mais à frente neste estudo.

Na maior parte dos casos, quanto maior a altura de trabalho, maior a vibração da ferramenta, pelo que se tende a usar ferramentas mais curtas. Por outro lado, menos altura de corte leva a uma menor versatilidade na operação. Neste sentido, tentam-se usar ferramentas de corte com características que aumentem o leque de aplicações sempre que possível, para simplificar os processos de maquinagem.



Figura 12 - Tipos de fresas [30].

Quanto às formas de ponta, na Figura 13 identificam-se as quatro variações existentes. O caso da ponta plana é teoricamente possível, mas na realidade caracteriza-se por um raio de canto de valor quase nulo, o que significa que consegue executar cantos quase perfeitos.

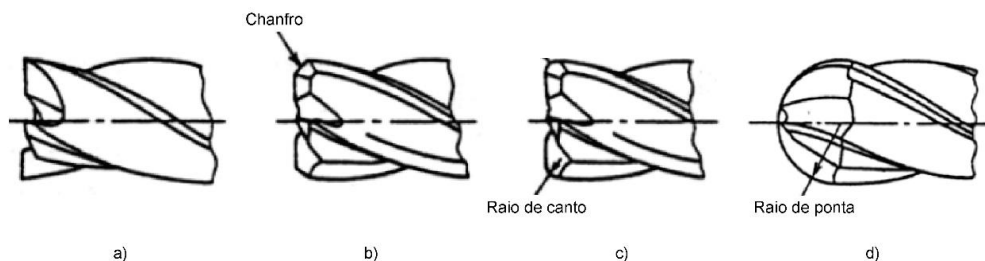


Figura 13 - Ilustração das formas de ponta das fresas: a) plana (raio de canto desprezável), b) chanfrada, c) arredondada, e d) esférica (adaptado de [2]).

Quanto maior o número de lâminas/hélices, menor será o espaço para saída de aparas, no entanto aumenta a rigidez da fresa. Deste modo, as ferramentas com menos lâminas são desenvolvidas para operações de desbaste, sendo para acabamento as que possuem um número maior de arestas de corte. Mesmo assim, para diâmetros muito pequenos é inviável ter mais do que duas lâminas, logo não é comum fazer-se distinção da aplicação da fresa através do número de arestas de corte. De notar que há fabricantes que produzem fresas com até dez hélices.

Os ângulos de hélice tomam valores diferentes consoante a sua aplicação, sendo que ângulos menores estão associados a velocidades de escoamento de aparas maiores e menores forças axiais, pelo que são características das fresas para desbaste. O caso contrário, acontece para fresas dedicadas a acabamentos. Existem ainda versões com ângulos intermédios, de modo a permitir executar ambas as operações [6] [7] (ver Figura 14).

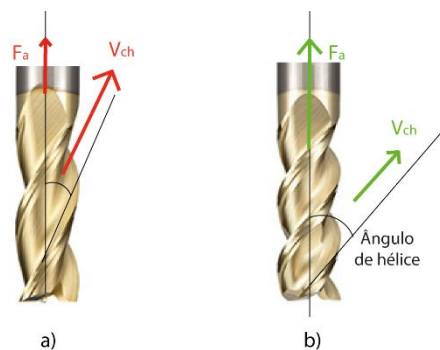


Figura 14 - Ilustração da relação entre velocidade de escoamento de aparas (V_{ch}) e a componente axial da força de corte (F_a) numa operação: a) de desbaste; b) de acabamento.

Existem ainda fabricantes que, na mesma fresa, projetam as arestas de corte com inclinações ligeiramente diferentes, de modo a criar forças de corte variáveis e, assim, ajudar na quebra da aparas.

2.2.1.2. Insertos/ pastilhas

Ao contrário do que acontece nas ferramentas monobloco, existe um sistema de codificação normalizado que caracteriza a geometria das pastilhas de corte. Esta codificação é útil, pois é possível caracterizar um produto em qualquer parte do globo. Ainda assim, os fabricantes podem produzir insertos que não obedecem às normas na totalidade, de forma a serem exclusivos à sua produção.

As pastilhas são elementos de corte muito versáteis, pelo que existem diversos aspetos que as caracterizam. Na Figura 15, mostra-se um exemplo de apresentação do sistema de codificação ISO de pastilhas [8].

Uma das grandes vantagens das pastilhas é o facto de cada uma delas ter 2 ou mais arestas de corte, utilizadas uma a uma (à exceção das pastilhas circulares que têm apenas uma aresta e vão rodando consoante o mecanismo de montagem). Por este motivo, o uso de pastilhas torna-se numa solução económica nos processos de maquinagem, pois estas têm um ciclo de vida tão maior quanto maior for o número de arestas de corte. Quando se têm pastilhas de geometria negativa o número de arestas de corte duplica, pois possuem arestas de corte em ambas as faces da pastilha.

A vida de uma pastilha é geralmente mais curta do que das ferramentas monobloco, pois são geralmente desenvolvidas para trabalhar com parâmetros de corte mais agressivos.

É nas operações de desbaste que se procura a rentabilidade do processo de maquinagem peça-a-peça, pelo que o uso de ferramentas com pastilhas nestas operações é benéfico.

Outro fator que influencia a utilização das pastilhas predominantemente nas operações de desbaste deve-se ao facto de se tratarem de soluções construtivas maiores, dada a necessidade de um suporte em aço ligado. De notar que são raros os casos em que se encontram pastilhas para ferramentas com diâmetros inferiores a 10mm. Uma maior ferramenta em rotação, tanto em comprimento como em diâmetro, resulta numa maior vibração da mesma, sendo mais crítico numa operação de acabamento do que de desbaste.

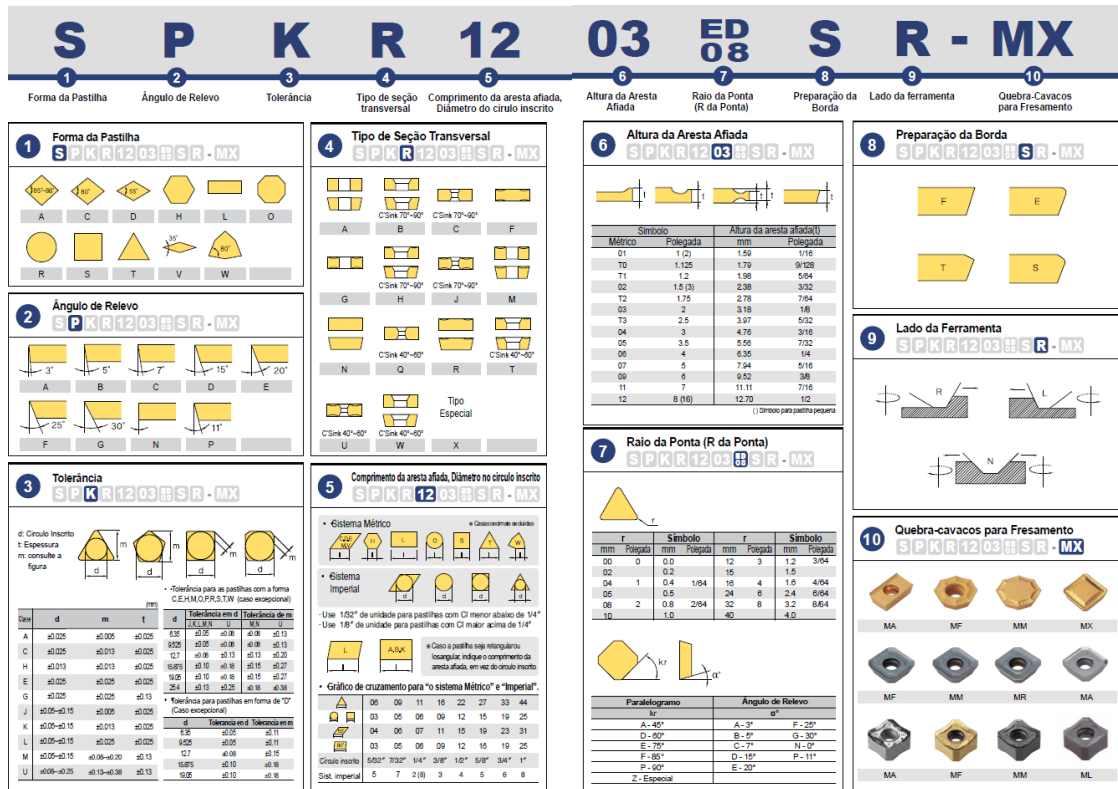


Figura 15 - Sistema de codificação ISO de pastilhas [8].

2.2.2. Materiais

A especialização dos materiais constituintes das ferramentas permite maquinar uma vasta panóplia de materiais que se conhece. Tal como existem inúmeras matérias-primas, é também necessário um leque de materiais que permita trabalhar em diferentes condições assegurando, na combinação ferramenta-peça, elevadas resistências ao desgaste, durezas a frio e a quente, tenacidades e condutividades térmicas desejáveis e baixos coeficientes de atrito e de expansão térmica. No entanto, não existe nenhum material que, por si só, consiga recriar todas as propriedades ótimas visto que, por exemplo, a dureza a quente e a resistência ao desgaste caminham no sentido oposto à tenacidade do material, isto é, quanto mais resistente um material é, geralmente menos tenacidade possui.

Sendo assim, não existindo um material ideal, os fabricantes de ferramentas estudam qual a composição mais apropriada da ferramenta a utilizar na maquinagem de um determinado grupo de matérias-primas. No Capítulo 2.2.2.2 explica-se a classificação ISO dos carbonetos sinterizados usados em ferramentas de corte.

Outro aspeto importante no fabrico de ferramentas é o seu custo, pois a indústria procura sempre a melhor relação preço-produtividade-vida da ferramenta, enquadrando-os num processo de produção específico.

O aço rápido (HSS) é o material mais barato e tem sido cada vez menos utilizado como material de corte, dado o desenvolvimento, durabilidade e diversidade de áreas de aplicação das ferramentas em carbonetos sinterizados. O metal duro é composto por carbonetos de tungstênio ($\%_{\min}WC \sim 85\%$) e outros, que fornecem dureza e resistência à ferramenta, e por uma matriz de cobalto ($\%_{\max}Co \sim 15\%$), responsável por aglomerar os carbonetos e por fornecer tenacidade à ferramenta. Fazendo uma comparação direta entre os dois materiais referidos anteriormente, o HSS ganha pela maior tenacidade e o metal duro pela maior dureza, tanto a quente como a frio, e pela melhor resistência ao desgaste.

Para além dos materiais mais comuns, enumerados acima, existem ainda os Cermets (materiais semelhantes aos carbonetos sinterizados em que as partículas duras são carbonetos, carbonitreto ou nitreto de titânio), os cerâmicos (alumina, nitreto de silício, SIALON, entre outros), o CBN e o diamante (ex: PCD), que são utilizados para casos mais exigentes, como na maquinagem de materiais muito duros, acima dos 40HRC, super ligas resistentes ao calor ou materiais muito macios como o alumínio, que requer um coeficiente de atrito muito baixo de modo a evitar a aderência de avara.

Na Figura 16 apresenta-se uma comparação entre as velocidades de corte e de avanço que podem ser alcançadas com cada material. De notar que um material ideal se situaria no canto superior direito do diagrama apresentado.

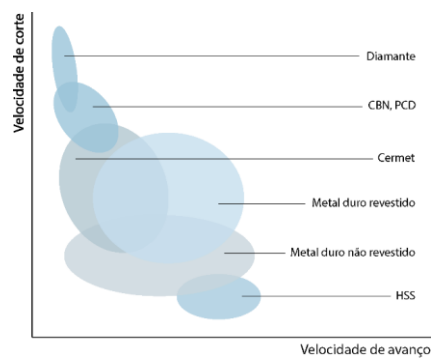


Figura 16 - Diagrama comparativo dos materiais constituintes das ferramentas de corte (adaptado de [8]).

Da análise do diagrama acima, denota-se a capacidade dos materiais mais resistentes de poderem laborar a grandes velocidades de corte, dada a resistência a temperaturas elevadas, no entanto não suportam velocidades de avanço elevadas, pois tratam-se de materiais frágeis e tais condições poderiam causar a deflexão e conseqüente quebra da ferramenta. O oposto se verifica nos materiais menos duros, cujas altas temperaturas provocariam a plastificação da aresta de corte.

O campo de aplicação dos metais duros revestidos, no centro do diagrama, revela a grande aplicabilidade deste material em diferentes situações. O carboneto de tungstênio é um material com dureza superior ao HSS, sofrendo com menor tenacidade, no entanto, quando comparado a outros materiais ainda mais duros, torna-se numa solução equilibrada para integrar o núcleo da ferramenta, que necessita de tenacidade para absorver os impactos inerentes ao arranque de avara. O facto de se ter um núcleo em WC, permite à ferramenta ter uma rigidez muito superior à do HSS e, por isso, menores vibrações durante o corte.

Como referido anteriormente, as ferramentas monobloco são constituídas apenas por um material (geralmente HSS ou metal duro), podendo ainda ser revestida. Já as ferramentas com pastilhas possuem o suporte em aço ligado e a pastilha, geralmente, em metal duro revestido. Desta forma, tem-se uma combinação de tenacidade e de dureza, e torna ainda possível a existência de ferramentas de grande porte sem induzir num custo de manutenção muito elevado, visto que apenas se tem de trocar as pastilhas e não todo o conjunto da ferramenta.

2.2.2.1. Revestimentos

O uso de revestimentos permite a maquinagem de materiais que não poderiam ser maquinados de modo eficaz por uma ferramenta totalmente em HSS ou WC e também o uso de parâmetros de corte que melhoram o rendimento do processo.

Comparativamente com os materiais de revestimentos, o HSS e o WC possuem maior tenacidade, mas desgastam-se mais rapidamente. Os revestimentos possuem maior resistência a altas temperaturas, baixo coeficiente de atrito e baixa condutividade térmica. A combinação de ambos resulta numa ferramenta com tenacidade no núcleo e resistência ao desgaste na superfície.

O revestimento é composto por uma ou mais camadas finas de material, geralmente aplicadas por CVD ou PVD, podendo ainda ser aplicadas por PACVD ou FCVA. A espessura total da camada situa-se entre os 0.05-6 μ m e é aplicada sobre a pastilha ou ferramenta monobloco (um pouco mais do que a altura de trabalho) pré-fabricada.

A microestrutura da camada varia conforme a sua espessura. O mecanismo de crescimento leva a um aumento do tamanho de grão com o aumento da espessura (Figura 17), pois camada após camada, a capacidade de arrefecimento das camadas inferiores diminui, fazendo o grão crescer. Desta forma, não se usam camadas muito espessas de modo a fazer-se sentir o efeito do revestimento [9].

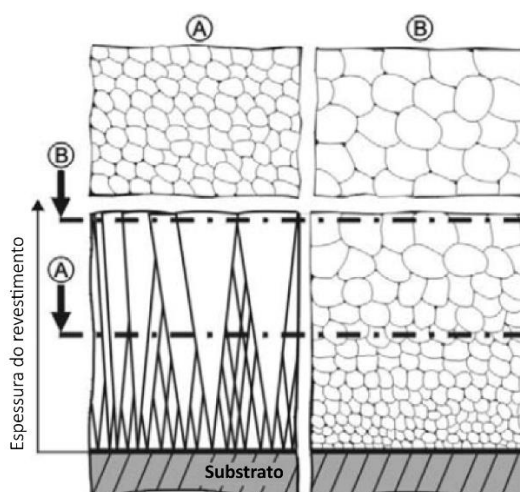


Figura 17 - Crescimento do grão na microestrutura dos revestimentos consoante a espessura (adaptado de [9]).

2.2.2.2. Classificação ISO dos carbonetos sinterizados utilizados em ferramentas de corte

Existe uma classificação ISO que diferencia as diferentes composições dos carbonetos sinterizados aplicados nas ferramentas de pastilhas, por grupos. Sendo que existem matérias-primas da mesma natureza, mas com maquinabilidades diferentes e que necessitam ferramentas com composições distintas, faz-se ainda uma subdivisão destes grupos em subgrupos mais específicos, numerados de 10 a 60, geralmente de 5 em 5. (ex: P10, P15, P20), sendo crescente a resistência ao desgaste e diminuindo a tenacidade. De notar, que cada fornecedor cria uma codificação para os materiais das ferramentas e os direciona para um cada grupo ISO.

Na Tabela 1, apresentam-se os grupos ISO e respetivos materiais a maquinar associados.

Tabela 1 - Grupos ISO dos carbonetos sinterizados aplicados em pastilhas de corte [10] [11].

Grupo ISO	Aplicação
P	Aços macios de baixo carbono Aços ferríticos Aços de construção de baixo-médio carbono ($0.1 < \%C < 0.5$) Aços de médio-alto carbono ($\%C > 0.5$) ideais para tratamentos térmicos, levemente ligados Aços ferramenta, duros Aços martensíticos, ligados com baixa maquinabilidade.
M	Aços inoxidáveis Aços inoxidáveis austeníticos e duplex
K	Ferro fundido cinzento Ferro fundido de baixa liga Ferro fundido maleável Ferro fundido nodular Ferro fundido de média e alta liga
N	Ligas não-ferrosas: alumínio, cobre, magnésio, bronze
S	Super-ligas resistentes a altas temperaturas Ligas muito ligadas com ferro, níquel, cobalto ou titânio
H	Aços temperados, com alta dureza (45-65 HRC) Aços inoxidáveis martensíticos

2.2.3. Vida da ferramenta

A vida da ferramenta é um dos aspetos que os utilizadores procuram otimizar com vista à produtividade, que pode ser expressa como tempo total de maquinagem, número de peças produzidas ou quantidade de material removido até um nível de desgaste estabelecido. Operar uma ferramenta até que esta frature é um método aplicável, no entanto impossibilita recondicionar a ferramenta (ferramentas monobloco) e traz geralmente problemas de acabamento no período de aproximação do fim de vida. Como alternativa, pode ser definido um nível de desgaste controlado que servirá como referência para substituir a ferramenta. O valor de desgaste de 0,5 mm no flanco é comum [2].

De qualquer forma, o valor de desgaste apresentado anteriormente é apenas de referência, pois poderá ser indicado outro valor, consoante o material da ferramenta ou matéria-prima, tolerância ou acabamento pretendidos.

É sabido que em utilização contínua e na produção em série de peças, a vida da ferramenta pode ser tão curta como 15 minutos. No entanto, tal valor é resultado da combinação de diversos fatores tais como maquinagem contínua ou intermitente, se os parâmetros de corte utilizados se encontram no limite indicado, se a ferramenta é indicada para o material a maquinar, se a temperatura não é demasiado elevada, se o próprio equipamento está a trabalhar de acordo com o esperado, se a ferramenta está acoplada da forma correta, entre muitos outros. Por estes motivos, os fabricantes de ferramentas que estimam uma vida de ferramenta, sempre se defendem dando valores esperados em “condições ideais de funcionamento”.

De uma forma ou de outra, seguindo os parâmetros de corte aconselhados pelo fabricante, aplicando a ferramenta nos materiais para a qual é desenvolvida e assegurando um bom funcionamento do equipamento, é possível obter um desempenho estável da mesma, com um desgaste progressivo e, assim, um tempo de vida esperado.

A identificação da necessidade de troca de ferramentas de corte convencionais (em HSS ou WC) pode dar-se por diversas razões [2]:

- Observação da aresta de corte danificada;
- Identificação de irregularidades por toque na aresta;
- Tolerâncias de corte esperadas não cumpridas;
- Rebarba na peça;
- Acabamento superficial não esperado;
- Projeção de avara queimada;
- Dificuldade na remoção de material (máquina em esforço anormal);
- Vibração excessiva (deteção sonora);
- Número de peças ou tempo de corte predefinidos para troca de ferramenta atingido;
- Quebra da ferramenta.

Na Figura 18, mostra-se um diagrama onde se identifica a diminuição da vida da ferramenta com o aumento da velocidade de corte. Na curva menos inclinada são claras 3 regiões que caracterizam a vida da ferramenta, delimitadas pela mudança de concavidade (da esquerda para a direita): iniciação do desgaste, região de desgaste estável e região de falha. A inclinação da curva na região mediana de desgaste depende da dureza do material e dos parâmetros de corte, sendo tão mais inclinada quanto mais severos forem estes valores. No entanto, a vida da ferramenta é um valor difícil de aferir com precisão, pois depende ainda do avanço, profundidade ou largura de corte, material e geometria da ferramenta, microestrutura e dureza da matéria-prima, tipo de corte, fluido de corte e da rigidez de todo o conjunto equipamento-ferramenta [12].

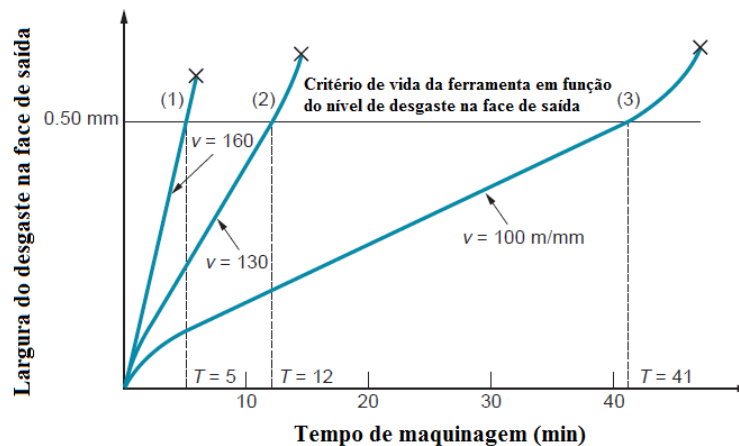


Figura 18 - Influência da velocidade de corte na vida da ferramenta [13].

Para facilitar o estudo da vida da ferramenta recorre-se à *Lei de Taylor*, que se trata de uma relação de potência entre a vida da ferramenta e a velocidade de corte com duas constantes, onde o índice da vida da ferramenta de Taylor (n) é o expoente da relação de potência, que representa o declive do diagrama $\log v_c - \log T$, caracterizando a natureza do material da ferramenta; e a constante de Taylor (C), que toma o valor da velocidade de corte para uma vida de 1 minuto, dependendo dos materiais da ferramenta e da peça, e dos parâmetros de corte (ver Figura 19) [2]. Resulta na expressão:

$$V_c T^n = C \quad (8)$$

A Lei de Taylor pode ser linearizada aplicando logaritmos, resultando:

$$\log V_c + n \log T = \log C \quad (9)$$

Na equação seguinte mostra-se a versão modificada desta equação em que se tem em conta o avanço e a profundidade de corte:

$$V_c T^n a_p^x f^y = C_1 \quad (10)$$

onde x e y são expoentes determinados experimentalmente, inferiores à unidade, em que geralmente $y > x$ [12].

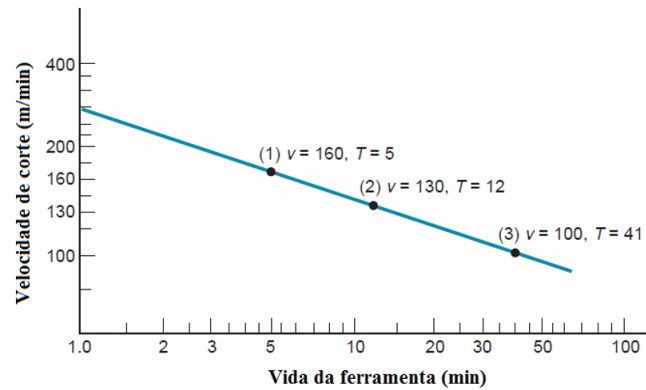


Figura 19 - Representação gráfica em escala logarítmica da Lei de Taylor aplicada num caso específico [13].

Da observação de ambas as equações e da Figura 19, tem-se que a vida da ferramenta diminui com o aumento dos parâmetros de corte. Sabendo que x, y são valores pequenos, é possível afirmar que a velocidade de corte é o parâmetro com maior impacto na vida da ferramenta, daí ser aceitável usar a equação simplificada. É ainda possível encontrar outras relações que têm em conta parâmetros como dureza, raio de ponta da ferramenta, área de contacto da ferramenta com a matéria-prima, ângulo de ataque, entre outros, tornando-se complexo dada a necessidade de uma grande quantidade de dados experimentais para identificar tal relação. Nas Tabelas 2 e 3 apresentam-se valores típicos de C e de n , respetivamente.

Tabela 2 - Valores típicos da constante C da Lei de Taylor para diferentes combinações matéria-prima/material da ferramenta [14].

Matéria-prima	Valores de "C" para diferentes combinações		
	HSS	WC	Cerâmicos
Aço ao carbono	40-100	160-200	2500
Ferro fundido	30-60	100-150	9000
Aço inox	20-35	120-200	-
Titânio	10-20	100-150	-

Tabela 3 - Valores típicos do expoente n da Lei de Taylor para ferramentas de diferentes materiais [12].

Material	HSS	WC	Cerâmicos
n	0.1-0.2	0.2-0.4	0.4-0.6

Apesar de existirem valores de referência, sabe-se que a Lei de Taylor é aceitável apenas em condições específicas, pois resultados práticos apresentados na referência [15] mostram curvas com comportamento não linear (ver Figura 20), que são mais usuais nas seguintes condições:

- maquinagem de materiais de alta resistência ou termo-resistentes;
- quando se opera em condições que resultam em vidas de ferramenta muito longas;
- altas taxas de remoção de material.

De qualquer forma, a aplicação da Lei de Taylor na maquinagem de aços ao carbono ou de baixa liga é aceitável quando se procuram vidas de ferramenta entre 10-50 minutos, pois trata-se da zona onde os valores ótimos são atingidos e onde as curvas reais apresentam um comportamento aproximadamente linear em representação bi-logarítmica [15].

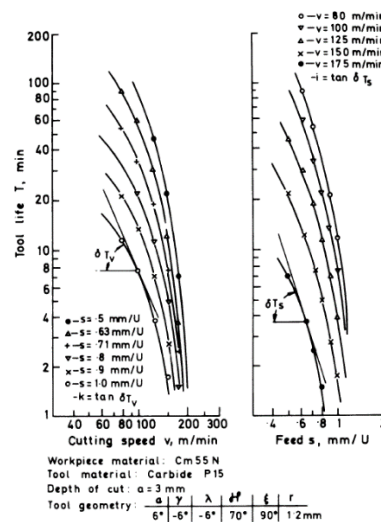


Figura 20 - Curvas típicas de vida da ferramenta com declives (n) variáveis: T-V_c à esquerda; T-f à direita [15].

Atualmente, o recurso à simulação por intermédio do método dos elementos finitos, aplicados a modelos de formação de apra e de desgaste da ferramenta, revela ser a forma mais aplicativa de incluir os parâmetros de corte comuns e ainda variáveis como temperatura, esforços e tensões, para a previsão do desgaste das ferramentas de corte. Os modelos utilizados trabalham com a lei de desgaste, calculada através de métodos empíricos para cada ponto de contacto da ferramenta com a matéria-prima. Da mesma forma, dado que ocorre uma alteração da geometria da ferramenta, o sistema é atualizado a cada ciclo simulado. Assim, tem-se uma representação muito próxima do que acontece num processo de remoção de apra, tendo como única desvantagem a grande complexidade de todo o processo, que impossibilita a sua implementação em ambiente industrial [16].

2.2.3.1. Tipos de falha

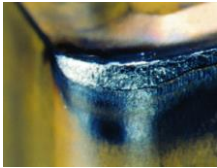
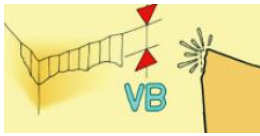





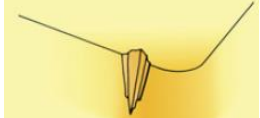
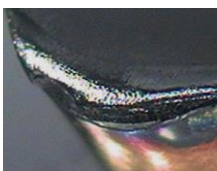





A falha das ferramentas pode ocorrer por via de diferentes fenómenos associados ao desgaste nas interfaces ferramenta-apara e ferramenta-peça. Estes podem ser por:

- **Abrasão** - remoção de pequenas partículas da ferramenta por ação mecânica de partículas duras;
- **Adesão** - soldadura entre materiais devido às elevadas pressões/temperaturas;
- **Difusão** - troca de elementos/átomos através do contacto entre materiais. Responsável pela perda de elementos que conferem dureza à ferramenta;

- **Reações químicas** - oxidação dos materiais expostos e remoção das películas de óxidos;
- **Deformação plástica** - forças de corte associadas a altas temperaturas promovem a plastificação da aresta de corte tornando-a mais suscetível à abrasão [13].

Os fenômenos suprarreferidos geram diferentes padrões de desgaste nas ferramentas. Na Tabela 4, mostram-se fotografias acompanhadas com uma descrição de falhas correntes nos insertos metálicos, no entanto é possível fazer uma correlação das mesmas em relação às ferramentas monobloco. O conhecimento dos tipos de desgaste é fundamental na identificação das possíveis causas.

Tabela 4 - Tipos de desgaste/falha em pastilhas de corte [11] [10].

Fotografia	Ilustração	Descrição
		Desgaste do flanco - é a causa mais comum de desgaste e também a mais desejada, por ser estável e previsível. É causada pelo deslizamento da ferramenta sobre a superfície da matéria-prima.
		Craterização - situada na face de ataque e resulta do atrito provocado pelo escoamento da apra. Aparece em situações de velocidade de corte excessiva.
		Aresta postíça - causada pelo mau escoamento de apra aderente. É comum aparecer na maquinagem de materiais excessivamente plásticos como os aços de baixo carbono e alumínio, de maquinabilidade difícil.
		Lascamento - causado por dano excessivo na ferramenta. Comum na maquinagem de superfícies duras, nas quais ocorre adesão da ferramenta à matéria-prima.
		Deformação plástica (impressão) - ocorre quando a temperatura na interface ferramenta-peça é demasiado alta, levando à plastificação da ferramenta. É frequente acontecer quando a velocidade de corte é demasiado alta.
		Fissuração térmica - causada pelo arrefecimento repentino na aresta de corte. Comum aparecer no corte interrompido de apra e na presença de fluido de corte.
		Fratura - causada pelo excesso de esforço na ferramenta (fruto de parâmetros de corte demasiado elevados ou choques indesejados), pela presença de inclusões de materiais duros, pela vibração da ferramenta, entre outros.

2.3. Economia de maquinagem

O custo de um processo de maquinagem é fruto da combinação do custo de diferentes parcelas:

- Equipamento, manutenção e instalação;
- Matéria-prima;
- Ferramentas;
- Gasto energético;
- Mão de obra (programação, preparação, acabamento, medição).

O peso dos pontos suprarreferidos não é igualmente distribuído, sendo que este depende muito da quantidade e da peça a produzir. Por exemplo, numa produção em série, o custo de programação, ferramentas e do equipamento são amortizados pela maior quantidade de peças produzidas; por outro lado o gasto energético e a manutenção tomam parcelas maiores. No que toca a peças de maior complexidade, a parcela de mão de obra cresce dada a maior necessidade de intervenção do operador.

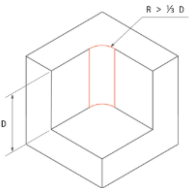
Nos custos de mão de obra incluem-se as trocas de ferramenta, que em ambiente de produção em série têm vidas de aproximadamente 15 minutos. Fazendo uma estimativa, se a troca de uma ferramenta levar 3 minutos ao operador, cerca de 16,7% do tempo é despendido a efetuar trocas de ferramenta. Este é um cálculo apenas indicativo, pois a vida da ferramenta é um parâmetro muito variável, dado que é afetado por inúmeros fatores, como abordado anteriormente.

A otimização dos custos inerentes aos processos de maquinagem passa pela análise dos fatores que afetam cada parcela do custo total, tendo como objetivo encontrar os que têm maior representação no somatório final e melhorá-los. É irreal aprimorar todas as parcelas, pois por vezes a otimização de uma delas faz-se à custa da penalização de outras.

2.3.1. Estratégias de projeto

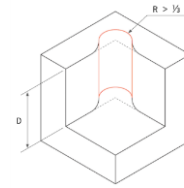
A melhoria de um processo de maquinagem deve começar a ser implementada desde o projeto das peças a maquinar até que estas estão prontas. Existem limitações físicas e tecnológicas que impedem certos tipos de movimentos e que atrasam o processo. Desta forma, sempre que se puder evitar tais situações, sem prejudicar a função da peça, aconselha-se a seguir estas técnicas de modo a melhorar o processo de maquinagem. Na Tabela 5, apresentam-se algumas estratégias conhecidas.

Tabela 5 - Estratégias de desenvolvimento de peças que facilitam a maquinagem [17] [18].

Descrição	Ilustração
Adição de raios maiores em arestas internas Como as ferramentas de fresagem são cilíndricas, as arestas internas têm sempre um raio associado. Quanto maior for esse raio, maior poderá ser o diâmetro da ferramenta e, assim, mais rápida poderá ser a produção. No caso de existirem várias arestas internas, deve-se tentar aplicar os mesmos raios em todas.	

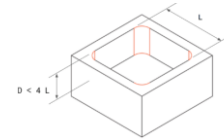
Uso de caixas de fuga

Por vezes, é necessário produzir contornos para encaixe de peças angulares, por exemplo um retângulo. Nestas situações pode-se executar uma caixa de fuga com raio à escolha, ao invés de tentar produzir raios de canto muito reduzidos.



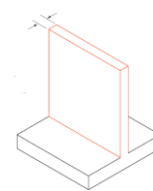
Limitar a profundidade de cavidades

Quanto mais funda for uma cavidade, maior quantidade de material terá de ser removida, o que é bastante demorado. Outro fator é o comprimento da ferramenta, que limita a profundidade de corte. Sabe-se ainda que quanto maior for a altura de maquinagem, maior é a vibração do sistema, pelo que vai desgastar mais a ferramenta e o equipamento.



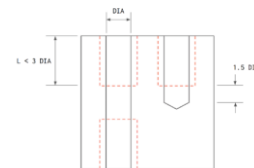
Aumento das espessuras de paredes finas

Em situações que a redução de peso da peça não é questionável ou que a geometria necessária não obriga a tal, espessuras maiores são mais estáveis, permitindo forças de corte superiores, ou seja, uma remoção maior de material numa só passagem. Paredes finas requerem a passagem múltipla de uma ferramenta a baixa profundidade de corte, para evitar empenos, aumentando o tempo de maquinagem. Quando possível, a espessura em metais deve ser superior a 0,8 mm (mínimo 0,5 mm) e em plásticos 1,5 mm (mínimo 1,0 mm).



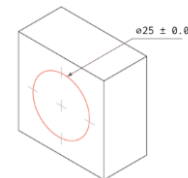
Limitar o comprimento de roscas

Em ligações comuns (sem inserts), cerca de 95% da força de aperto localiza-se nos 5 primeiros fios de rosca, pelo que ter comprimentos de rosca muito longos se torna demorado e, por vezes, desnecessário. Da mesma forma aumenta o risco de fratura da ferramenta.



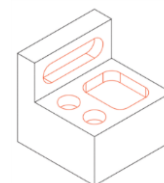
Inserir tolerâncias finas apenas quando necessário

Definir tolerâncias dimensionais ou geométricas finas nas peças aumenta o custo pois carece de um cuidado acrescido na maquinagem bem como posterior verificação.



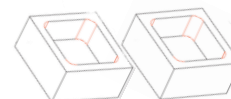
Minimizar quantidade de apertos necessários

Quanto menor for o número de apertos necessários, menor o tempo despendido na preparação.



Produção de várias peças em simultâneo

Tirar partido do mesmo aperto para produzir mais do que uma peça, ou até apenas parte da peça traduz-se num ganho significativo de custos, visto que se reduz etapas em relação à produção de peças individuais.



Usufruir de ferramentas standard

Desenvolver uma peça que possa ser produzida com as ferramentas disponíveis num determinado centro de maquinagem evita a necessidade de efetuar trocas, encomendas ou o recurso a equipamentos especiais.

-

2.3.2. Estratégias de maquinagem

Na generalidade dos processos de corte, existe uma série de problemas conhecidos que são originados por causas variadas. Quando ocorrem esses problemas, o operador deve ser capaz de os identificar rapidamente e de proceder à correção dos mesmos. Na Tabela 6, apresentam-se alguns destes problemas e causas conhecidas, e de seguida descrevem-se procedimentos para os corrigir, assumindo que a combinação matéria-prima - ferramenta está correta.

Tabela 6 - Problemas e respetivas causas num processo de maquinagem.

Problema \ Causa	Vibração / trepidação	Partículas duras presentes na matéria-prima	Parâmetros de corte indevidos	Ferramenta desgastada	Aperto da matéria-prima defeituoso
Tolerância dimensional não cumprida	x			x	x
Ruído de corte excessivo	x	x	x	x	x
Acabamento superficial inesperado	x	x	x	x	x
Quebra/desgaste irregular da ferramenta	x	x	x	-	x
Rebarba na peça			x	x	
Projeção de aparas queimada (quando não é suposto)			x	x	
Dificuldade na remoção de material		x	x	x	
Vibração da matéria-prima	-				x

- **Vibração**

Quando as dimensões obtidas estão fora da tolerância permitida, mas a peça apresenta um acabamento superficial esperado, um de dois cenários possíveis pode estar a decorrer:

- a ferramenta já se desgastou e está a remover menos material do que o esperado;
- a ferramenta está a trepidar e a remover mais material (caso a trepidação seja baixa, a alteração no ruído de maquinagem pode não ser perceptível).

Na primeira situação, como o acabamento superficial é aceitável, pode-se optar por ajustar a compensação da ferramenta na CNC e continuar a maquinar, pois as arestas de corte ainda estão funcionais. Existem já controladores CNC que possuem um sistema de auto-compensação do desgaste da ferramenta.

No segundo caso, existem vários cenários [19]:

- a montagem da ferramenta no cone deverá ser verificada, sendo que cada tipo de cone possui um conjunto de pontos a ser tidos em conta;
- parâmetros de corte incorretos: avanço baixo ou velocidade de corte e profundidade de cortes altos (força de corte excessiva);

- a ferramenta escolhida pode estar a trabalhar a alturas de corte muito altas, pelo que a troca de ferramenta, por uma mais rígida, pode resolver a questão;
- o próprio cone pode precisar de calibração e, nesta situação, existem equipamentos que, através de rotação, conseguem detetar onde o desequilíbrio se dá e indicar onde deve ser removido material (no cone) para o calibrar;
- a causa da vibração pode ter origem no equipamento e a equipa de manutenção da máquina deverá ser chamada.

- **Irregularidades presentes na matéria-prima**

A presença de inclusões mais duras na matéria-prima pode ocorrer em certos materiais que não passaram por um tratamento térmico de normalização ou amaciamento da microestrutura. Certos aços de construção são obtidos por reciclagem de outros, pelo que se podem encontrar partículas com dureza superior e que acabam por danificar a ferramenta. Sendo difícil aferir a presença destas partículas, o utilizador deve ter este fator em conta na escolha da ferramenta ou optar por matérias-primas que sejam fornecidas num estado normalizado, podendo, por outro lado, resultar num maior desgaste na ferramenta, fruto do aumento da resistência da matéria-prima [19].

- **Aperto da matéria-prima defeituoso**

A correta fixação da matéria prima é tão importante como o aperto da ferramenta, pois pode comprometer toda a peça. Assim, é imprescindível que o aperto seja conferido pelo operador antes de iniciar qualquer remoção de material. Por vezes, quando a peça é complexa pode-se optar pela utilização de *gabarits*, desenvolvidos especificamente para o produto em questão [19].

- **Parâmetros de corte indevidos ou ferramenta desgastada**

A correta seleção dos parâmetros de corte é função do equipamento, da matéria-prima, da geometria da ferramenta, do tipo de operação (desbaste ou acabamento) e dos requisitos de acabamento superficial da peça. Por ser função de um elevado número de fatores e por se procurar otimizar a utilização de ferramentas de corte em fresagem CNC, mantendo ou melhorando a produtividade da empresa em questão, apresentam-se, de seguida, estratégias conhecidas que visam a melhoria da utilização das ferramentas de corte [19].

2.3.3. Seleção de parâmetros de corte

Atualmente, o objetivo principal das indústrias transformadoras é o de produzir à maior taxa de remoção de material possível, ao mínimo custo, sem afetar a qualidade final do produto. Para concretizar a primeira parte bastaria aumentar a velocidade de corte e o avanço, no entanto isso iria resultar num desgaste mais rápido das ferramentas e aquecimento do sistema. Dessa forma, a substituição de ferramentas seria mais frequente, resultando num aumento da paragem de produção e dos gastos diretos com o custo das ferramentas.

Assumindo que a ferramenta é utilizada para trabalhar um material para o qual é indicada, os parâmetros de corte afetam diretamente tanto a produtividade como a vida da ferramenta. Se o objetivo é maximizar a produtividade, então os parâmetros de corte são maximizados, dentro dos limites corretos de funcionamento, de modo a aumentar a produtividade de peças maquinadas. No entanto, na produção de peças únicas ou de pequenas séries, procura-se ter um equilíbrio entre a produtividade e a vida da ferramenta, pois a troca e substituição de ferramentas têm maior representação nos custos totais de produção. Assim, é comum investir-se em ferramentas de corte de qualidade superior, pois usando parâmetros de corte mais conservadores, se consegue prolongar muito a sua vida.

Os fabricantes de ferramentas fornecem parâmetros de corte aconselhados para um equilíbrio entre produtividade e vida da ferramenta, tanto para aumentar a vida da ferramenta como para preservar os equipamentos, pois a potência, binário e limite de velocidade têm de ser tidos em conta. No cenário da produção em série, estes parâmetros são aumentados para aumentar a produtividade.

O primeiro passo para otimizar a utilização das ferramentas de corte é evitar que estas tenham uma vida prematura, isto é, que tenham de ser trocadas porque sofreram um desgaste irregular/ anormal ou por fraturara.

Tomando as razões de desgaste/falha das ferramentas presentes na Tabela 4, é possível traçar um diagrama intuitivo que ajuda a associar o tipo de desgaste ao avanço e à velocidade de corte. No centro da Figura 21, encontra-se o desgaste de flanco, que é progressivo e o mais desejável, pois permite prever o ciclo de vida da ferramenta. Na presença de um tipo de desgaste que não o referido anteriormente, numa análise superficial, o operador pode identificá-lo e ajustar os parâmetros de corte na direção do centro do diagrama. Desta maneira, procura-se alcançar a vida ótima da ferramenta. De notar, que caso o desgaste seja excessivo, a causa pode estar na escolha errada da ferramenta e, nesta situação, só se conseguirá atingir o desgaste ótimo efetuando a troca da mesma.

A partir do momento que se obtém um desgaste progressivo, deve-se procurar os parâmetros de corte ótimos que encontram o objetivo final: produtividade, vida ferramenta ou uma combinação de ambos.

O método anteriormente indicado, aplica-se numa situação prática pontual, pois existem métodos teóricos que procuram determinar os parâmetros de corte ideais. No entanto, como referido anteriormente, a velocidade de corte é o parâmetro com maior representação no desempenho da ferramenta. Assim sendo, existem duas perspetivas para determinar a velocidade de corte ótima, que resultam da derivação dos somatórios dos tempos ou custos de produção, tendo em conta a Lei de Taylor. Ambas as soluções procuram um equilíbrio entre a taxa de remoção de material e a vida da ferramenta, e baseiam-se no Modelo de Gilbert. De seguida, mostra-se um critério que agrega ambas as soluções e a influência do avanço nos custos de maquinagem. De notar que estas são análises que permitem uma representação bidimensional pois não têm em conta nem a profundidade de corte nem o número de passagens da ferramenta, o que tornaria a análise muito complexa [2] [20] [21] [22].

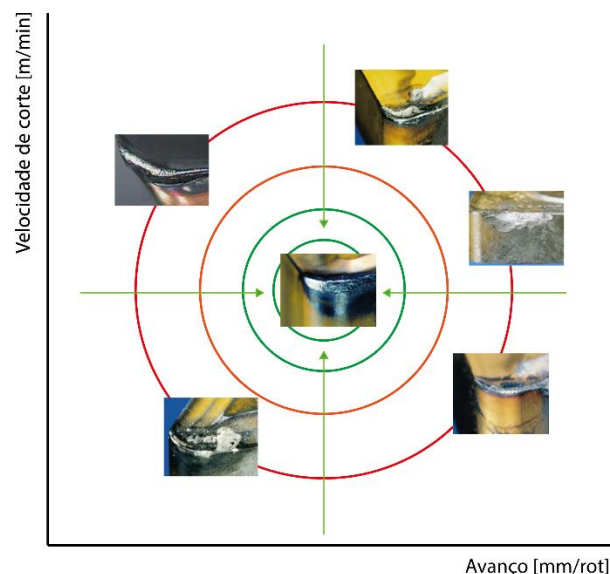


Figura 21 - Diagrama ilustrativo da relação entre a velocidade de corte, o avanço e o tipo de desgaste.

2.3.3.1. Maximização da produtividade

A minimização do tempo de maquinagem por componente e maximização da produtividade são equivalentes. Este objetivo é importante quando a prioridade é produzir a maior quantidade de peças possível sem incorrer num uso incorreto das ferramentas.

Esta formulação tem em conta os seguintes parâmetros, todos eles referentes à produção de uma peça (ver Figura 22):

- Tempo de maquinagem T_m - tempo em que a ferramenta está a cortar material (ver equação (4))
- Tempo de substituição da ferramenta por peça produzida T_s - tempo contabilizado na substituição da ferramenta. Depende do rácio entre o tempo de maquinagem e a vida da ferramenta, e do tempo de substituição propriamente dito (T_t), pelo que se tem:

$$T_s = \frac{T_m}{T} T_t \quad (11)$$

- Tempo de manuseamento T_h - todo o tempo desde que o processo de produção de uma peça inicia até que está pronta, subtraindo o T_m e o T_t .

O tempo total de maquinagem, T_c , é o somatório dos três tempos suprarreferidos, resultando:

$$T_c = T_m + T_s + T_h \quad (12)$$

Colocando em função da velocidade de corte, vem:

$$T_m = \frac{\pi DL}{1000 V_c f} \quad (13)$$

$$T = \left(\frac{C}{V_c} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (14)$$

$$T_s = \frac{\frac{\pi DL}{1000 V_c f}}{\left(\frac{C}{V_c} \right)^{\frac{1}{n}}} T_t = T_t \frac{\pi DL}{1000 f C^{1/n} V_c^{\frac{1-n}{n}}} \quad (15)$$

Por fim:

$$T_c = \frac{\pi DL}{1000 V_c f} + T_t \frac{\pi DL}{1000 f C^{1/n} V_c^{\frac{1-n}{n}}} + T_h \quad (16)$$

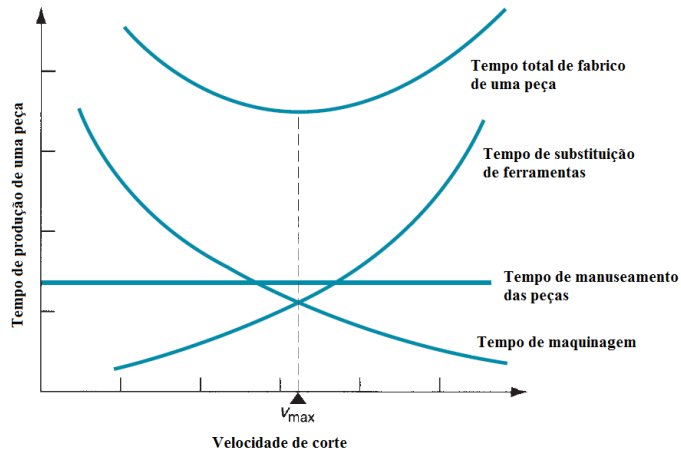


Figura 22 - Representação gráfica tempo-velocidade de corte num processo de maquinagem [23].

A determinação da velocidade de corte para a qual temos o menor tempo de produção de uma peça, consegue-se através da derivação da expressão do T_c em função da V_c :

$$\left. \frac{dT_c}{dV_c} \right|_{T_{cmin}} = 0$$

resultando na velocidade de corte e vida de ferramenta correspondentes à produtividade máxima:

$$V_p = \frac{C}{\left[\left(\frac{1}{n} - 1 \right) T_t \right]^n} \quad (17)$$

$$T_p = \left(\frac{1}{n} - 1 \right) T_t \quad (18)$$

2.3.3.2. Custo mínimo unitário

A determinação dos custos é obtida pela multiplicação dos tempos relativos ao processo de maquinagem pelo respetivo custo associado (ver Figura 23). O tempo total de fabrico de uma peça será multiplicado pelo custo de operação da máquina e operador (C_o), e tem-se ainda em conta o custo da própria ferramenta (P_t - no caso de uma pastilha é o preço da pastilha a dividir pelo número de arestas de corte), que quantifica o custo do desgaste da ferramenta no processo (uma fresa ou uma só pastilha), pelo que é dado pela fórmula:

$$C_t = \frac{T_m}{T} P_t \quad (19)$$

em que P_t é o preço da fresa monobloco ou da pastilha de corte. No caso de ferramentas afiáveis, tem-se em conta o número de afiações da ferramenta (incluindo a inicial) até que

esta não pode mais ser usada (n_g), a relação entre o tempo que se leva a afiar e a vida da ferramenta (T_g) e o custo da afiação por unidade de tempo (C_g), pelo que se tem:

$$C_t = \frac{T_m P_t}{\sum_1^{n_g} T_i n_g} + T_g C_g \quad (20)$$

A soma dos custos para uma ferramenta não afiável tem a forma:

$$C_c = C_o T_c + \frac{T_m}{T} P_t \quad (21)$$

Que em função da velocidade de corte, toma a forma:

$$C_c = C_o \left(\frac{\pi D L}{1000 V_c f} + T_t \frac{\pi D L}{1000 f C^{1/n}} V_c^{\frac{1-n}{n}} + T_h \right) + P_t \frac{\pi D L}{1000 f C^{1/n}} V_c^{\frac{1-n}{n}} \quad (22)$$

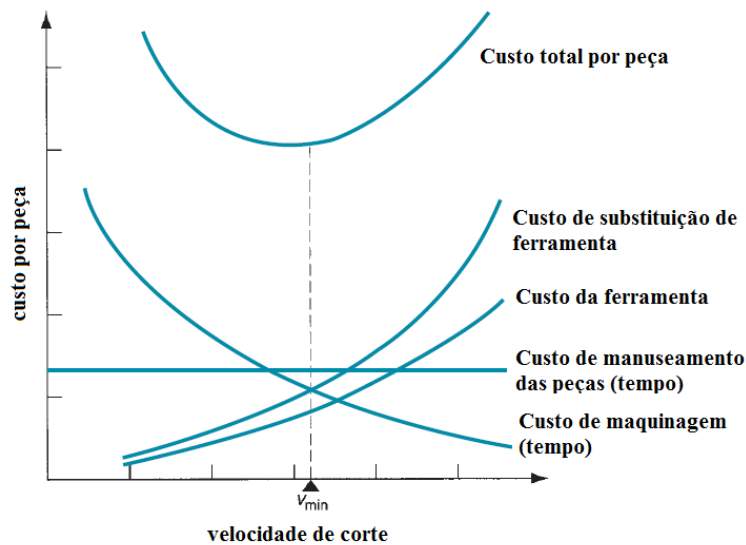


Figura 23 - Representação gráfica custos de maquinagem-velocidade de corte num processo de corte [23].

A determinação da velocidade de corte para a qual temos o menor custo total por peça, consegue-se através da derivação da expressão do C_c em função da V_c :

$$\left. \frac{dC_c}{dV_c} \right|_{C_{c_{min}}} = 0$$

Resultando na velocidade de corte e na vida de ferramenta que correspondem ao custo mínimo unitário, também conhecidas como velocidade de corte e vida de ferramenta económicas:

$$V_e = C \left[\left(\frac{n}{1-n} \right) \left(\frac{C_o}{C_o T_t + P_t} \right) \right]^n \quad (23)$$

$$T_e = \left(\frac{1}{n} - 1 \right) \left(\frac{C_o T_t + P_t}{C_o} \right) \quad (24)$$

Fazendo uma análise às equações (17), (18), (23) e (24), sabe-se que $V_e < V_p$ e, portanto, $T_e > T_p$. Os valores usuais de T_e e de T_p são geralmente de 20 e 15 minutos, respetivamente, pelo que se tem um intervalo de valores de velocidade de corte a que se pode recorrer, procurando um equilíbrio entre máxima produtividade ou mínimo custo unitário [22].

2.3.3.3. Critério do rendimento máximo

Para além dos métodos apresentados anteriormente, baseados no Modelo de Gilbert, surge ainda um critério que combina ambos com o preço de venda da peça (P_v), tendo em vista alcançar um equilíbrio entre os dois métodos. De qualquer forma, este critério situa-se sempre entre os valores limitados pelos métodos anteriormente referidos, em que o rendimento mínimo, i. e., o lucro nulo corresponde ao custo máximo unitário de produção e o lucro máximo ao custo mínimo unitário.

$$P_c = \frac{P_v - C_c}{T_c} \quad (25)$$

2.3.3.4. Influência do avanço no custo de produção

Como se sabe, o avanço afeta tanto a vida da ferramenta como o tempo de maquinagem. Analisando a influência do aumento do avanço para, por exemplo, o dobro, tem-se que o tempo de maquinagem diminui para metade, no entanto o mesmo não acontece com a vida da ferramenta, que vai diminuir numa proporção inferior. Na Figura 24 é possível observar que as curvas de custo por peça têm o valor mínimo menor para valores maiores de avanço [22].

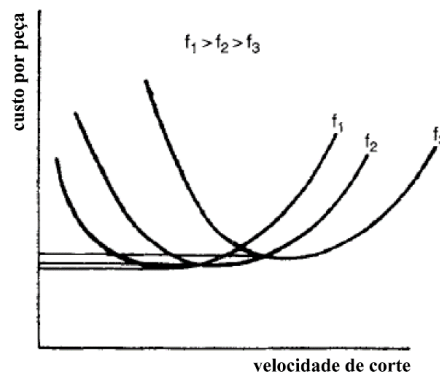


Figura 24 - Representação gráfica da influência do avanço no custo de produção [22].

Assim, sabe-se que o avanço deve ser o máximo desde que os requisitos de acabamento superficial sejam cumpridos. A expressão seguinte permite calcular a altura teórica entre o pico e o vale da superfície maquinada por uma ferramenta com raio de ponta não nulo [15] [22]:

$$R_{max} = \frac{f^2}{8r_\epsilon} \quad (26)$$

2.3.3.5. Outros métodos de otimização dos parâmetros de corte

Quando se tem disponível uma grande quantidade de dados com os quais é possível recorrer a modelos mais complexos que têm em conta muitos fatores de maquinagem tais como os parâmetros de corte, rugosidade superficial, rigidez do sistema, valores mínimos e máximos de rotação, potência de corte, maquinabilidade da matéria-prima, geometria da ferramenta, entre outros, pode-se recorrer a [22]:

- métodos de programação linear e as equações não-lineares passam por um processo de linearização através da função logarítmica;
- métodos de programação não-linear, caracterizados como determinísticos ou probabilísticos;
- lógica difusa, onde os fatores de maquinagem são definidos e avaliados como incertezas;
- modelação Z-map, em que recursos computadorizados avançados são utilizados para calcular os parâmetros de corte de forma instantânea, em função de um algoritmo que corre em paralelo com a programação CAM;
- modelação baseada em inteligência artificial (ex: redes neurais).

2.3.4. Afição de ferramentas

A afiação de ferramentas é um processo amigo do ambiente, que permite a reutilização de ferramentas após terem chegado ao fim de vida, resultando numa rentabilização do investimento inicial na compra da ferramenta. Pode apenas ser executada em algumas ferramentas monobloco e é tanto mais eficaz quanto menor for o desgaste. Em alguns casos, é possível devolver grande parte das propriedades à ferramenta, sacrificando um pequeno parcial do diâmetro e/ou comprimento. No entanto, o desgaste da ferramenta não pode ser excessivo, pois a afiação não consegue reverter danos severos nas arestas de corte. Assim, a viabilidade da afiação de uma ferramenta deve ser sempre avaliada *a priori* de modo a ser economicamente vantajosa.

O processo de afiação faz-se com recurso a equipamentos idênticos com os quais se fabricam as ferramentas novas, nomeadamente através de retificadoras convencionais ou CNC, ou por retificação eletroquímica (ECG), seguindo-se a aplicação de revestimento, caso tal se aplique.

Existem entidades que garantem a mesma vida da ferramenta após afiação, principalmente quando uma ferramenta é afiada pelo fabricante.

O custo da afiação de uma ferramenta é cerca de 50% do custo de produção de uma ferramenta nova e, seguindo padrões comuns de desgaste, consegue-se executar um mínimo de 3 afiações por ferramenta [24].

No caso das pastilhas de corte, não é possível executar afiações, pelo que é corrente reciclá-las após serem substituídas, dado que o tungsténio é um recurso finito e que a sua transformação em matéria-prima útil é conhecida.

3. Diagnóstico inicial da empresa

Neste Capítulo apresenta-se um conjunto de tópicos que se relacionam com a atividade da empresa, relevantes para o presente estudo. Assim, os materiais utilizados em maquinagem, os equipamentos disponíveis, as ferramentas e tipos de fixação utilizadas serão apresentados.

O conhecimento dos assuntos acima é estritamente necessário de modo a direcionar o estudo à atividade da entidade em causa.

3.1. Materiais utilizados

Neste tópico, são apresentados os materiais maquinados na empresa, os seus aspetos mais relevantes e respetivas propriedades físicas e mecânicas. Será usada a nomenclatura mais corrente para os apresentar. Na Tabela 7 apresentam-se as designações dos materiais utilizados na empresa segundo diferentes normas.

Tabela 7 - Designação dos materiais utilizados de acordo com diferentes normas.

Designação corrente	EN	AISI	DIN	AFNOR	W.Nr.
C1	S235JRC	1015	RSt 37-2	E 24-2	1.0122
F10	C45E / C45U	1045	Ck45	XC 48	1.1191/1.1730
PM300	40 CrMnNiMo 8-6-4	P20	40 CrMnNiMo 7	40 CMND 8	1.2738
C265	X 153 CrMoV 12	D2	X 155 CrVMo 12-1	Z 160 CDV 12	1.2379
Al5083	AW-5083	-	AlMg4,5Mn	A - G4,5MC	3.3547

3.1.1. Aço C1

O aço C1 (0,20 %C, 1,40 %Mn, 0,040 %P, 0,040 %S, 0,55 %Cu, 0,012 %N) é um aço de construção de baixo carbono, económico para aplicações estruturais. É geralmente usado na condição de estirado a frio e não é recomendado para tratamento térmico, embora pontualmente possa ser aplicada a carbonitruração ou nitruração. Internamente, o seu uso já foi praticamente substituído pelo F10, apresentado na próxima Secção, dado que a relação qualidade-preço é superior. As peças produzidas neste material, são zincadas por motivos estéticos e de proteção à corrosão. É fornecido no estado calibrado com cerca de 20-21 HRC

de dureza e em termos de maquinabilidade situa-se na categoria ISO P20 de pastilhas de corte. Na Tabela 8, apresentam-se algumas das suas propriedades físicas e mecânicas a 20°C.

Tabela 8 - Propriedades físicas e mecânicas a 20°C do aço C1.

Densidade	Coefficiente de dilatação térmica [10^{-6} m/mK]	Condutibilidade térmica [W/mK]	Módulo de elasticidade [GPa]	Tensão de cedência [MPa]	Tensão de rutura [MPa]	Extensão após rutura (%)
7,84	11,6	15,1	200	>235	400-730	8-11

3.1.2. Aço F10

O aço F10 (0,42-0,50 %C, 0,40 %Si, 0,50-0,80 %Mn, 0,040 %P, 0,040 %S) é um aço de construção de médio carbono que pode ser usado no estado natural ou sujeito a tratamento térmico. Trata-se de um aço com um largo campo de aplicações, presente em praticamente todas as aplicações do sector metalomecânico e encontra o maior volume de peças produzidas na empresa. As peças em F10 são zincadas por motivos estéticos e de proteção à corrosão. É fornecido no estado recozido com cerca de 205HB (17 HRC) de dureza e em termos de maquinabilidade situa-se na categoria ISO P20 de pastilhas de corte. Na Tabela 9, apresentam-se algumas das suas propriedades físicas e mecânicas a 20°C.

Tabela 9 - Propriedades físicas e mecânicas a 20°C do aço F10 (após TT).

Densidade	Coefficiente de dilatação térmica [10^{-6} m/mK]	Condutibilidade térmica [W/mK]	Módulo de elasticidade [GPa]	Tensão de cedência [MPa]	Tensão de rutura [MPa]	Extensão após rutura (%)
7,84	12,6	44,9	200	700-800	850-950	4-6

3.1.3. Aço PM300

O aço PM300 (0,35-0,45 %C, 0,20-0,40 %Si, 1,25-1,60 %Mn, 0,030 %P, 0,010 %S, 1,80-2,10 %Cr, 0,10-0,33 %Mo, 0,85-1,20 %Ni) é um aço superior, pré-tratado, sendo fornecido no estado tratado (têmpera e revenido), com aproximadamente 310HB (33 HRC). Este melhora o trabalho a frio, fazendo com que todos os carbonetos presentes no material se apresentem sob a forma de pequenas partículas esféricas dispersas de forma homogénea pela matriz ferrítica. Assim, em termos de maquinabilidade este material situa-se na categoria ISO P30 de pastilhas de corte.

A este material é geralmente aplicado um tratamento de nitruração após maquinagem, de modo a endurecer a superfície mantendo a tenacidade do núcleo da peça. Este processo consiste no enriquecimento superficial da peça por difusão de carbono e azoto (camadas de 0.05-1.0mm), mediante contacto do corpo com uma atmosfera controlada. Após enriquecimento, as peças são imersas rapidamente em óleo de modo a produzir uma elevada dureza superficial (>50 HRC) resistente ao desgaste. Este tratamento traz ainda maior resistência à corrosão. As peças em PM300 são aplicadas em zonas em que existe contacto ou impacto dinâmico entre corpos. Na Tabela 10, apresentam-se algumas das suas propriedades físicas e mecânicas a 20°C.

Tabela 10 - Propriedades físicas e mecânicas a 20°C do aço PM300 (após TT).

Densidade	Coefficiente de dilatação térmica [10 ⁻⁶ m/mK]	Condutibilidade térmica [W/mK]	Módulo de elasticidade [GPa]	Tensão de cedência [MPa]	Tensão de rutura [MPa]	Extensão após rutura (%)
7,80	12,7	28	205	900	1020	17

3.1.4. Aço C265

O aço C265 (1,45-1,60 %C, 0,10-0,60 %Si, 0,50-0,60 %Mn, 0,030 %P, 0,030 %S, 11,00-13,00 %Cr, 0,70-1,00 %Mo, 0,70-1,00 %V) é um aço ferramenta, mais vulgarmente utilizado para ferramentas de trabalho a frio. Possui muito boa resistência ao desgaste abrasivo, mas é limitado no que concerne à resistência à fratura. Sendo a base das ferramentas de trabalho a frio, existem inúmeras vantagens na sua utilização, como em séries de média duração, em que o principal mecanismo de falha é o desgaste abrasivo, com baixo risco de fragmentação ou fissuração. É usualmente aplicado em matrizes de corte, guias de punções e outras peças que contactem, em esforço, com outras.

Fornecido com 210HB (18 HRC) no estado recozido, em termos de maquinabilidade insere-se no grupo ISO P20 da classificação de pastilhas de corte. É geralmente tratado termicamente após maquinagem com têmpera e revenido, sendo capaz de atingir durezas entre os 54-62 HRC. Na Tabela 11, apresentam-se algumas das suas propriedades físicas e mecânicas a 20°C, após tratamento térmico.

Tabela 11 - Propriedades físicas e mecânicas a 20°C do aço C265 (após TT).

Densidade	Coefficiente de dilatação térmica [10 ⁻⁶ m/mK]	Condutibilidade térmica [W/mK]	Módulo de elasticidade [GPa]	Tensão de cedência [MPa]	Tensão de rutura [MPa]	Extensão após rutura (%)
7,70	11,7	20	210	1650 (50HRC) - 2200 (62HRC)	-	-

3.1.5. Liga de alumínio Al5083

A liga de alumínio Al5083 (0,4 %Si, 0,4 %Fe, 0,1 %Cu, 0,4-1,0 %Mn, 4,0-4,9 %Mg, 0,25 %Zn, 0,15 %Ti, 0,05-0,25 %Cr, restante Al) é uma liga de alumínio-magnésio-manganês da série 5000, conhecido pela sua boa desempenho em qualquer ambiente envolvente, boa maquinabilidade e alta resistência mecânica e à corrosão, não necessitando de tratamentos térmicos para obter as propriedades de trabalho que o caracterizam. O material é fornecido no estado laminado (H111), encruando um pouco, e com 75HB (fora da escala HRC). Em termos de maquinabilidade insere-se no grupo ISO N8 da classificação de pastilhas de corte.

Todas as peças produzidas neste material passam por um processo de anodização, que consiste na criação de uma película de óxido decorativa, antioxidante e anticorrosiva.

Peças em Al5083 são maioritariamente aplicadas em partes móveis dos equipamentos ou suscetíveis a ajuste durante o seu funcionamento. O uso deste material traz vantagens a níveis estéticos e mássicos, no entanto é menos resistente ao desgaste e o seu custo é superior. Na Tabela 12, apresentam-se algumas das suas propriedades físicas e mecânicas a 20°C.

Tabela 12 - Propriedades físicas e mecânicas a 20°C do Al5083.

Densidade	Coefficiente de dilatação térmica [10^{-6} m/mK]	Condutibilidade térmica [W/mK]	Módulo de elasticidade [GPa]	Tensão de cedência [MPa]	Tensão de rutura [MPa]	Extensão após rutura (%)
2,70	25	121	72	110-125	260-345	12-15

3.1.6. Polióxido de Metileno (POM)

POM ou poliacetal é um polímero termoplástico utilizado em peças que requerem elevada rigidez, resistência, baixo atrito, estabilidade dimensional (quando comparado com outros polímeros), antiaderência, boa maquinabilidade, bom rácio resistência-peso, a um custo relativamente baixo (quando comparado com ligas metálicas). Possui uma dureza entre 78-84 ShD.

É utilizado em peças de substituição principalmente aplicadas em guiamento de peças macias pois são de fácil obtenção e não riscam os materiais em contacto, como por exemplo, o alumínio.

Tabela 13 - Propriedades físicas e mecânicas a 20°C do POM.

Densidade	Coefficiente de dilatação térmica [10^{-6} m/mK]	Condutibilidade térmica [W/mK]	Módulo de elasticidade [GPa]	Tensão de cedência [MPa]	Tensão de rutura [MPa]	Extensão após rutura (%)
1,41	110	0,31	2,5	88	60	30

3.2. Equipamentos disponíveis

Nas instalações da empresa, estão disponíveis diversos equipamentos para a maquinação de peças, entre elas: três centros de maquinação CNC (ver Figura 25), uma furadora vertical, uma roscadora pneumática, uma retificadora convencional e um torno horizontal. Sob interesse deste tema, apenas será feita uma apresentação mais especificada dos centros de maquinação CNC.



Figura 25 - Centros de maquinação: DMC 63V (CNC1 e 2) (à esquerda); e Microcut M1050 (CNC3) (à direita).

Os centros de maquinagem são utilizados para a produção de grande parte das peças constituintes dos produtos da empresa. Tratam-se de máquinas com 3 eixos motores, possuindo uma mesa com ranhuras em T para fixação de componentes de aperto, nomeadamente prensas, gabarits e placas especiais. Todos possuem um carrossel com 24 slots para acoplamento de ferramentas do tipo ISO40. Apenas as ferramentas mais usadas estão montadas permanentemente, estando entre elas ferramentas de fresagem, furação e de centragem. Quando é necessário acoplar uma ferramenta diferente, troca-se por outra que esteja no carrossel e que não seja necessária naquele processo.

Por estratégia da empresa e por razões de capacidade de maquinagem, a CNC3 destina-se, para além das peças regulares, à produção de peças de maior porte ou à produção de um número superior de peças em simultâneo, dada a presença de uma placa multi-furo que auxilia a fixação de diversos blocos de matéria-prima (ver Figura 26).



Figura 26 - Placa multi-furo presente na CNC3, com prensa de aperto acoplada.

O fluido de corte utilizado é uma solução de água e um óleo semi-sintético solúvel, Castrol Hysol T15, numa percentagem de 5% V/V.

Na Tabela 14, apresentam-se as especificações dos centros de maquinagem (ver Figura 26) disponibilizadas pelos respetivos fabricantes.

Tabela 14 - Características dos centros de maquinagem.

	Deckel Maho - DMC 63V	Microcut M1050
Quantidade	2	1
Designação interna	CNC1 e CNC2	CNC3
Número de eixos motores	3	3
Rotação máxima do cabeçote [rpm]	8 000	12 000
Tamanho da mesa [mm]	800x500	1200x600
Deslocamento em X [mm]	630	1050
Deslocamento em Y [mm]	500	600
Deslocamento em Z [mm]	500	600
Capacidade máxima da mesa [kg]	500	800
Potência do cabeçote (S2**/S1*) [kW]	13/9	15/11
Binário (S2**/S1*) [Nm]	83/57	95.5/70
Rendimento (%)	-	90%
Consumo de energia [kVA]	30	-
Velocidade de avanço máxima [m/min]	30	30
Resolução do posicionamento [mm]	0.01	0.01
Repetibilidade [mm]	-	+/- 0.01
Tipo de guiamento linear	Rolos	Rolos
Controlador	Heidenhain TNC 426	Fanuc alphaT12

*S1 - regime contínuo; **S2 - regime limitado a 30 minutos de duração

3.3. Ferramentas utilizadas

Para ser possível dar início a qualquer ação de melhoria relativamente à utilização de ferramentas na fresagem CNC, é necessário registar e recolher toda a informação existente quanto às ferramentas de corte utilizadas na empresa. Desta forma, a recolha dos dados referidos anteriormente foi feita junto da administração e dos operadores dos centros de maquinaria da empresa, e dos fornecedores das próprias ferramentas. A primeira parte forneceu registos de compras e stocks disponíveis; a segunda informou qual a aplicação dada e frequência de utilização de cada ferramenta; e a terceira parte, numa fase inicial, forneceu informação técnica incluindo as razões para o uso das respetivas ferramentas, tendo em conta a área de atuação da empresa.

Até à data, sempre que alguma ferramenta apresentava um desgaste anormal, o fornecedor correspondente era contactado e questionado sobre o assunto, visto que os operadores aplicavam os parâmetros aconselhados pelos fornecedores ou uma razão aproximada. Caso fosse necessário testar uma ferramenta diferente, o fornecedor enviaria o produto novo e os operadores testariam a ferramenta nas condições indicadas.

Muitas das vezes, os parâmetros de corte aconselhados pelos fabricantes ultrapassavam as capacidades motoras dos equipamentos presentes na empresa, pelo que é recorrente, baixar a velocidade de rotação do cabeçote para um valor abaixo do limite e, na mesma proporção, reduzir a velocidade de avanço, visto estarem diretamente relacionados. Segundo os operadores é um método recorrente e com resultados satisfatórios. Geralmente não se trabalha à rotação máxima do equipamento, de modo a não provocar desgaste excessivo da máquina.

As ferramentas utilizadas na empresa foram selecionadas pelo trio operadores-fornecedores-administração tendo em vista a utilização de ferramentas que possam maquinar todos os materiais referidos na Secção 3.1, com uma produtividade e vida da ferramenta aceitáveis.

Sendo assim, no Anexo A listam-se as ferramentas de corte utilizadas em fresagem aquando do início do desenvolvimento deste trabalho, identificando-as pela sua referência de fabricante, tipologia e em que operações são aplicadas. São ainda apresentados os preços, respetivos fornecedores, características técnicas e parâmetros de corte fornecidos pelos mesmos (Anexos B e C). De notar que a nomenclatura interna à empresa pode não corresponder aos termos técnicos mais corretos, nomeadamente a designação de “disco” como sendo referente às fresas de pastilhas e “fresas” para as fresas monobloco. Mesmo assim, optou-se por manter esse termo no decorrer do trabalho, de modo a tornar mais eficaz a comunicação dos resultados deste estudo à empresa.

Foram avaliadas as circunstâncias que levam à troca de ferramentas. Assim, as razões apresentadas pelos operadores para troca de ferramenta de acabamento são as seguintes:

- Observação da aresta de corte danificada;
- Tolerâncias de corte esperadas não cumpridas;
- Acabamento superficial não esperado;
- Projeção de apra queimada (quando não é suposto);
- Dificuldade na remoção de material (máquina em esforço anormal);
- Vibração excessiva (deteção sonora);
- Quebra da ferramenta.

No que toca a ferramentas utilizadas para operações de desbaste, estas são utilizadas até à falha, i.e., até ao momento em que deixam de remover material ou quando o material começa a apresentar rebarba, pois indica que a aresta de corte já não está a cortar o material, mas apenas a deformá-lo plasticamente.

Dada a inexistência de auto-compensação do desgaste da ferramenta (função ativa presente em alguns controladores CNC), quando o operador verifica que esta está a remover material fora de cota, mas que ainda tem capacidade de continuar a operar, o ajuste é feito manualmente e inserido no *software* CAM.

Todas as ferramentas são utilizadas indistintamente em todos os materiais. Entre os aços, os parâmetros de corte mantêm-se e são apresentados nos Anexos B e C. Quanto à maquinagem do Al5083 e do POM, os operadores aumentam a velocidade de avanço 150% (RPM na respetiva proporção) relativamente aos parâmetros usados nos aços.

3.4. Tipos de fixação utilizados

Todos os centros de maquinagem presentes possuem um cabeçote/árvore compatível com o cone ISO40 ou equivalentes (SK40, NT40, BT40). A norma ISO40 refere-se apenas ao cone, pelo que existem diferentes soluções construtivas para acoplar as ferramentas desejadas. No caso da empresa em questão, usam-se 3 tipos distintos de cones (ver Figura 27): porta-piças (ER32), para fresas monobloco com 3-20 mm de diâmetro; de auto-aperto (C32), para alguns casos especiais de diâmetros intermédios; e com bucha roscada (DIN 6357-B), para fresas de pastilhas com 16-40 mm de diâmetro na zona de acoplamento (podem possuir maiores dimensões de corte).

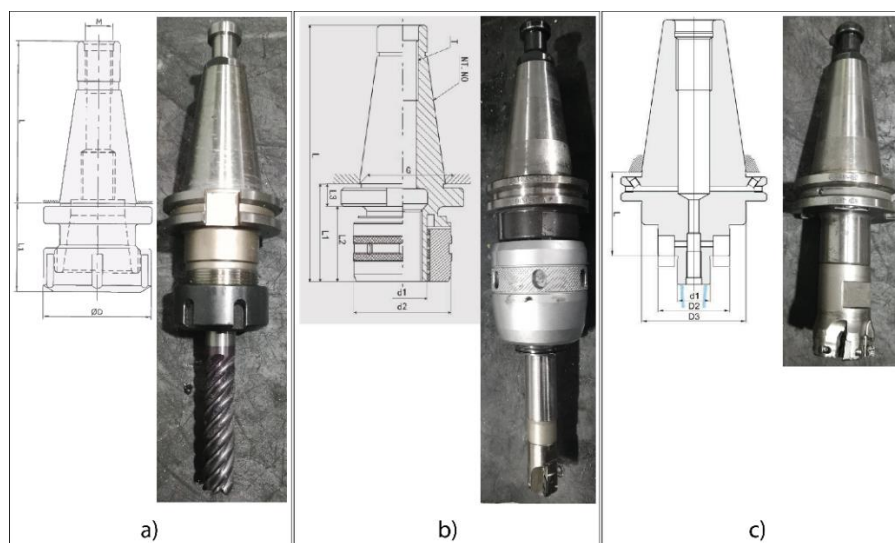


Figura 27 - Tipo de cone ISO40 usado na empresa: a) porta-piças; b) de auto-aperto; e c) com bucha roscada.

Dos cones presentes na Figura 27, destaca-se o cone porta-piças pois é o mais utilizado na empresa, visto ser aplicado na maior parte das ferramentas utilizadas. No acoplamento de ferramentas através deste cone, procura-se maximizar a força de aperto transferida para a ferramenta. Uma força de aperto alta amortece a vibração, permitindo maiores rotações e menor batimento. Minimizando o batimento, tem-se acabamentos melhores, vida da ferramenta mais longa, desgaste regular e reduz-se ainda a probabilidade de falhar tolerâncias aquando da maquinagem, prevenindo o desperdício de peças mal produzidas.

Existem diversos tamanhos e estilos de pinças, associados ao cone usado, sendo capazes de abranger diversos diâmetros de ferramenta. Geralmente, numa pinça podem ser aplicados até 2 diâmetros diferentes, por exemplo 10 e 11 mm, sendo que a aplicação tem mais sucesso com a ferramenta de diâmetro maior, pois o aperto terá maior rigidez. Os cones usados têm a

codificação ER32, que correspondem ao código ER32 de pinças, em que o tamanho e configuração exteriores são iguais, independentemente do diâmetro da ferramenta para qual a pinça corresponde.

Pinças de tamanhos superiores, por exemplo ER40, quando aplicadas nos mesmos diâmetros de ferramenta que as ER32, conferem uma melhor estabilidade à mesma, por oferecerem maior rigidez no acoplamento.

Quando se troca de ferramenta, a pinça e o cone devem ser limpos e secos, de modo a que o contacto entre superfícies seja maximizado e assim, aumentar o atrito entre corpos e prevenindo movimentos relativos indesejáveis. Da mesma forma, deve-se manter as pinças sem oxidação, de modo a evitar irregularidades no aperto.

A pinça deve agarrar a fresa em toda a superfície da haste ou em, pelos menos, 2/3 da mesma. Após montada, os espaçamentos na pinça devem ser todos iguais, pois demonstra que os esforços serão igualmente distribuídos pela ferramenta, melhorando a suo desempenho. De notar que um batimento, geralmente causada por montagem deficiente, de 0.025 mm pode causar até 10% na redução da vida da ferramenta.

Comparando este com outros tipos de aperto, encontra-se no uso de pinças uma boa combinação entre preço-leque de aplicação-desempenho, pois um cone pode ser usado numa larga gama de ferramentas. Da mesma forma, quando montada corretamente e como esta solução é simétrica em relação ao eixo de rotação, obtém-se valores baixos de batimento, permitindo bons acabamentos superficiais e cotas com tolerâncias até +/-0.01 mm.

3.5. Custos indiretos na substituição de ferramentas

Para além dos custos diretos das ferramentas, existem ainda os custos associados à mão-de-obra do operador no manuseamento, montagem, preparação e troca das ferramentas.

Assim sendo, cronometraram-se 4 tempos gastos em diferentes operações inerentes à substituição de ferramentas, realizadas por operadores experientes e registaram-se na Tabela 15. De seguida, calculou-se o tempo médio e respetivo custo, tendo em conta o custo de mão-de-obra de 30€/hora.

Analisando a informação na Tabela 15, é possível retirar algumas conclusões quanto a possíveis otimizações:

- A hipótese de investir num carrossel com maior número de *slots* é excluída, pois o custo associado à troca de cones é reduzido. Da mesma forma, os carrosséis já possuem as ferramentas mais utilizadas diariamente, pelo que a troca de cones apenas acontece quando se necessita de uma ferramenta especial;
- Possuir ferramentas específicas em cada CNC não é muito proveitoso, pois a poupança de tempo que se ganha na ausência da troca de ferramentas não compensa a perda de flexibilidade em produzir apenas peças específicas num determinado centro de maquinagem.

De notar que, na maior parte das vezes, as operações de manutenção das ferramentas são executadas durante ciclos de maquinagem, de modo a aproveitar o tempo entre intervenções necessárias na maquinagem.

Tabela 15 - Tempos e custos associados a operações inerentes à substituição de ferramentas.

Ação	Duração [s]	Duração média [s]	Custo [€]
Troca de cone porta-pinças no carrossel	5	8	0.06
	9		
	9		
	8		
Troca de fresa monobloco por outra igual (mantendo a mesma pinça no cone)	134	130	1.08
	117		
	128		
	140		
Troca de fresa monobloco por outra de diâmetro não compatível na mesma pinça	177	187	1.56
	192		
	190		
	187		
Troca de uma pastilha	56	47	0.39
	50		
	35		
	46		

(Página propositadamente em branco)

4. Registo do consumo de ferramentas

Para constituir um argumento forte quanto ao consumo de ferramentas é necessário encontrar um método para registo de dados reais. Nesse sentido, uma das primeiras ações deste trabalho consistiu na criação de um método para registar o consumo de ferramentas, de modo a procurar retirar o máximo de dados possíveis para análise. Sendo assim, criou-se uma tabela para registo (ver Anexo D), por número da ferramenta, da data da primeira utilização, data e motivo de troca (desgaste normal, desgaste anormal ou quebra), deixando um campo para observações, onde o operador que efetua a substituição poderá dar mais alguma informação quando o motivo de troca da ferramenta fosse desgaste anormal ou fratura. Este último campo ajudará a focar o estudo em algum acontecimento irregular. Associado a cada linha da tabela, existe um código do tipo *CNCX_Y*, em que X (1, 2, 3) se refere à denominação interna dos centros de maquinagem e Y (1, 2, 3, etc.) à numeração do item na tabela. Este código será escrito numa etiqueta autocolante a colocar num saco onde a ferramenta será armazenada para posterior análise, como mostrado na Figura 28.

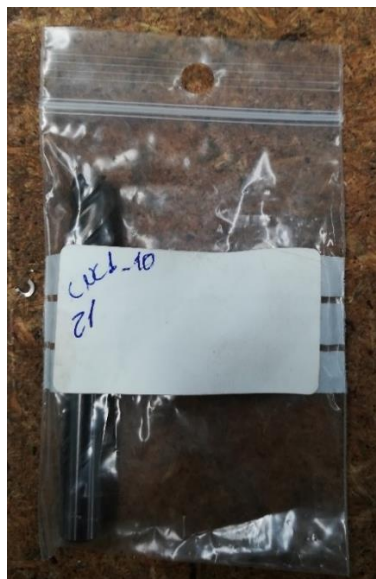


Figura 28 - Exemplo de saco para recolha de ferramenta substituída.

Para além da tabela referida anteriormente, criou-se uma lista (ver Anexo A) onde constam todas as ferramentas utilizadas na empresa no momento de iniciação da recolha de dados, que foi sendo atualizada à medida que se acrescentava alguma ferramenta à produção ou deixava

de ser utilizada. Estes dois acontecimentos, embora esporádicos, deram-se pois já estariam planeados *a priori* do início deste estudo.

Na lista de ferramentas registou-se cada ferramenta pela sua designação prática, referência, aplicação (desbaste, acabamento ou ambos), tipologia (fresa monobloco ou de pastilhas), enquadramento (uso esporádico, em uso, para teste, fora de uso), fornecedor e preço. A cada uma foi atribuída um número de identificação para rápida referência.

Para registo dos dados, um par de cada um dos elementos suprarreferidos foi entregue a cada um dos operadores dos centros de maquinagem.

Levar a cabo a criação da lista de ferramentas, requereu a consulta de uma lista existente na empresa, mas que não estava atualizada, pelo que foi necessária a procura de alguma informação em faturas antigas. Após implementação deste método, a empresa passou a ter um registo organizado e atualizado das ferramentas em uso, bem como um procedimento de registo do consumo de ferramentas que pudesse ser utilizado para estimar custos periodicamente, frequência de substituição de ferramentas, prever stocks necessários bem como o custo de reposição, entre outros.

Aquando do início da recolha de dados, os operadores foram questionados sobre causas comuns de desgaste anormal que são difíceis de contornar. A primeira situação refere-se à maquinagem de alumínio, que provoca menos desgaste do que o aço, dado ser um material mais macio. No entanto, provoca apana aderente por ser mais dúctil e pelas ferramentas não serem especificamente adequadas para este material. Mesmo com a adaptação dos parâmetros de corte, é recorrente acontecer este fenómeno, o que carece de um cuidado superior por parte do operador. Na ocorrência desta situação, é normal remover-se a apana aderente e verificar se as arestas de corte da ferramenta estão danificadas. Caso não estejam, a ferramenta volta a ser usada.

A segunda situação está relacionada com a maquinagem dos aços. Todos os parâmetros de corte são idênticos, independentemente do aço em questão, o que não é ideal pois apesar de se inserirem em categorias de maquinagem próximas, existem diferenças que provocam desgastes específicos, nomeadamente a presença de inclusões no aço F10.

A questão de estabelecer grupos de parâmetros de corte específicos para cada aço torna-se difícil de resolver, até à data, pois a empresa não tem conhecimento de nenhum recurso capaz de implementar todos os dados necessários de forma expedita. A prática corrente consiste num ajuste manual por parte do operador, tendo por base a sua experiência e o material a maquinar.

4.1. Interpretação de resultados

Após 2 meses desde a entrega das folhas para recolha de dados sobre a substituição de ferramentas, a análise das fresas monobloco e de pastilhas usadas permite constatar que as fresas monobloco apresentam, na sua generalidade, um desgaste progressivo (Figura 30 - b) e c)), havendo poucos casos de desgaste anormal ou de fratura (Figura 30 - a)). No entanto, estes casos dão-se pelas ferramentas serem usadas, por vezes, em operações de desbaste, em zonas de diâmetro reduzido. Relativamente às pastilhas verificaram-se lascamentos e até fraturas (ver Figura 29), visto serem usadas até não serem capazes de remover mais material.

No mesmo período, a proporção de fresas monobloco-pastilhas substituídas é de 1:7,73 (15-116). Este dado ajuda a perceber que as pastilhas são trocadas com muito maior frequência, pelo motivo de estas serem utilizadas em condições mais severas. É estratégia da empresa utilizar as fresas monobloco maioritariamente para operações de acabamento, removendo o mínimo de material possível e assim prolongando a vida das mesmas. Este método traz

vantagens económicas, visto o custo das fresas monobloco ser bastante superior ao das pastilhas (mesmo considerando que uma fresa consome várias pastilhas).

Tendo sido feito um diagnóstico inicial da empresa e registados os consumos de ferramentas durante um período definido, foram criadas as bases para elaborar uma abordagem ao problema de otimização das ferramentas.

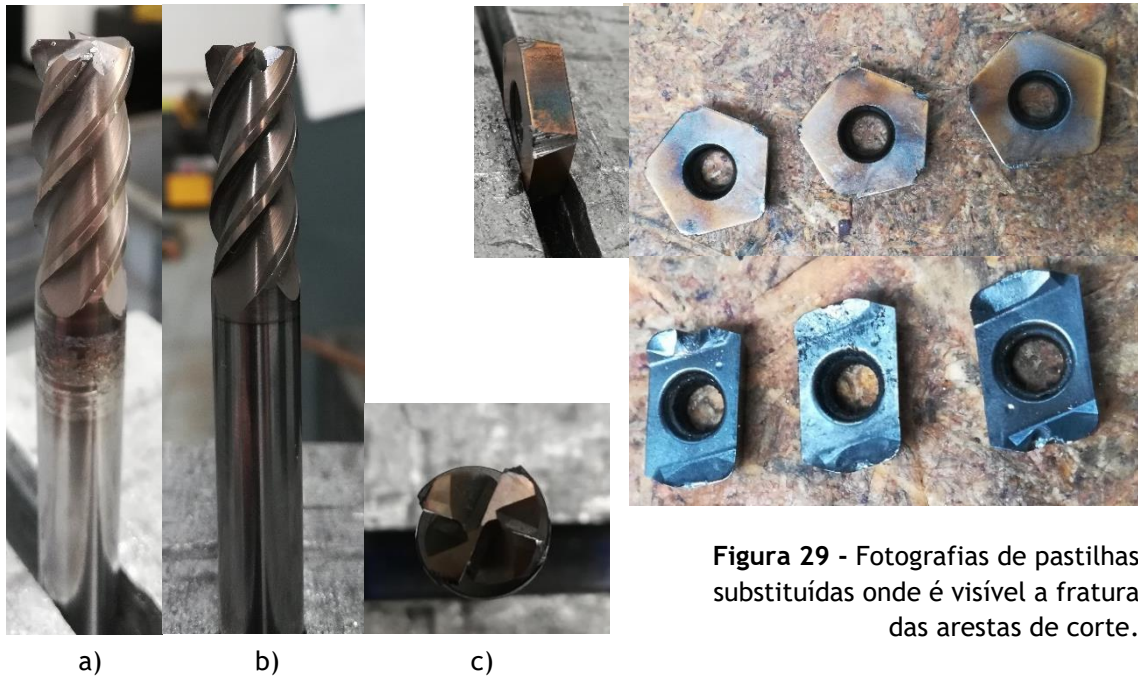


Figura 29 - Fotografias de pastilhas substituídas onde é visível a fratura das arestas de corte.

Figura 30 - Exemplos de fresas monobloco substituídas: a) com arestas de corte fraturadas; b) com desgaste reduzido (vista lateral); e c) com desgaste reduzido (vista de topo).

4.2. Abordagem inicial dos resultados

Sabe-se que a produção de peças na empresa em questão é unitária ou, esporadicamente, de séries muito pequenas (máximo de 15-20 peças). Desta forma, torna-se difícil retirar dados úteis da programação CAM de produção das peças, pois seria um trabalho muito extensivo para poder formular um padrão aplicável a cada ferramenta. A contabilização do tempo de maquinagem de cada ferramenta, avaliando as programações CAM, seria um método a utilizar para poder aferir a vida das ferramentas, tendo em conta as condições de corte praticadas na empresa, no entanto, dado que nem todas as operações são programadas usando o *software* CAM, alguns dados podiam não corresponder à realidade. Apenas as operações de acabamento, de pré-acabamento e de longa duração são programadas na íntegra, sendo que algumas operações de desbaste são controladas manualmente.

Segundo os operadores, as fresas monobloco têm tido desempenhos constantes ao longo do tempo e melhores quando comparadas às ferramentas utilizadas anteriormente (houve uma atualização de ferramentas na passagem de 2019 para 2020, anterior ao início do estudo). Sabendo que os parâmetros de corte utilizados são similares aos aconselhados pelos fabricantes, juntamente com o facto de os desgastes apresentados serem progressivos, pode-se concluir que as fresas monobloco estão a ser utilizadas corretamente. Da verificação

efetuada, apenas quando as RPM aconselhadas se aproximam do limite do equipamento é que se recorre a uma diminuição proporcional das RPM e conseqüente velocidade de avanço.

De qualquer forma, através de testes poderia ser possível otimizar os parâmetros de corte das ferramentas monobloco usadas na produção específica da empresa, tentando aplicar métodos de otimização da velocidade de corte, tal como descrito na Secção 2.3.3, mas traria custos elevados dado o elevado preço das fresas em metal duro e respetivas longas vidas de ferramenta.

Assim sendo, optou-se por explorar o tema da afiação das fresas monobloco utilizadas, tendo em vista a rentabilização das mesmas que, fruto de serem em grande parte aplicadas apenas em operações de acabamento, vêem-se substituídas com pequenos desgastes. Por apresentarem desgastes reduzidos e localizados, as fresas monobloco podem ser mais facilmente afiadas, a custos também mais baixos, sem comprometerem as dimensões das ferramentas em grande escala. No entanto, o desgaste destas ferramentas terá de ser mais vigiado, pois valores excessivos podem prejudicar a rentabilização ou não aplicabilidade do processo.

Quanto às pastilhas, a recolha de dados de corte indica que, em alguns casos, os valores usados são muito distantes dos aconselhados, resultando em taxas de remoção de material e vidas de ferramenta que não majoram o seu potencial. Sendo que as operações de desbaste não têm de garantir um bom acabamento superficial, os parâmetros de corte devem ser otimizados no sentido de reduzir os custos da operação e/ou de maximizar a produtividade. Em paralelo, os dados de corte a utilizar devem respeitar os limites físicos dos equipamentos e permitir um desempenho estável das pastilhas, evitando desgastes prematuros.

A otimização dos parâmetros de corte, considerando os materiais utilizados e tendo como objetivo atingir a máxima produtividade possível sem induzir num aumento dos custos de produção, aparentou ser a direção ideal a tomar para atingir bons resultados. Para tal, tornou-se necessário estruturar uma metodologia que pudesse ter uma aplicação no panorama das ferramentas utilizadas, partindo da análise de ferramentas chave, i.e., mais utilizadas nos processos de maquinaria, pois seria necessário um período muito extenso para examinar cada ferramenta individualmente.

O facto de as pastilhas terem preços muito inferiores aos das fresas resulta num custo de utilização por minuto muito inferior. Assim sendo, o processo de maquinaria deve recorrer ao uso de pastilhas quanto mais possível. De qualquer forma, num processo de otimização é necessário ter em mente que o balanço da redução da vida da ferramenta e do tempo de produção não pode ser feito de forma direta, i.e., a redução de 1 minuto na vida da ferramenta raramente corresponde à redução de 1 minuto do tempo de produção.

De forma a realizar uma análise adequada, deve-se recorrer a modelos otimizados para obtenção dos parâmetros de corte ideais. No caso em estudo, para ser possível obter uma resposta em tempo útil, deu-se ênfase à velocidade de corte, visto ser o parâmetro de corte com mais peso tanto na produtividade como na vida da ferramenta.

Existe uma tendência em preservar as pastilhas face ao potencial de maquinaria que possuem. Há um estigma que “pastilhas que têm maior durabilidade são melhores”, no entanto pode não se estar a tirar proveito das suas capacidades. Outro ponto a ter em conta, é a preservação dos equipamentos, pois quanto mais altos os parâmetros de corte, mais alta é a demanda do equipamento.

No panorama de custos de maquinaria, os custos de ferramentas são baixos face a outras parcelas, pelo que convém explorá-las ao máximo.

5. Otimização da utilização das pastilhas

Em busca da otimização da utilização das pastilhas de corte aplicadas em operações de desbaste, estas serão testadas experimentalmente de forma a encontrar e validar parâmetros de corte que maximizem a produtividade das operações de desbaste. Terá de ser tida em conta a maquinagem de diferentes materiais e a representatividade de cada um na produção de peças na empresa, de modo a focar o estudo na ordem decrescente dos materiais mais usados.

Dada a quantidade de pastilhas de corte usadas, será impraticável efetuar testes experimentais para todos os casos, pelo que se terá de encontrar um método que consiga ser capaz de validar resultados transversais a todas as fresas de pastilhas.

Assim sendo, nesta Secção começa-se por apresentar o planeamento de testes experimentais, tendo por base uma análise empírica sobre os parâmetros de corte a usar. De seguida, descrevem-se diversos testes executados com o objetivo de validar os dados empíricos estimados. Posteriormente comparam-se e estimam-se parâmetros para a maquinagem de todos os materiais usados na empresa e apresenta-se uma análise para implementação dos mesmos nos centros de maquinagem.

Por fim, estima-se o balanço resultante calculado tendo em conta os parâmetros de corte usados *a priori* na empresa e os parâmetros ótimos determinados, tanto de um ponto de vista económico como de aumento da produtividade.

5.1. Estudo dos parâmetros a aplicar nos testes experimentais

Como estudado anteriormente, existem modelos que visam otimizar os parâmetros de corte com o objetivo de alcançar a máxima produtividade ou o custo mínimo unitário.

Tendo por base os modelos de Gilbert referidos na Secção 2.3.3, é necessário conhecer o par de parâmetros n e C , provenientes da Lei de Taylor (equação (8)) aplicada a cada combinação ferramenta/matéria-prima. A utilização destes métodos permite obter valores ótimos para cada enquadramento desejado. Sabe-se que a Lei de Taylor foi determinada para operações de torneamento, em que o corte é constante, ao contrário do que acontece nas operações de fresagem. Nestas a ação da ferramenta é intermitente causando mais desgaste através do choque, mas também menores temperaturas de trabalho, para as mesmas condições, dado existirem períodos sem contacto e de conseqüente arrefecimento. Não sabendo qual o peso de cada um dos fatores apresentados, para uma análise desta complexidade, assume-se que a adoção da Lei de Taylor como ferramenta de otimização da

velocidade de corte induz um erro negligenciável, permitindo a sua utilização no caso em concreto.

É fundamental realizar testes experimentais com o objetivo de validar as análises efetuadas, usando a calculadora, e assim poder aplicar a mesma analogia em todas as ferramentas utilizadas na empresa, visto que analisar as ferramentas individualmente seria um processo muito demorado e difícil de conciliar com a normal atividade da empresa.

Contabilizando todas as ferramentas, todos os materiais e executando no mínimo 3 testes por combinação, de modo a ser possível elaborar a lei de Taylor com uma aproximação aceitável, centenas de testes teriam de ser executados. Assim sendo, foi imprescindível encontrar um método empírico, do qual se pudesse retirar dados aproximados aos que seriam obtidos em testes experimentais.

Um recurso encontrado para determinação de parâmetros de corte e de uma estimativa da vida da ferramenta foi a *calculadora da velocidade de corte* disponível na página *online* da *Sandvik Coromant* [25]. Esta aplicação limita a sua aplicação a pastilhas de corte e, entre outros parâmetros, devolve um intervalo de valores para a velocidade de corte e respetiva vida da ferramenta (definida a 0,2 mm de desgaste de flanco), em função da geometria, tipo e categoria da pastilha, da dureza do material a maquinar, do tipo de refrigeração, do ângulo de ataque da ferramenta, da largura de corte e do avanço por dente. Os restantes dados de corte requeridos não afetam o gráfico T-V_c fornecido. Na Figura 31 é possível observar um exemplo de gráfico de valores aconselhados através da calculadora, onde o ponto mais à esquerda da curva corresponde ao valor da velocidade de corte para a qual se tem a maior vida útil e o valor mais à direita corresponde à maior taxa de remoção de material.



Figura 31 - Exemplo de apresentação de um gráfico T-V_c fornecido pela calculadora da velocidade de corte [25].

Tendo em conta as razões acima enunciadas, a calculadora será utilizada para prever velocidades de corte a ensaiar nos testes experimentais, de acordo com as vidas de ferramenta estimadas pela mesma. Da mesma forma, ajudará a estabelecer limites máximos de velocidades de corte recomendadas, visto procurar-se a produtividade máxima. Na Secção seguinte, o processo de análise empírica é explicado.

5.1.1. Análise empírica

Primeiramente, das ferramentas de pastilhas listadas (ver Anexo A), prosseguiu-se com a análise de todas as ferramentas em uso (exceção das pastilhas nº9 e nº10 que são utilizadas apenas para a execução de caixas de parafusos de cabeça cilíndrica, tendo menos relevância para o estudo).

De seguida fez-se uma comparação direta entre os parâmetros de corte usados na empresa e os aconselhados pelos fabricantes/fornecedores, fazendo uso da calculadora anteriormente referida para aferir as vidas de cada ferramenta segundo cada conjunto de parâmetros. Esta análise (Anexo D) permitiu comparar, de forma empírica, o desempenho praticada das pastilhas *versus* a recomendada para os dois materiais mais usados, traduzida pela taxa de remoção de material, vida da ferramenta e custo de utilização. Para a realização desta análise, foi necessário averiguar os materiais constituintes das pastilhas de cada fabricante e encontrar um equivalente de entre os materiais disponíveis na calculadora da *Sandvik Coromant*, pois os fabricantes/fornecedores de ferramentas da empresa não trabalham com esta marca. Visto todas as pastilhas terem um revestimento à base de nitretos de titânio ou titânio e alumínio, com um leque de utilização que abrange, no mínimo, todo o grupo ISO P de materiais (ver Tabela 1), podendo ser utilizadas com ou sem fluido de corte, definiram-se como sendo mais adequados os materiais das classes GC1130 e GC4330.

De referir que a calculadora da *Sandvik Coromant* apresenta um primeiro ponto que corresponde à velocidade de corte aconselhada para obter um equilíbrio entre produtividade e vida da ferramenta. Se este ponto se aproximar aos parâmetros recomendados pelo fabricante/fornecedor, então pode-se concluir que a escolha do material equivalente é correta. Assim, é possível enquadrar os materiais e os respetivos parâmetros.

Com a comparação entre os parâmetros praticados e os recomendados aferiu-se que:

- Nenhuma pastilha estava a ser utilizada nas condições aconselhadas pelos fabricantes/fornecedores
- Os valores de taxa de remoção de material (Q) eram mais baixos usando os parâmetros da empresa;
- As vidas das pastilhas eram mais longas usando os parâmetros da empresa;
- Salvo um caso (ferramenta nº32), o custo de utilização era mais baixo usando os parâmetros da empresa.

Perante o cenário analisado, questionou-se sobre a razão de os parâmetros praticados na empresa serem diferentes dos recomendados pelos fabricantes. Segundo os operadores, os parâmetros praticados são mais conservadores para a preservação dos equipamentos. No entanto, é necessário fazer uma análise de modo a verificar se os parâmetros aconselhados realmente afetam a integridade dos centros de maquinagem. Esta análise é apresentada mais à frente neste estudo.

Recorrendo à comparação feita, decidiu-se utilizar os parâmetros recomendados pelos fabricantes/fornecedores para prosseguir com a análise empírica.

Para obter os resultados considerou-se o tipo de refrigeração como sendo por ar comprimido e usou-se uma largura de corte de 70% do diâmetro da ferramenta, pois segundo a fonte [26] é a largura de corte máxima que permite uma variação da espessura de apra descendente e assim uma variação também descendente da força de corte, quando praticada a fresagem concordante. Este método permite menor vibração e uma vida da ferramenta mais longa, associada a uma taxa de remoção de material elevada.

Por ser matematicamente simples extrapolar os resultados simulados na análise de 1 pastilha para n, as simulações e futuros testes experimentais foram também executados com 1 unidade. Este fator traz ainda vantagens económicas.

5.1.1.1. Estimativa das constantes n e C da Lei de Taylor

Visto que a calculadora da *Sandvik Coromant* propõe uma curva de vida da ferramenta e velocidade de corte (Figura 31) que traduz a Lei de Taylor, pode-se recorrer à mesma para recolher valores e dessa forma definir as constantes n e C, necessárias para aplicação dos modelos de otimização da *Lei de Taylor* de Gilbert enunciados em [20].

Assim sendo, apresenta-se o procedimento para obtenção dos parâmetros:

1. Inserir todos os parâmetros pedidos na aplicação disponível em [25], conforme descrito anteriormente;
2. Retirar as vidas de ferramenta simuladas em função de 5 valores da velocidade de corte/frequência de rotação:
 - a. Um dos valores deve corresponder ao valor da velocidade de corte/RPM aconselhado pelo fabricante/fornecedor da pastilha;
 - b. Abranger todo o domínio apresentado, pois constitui um intervalo aconselhado de velocidades de corte que permitirá um intervalo de aproximadamente 100-150 m/min.
3. Dispor os valores retirados em escalas logarítmicas e efetuar regressão linear para obter a equação da reta aproximada;
4. Usar valores da equação de reta obtida, analogamente à equação (9), para retirar os valores das constantes (ver Figura 32);
5. Repetir processo para cada pastilha.

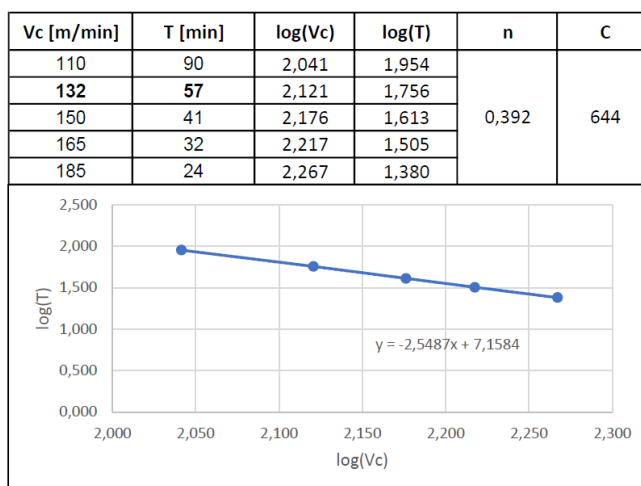


Figura 32 - Método para cálculo das constantes da *Lei de Taylor* com base em informação da calculadora da *Sandvik Coromant*.

Na Tabela 16, apresentam-se as constantes n e C da *Lei de Taylor* obtidas usando o método anteriormente descrito. No Anexo F apresentam-se todos os parâmetros considerados apresentando o intervalo de velocidades de corte aconselhado.

Da análise dos resultados, tanto os valores de n como de C se encontram dentro dos valores esperados dada a natureza dos materiais das pastilhas, segundo a Tabela 2 e a Tabela 3.

Tabela 16 - Constantes n e C da *Lei de Taylor* baseados em informação da calculadora da *Sandvik Coromant*.

Nº	Designação	Referência	Material equivalente	n	C
11	Disco 21	SPKW 06T2008 DM AM10	GC1130	0,405	587
14	Disco 13	EOMT060210ZER	GC4330	0,404	1185
15	Disco 25	EPMT100312ZER	GC4330	0,399	884
15	Disco 35	EPMT100312ZER	GC4330	0,405	839
32	Disco 40	APKT 1003PD R-M DP30M	GC1130	0,402	1040
37	Disco 66	PE 05 P35 ABS - 1 -1.1H	GC1130	0,413	962
38	Disco 52	WNMX 09T316 ZNN-MM	GC4330	0,397	1155

5.1.1.2. Previsão dos parâmetros ótimos de trabalho

Após calcular as constantes n e C, pode-se recorrer aos métodos de Gilbert para determinar os parâmetros que resultam na máxima produtividade (V_p e T_p , equações (17) e (18)) e no custo mínimo unitário (V_e e T_e , equações (23) e (24)), através das equações anteriormente apresentadas.

Na Tabela 17, apresentam-se os valores obtidos para cada ferramenta completa (conjunto total de pastilhas), representada pelo seu nº de identificação. As respetivas frequências de rotação (N em RPM) foram calculadas de modo a permitir uma comparação direta com os valores praticados na empresa e com os fornecidos pelos fabricantes/fornecedores.

Tabela 17 - Resultados empíricos para as velocidades de corte ótimas.

Nº	Designação	Referência	V_p [m/min]	N_p [RPM]	T_p [min]	V_e [m/min]	N_e [RPM]	T_e [min]
11	Disco 21	SPKW 06T2008 DM AM10	341	5163	3,83	175	2649	11,45
14	Disco 13	EOMT060210ZER	658	16106	4,29	265	6485	21,03
15	Disco 25	EPMT100312ZER	425	6945	6,25	164	2677	41,06
15	Disco 35	EPMT100312ZER	403	4353	6,10	153	1654	40,05
32	Disco 40	APKT 1003PD R-M DP30M	745	5931	2,29	358	2849	9,22
37	Disco 66	PE 05 P35 ABS - 1 -1.1H	536	2585	4,12	251	1213	22,20
38	Disco 52	WNMX09T316ZNN-MM	570	3489	5,92	278	1704	27,69

Analisando a Tabela 17, é possível concluir que os valores que resultam na máxima produtividade são impraticáveis tanto pelos altos valores de velocidade de corte, como pelas vidas de ferramenta muito curtas, sendo que um dos valores de N_p ultrapassa ainda o valor limite dos equipamentos (assinalado a vermelho). Por outro lado, os parâmetros que levam ao custo mínimo unitário já se apresentam exequíveis, mesmo que alguns deles se localizem fora do intervalo de valores apresentados pelos fabricantes/fornecedores ou pela calculadora da *Sandvik Coromant* (ver intervalos de valores no Anexo F). Os valores estimados podem até ser superiores aos propostos pelos fabricantes/fornecedores, dado que estes últimos procuram um desempenho equilibrada entre produtividade e a vida da ferramenta.

Tendo em conta os dados obtidos para a produtividade máxima, apesar de não serem praticáveis, sabe-se que em todos os casos, o sentido é o do aumento da velocidade de corte. Assim sendo, nos testes experimentais propostos procurar-se-á alcançar a velocidade de corte máxima para cada ferramenta, estando o limite máximo definido pelo intervalo de valores retirado na calculadora da *Sandvik Coromant*.

5.1.2. Determinação empírica da potência e binário de corte

A calculadora usada não teve em conta as limitações físicas impostas pelos equipamentos, pelo que é necessário prever se os parâmetros de corte estimados não comprometem a integridade dos equipamentos.

Usando as equações (6) e (7), calculou-se a potência e binário de corte para cada caso simulado. Para determinar o coeficiente de força específica de corte dos 3 materiais mais usados, em função das suas propriedades químicas e físicas e do avanço por dente da ferramenta, seguiu-se a tabela presente no Anexo G [27], obtendo-se a seguinte correspondência para os 3 materiais mais utilizados na empresa:

- F10 - Aço Baixo Carbono (620 MPa)
- PM300 - Aço Níquel Cromo-Molibdênio (940 MPa)
- C265 - Aço Cromo-Molibdênio (730 MPa)

Nas situações em que os valores de avanço por dente não estão presentes na tabela do Anexo G, efetuaram-se interpolações ou extrapolações para determinar o valor do coeficiente.

Após obter os valores de potência e binário de corte, comparam-se estes com as curvas de potência e de binário disponibilizadas pelos fabricantes dos equipamentos. Na Figura 33, apresentam-se os gráficos disponibilizados para a CNC3.

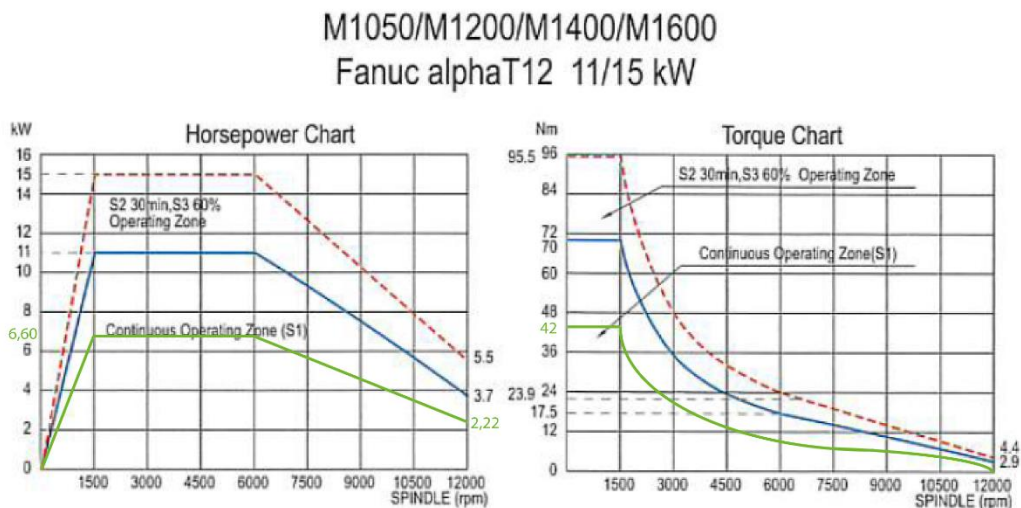


Figura 33 - Gráficos de potência e binário da CNC3 (Microcut M1050) (adaptado de [27]).

Apesar do fabricante da CNC3 apresentar gráficos de potência e binário de corte, os operadores das máquinas declaram que começam a ocorrer fenômenos de vibração quando se ultrapassa cerca de 60-70% dos valores de potência de corte assinalados como sendo de regime constante (linhas azuis), o que não é recomendável pois diminui a longevidade do equipamento, mais propriamente a vida útil de rolamentos, guias, juntas, entre outros.

Apesar do fabricante das CNC1 e CNC2 não disponibilizar as curvas de binário e de potência, sabe-se que estas possuem valores limite inferiores aos da CNC3, o que significa que um grupo de parâmetros aplicável na CNC3 poderá não ser aplicável nas CNC1 e CNC2. No entanto, na Tabela 14 é possível consultar alguma informação útil.

É importante referir que a potência e binário de corte devem ser estimados não só para fresas com uma pastilha, mas também com o número total de pastilhas em que cada uma é aplicada, pois pode ser possível realizar o teste com apenas uma pastilha e não o ser com o número total. Caso seja ultrapassado um dos limites, não há razão para executar o teste.

5.2. Realização de testes práticos de maquinagem

A realização de testes práticos de maquinagem tem como objetivo validar as velocidades de corte máximas possíveis para as fresas de pastilhas, levando à maximização da produtividade, dentro dos limites físicos de cada ferramenta.

Antes de estimar os parâmetros de corte ótimos é necessário validar a informação obtida com base na calculadora da *Sandvik Coromant*. Para isso, realizar-se-ão testes, apenas com uma pastilha montada por ferramenta, com o aço F10 para a verificação das vidas de ferramenta estimadas, através da medição do desgaste de flanco resultante nos ensaios. Caso se confirmem as expectativas, então será válido utilizar os parâmetros estimados para avançar na determinação dos parâmetros de corte ótimos que visarão alcançar a produtividade máxima possível. De seguida, executar-se-ão testes equivalentes, mas para comparar desgastes resultantes da maquinagem do segundo material mais utilizado, o PM300, de forma a encontrar uma relação entre os parâmetros de corte que alcançam a mesma vida de ferramenta.

Após estimar os parâmetros ótimos que vão de encontro com o objetivo da produtividade máxima, testar-se-ão as fresas de pastilhas com o número total de pastilhas montadas, de forma a avaliar o comportamento durante a maquinagem de diferentes geometrias e assim validar ou não os grupos de parâmetros estimados.

Como referido anteriormente, a empresa em questão tem 3 centros de maquinagem disponíveis, dos quais a CNC3 se destaca por ser um modelo mais recente, com melhores especificações e um maior número de informação disponível para consulta, nomeadamente documentação técnica do fabricante com as curvas de potência e de binário de corte e mais informações de corte na consola do equipamento.

A CNC3 possui a maior versatilidade de produção nesta empresa e é onde se realizam as peças com maiores dimensões, que resultam em grandes desbastes, pelo que a realização de testes neste equipamento e consequente otimização terá uma aplicação direta na mesma. De qualquer forma, os resultados dos testes realizados neste centro de maquinagem aplicam-se transversalmente aos outros 2 equipamentos, visto operarem as mesmas ferramentas e os mesmos materiais. No final, a implementação de melhorias poderá ter apenas uma maior representação neste equipamento, pelos motivos acima referidos. Por outro lado, os parâmetros de corte devem ser ajustados a cada equipamento visto terem capacidades de operação diferentes (ver Tabela 14), caso tal necessidade se verifique.

5.2.1. Teste de determinação da potência de corte

Como os parâmetros de corte recomendados pelos fabricantes/fornecedores são, na maioria, mais elevados do que os valores usados na empresa, surgiu a questão se assim é por opção de se pretender aumentar a vida das ferramentas ou porque valores superiores provocariam esforços demasiado altos nos centros de maquinagem.

Sendo assim, surgiu a necessidade de prever a potência de corte dos testes a realizar, pois a ultrapassagem destes valores limite inibiria a sua realização. Para isso, usou-se a fórmula para cálculo da potência de corte conhecida, tendo em conta o rendimento do equipamento (equação (6)) e verificou-se experimentalmente a proximidade com os resultados visualizados no mostrador do centro de maquinagem. Havendo uma relação direta entre a potência de corte e o binário de corte (equação (7)) e não sendo possível observar/consultar o binário em nenhum dos equipamentos, apenas se verificará a aplicabilidade do método para a potência de corte.

Para cada teste a executar, verifica-se se a potência de corte estimada se situa na zona de 60% abaixo das linhas azuis (linha verde da Figura 33), em função da frequência de rotação da árvore. A Tabela 18 apresenta os resultados destes testes para avaliação da potência de corte.

Tabela 18 - Resultados do teste de determinação da potência de corte com a ferramenta nº37 usando o aço F10.

Teste	Parâmetros utilizados					P _c estimada [kW]	Potência nominal (P _n) @RPM [kW]	Limite teórico @70%P _n	Carga no mostrada (%)	Potência real [kW]
	a _p [mm]	a _e [mm]	N [RPM]	f _z [mm/rot]	V _f [mm/min]					
1	2,0					3,88			25-30	2,20-2,64
2	2,5	39,6	1200	0,25	1500	4,85	8,80	6,16	40-45	3,52-3,96
3	3,0					5,83			55-60	4,84-5,28

Da análise aos valores obtidos (Tabela 18), conclui-se que a potência estimada é maior do que a real, possivelmente fruto de o coeficiente de força específica de corte utilizado para a estimativa ser superior ao real. De qualquer forma, a tomada de decisão tendo em conta um valor estimado superior acaba por resultar num fator de segurança, o que é apenas benéfico para a salvaguarda do equipamento. Assim, torna-se válido o método analítico utilizado para determinação da potência de corte.

5.2.2. Testes para verificação da vida das ferramentas

O procedimento de execução destes testes consistiu em operar diversas fresas de pastilhas, mas com apenas 1 pastilha montada, sob parâmetros de corte iguais aos utilizados para estimar as constantes n e C da *Lei de Taylor* (ver Secção 5.1.1.1) durante o período estimado de uma vida da ferramenta. O objetivo foi o de verificar se as simulações empíricas com recurso à calculadora da *Sandvik Coromant* seriam válidas, i.e., se as pastilhas realmente tinham uma vida de ferramenta correspondente à simulada, quando operadas com os parâmetros de corte indicados.

Num primeiro cenário, escolhendo as 7 pastilhas com mais interesse em analisar e os 4 materiais mais utilizados e executando 5 testes para cada combinação pastilha - matéria-prima resultaria em 140 testes. Para além do tempo que cada teste demoraria (mínimo 25-30 minutos podendo chegar a 45-50 minutos) acresceria o custo da execução de todos os testes e ainda a enorme ocupação de um dos três centros de maquinaria disponíveis, tornando esta análise impraticável.

Dado o cenário custoso acima referido, sentiu-se a necessidade de reduzir o número de testes a executar, utilizando uma estratégia que pudesse ser extensível a todas as combinações ferramenta - matéria-prima. Se seguida, as considerações tomadas para a planificação da execução dos testes:

1. Apenas se utilizará o material F10 nos testes iniciais por várias razões:
 - a. Segundo os operadores, o aço F10 é o material responsável pelo maior desgaste das pastilhas, fruto da presença de inclusões na matéria-prima.
 - b. As pastilhas não são originalmente recomendadas para fresagem de alumínio, pelo que não existem dados comparativos para esta combinação. Para além disso, o Al5083 provoca um desgaste muito baixo nas pastilhas, quando comparado aos aços.
 - c. O aço F10 é o material mais utilizado na empresa, logo otimizar para este material traz maior representatividade nos ganhos finais.

- d. Os aços em questão pertencem todos à mesma categoria na aplicação usada, pelo que os valores simulados são iguais entre os materiais. Assim, esperam-se comportamentos similares.
 - e. A calculadora utilizada para simulação de parâmetros não abrange a dureza do segundo material mais utilizado, o PM300.
2. Execução de 3 testes nas pastilhas escolhidas com maior representatividade na produção da empresa e que apresentam maiores diferenças entre a taxa de remoção de material e a vida da ferramenta calculadas com os parâmetros usados na empresa e os recomendados pelos fabricantes/fornecedores, utilizando a calculadora da *Sandvik Coromant*,
 3. Adotar 0,2mm de desgaste no flanco como desgaste para fim de vida, pois é o valor indicado pela equipa técnica da *Sandvik Coromant*. A partir deste valor, o desgaste é mais descontrolado, pelo que aplicar a Lei de Taylor perde o sentido. É ainda o valor de referência praticado na aplicação usada para simulação.
 4. É suficiente utilizar uma pastilha por fresa em cada teste visto que o uso de mais pastilhas traz maior despesa e as propriedades resultantes são diretamente proporcionais. A extrapolação de resultados para um maior número de pastilhas por disco é simples e a vida da ferramenta poderá ser ainda maior dado o maior equilíbrio na rotação.

Por questões de organização, os testes a executar, listaram-se por (detalhes no Anexo H):

- Nº, designação e referência da ferramenta;
- Matéria-prima respetiva para cada teste;
- Nº de identificação do teste;
- Parâmetros de corte a adotar;
- Duração estimada do teste (segundo a vida de ferramenta obtida por simulação)
- Parâmetros úteis para determinação de outros dados inerentes aos testes (taxa de remoção de material, coeficiente de força específica de corte), nomeadamente a potência e binário de corte, dimensões e custo do material necessário.

Assim, começou-se por fazer um conjunto de 3 testes a uma das pastilhas seleccionadas, usando os parâmetros de corte definidos da seguinte maneira:

- a_p , f_z - segundo valores recomendados pelos fabricantes/fornecedores;
- a_e - 70% do diâmetro da ferramenta;
- V_c - variável de teste para teste: 1 dos valores correspondente ao valor fornecido pelo fabricante e os restantes 2 escolhidos na direção da velocidade teórica para máxima produtividade, sendo que o limite traçado pelos valores de velocidade de corte apresentados nas estimativas da aplicação utilizada nunca é ultrapassado, pois constituem os valores máximos recomendados.

Para além de verificar a vida das ferramentas, este teste ajudará a analisar o comportamento das pastilhas seleccionadas quando operadas à velocidade máxima de corte recomendada.

A previsão de potência e binário de corte foram calculados previamente à execução, pois caso se ultrapassasse 60% da potência nominal às frequências de rotação respetivas, com o número total de pastilhas, o teste não seria executado.

De acordo com o volume de material necessário calculado, fez-se o aperto do bloco na prensa da CNC3, como mostrado na Figura 34, e correu-se o programa criado para desbaste do material. Cada teste teve a duração da vida da ferramenta estimada para o grupo de parâmetros de corte utilizados.



Figura 34 - Exemplo da disposição do teste para verificação de vida das ferramentas (teste nº 1 com a ferramenta nº14).

Na Tabela 19 apresentam-se os dados de corte utilizados nos testes respetivos, bem como os desgastes registados. No Anexo H, apresentam-se alguns dados extra à realização dos testes.

Tabela 19 - Dados de corte usados nos testes para verificação da vida das ferramentas e desgastes de flanco resultantes.

Nº	Designação	Referência	Matéria prima	Teste	a_p [mm]	f_z [mm/rot]	V_c [m/min]	N [RPM]	V_f [mm/min]	Q [mm³/min]	Duração [min]	Desgaste de flanco [µm]
14	Disco 13	EOMT060210ZER	F10	1	0,381	0,508	233	5700	2896	10039	56	206,36
				2			250	6130	3114	10797	47	132,17
				3			275	6730	3419	11853	37	141,01
15	Disco 25	EPMT100312ZER	F10	1	0,760	0,635	187	3050	1937	25759	49	112,89
				2			214	3500	2223	29559	35	143,97
				3			245	4000	2540	33782	25	158,84

Por referência do suporte técnico da *Sandvik Coromant*, as vidas estimadas pela calculadora consideram-se para um desgaste de flanco de 0,2mm, valor muito baixo para ser medido sem recurso a um instrumento de ampliação. Sendo assim, recorreu-se ao microscópio ótico presente no laboratório de materiais da FEUP para verificar o desgaste após realização dos testes. Para observação, a face de saída de cada pastilha foi posicionada perpendicularmente à lente, com recurso a um bloco de plasticina.

Na Figura 35 apresenta-se uma visão macroscópica da zona observada ao microscópio.

Nas Figuras 36 a 41 apresentam-se fotografias tiradas, com a indicação do desgaste medido recorrendo ao *software Basic Stream* da *Olympus* disponível no laboratório. Estas medições foram feitas coincidindo 1 dos 2 pontos com o máximo de desgaste e o outro com a aresta de corte, de modo a que o segmento de reta de medição criado fosse perpendicular à aresta de corte (a vermelho nas imagens).



Figura 35 - Especificação da zona observada ao microscópio.

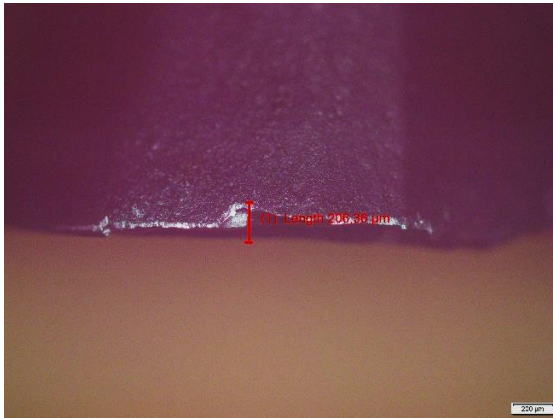


Figura 36 - Teste nº 1 com disco 13.

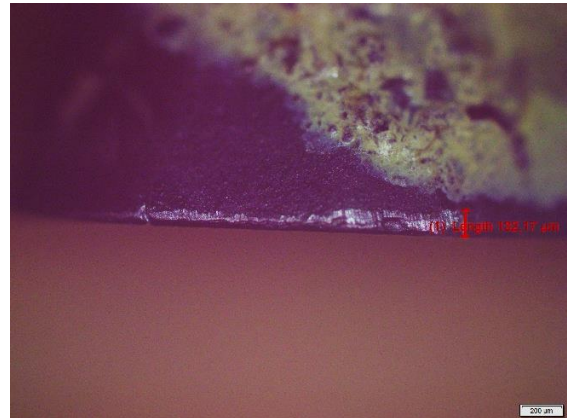


Figura 37 - Teste nº 2 com disco 13.

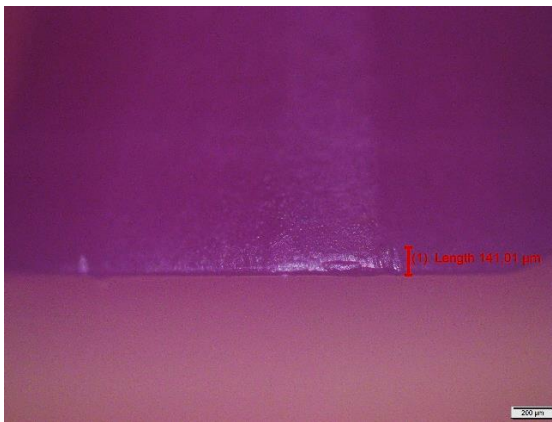


Figura 38 - Teste nº 3 com disco 13.



Figura 39 - Teste nº 1 com disco 25.

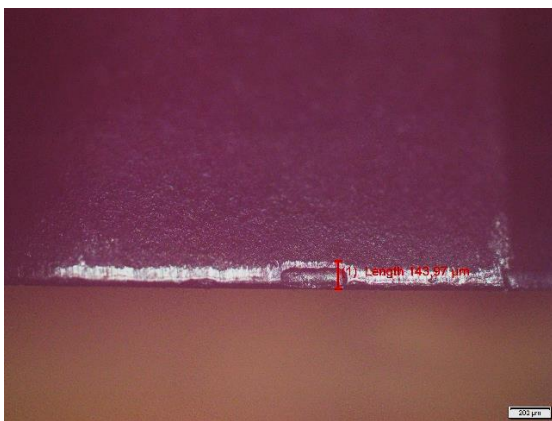


Figura 40 - Teste nº 2 com disco 25.

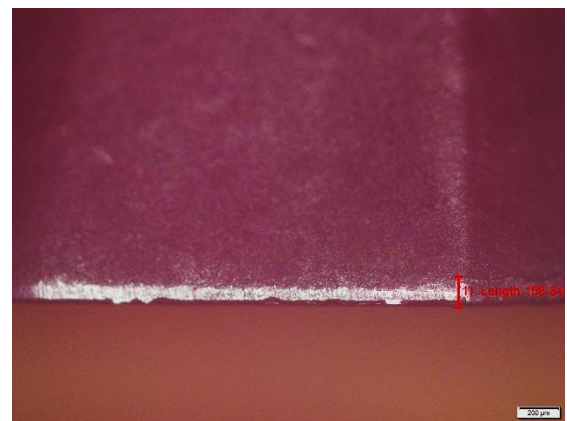


Figura 41 - Teste nº 3 com disco 25.

No teste nº 1 com disco 13 (ver Figura 36) é possível observar a fratura da aresta de corte, que por ter ocorrido a uma velocidade de corte inferior à usada nos testes nº 2 e 3 se crê que pode dever-se à presença de partículas duras na matéria-prima. Pelo mesmo motivo, o desgaste consequente foi superior. Na Figura 38 e na Figura 40 identificam-se pequenas fraturas causadas por inclusões, na aresta de corte, que na continuidade de operação iriam localizar o desgaste nesse pontos.

À exceção dos casos referidos, todos os padrões de desgaste são progressivos e em nenhum dos testes executados, o valor deste ultrapassou 0,2 mm, demonstrando que a vida da ferramenta pode ser ainda mais longa. De qualquer forma, verifica-se que as vidas das ferramentas estimadas pela calculadora da *Sandvik Coromant* são muito próximas dos valores reais, pelo que é válido ter em consideração as vidas das ferramentas estimadas para as restantes ferramentas no desenrolar deste estudo.

Da mesma forma, verificou-se o comportamento estável das ferramentas quando operadas às velocidades de corte máximas recomendadas, permitindo extrapolar estes valores para a obtenção de máxima produtividade.

5.2.3. Testes de comparação de desgaste entre materiais

Apesar de pertencerem a categorias de materiais distintas, relatos dos operadores indicam níveis de desgastes próximos para cada material, mesmo sendo mais recorrente no aço F10.

Utilizando o mesmo conjunto de parâmetros para cada ferramenta testada anteriormente, testou-se a sua aplicabilidade, mas com a segunda matéria-prima mais utilizada, o aço PM300. O objetivo deste teste é o de comparar o desgaste em cada pastilha quando aplicados os mesmos parâmetros de corte, verificando se existe ou não uma diferença significativa no desempenho da pastilha entre materiais e se é necessário diferenciar os parâmetros de corte, de modo a otimizar o processo de maquinagem.

Antes da execução dos testes, prevê-se que o desgaste seja maior neste material, dado que a dureza do PM300 é bastante superior e contém maior quantidade de elementos de liga. No entanto ocorrem situações em que as pastilhas têm menor durabilidade quando maquinam o F10.

Caso se verifiquem desgastes aproximados, é possível aferir que não existe a necessidade de ter grupos de parâmetros específicos para cada aço e que as restantes ferramentas também se comportam da mesma forma. Poder aplicar os mesmos dados de corte em ambos os materiais, torna o processo mais simples, dado que toda a informação de corte está definida no *software* CAM.

Na Tabela 20 apresentam-se os dados relativos aos testes executados com o aço PM300, usando parâmetros equivalentes aos usados anteriormente nos testes com o aço F10. Apresentam-se ainda os níveis de desgaste resultantes. No Anexo H apresentam-se dados adicionais relativos aos testes referidos.

Tabela 20 - Dados de corte usados nos testes para comparação de desgastes de flanco usando o aço PM300 e respetivos desgastes resultantes.

Nº	Designação	Referência	Matéria prima	Teste	a_p [mm]	f_z [mm/rot]	V_c [m/min]	N [RPM]	V_f [mm/min]	Q [mm ³ /min]	Duração [min]	Desgaste de flanco [µm]
14	Disco 13	EOMT060210ZER	PM300	4	0,381	0,508	275	6730	3419	11853	17	1413,02
				5			250	6130	3114	10797	26	599,65
15	Disco 25	EPMT100312ZER	PM300	4	0,760	0,635	245	4000	2540	33782	5	1208,40
				5			214	3500	2223	29559	9	702,57

Nas Figuras 42 a 45 apresentam-se as fotografias das ferramentas tiradas, usando o mesmo método descrito na série de testes anteriores. Através de uma rápida observação das figuras, facilmente se conclui que os desgastes obtidos são completamente díspares dos obtidos na maquinagem do aço F10, pelo que é seguro afirmar que não se pode aplicar o mesmo grupo de parâmetros nos dois materiais analisados.

Para além de em nenhum dos testes executados se ter atingido o tempo previsto de execução, pois começaram a notar-se sinais de esforço na remoção de aparas, aparas

incandescente e/ou fumos e as arestas de corte resultantes foram completamente destruídas durante as operações.

Analisando o padrão de desgaste resultante - ocorrência de fratura - sabe-se que geralmente é fruto de velocidades de avanço demasiado elevadas. Sendo assim, é necessário ajustar-se este parâmetro para obter desgastes na casa dos 0,2 mm para vidas de ferramenta similares às obtidas nos testes anteriores. Sabe-se ainda que com a redução da velocidade de corte usada, aumenta-se a vida da ferramenta, pelo que o ajuste deste parâmetro é necessário para alcançar uma vida de ferramenta útil. No catálogo [28] faz-se referência a parâmetros para diferentes materiais, pelo que se toma como referência para determinar novos parâmetros a aplicar em futuros ensaios.

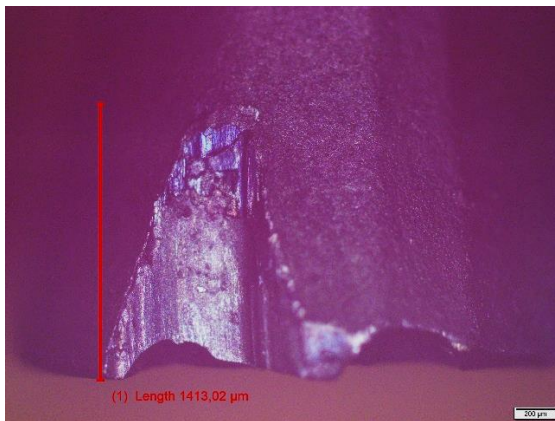


Figura 42 - Teste nº 4 com disco 13.

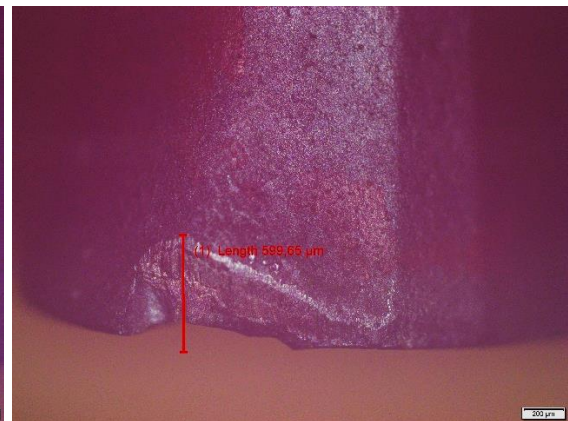


Figura 43 - Teste nº 5 com disco 13.

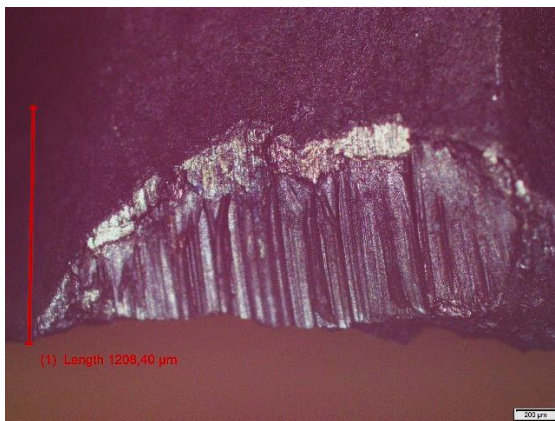


Figura 44 - Teste nº 4 com disco 25.

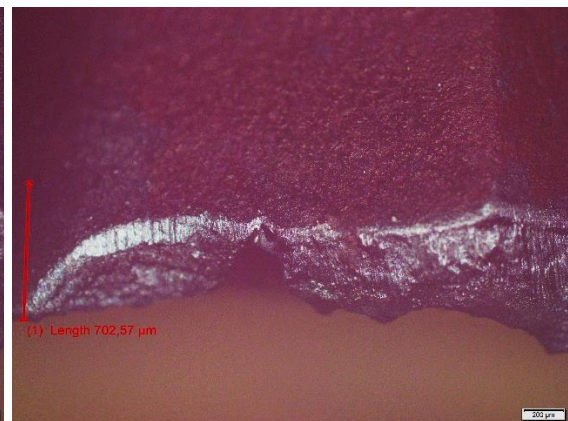


Figura 45 - Teste nº 5 com disco 25.

Apesar das pastilhas testadas não apresentarem sinais de aresta queimada, durante o teste ocorreu a projeção de apra queimada e fumos, o que indica uma velocidade de corte muito elevada. Tendo em conta esta informação e os dados disponíveis em catálogo, testou-se novamente as pastilhas, reduzindo a velocidade de corte e conseqüentemente a frequência de rotação e velocidade de avanço, durante um intervalo de tempo igual ao determinado para os parâmetros ótimos do material F10. Os novos parâmetros de corte utilizados e respetivos desgastes resultantes apresentam-se na Tabela 21 e no Anexo H mostram-se dados extra à realização dos referidos testes.

Nas figuras 46 a 48 apresentam-se as imagens das pastilhas usadas nos ensaios do PM300 com novos parâmetros de corte.

Tabela 21 - Novos dados de corte usados nos testes para comparação de desgastes de flanco usando o aço PM300 e respectivos desgastes resultantes.

Nº	Designação	Referência	Matéria prima	Teste	a_p [mm]	f_z [mm/rot]	V_c [m/min]	N [RPM]	V_f [mm/min]	Q [mm ³ /min]	Duração [min]	Desgaste de flanco [µm]
14	Disco 13	EOMT060210ZER	PM300	6	0,381	0,508	225	5500	2794	9687	34	243,42
15	Disco 25	EPMT100312ZER	PM300	6	0,760	0,635	172	2800	1778	23647	18	382,94
				7			147	2400	1524	20269	25	228,65

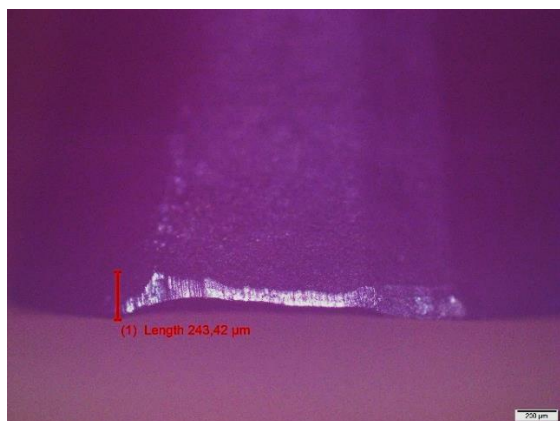


Figura 46 - Teste nº 6 com disco 13.

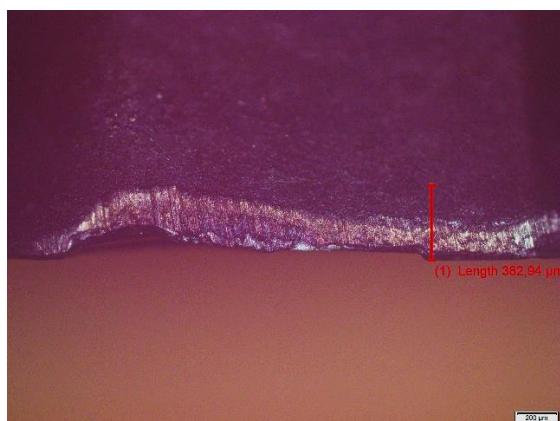


Figura 47 - Teste nº 6 com disco 25.



Figura 48 - Teste nº 7 com disco 25.

Na Figura 46, apesar do desgaste não estar muito acima dos 0,2 mm, é notável a irregularidade do desgaste, provocando a fratura da aresta de corte. Assim, crê-se que a velocidade de corte testada deva ser ainda alta para a maquinagem do PM300. Na Figura 48 observa-se um desgaste progressivo, ligeiramente acima dos 0,2 mm, no entanto é aceitável. Assim sendo pode-se considerar ter encontrado a velocidade de corte para a maquinagem de PM300, que resulta num desgaste e consequente vida da ferramenta equivalentes aos resultantes na maquinagem do aço F10.

5.2.4. Estimativa do conjunto de parâmetros de corte otimizados e teste da sua aplicação em ferramentas com o número total de pastilhas

Com os dois testes apresentados nas Secções 5.2.2 e 5.2.3, para além de se verificar a validade das vidas de ferramenta estimadas pela calculadora da *Sandvik Coromant* e de estabelecer uma comparação do desgaste entre os materiais mais usados, validou-se a aplicação dos parâmetros de corte que maximizam a produtividade, dentro dos limites aconselhados, visto que os valores de velocidade de corte utilizados nos testes corresponderam aos valores máximos recomendados.

Assim sendo, é possível extrapolar os resultados a todas as pastilhas de corte em análise e, numa primeira parte, estimar os parâmetros otimizados para a obtenção da máxima produtividade possível na maquinagem do aço F10.

No que toca à velocidade de corte, os parâmetros de corte otimizados para a maquinagem do aço F10 tomam os valores máximos apresentados pela calculadora da *Sandvik Coromant* (coincidem com os valores máximos usados para a determinação das constantes n e C da *Lei de Taylor* - ver Anexo F). Da mesma forma, o a_p e f_z serão equivalentes aos testados, ou seja, tomarão os valores aconselhados pelos fabricantes/fornecedores das pastilhas; e o a_e será 70% do diâmetro da ferramenta.

Na Tabela 22 apresenta-se um conjunto de parâmetros otimizados que visam alcançar a produtividade máxima possível, aplicados em fresas com uma pastilha, na execução de operações de desbaste na maquinagem do aço F10.

Tabela 22 - Parâmetros otimizados, aplicados em fresas com uma pastilha, que maximizam a produtividade em operações de desbaste no aço F10.

Nº	Designação	Referência	a_e [mm]	a_p [mm]	f_z [mm/rot]	V_c [m/min]	N [RPM]	V_f [mm/min]	Q [mm ³ /min]
11	Disco 21	SPKW 06T2008 DM AM10	14,7	0,500	1,167	160	2430	2 835	20 837
14	Disco 13	EOMT060210ZER	9,1	0,381	0,508	300	7350	3 734	12 945
15	Disco 25	EPMT100312ZER	17,5	0,760	0,635	245	4000	2 540	33 782
15	Disco 35	EPMT100312ZER	24,5	0,760	0,635	228	2460	1 562	29 086
32	Disco 40	APKT 1003PD R-M DP30M	28,0	1,000	0,250	261	2080	520	14 560
37	Disco 66	PE 05 P35 ABS - 1 -1.1H	46,2	2,000	0,290	238	1150	334	30 815
38	Disco 52	WNMX09T316ZNN-MM	36,4	1,500	0,250	327	2000	500	27 300

Os dois testes apresentados em 5.2.2 e 5.2.3 aplicaram-se a fresas com apenas 1 pastilha montada, visto que o desgaste é similar entre pastilhas da mesma ferramenta, aplicadas durante o mesmo período. Deste modo, surge a questão se a aplicação dos parâmetros testados em apenas uma pastilha pode ser conjugada para o número total de insertos por ferramenta e também se estes se aplicam nos diversos tipos de operação praticados na maquinagem de peças na empresa em questão.

Apesar de ter sido executado um processo de confirmação da potência e binário de corte numa operação de facejamento, com o objetivo de determinar se um dado grupo de parâmetros provoca esforços excessivos no equipamento, sabe-se que o comportamento na execução de diferentes formas é variável.

Sendo assim, é necessário testar-se a aplicabilidade dos parâmetros otimizados para a maquinagem do aço F10 quando operados em fresas com o número total de pastilhas, dada a grande diferença de parâmetros de corte entre os valores usados e os testados em algumas ferramentas, maioritariamente por uma questão de conservação dos equipamentos. Caso as fresas completas demonstrem um bom desempenho na execução deste teste, os parâmetros de

corte apresentados na Tabela 22 serão admitidos como válidos para aplicação nas ferramentas com o número completo de pastilhas.

Neste teste, preparou-se um programa em que a ferramenta executa os tipos de operação mais importantes executados na empresa, tendo por base os parâmetros ótimos determinados, de modo a verificar se algum tipo de operação resulta num comportamento anormal do equipamento que diminuirá a longevidade do mesmo, nomeadamente produção de vibrações, esforços indesejáveis ou movimentos bruscos. Para a execução do mesmo, desenhou-se uma peça que promove diversos tipos de operações de fresagem (ver Figura 49) e contou-se com o apoio de dois operadores experientes, que avaliaram a realização do procedimento. Para além dos tipos de operação identificados, avaliou-se o comportamento da máquina no que toca às constantes acelerações e desacelerações resultantes da geometria da peça projetada. Na mesma figura, r corresponde ao raio da ferramenta e R ao raio local da geometria da peça.

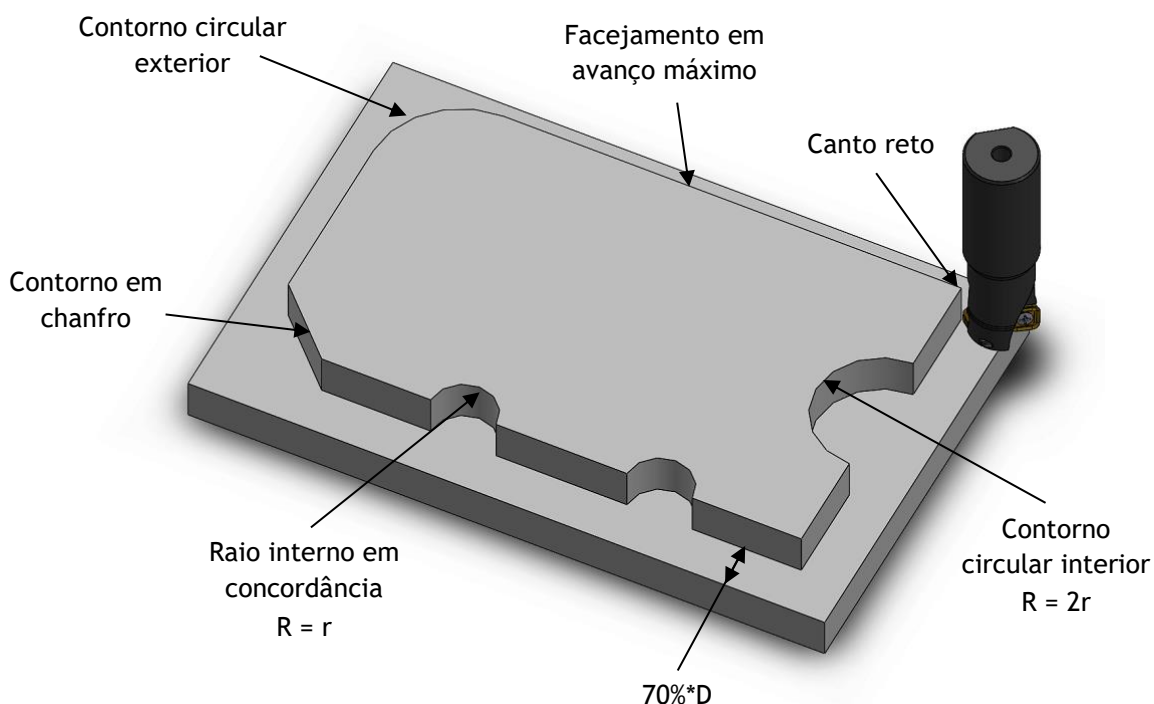


Figura 49 - Modelo utilizado para execução do teste da aplicação de parâmetros nos discos completos.

Como não se procurou avaliar o desgaste, cada ferramenta operou apenas 5mm de altura. Na Tabela 23 apresentam-se os parâmetros usados nos testes e na Tabela 24, registaram-se os dados considerados importantes para avaliação da atividade, utilizando o aço F10 por ser o mais usado e o que permite parâmetros e pressões específicas de corte mais elevados, resultando em valores de potência e de binário de corte estimados superiores. Da mesma forma, os parâmetros escolhidos para os testes são os que maximizam a produtividade, não ultrapassando os limites existentes.

De notar que as ferramentas nº11 e nº32 não passaram por este teste, dado os parâmetros não serem muito exigentes e pelas suas utilizações serem consideravelmente menos frequentes.

No caso da ferramenta nº37, como apenas é utilizada para faceamentos, a execução deste teste não faz sentido. Por outro lado, esta foi a ferramenta utilizada no teste descrito em 5.1.2, pelo que a seu desempenho já foi avaliada. Como os parâmetros otimizados requerem menos potência do que os testados, admite-se que são válidos. Na Figura 50 apresenta-se o *setup* do ensaio experimental.

Tabela 23 - Parâmetros escolhidos para os testes de ferramentas com o número total de pastilhas.

Nº	Designação	Referência	Matéria prima	a _p [mm]	f _z [mm/rot]	K _c [MPa]	V _c [m/min]	N [RPM]	V _f [mm/min]	Q [mm ³ /min]	Potência de corte estimada [kW]	Binário de corte estimado [Nm]
14	Disco 13	EOMT060210ZER	F10	0,381	0,508	1585	300	7350	11201	38836	1,14	1,48
15	Disco 25	EPMT100312ZER	F10	0,760	0,635	1565	245	4000	12700	168910	4,90	11,69
15	Disco 35	EPMT100312ZER	F10	0,760	0,635	1565	228	2460	7811	145432	4,21	16,36
38	Disco 52	WNNMX 09T316 ZNN-MM	F10	1,500	0,250	1765	327	2000	3000	163800	5,35	25,56

Tabela 24 - Resultados qualitativos dos testes com número completo de pastilhas.

Nº	Designação	Carga máxima no mostrador (%)	Vibrações	Movimentos bruscos
14	Disco 13	10-15	a _e =D	Não
15	Disco 25	35-40	Não	Não
15	Disco 35	35-40	Não	Não
38	Disco 52	45-50	Não	Não



Figura 50 - Setup do teste executado com a ferramenta completa nº 38.

A execução deste teste surpreendeu pelas elevadas taxas de remoção de material resultantes, comparativamente com os valores praticados anteriormente, na ausência de movimentos bruscos provocados pela maquinagem de cantos retos. De seguida, apresentam-se as observações retiradas da sua realização:

1. Durante a execução dos testes, nomeadamente às pastilhas nº 14 (disco 13) e nº 15 (disco 25), constatou-se que o controlador da CNC3 limita a velocidade de avanço a 10000 mm/min, mantendo a rotação definida na programação CAM (contrariando a relação estabelecida na fórmula de cálculo da velocidade de avanço - ver equação (2)). Esta combinação provoca um aumento do avanço por dente, que prejudica diretamente a vida da ferramenta. Por ser um aspeto incontornável, nestas duas situações, as velocidades de corte otimizadas serão limitadas pelo valor máximo da velocidade de avanço permitida, mantendo o avanço por dente aconselhado pelo fabricante/fornecedor. Esta adaptação diminuirá as velocidades de corte e, conseqüentemente, aumentará as vidas de ferramenta das duas ferramentas referidas.
2. No que toca às potências de corte praticadas, apenas no caso da fresa de pastilhas nº38 se verificaram cargas perto dos 50%, em zonas em que o penetramento de trabalho coincidiu com o diâmetro da ferramenta. Mesmo assim, nunca se ultrapassou a barreira de 60% da carga nominal à rotação respetiva, pelo que são valores aceitáveis.

- Em zonas de penetramento de trabalho iguais ao diâmetro da ferramenta, notaram-se pequenas vibrações (por detecção sonora) com a fresa de pastilhas nº14, prevendo-se que ocorram fruto do aumento do avanço por dente, resultante da limitação da velocidade de avanço referida anteriormente. Visto que a velocidade de corte foi otimizada para um penetramento de trabalho de 70% do diâmetro, e sendo esta uma ferramenta de diâmetro reduzido (menor rigidez), o aumento do penetramento de trabalho, nas zonas referidas, conjuntamente com um avanço por dente acima do aconselhado tem impacto na estabilidade.

Antes de partir para a apresentação dos parâmetros ótimos, deve-se referir que, no caso da ferramenta nº37 (disco 66), os parâmetros aconselhados pelo fornecedor ultrapassam os limites aconselhados de potência do equipamento, pelo que se fará uma combinação dos parâmetros usados na empresa e os aconselhados, apontando para atingir o limite aconselhado de potência de corte e uma taxa de remoção de material superior à praticada. Na Figura 29, estas pastilhas apresentam aresta queimada, indicando velocidade de corte excessiva. Assim sendo manteve-se a profundidade de corte, reduziu-se a velocidade de corte e aumentou-se o avanço por dente, resultando numa melhoria, mesmo que reduzida, como é possível constatar pela observação dos parâmetros estimados na Tabela 25 e os praticados na empresa (ver Anexo E).

De acordo com o teste realizado e com os comentários acima apresentados, é possível definir o conjunto de parâmetros otimizados para operações de desbaste na maquinaria usando o aço F10 e fresas com o número completo de pastilhas, visando alcançar a produtividade máxima possível.

Na Tabela 25 apresentam-se os parâmetros de corte finais a aplicar nas ferramentas com o número total de pastilhas, para operações de desbaste no aço F10.

Tabela 25 - Parâmetros finais a aplicar nas pastilhas para maquinaria do aço F10.

Nº	Designação	Referência	a_e [mm]	a_p [mm]	f_z [mm/rot]	V_c [m/min]	N [RPM]	V_f [mm/min]	Q [mm³/min]	T [min]	Potência de corte estimada [kW]	Binário de corte estimado [Nm]
11	Disco 21	SPKW 06T2008 DM AM10	14,7	0,500	1,167	160	2430	8505	62512	25	1,22	4,81
14	Disco 13	EOMT060210ZER	9,1	0,381	0,508	268	6562	10000	34671	39	1,02	1,48
15	Disco 25	EPMT100312ZER	17,5	0,760	0,635	193	3150	10000	133000	45	3,85	11,69
15	Disco 35	EPMT100312ZER	24,5	0,760	0,635	228	2460	7811	145432	25	4,21	16,36
32	Disco 40	APKT 1003PD R-M DP30M	28,0	1,000	0,250	261	2080	1040	29120	31	1,03	4,73
37	Disco 66	PE 05 P35 ABS - 1 -1.1H	46,2	2,000	0,290	238	1150	1668	154077	29	4,94	40,99
38	Disco 52	WNNMX09T316ZNN-MM	36,4	1,500	0,250	327	2000	3000	163800	24	5,35	25,56

5.3. Determinação de parâmetros ótimos para os diferentes materiais

Como referido anteriormente, a empresa aplica os mesmos parâmetros de corte em qualquer operação de maquinagem de aços, estando condicionados ao material mais exigente, de modo a que as ferramentas não sofram um desgaste prematuro no processo.

A opinião inicial dos operadores relata que o F10 provoca um desgaste maior do que o PM300, acontecimento comprovado como errado com base nos testes executados. Como os parâmetros aplicados são os mesmos para ambos os materiais e ainda assim, conservadores, a presença de inclusões no F10 estima-se como sendo a causadora de fraturas na aresta de corte das pastilhas, provocando de seguida um desgaste abrupto das ferramentas. Por serem parâmetros mais conservadores, as vidas das pastilhas tornam-se mais longas, estando mais suscetíveis a maquinar uma inclusão presente no material. Na Secção 5.2.2, as figuras apresentadas mostram a imprevisibilidade do aparecimento destas partículas mais duras, não havendo um padrão temporal de ocorrência de impressão por via das mesmas, pelo que é impraticável ajustar os parâmetros num certo momento para evitar o dano localizado.

Sendo que o material mais trabalhado é também o mais macio, a empresa acaba por sair prejudicada, pois não tira partido total das suas ferramentas, visto estas possuírem uma maior capacidade de remoção de material do que aquela que é praticada.

Nos testes executados com F10, obtiveram-se padrões de desgaste progressivos, usando os parâmetros definidos como ótimos, aprovando o método de simulação de valores fornecidos pela calculadora da *Sandvik Coromant*. No entanto, não foi possível simular valores para a dureza do PM300 (300HB), pelo que os dados de corte usados nos testes de 5.2.3 foram tomados tendo por base o catálogo de um dos fabricantes e a experiência adquirida no decorrer dos testes.

Sabendo que a velocidade de corte aconselhada para a maquinagem do PM300 é mais baixa do que para o F10, procurou-se encontrar uma percentagem aproximada que relacionasse os dois parâmetros, de modo a ser possível extrapolar os parâmetros para todas as ferramentas. Neste sentido:

- Utilizou-se a calculadora da *Sandvik Coromant* para simular valores máximos de velocidade de corte para materiais do grupo P, com durezas de 145HB e 250HB (105HB de diferença pois é o valor aproximado da diferença de durezas entre o F10 e o PM300), usando uma qualquer ferramenta e respetivos parâmetros;
- Comparou-se a razão entre velocidades de corte simuladas e a razão calculada com velocidades de corte testadas na ferramenta nº15 (ver Tabela 26).

Tabela 26 - Dados simulados para cálculo da razão entre velocidades de corte para diferentes durezas.

Simulação	Dureza [HB]	Parâmetros utilizados					Razão (%)
		a_p [mm]	f_z [mm/rot]	a_e [mm]	N_{max} [RPM]	V_{Cmax} [m/min]	
1	145	0,5	1,167	14,7	3340	220	61,4%
2	250				2050	135	

Analisando os resultados dos testes efetuados na ferramenta nº15 (Tabela 19 e Tabela 21), obtiveram-se desgastes equivalentes para o F10, a 245 m/min, e para o PM300, a 147 m/min, resultando numa razão de 60% (não considerando a limitação da velocidade de avanço imposta pelo controlador do centro de maquinagem).

Comparando ambas as razões acima referidas, conclui-se que tomar 60% como a razão entre as velocidades de corte ótimas para ambos os materiais mais usados é uma boa consideração, permitindo estimar os parâmetros para a aplicação de todas as ferramentas em PM300. De notar que as ferramentas submetidas aos testes de desgaste com o PM300 coincidem com as ferramentas cuja velocidade de avanço foi limitada pelo controlador, pelo que para estas, a proporção de 60% é aplicada em relação aos parâmetros que seriam aplicados caso esse parâmetro não fosse limitado. Assim, na Tabela 27 apresentam-se os parâmetros de corte finais a aplicar nas ferramentas completas, para operações de desbaste em PM300.

Tabela 27 - Parâmetros finais a aplicar nas pastilhas para maquinagem de PM300.

Nº	Designação	Referência	a_e [mm]	a_p [mm]	f_z [mm/rot]	Vc [m/min]	N [RPM]	V_f [mm/min]	Q [mm³/min]	T [min]	Potência de corte estimada [kW]	Binário de corte estimado [Nm]
11	Disco 21	SPKW 06T2008 DM AM10	14,7	0,500	1,167	96	1 458	5 103	37 507	25	0,63	4,12
14	Disco 13	EOMT060210ZER	9,1	0,381	0,508	180	4 410	6 721	23 302	30	0,67	1,45
15	Disco 25	EPMT100312ZER	17,5	0,760	0,635	147	2 400	7 620	101 346	25	2,78	11,07
15	Disco 35	EPMT100312ZER	24,5	0,760	0,635	137	1 476	4 686	87 259	25	2,40	15,50
32	Disco 40	APKT 1003PD R-M DP30M	28,0	1,000	0,250	157	1 248	624	17 472	31	0,57	4,36
37	Disco 66	PE 05 P35 ABS - 1 -1.1H	46,2	2,000	0,290	143	690	1 001	92 446	29	2,88	39,80
38	Disco 52	WNMX09T316ZNN-MM	36,4	1,500	0,250	196	1 200	1 800	98 280	24	3,17	25,20

Relativamente ao terceiro material, o C265 tem uma dureza idêntica à do F10 e insere-se no mesmo grupo de materiais, o P20, no entanto possui uma maior quantidade de elementos de liga, resultando numa pior maquinabilidade. Por outro lado, o C265 é fornecido no estado recozido, o que elimina a presença de inclusões de partículas duras nos blocos a maquinar. Segundo os operadores, este material desgasta muito as ferramentas, pelo que não pode sequer ser comparado à maquinagem de nenhum dos outros materiais.

Por fim, na inexistência de valores de referência quanto à maquinagem do Al5083 ou do POM torna-se difícil fazer uma previsão de resultados/parâmetros a aplicar, visto que as pastilhas são destinadas à maquinagem de aços. No entanto, recorrendo à aplicação da *Sandvik Coromant* para simular a aplicabilidade de uma pastilha na maquinagem de alumínio com dureza semelhante, e usando os mesmos parâmetros tabelados para os aços, obtém-se valores de velocidade de corte cerca de 130-230% superiores. Desta forma, sabe-se que é teoricamente possível e aconselhável aumentar os valores nesta proporção usando pastilhas com as respetivas características. Outra possibilidade é a de usar pastilhas do grupo ISO N, no entanto não se analisará neste estudo. Tendo por base o que já é costume aplicar na maquinagem destes materiais (aumento da velocidade de avanço e respetiva rotação em 150% na consola do equipamento - valor máximo para ajuste manual), admite-se que se pode continuar a usar o mesmo método, considerando os parâmetros de corte estimados para o F10.

Na Tabela 28 apresenta-se uma estimativa dos valores a aplicar na maquinagem de Al5083 e de POM, tendo em conta as limitações impostas pelos equipamentos.

Tabela 28 - Estimativa de valores de N e V_f a aplicar na maquinagem de Al5083 e POM.

Nº	Designação	Referência	Parâmetros ótimos para maquinagem de F10					Parâmetros ótimos para maquinagem de Al/POM			
			a_e [mm]	a_p [mm]	f_z [mm/rot]	V_c [m/min]	N [RPM]	V_f [mm/min]	V_f hipotética [mm/min]	V_f aplicável [mm/min]	N resultante [RPM]
11	Disco 21	SPKW 06T2008 DM AM10	14,7	0,500	1,167	160	2430	8505	12758	10000	2857
14	Disco 13	EOMT060210ZER	9,1	0,381	0,508	268	6562	10000	15000	10000	6562
15	Disco 25	EPMT100312ZER	17,5	0,760	0,635	193	3150	10000	15000	10000	3150
15	Disco 35	EPMT100312ZER	24,5	0,760	0,635	228	2460	7811	11716	10000	3150
32	Disco 40	APKT 1003PD R-M DP30M	28,0	1,000	0,250	261	2080	1040	1560	1560	3120
37	Disco 66	PE 05 P35 ABS - 1 -1.1H	46,2	2,000	0,290	238	1150	1668	2501	2501	1725
38	Disco 52	WNMX09T316ZNN-MM	36,4	1,500	0,250	327	2000	3000	4500	4500	3000

Por fim, criou-se uma biblioteca que associa cada material específico aos parâmetros de corte respetivos, para que estes sejam facilmente selecionados aquando da programação.

5.4. Aplicação de parâmetros nos centros de maquinagem

Todos os testes apresentados anteriormente foram realizados na CNC3, pois foi possível monitorizar mais parâmetros relacionados com a maquinagem e também por estar, *a priori*, mais próxima das condições ótimas de funcionamento, dado ter sido mais recentemente adquirida e, dessa forma, por induzir uma menor quantidade de variáveis imprevisíveis.

Por ser mais potente do que os centros de maquinagem CNC1 e CNC2 (Tabela 14), admite-se que os limites aconselhados de funcionamento da CNC3 são comparativamente superiores pelo que, na ausência das curvas de potência e binário de corte dos dois primeiros equipamentos, se utilizam os seus valores limite disponibilizados e os declives presentes nas curvas da CNC3 para traçar as curvas das CNC1 e CNC2, já tendo em conta um igual limite de 60% para preservação dos equipamentos. Este método apenas carece dos valores corretos de rotação para os quais acontecem as mudanças de regime, mas sabendo o limite máximo real de potência de corte, admite-se como sendo válido.

Na Figura 51, apresentam-se as curvas de potência e binário de corte estimadas para as CNC1 e CNC2 (linhas a laranja).

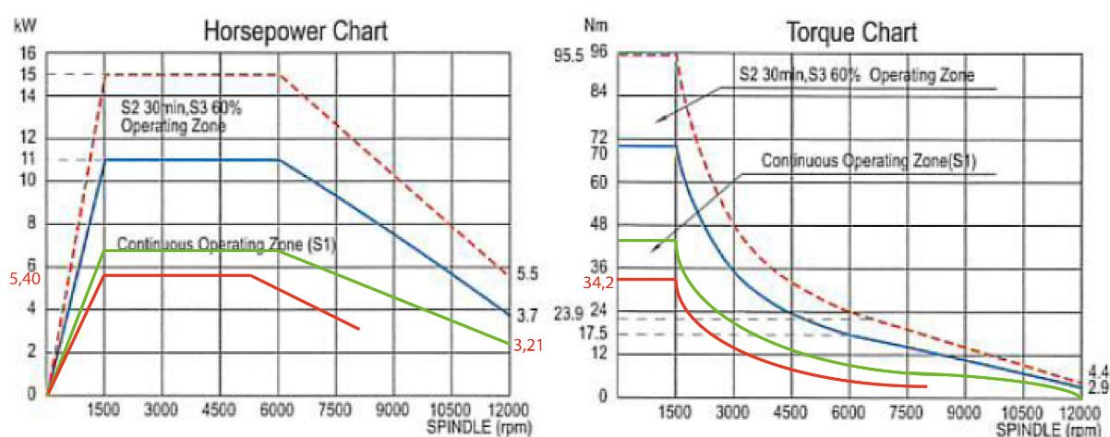


Figura 51 - Curvas de potência e de binário de corte estimadas para as CNC1 e CNC2.

Fazendo uma comparação entre o conjunto de parâmetros ótimos para maquinagem de F10 (ver Tabela 25) e de PM300 (ver Tabela 27), obtém-se valores de potência e binário de corte superiores no primeiro.

Analisando as potências e binários de corte apresentados no conjunto de parâmetros otimizados para maquinagem de F10, em conjunto com as respetivas frequências de rotação, nota-se que apenas a ferramenta nº37, designada como disco 66, ultrapassa os limites de potência e binário de corte estimados para as CNC1 e CNC2. A ferramenta nº38, designada de disco 52, está próxima do limite (59,4%), mas não o ultrapassa. De facto, as duas ferramentas referidas apenas se aplicam na CNC3, exatamente pelas razões apresentadas, pelo que a ferramenta com maior demanda para as CNC1 e CNC2 é o disco 35, totalizando 46,7% da carga máxima nominal.

Em suma, nenhum grupo de parâmetros definido ultrapassa os limites aconselhados dos equipamentos, tornando possível uma aplicação transversal dos parâmetros de corte entre eles.

5.5. Balanço relativo à proposta de novos parâmetros de corte

Em função do aumento proposto dos parâmetros de corte comparativamente aos valores inicialmente praticados pela empresa, procura-se que o balanço seja positivo, tendo em conta as novas taxas de remoção de material e do aumento da produtividade.

A análise dos ganhos resultantes ajuda a quantificar o retorno do estudo realizado e de que forma será sentido na produção de peças na empresa. Com o aumento das taxas de remoção de material reduz-se o tempo de maquinagem, melhorando a produtividade, e resulta ainda em menor custo unitário se os consumos de ferramentas forem controlados.

5.5.1. Ganhos de produção

O grande objetivo é aumentar a produtividade e reduzir os custos de produção através da otimização dos parâmetros de corte de cada pastilha nas operações de desbaste. Importa saber quais os ganhos usando as ferramentas com o número total de pastilhas.

Por um lado, o aumento da taxa de remoção de material traz vantagens diretas por reduzir o tempo de maquinagem; por outro lado isso induz um maior desgaste das ferramentas, pelo que é necessário formular um balanço tendo em conta todos os aspetos mensuráveis. Assim sendo, os passos apresentados de seguida conduzem à equação final que trará o ganho financeiro de cada ferramenta, por unidade de volume de material removido, sendo baseados no método de Gilbert apresentado em [20]. Nas expressões abaixo, o índice u refere-se a características calculadas com os parâmetros usados na empresa aquando do início do estudo e o índice f a características calculadas com os parâmetros finais após o estudo de otimização.

A diferença do tempo de maquinagem Δt_m , vem em função das diferentes taxas de remoção de material e do número de pastilhas, sendo $V(\text{mm}^3)$ o volume de material maquinado e $t_x(\text{s})$ o tempo de maquinagem com o grupo de parâmetros x :

$$\Delta t_m = t_u - t_f = \frac{V}{Q_u} - \frac{V}{Q_f} = V \left(\frac{1}{Q_u} - \frac{1}{Q_f} \right) \quad (27)$$

Assim, o ganho de maquinagem (G_m) está associado à diferença do tempo de maquinagem provocado pela alteração de parâmetros de corte, tendo em conta o custo de maquinagem/mão-de-obra $C_o(\text{€/min})$.

$$G_m = \Delta t_m * C_o \quad (28)$$

O ganho no uso da ferramenta (G_f) não depende do número de pastilhas por disco, vindo em função do custo de utilização por aresta de corte $C_{fx}(\text{€/min})$, tendo em conta a vida de ferramenta para 0,2mm de desgaste. Na realidade, a pastilha é utilizada até à rotura, resultando num custo de utilização ainda mais baixo. No entanto, como este fim de vida é imprevisível, cinge-se os cálculos dos ganhos às vidas aferidas.

$$G_f = \Delta t_m \left(\frac{z * P_t}{z * T_u} - \frac{z * P_t}{z * T_f} \right) = \Delta t_m (C_{fu} - C_{ff}) \quad (29)$$

O ganho na troca de pastilhas G_t vem em função de parâmetros já conhecidos:

$$G_t = \left(\frac{t_u}{z * T_u} - \frac{t_f}{z * T_f} \right) z * T_t * C_o = V \left(\frac{1}{T_u * Q_u} - \frac{1}{T_f * Q_f} \right) T_t * C_o \quad (30)$$

O somatório dos 3 ganhos acima referidos, quantifica o ganho total para um volume específico e toma a forma:

$$G = G_m + G_f + G_t = V \left[\left(\frac{1}{Q_u} - \frac{1}{Q_f} \right) (C_o + C_{fu} - C_{ff}) + C_o * T_t \left(\frac{1}{T_u * Q_u} - \frac{1}{T_f * Q_f} \right) \right] \quad (31)$$

Por fim, vem o ganho por unidade de volume, de modo a ser aplicável em qualquer situação, pelo que se tem:

$$\frac{G}{V} = \left(\frac{1}{Q_u} - \frac{1}{Q_f} \right) (C_o + C_{fu} - C_{ff}) + C_o * T_t \left(\frac{1}{T_u * Q_u} - \frac{1}{T_f * Q_f} \right), \left[\frac{\text{€}}{\text{mm}^3} \right] \quad (32)$$

Tendo em conta a equação (32) e os conjuntos de parâmetros ótimos para a maquinagem dos aços F10 e PM300 (ver Tabela 25 e Tabela 27, respetivamente), na Tabela 29 apresentam-se os ganhos [€/mm³] para a maquinagem de cada um dos materiais, calculando os respetivos valores para um volume exemplo de material desbastado de 100 000 mm³, bem como o tempo de maquinagem usando os parâmetros aplicados na empresa e usando os parâmetros ótimos estimados; e ainda a diferença no tempo de maquinagem (Δt_m). Da observação da mesma, conclui-se que existem casos em que a diferença de tempo de maquinagem é muito significativa. No caso do desbaste do aço F10, em todas as ferramentas ocorre uma melhoria no tempo de maquinagem e ainda resulta em lucro. No Anexo I apresentam-se todos os dados utilizados na determinação dos referidos ganhos.

De notar dois casos distintos na maquinagem do aço PM300:

1. Ferramenta nº 15 (Disco 25) - o tempo de maquinagem reduz para cerca de metade, mas o ganho associado é negativo, o que traduz num gasto superior de custos. No entanto, conseguiu-se otimizar a produtividade em cerca de 200%.
2. Ferramenta nº37 (Disco 66) - por considerar os mesmos parâmetros de corte para a maquinagem de todos os aços, nas condições iniciais da empresa, e pela taxa de remoção de material otimizada para a maquinagem de F10 ser próxima da calculada através dos valores usados na instituição, a redução de 60% da velocidade de corte para maquinagem do PM300 induz uma descida significativa na taxa de remoção de material, e conseqüentemente no ganho e no tempo de maquinagem. No entanto, a diferenciação de parâmetros de corte entre os aços, traz vidas de ferramenta mais estáveis e progressivas, o que é desejável.

Tabela 29 - Ganhos por unidade de volume baseados nos parâmetros de corte otimizados.

Nº	Designação	Referência	Ganho F10 [€/mm ³]	Ganho PM300 [€/mm ³]	Desbaste de 100 000mm ³ F10				Desbaste de 100 000mm ³ PM300			
					Ganho [€]	t _u [min]	t _f [min]	Δt _m [min]	Ganho [€]	t _u [min]	t _f [min]	Δt _m [min]
11	Disco 21	SPKW 06T2008 DM AM10	0,0000533	0,0000518	5,33 €	18,00	1,60	16,40	5,18 €	18,00	2,67	15,33
14	Disco 13	EOMT060210ZER	0,0000203	0,0000122	2,03 €	10,18	2,88	7,29	1,22 €	10,18	4,29	5,88
15	Disco 25	EPMT100312ZER	0,0000028	-0,0000007	0,28 €	1,97	0,75	1,22	-0,07 €	1,97	0,99	0,99
15	Disco 35	EPMT100312ZER	0,0000022	0,0000005	0,22 €	1,17	0,69	0,48	0,05 €	1,17	1,15	0,02
32	Disco 40	APKT 1003PD R-M DP30M	0,0000702	0,0000615	7,02 €	14,88	3,43	11,45	6,15 €	14,88	5,72	9,16
37	Disco 66	PE 05 P35 ABS - 1 -1.1H	0,0000004	-0,0000022	0,04 €	0,72	0,65	0,07	-0,22 €	0,72	1,08	-0,36

5.5.2. Visão geral de ganhos

Com o auxílio dos operadores, recolheram-se dados relativos aos tempos de maquinagem de peças no período de uma semana, com o objetivo de determinar uma quantidade de referência de material desbastado. Apesar do valor recolhido ser muito específico à produção dessa semana, este ajuda a quantificar os ganhos numa escala maior e mais útil. De forma a ser um procedimento simples, pediu-se que registassem os tempos de maquinagem das operações de desbaste executadas, relativos aos 3 centros de maquinagem, associando-os à respetiva ferramenta. Para cada ferramenta, multiplicando o tempo de maquinagem semanal registado pela taxa de remoção de material respetiva (referente aos parâmetros usados), tem-se o volume aproximado de material removido durante esse período. De seguida, multiplicando o valor obtido pelo respetivo ganho por unidade de volume, tem-se uma dedução do ganho possível usando os parâmetros otimizados.

Antes de calcular o valor total, há que ter em conta que os ganhos não são iguais para todos os aços, tendo-se definido os parâmetros ótimos para a maquinagem de F10 e de PM300 (ver Tabela 25 e Tabela 27, respetivamente). Sendo assim, para calcular o ganho total é necessário identificar qual a representação exata de cada material nas operações de desbaste na maquinagem de peças. Para isso, recolheram-se dados relativos à compra de material no primeiro semestre de 2020. A admissão destas quantidades para uma avaliação geral seria demasiado específica.

No sentido direto da avaliação, maior massa de material adquirida não significa necessariamente que se desbastou maior quantidade desse mesmo material, pois tudo depende da geometria da peça a produzir. No entanto, tendo conhecimento das geometrias das peças maquinadas internamente e dos sobredimensionamentos atribuídos aos blocos para maquinagem, é seguro utilizar a proporção de material adquirido para corresponder à quantidade de material desbastado a que cada matéria-prima corresponde.

Na Tabela 30, registou-se a massa adquirida de cada material e calcularam-se os volumes respetivos e resultante representação, através da correspondente densidade. Não se contabilizam as quantidades adquiridas de Al5083 nem POM, dado não ter sido feita uma análise fundamentada quanto à maquinagem destes materiais.

Tabela 30 - Representação da utilização de cada aço na empresa.

Material	Massa adquirida [kg]	Densidade	Volume [dm³]	% na produção
F10	3618,5	7,84	461,5	89,8
PM300	314,5	7,80	40,3	7,8
C265	94,5	7,70	12,3	2,4

Desta forma, contabilizando a proporção da utilização de cada material e respetivos ganhos na Tabela 31, dispõe-se os resultados obtidos para as ferramentas nº 14, 15 e 37, pois são as mais usadas e das quais se recolheram tempos de maquinagem na semana analisada. Segundo os operadores, durante esse período teve-se uma utilização habitual das ferramentas, pelo que se apresentam os resultados apenas em função dos casos referidos.

Tabela 31 - Ganhos semanais estimados em função das pastilhas mais utilizadas.

Nº	Designação	Referência	Ganho F10 [€/mm ³]	Ganho PM300 [€/mm ³]	T_semana CNC1/2 [min]	T_semana CNC3 [min]	V removido @Q_u [mm ³]	Ganho semanal F10 [€]	Ganho semanal PM300 [€]	Ganho semanal [€]
14	Disco 13	EOMT060210ZER	0,0000203	0,0000122	364	104	1533168	31,09 €	18,75 €	29,38 €
15	Disco 25	EPMT100312ZER	0,0000028	-0,0000007	0	105	1065015	3,00 €	-0,75 €	2,63 €
15	Disco 35	EPMT100312ZER	0,0000022	0,0000005	600	229	14194602	30,87 €	7,38 €	28,30 €
37	Disco 66	PE 05 P35 ABS - 1 -1.1H	0,0000004	-0,0000022	0	100	2772000	1,02 €	-6,18 €	0,44 €

Segundo os dados recolhidos, prevê-se um ganho semanal de 60,76€ (267,32€ mensal, considerando 22 dias úteis) na maquinaria de peças em F10 e PM300.

Apesar de ocorrer uma perda ao invés de um ganho, nos casos dos discos 25 e 66, pelo PM300 ser maquinado em muito menor quantidade do que o F10, o balanço semanal acaba por ser positivo e as ferramentas têm uma vida útil estável e progressiva.

5.5.3. Redução de custos por aumento da taxa de remoção de material e aumento da produtividade

Existindo um aumento significativo na grande parte das taxas de remoção de material, prevê-se que seja possível aumentar a produtividade, i.e., a quantidade de material desbastado no mesmo espaço de tempo, tendo em conta as quantidades de material maquinado e a representatividade de cada ferramenta na maquinaria de peças. Assim, é provável que se consiga aumentar os ganhos financeiros.

A taxa de remoção de material pesada pela utilização de cada material (Q_{fm}) é calculada através da média ponderada entre a Q_f de cada material e a respetiva proporção de utilização.

Fazendo uma comparação direta entre a Q_{fm} e a taxa de remoção de material segundo os parâmetros usados na empresa (Q_u), tem-se uma proporção média do aumento por alteração dos parâmetros.

Recorrendo ao tempo de maquinaria semanal de cada ferramenta, afere-se a representatividade de cada ferramenta no tempo total de maquinaria. Combinando ambos os valores referidos com o ganho deduzido na tabela anterior, que constitui o peso de maquinaria de cada um dos materiais, tem-se um ganho estimado da produção.

Tabela 32 - Ganhos semanais contabilizando o aumento da produtividade.

Nº	Designação	Referência	Q_{fm} [mm ³ /min]	Comparação Q_{fm}/Q_u	Representatividade temporal da utilização da ferramenta	Ganho semanal total [€]
14	Disco 13	EOMT060210ZER	11424	348,73%	31,16%	61,31 €
15	Disco 25	EPMT100312ZER	26295	259,24%	6,99%	3,11 €
15	Disco 35	EPMT100312ZER	28152	164,41%	55,19%	53,98 €
37	Disco 66	PE 05 P35 ABS - 1 -1.1H	29826	107,60%	6,66%	0,47 €

Como o balanço semanal é positivo, em comparação com as condições usadas na empresa, o aumento da produtividade induz num aumento do ganho para o mesmo período, resultando em 118,87€ semanais (523,05€ mensais, considerando 22 dias úteis).

Tendo em conta a comparação entre taxas de remoção de material e a representatividade temporal da utilização de cada ferramenta, prevê-se uma produtividade de 218% em relação à praticada inicialmente.

5.5.4. Retorno do investimento nos testes

Através do ganho calculado é interessante saber em quanto tempo as melhorias efetuadas trarão o retorno do investimento feito na realização de testes. Como os volumes de material removido, os tempos de maquinagem e as quantidades de ferramentas foram sendo registadas ao longo do processo, torna-se expedito executar esta análise. No que toca a material, será contabilizado o volume removido cujo propósito foi apenas direcionado para este estudo.

Na Tabela 33, registam-se os gastos estimados dos testes executados. As quantidades foram calculadas tendo em conta os dados disponíveis no Anexo H. No tempo de manuseamento foram considerados 10 minutos por cada aperto de material executado, 10 minutos para cada programação e 5 minutos por teste para discussão de resultados.

Tabela 33 - Aferição dos gastos inerentes à execução dos testes.

Tema	Quantidade	Custo por unidade	Custo [€]
Desbaste de F10	46,02kg	1,06€/kg	48,78
Desbaste de PM300	20,58kg	1,35€/kg	27,78
Tempo de maquinagem	142min	0,50€/min	71,00
Ferramentas	5/4	8,22€/8,25€	74,10
Tempo de manuseamento*	325min	0,50€/min	162,50
Tempo de substituição de ferramentas	16,06min	0,50€/min	8,03
		Total	392,19

*Programação de cada ciclo de testes, preparação do material e discussão de resultados

De notar que grande parte das ferramentas não sofreu um desgaste que justificasse serem substituídas, pois era reduzido e para avaliação do estudo. Ainda assim, contabiliza-se o custo total de cada aresta de corte usada.

Tendo em conta o custo total aferido e o ganho calculado, tem-se que o retorno do investimento acontecerá em pouco mais de 3 semanas. Assim, valerá a pena continuar a realizar estudos similares para otimização do processo de maquinagem.

6. Otimização da utilização das fresas monobloco

Na Secção 4 analisou-se o consumo de ferramentas registado durante um período de dois meses, pelo que se concluiu que a utilização das fresas monobloco poderia ser rentabilizada recorrendo à afiação das mesmas, indo também de encontro a um dos objetivos desta dissertação.

A maioria das ferramentas substituídas durante o período suprarreferido apresentavam um desgaste reduzido nas arestas de corte, como apresentado na Figura 52, mas suficiente para não cumprir requisitos de toleranciamento. No entanto, algumas das fresas possuíam a ponta completamente destruída (Figura 53).

Como as fresas são maioritariamente usadas para operações de acabamento, o cenário descrito no primeiro caso é mais frequente, podendo ocorrer o segundo para rentabilização do poder de corte da fresa para operações de desbaste, em que o cumprimento de tolerâncias não é requerido. Perante estas duas situações, sabe-se que quanto maior for o desgaste/dano da ferramenta, mais severo será o processo de afiação, trazendo maiores variações dimensionais na ferramenta após execução do processo.



Figura 52 - Fresa monobloco analisada após utilização (ferramenta nº 17). À esquerda: fotografia da ferramenta; à direita: observação microscópica da lâmina (desgaste na aresta de corte: 72,47µm).

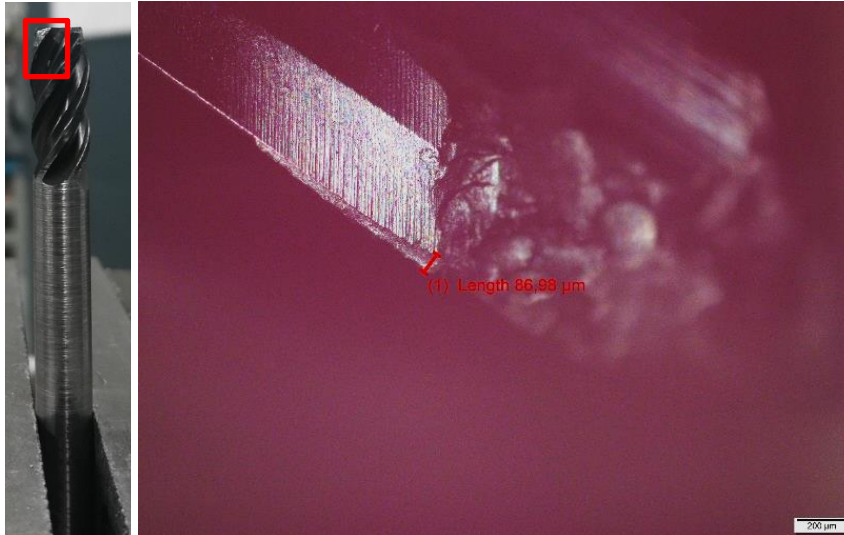


Figura 53 - Fresa monobloco analisada após utilização (ferramenta nº 16). À esquerda: fotografia da ferramenta; à direita: observação microscópica da lâmina (desgaste na aresta de corte: 86,38μm).

6.1. Afição das ferramentas substituídas

Tal como é referido na bibliografia disponível [24], para a afiação garantir o desempenho inicial, aconselha-se que esta seja executada pelo próprio fabricante, pois garantem que os processos de afiação sejam idênticos aos que foram utilizados para a produzir a ferramenta inicial.

Desta forma, entrou-se em contacto com os fornecedores das ferramentas monobloco da empresa para saber se afiam ferramentas e quais os seus pontos de vista relativamente à rentabilidade deste processo de reaproveitamento, esperando um de dois cenários distintos:

- Se realizam a afiação: qual o desempenho garantida, o custo de operação e o prazo de entrega;
- Se não realizam: qual a opinião sobre afiar as ferramentas e se têm conhecimento de casos bem sucedidos de utilização de ferramentas afiadas.

Do contacto com 2 fornecedores constatou-se que nenhum deles afia ferramentas, no entanto, a opinião de cada um deles é distinta, pelo que se apresenta abaixo.

Fornecedor 1

Segundo a experiência que tem, é um procedimento que não o convenceu, principalmente pela má desempenho das mesmas após afiação, havendo três razões principais:

- quando não é feito o revestimento correto, a ferramenta tem um desgaste abrupto;
- a sobreposição inevitável de revestimentos pode afetar o controlo dimensional da peça;
- dificilmente se consegue a mesma geometria de corte.

Deixou ainda algumas notas:

- Se as ferramentas afiadas forem aplicadas em desbastes, não é necessária tanta preocupação no que toca a rigor dimensional, logo a análise às vantagens deverá ser feita apenas de um ponto de vista económico;

- É necessário ter um stock duplo para substituição das ferramentas enquanto parte delas estiver em processo de afiação.

Fornecedor 2

O panorama mostrado foi mais positivo. Dado que em tempos subcontractava a afiação de ferramentas, referiu que nos dias de hoje é possível encontrar afiadores não produtores de ferramentas capazes de devolver o desempenho, quase na totalidade ou até melhor, à ferramenta, pois esta depende principalmente do revestimento, que pode ser ainda melhor do que o original. Indicou ainda, que geralmente só se afiam fresas com diâmetros superiores a 6mm, pois para diâmetros mais reduzidos, o custo da afiação torna-se mais representativo e mais dificilmente se verificam vantagens económicas. Segundo este, o preço de afiação deve ser até 50% do preço inicial da ferramenta. Por fim, desmistificou alguns pontos, que por vezes afetam a tomada de decisão quanto a este assunto:

- Uma fresa monobloco integral de metal duro não amacia com o revestimento, dado que tem um ponto de fusão muito alto. Por outro lado, nas ferramentas em HSS, é um fator a ter em conta;
- Ao contrário do indicado pelo fornecedor 1, o duplo revestimento não se dá nas zonas de corte da fresa dado que as arestas são retificadas na totalidade, sendo que esta dupla camada apenas se verifica nas zonas de escoamento de apra. Pode sim afetar o arrefecimento da fresa, por constituir uma camada extra à transferência de calor. No entanto são também barreiras à transferência de calor para a fresa;
- Por vezes, a barreira criada quanto a este tema da afiação é apenas “psicológica”, pois uma má execução da afiação constitui uma imagem negativa para todo o processo, mesmo existindo quem o consiga executar com sucesso.

Tendo em conta os relatos transmitidos e o panorama da aplicação das ferramentas monobloco na empresa em questão, a afiação teria de garantir bons resultados superficiais, para executar bons acabamentos, não podendo ocorrer uma grande variação das dimensões, de modo a não prejudicar a aplicabilidade da ferramenta. Apesar da ferramenta ser medida ao introduzir-se no equipamento, é necessário uniformizar as dimensões da mesma.

Visto que nenhum dos fornecedores executava o processo, sentiu-se a necessidade de encontrar alguma entidade que o fizesse, garantindo os requisitos necessários.

Após alguma procura, contacto e decisão, solicitou-se a afiação das três fresas monobloco mais utilizadas, nomeadamente as ferramentas nº 17, 19 e 21, a um centro técnico de afiação de ferramentas. À exceção da ferramenta nº19, as restantes ferramentas enviadas tinham sido substituídas durante o período analisado, de modo a ser possível fazer um balanço de desempenho *a posteriori*.

6.2. Avaliação das ferramentas afiadas

As ferramentas afiadas foram recebidas após um prazo alargado de entrega e apresentavam algumas variações fulcrais, no que concerne a questões dimensionais.

Na Tabela 34, apresentam algumas dimensões relevantes referentes às ferramentas afiadas (parâmetros com índice *f*), comparando-as com as respetivas medidas iniciais (parâmetros com índice *i*). Na Figura 54, dispõe-se fotografias comparativas de ambos os casos.

Tabela 34 - Comparação dimensional de fresas monobloco antes e após afiação.

Nº	Referência	D _i	D _f	L _i	L _f	L _{oi}	L _{of}
17	9164100610	6,00	5,95	60	52	15	7
19	9164100810	8,00	7,60	80	77	20	17
21	9164101010	10,00	9,90	80	74	24	18

Parâmetros da ferramenta [mm]: D - diâmetro; L - comprimento; L_o - altura de trabalho.

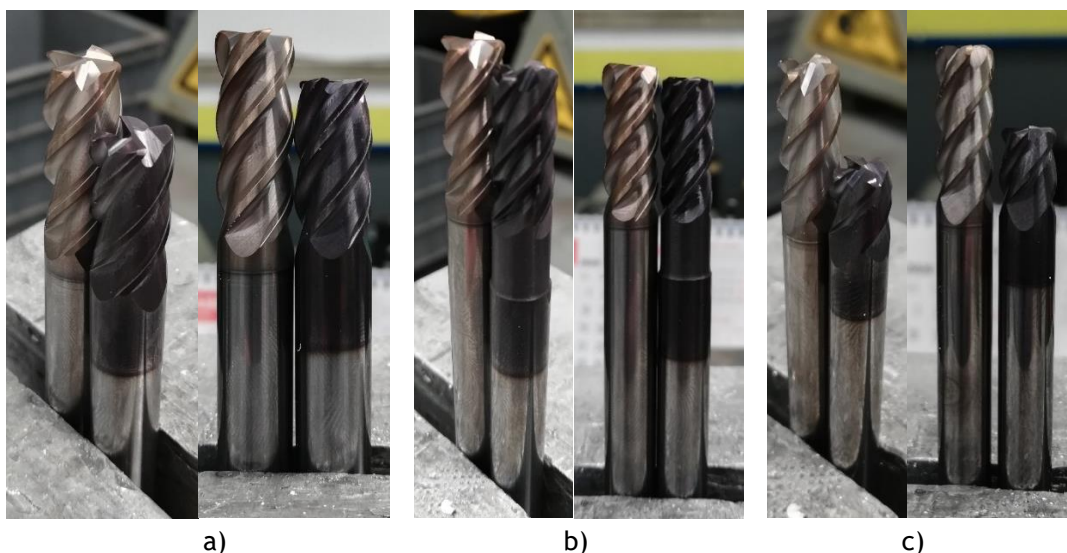


Figura 54 - Fotografias comparativas entre ferramentas novas e afiadas: a) nº21; b) nº19; e c) nº17.

Na Tabela 34, as dimensões realçadas a vermelho, indicam dimensões indesejáveis, por constituírem barreiras à maquinagem de componentes. Passam-se a especificar:

- Ferramenta nº17 - a versão afiada perdeu mais de 50% da altura de trabalho, fruto do desgaste localizado na ponta. Apenas 7mm de altura de trabalho é muito reduzido e condiciona em muito a aplicabilidade da fresa.
- Ferramenta nº19 - apesar da altura de trabalho ter sido pouco afetada, o diâmetro foi reduzido para um valor abaixo das expectativas. Por vezes utiliza-se a ferramenta em profundidades superiores à altura de trabalho, retificando uma pequena parte da haste (logo a seguir às hélices) por meios de remoção de material com uma lixa de diamante. Neste caso, 0,4mm de diferença no diâmetro é uma quantidade muito elevada para adaptar através deste processo.

Visualmente, foi possível concluir que o revestimento aplicado difere do original, pelo que a seu desempenho deverá ser averiguada no período de testes.

A redução de diâmetro e do comprimento das ferramentas é inevitável, no entanto deve ser o menor possível, caso contrário acaba por perder rentabilidade pela redução do leque de operações em que pode ser aplicada. No cenário do processo de afiação ser rentável e aplicado na empresa, os pontos referidos anteriormente devem ser discutidos e corrigidos, de modo a executar uma afiação mais favorável à utilização da ferramenta.

A avaliação do desempenho das fresas afiadas é abordada no tópico seguinte, sendo que a ferramenta nº17 não será avaliada dado que a sua altura de trabalho foi demasiado reduzida.

6.2.1. Testes

Sendo que se tratam de ferramentas com vidas muito longas, aplicadas maioritariamente em operações de acabamento, submetê-las a testes de desgaste, equivalentes aos realizados nas ferramentas de pastilhas, seria muito demorado. Em alternativa, após receção das fresas afiadas, duas delas foram montadas de imediato nos centros de maquinagem, nomeadamente as ferramentas nº 19 e 21, para avaliação da seu desempenho.

Ambas as ferramentas selecionadas provêm do mesmo fabricante e pertencem à mesma classe, variando entre elas apenas o diâmetro e a altura de trabalho. Da mesma forma, a velocidade de corte aplicada é igual para ambas, sendo os restantes parâmetros de corte afinados pelo diâmetro respetivo.

Com a execução deste teste, pretende-se comparar as ferramentas afiadas às originais, no que concerne à durabilidade, aos padrões de desgaste, ao comportamento em trabalho (se as ferramentas estão devidamente equilibradas) e se a afiação condiciona o normal funcionamento da produção de peças.

Tendo por base a informação recolhida quanto ao consumo de ferramentas durante um período de 2 meses, espera-se que a fresa nº21 tenha uma vida de 14,7 dias úteis, ou seja, de aproximadamente 3 semanas, para poder equivaler o desempenho média da ferramenta original. No que toca à ferramenta nº19, apenas ocorreu uma troca durante o período analisado, por ser usada em muito menor escala. Desta forma, a operação desta ferramenta durante o período de testes ajudará apenas a comparar as desempenhos, sabendo que foi pedida uma maior frequência na utilização da mesma durante o período restante para a realização deste estudo.

Na Figura 55, apresentam-se fotografias que ajudam a comparar o estado da ferramenta nº21 afiada, 12 dias após ser montada no centro de maquinagem e uma ferramenta original substituída durante o período de análise após 11 dias de utilização. Da observação da mesma, comparando com o estado com o qual foi fornecida (ver Figura 54-a), conclui-se que:

- O desgaste nas arestas de corte laterais é reduzido e progressivo, pelo que ainda é capaz de operar por mais tempo de forma estável;
- A ponta da ferramenta sofreu fraturas visíveis - resultado da fresa monobloco ter sido encurtada através de um corte plano. A ferramenta original tem um ângulo negativo na ponta, que ajuda no escoamento da aparas na fresagem de topo ou de canto;
- O desgaste do revestimento após afiação é visivelmente superior;
- A vida da ferramenta é superior a 12 dias.

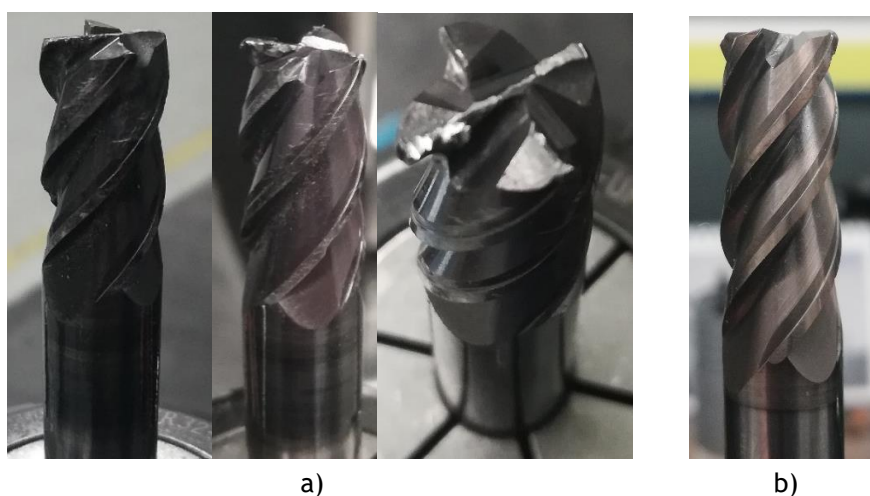


Figura 55 - Ferramenta nº21: a) afiada, 12 dias após instalação no centro de maquinagem; e b) original, substituída durante o período de análise após 11 dias de utilização.

6.3. Balanço

Antes de efetuar o balanço em função dos resultados dos testes, é possível determinar qual a vida mínima que a ferramenta deverá apresentar para ser rentável, em função do custo de afiação. Na Tabela 35, mostra-se a referida análise.

Tabela 35 - Análise de custos de utilização das ferramentas afiadas.

Nº	Designação	Referência	Preço [€]	Quantidade substituída nos 2 meses analisados	Vida de ferramenta média [dias]	Custo de utilização [€/dia]	Custo de afiação [€]	Rácio custo de afiação / preço inicial	Vida mínima para ser vantajoso [dias]
17	FR-MD-D6 Z4 R1.0 - HS 4 06 R1.0-ABS	9164100610	28,67€	5	26,4	1,09€	12,30 €	42,90%	11,3
19	FR-MD-D8 Z4 R1 Enc.8 - HS 4 08 R1.0-ABS-3.1 C 44/18	9164100810	39,60€	1	132,0	0,30€	15,45 €	39,02%	51,5
21	FR-MD-D10 Z4 R1 Enc.10 - HS 4 10 R1.0-ABS	9164101010	44,60€	9	14,7	3,04€	19,20 €	43,05%	6,3

Analisando o caso da ferramenta nº 21, mesmo que não tenha uma duração equivalente à fresa monobloco original, por ter um custo de afiação menor (43,05% do preço inicial), após 6,3 dias de utilização, esta passa a ser rentável. Quanto maior for a duração, maior será a rentabilidade, obviamente.

Da observação das ferramentas monobloco substituídas durante o período de análise, conclui-se que todas possuem capacidade de serem afiadas. Apenas as ferramentas de menor diâmetro (não afiáveis) apresentaram fraturas que impedem a afiação. Extrapolando o desempenho da ferramenta testada às ferramentas nº 17 e 19 e assumindo que a afiação será feita de forma a não prejudicar a aplicabilidade destas fresas, é possível prever o balanço financeiro mínimo resultante.

Em função da informação presente na folha de registo de consumo de ferramentas e dos testes efetuados, apenas se pode comparar o desempenho da fresa monobloco nº21. Assim sendo, admitindo que a referida ferramenta tem uma vida de ferramenta mínima de 12 dias e que o valor médio obtido no período de recolha é de 14,7 dias, então o desempenho será, no mínimo de 81,6% em relação à original.

De referir, que a afiação de ferramentas não exclui a compra das ferramentas novas, pelo que o ganho resultante apenas se faz sentir durante o período em que a ferramenta afiada está a ser utilizada. Assim, considerando 22 dias úteis e que as ferramentas são afiadas apenas uma vez, o ganho financeiro mensal (€) é dado pela seguinte expressão:

$$\text{Ganho mensal} = \text{ganho de utilização da ferramenta afiada} * \frac{T_{\min}}{T + T_{\min}} * 22 \quad (33)$$

Admitindo ainda que o desempenho das outras ferramentas será similar, na Tabela 36 apresenta-se a estimativa do ganho financeiro, prevendo-se um ganho mínimo de 20,84€/mês.

Tabela 36 - Estimativa do ganho financeiro obtido pela afiação das fresas monobloco mais utilizadas na empresa.

Nº	Designação	Referência	Preço [€]	Vida de ferramenta média T [dias]	Custo de utilização [€/dia]	Custo de afiação [€]	Vida mínima em função do resultado dos testes T_min [dias]	Custo de utilização da ferramenta afiada [€/dia]	Ganho de utilização da ferramenta afiada [€/dia]	Ganho mensal [€]
17	FR-MD-D6 Z4 R1.0 - HS 4 06 R1.0-ABS	9164100610	28,67€	26,4	1,09€	12,30 €	21,5	0,57 €	0,52€	5,09€
19	FR-MD-D8 Z4 R1 Enc.8 - HS 4 08 R1.0-ABS-3.1 C 44/18	9164100810	39,60€	132,0	0,30€	15,45 €	107,7	0,14 €	0,16€	1,55€
21	FR-MD-D10 Z4 R1 Enc.10 - HS 4 10 R1.0-ABS	9164101010	44,60€	14,7	3,04€	19,20 €	12,0	1,60 €	1,44€	14,20€

Por fim, conclui-se que o ganho resultante é baixo, dado que o período de testes da ferramenta afiada foi curto. No entanto, na Figura 55-a observou-se que existe potencial para que a vida da ferramenta se prolongue, resultando num ganho superior.

7. Conclusões e Trabalhos futuros

7.1. Conclusões

A realização desta dissertação resultou, acima de tudo, numa avaliação da utilização das ferramentas de corte utilizadas na empresa *Dinâmica Virtual - Serviços de Engenharia, Lda.*, especificamente aplicadas nos materiais nela maquinados em operações de fresagem. Esta avaliação permitiu determinar que pontos poderiam ser melhorados, tendo em conta o contexto de produção de peças da entidade em questão.

Apesar de se tratar de uma empresa de produção de peças únicas ou de séries muito pequenas, o panorama atual da atividade da mesma requer uma demanda muito alta da produção, pelo que se optou por maximizar a produtividade sem que o balanço total de custos fosse negativo. Geralmente, maximizar a produtividade traz um aumento de custos em prol do aumento da taxa de remoção de material, fruto do aumento de consumo de ferramentas. No entanto, o balanço de custos foi positivo, o que leva a crer que as ferramentas de pastilhas estavam a ser utilizadas muito aquém das suas capacidades, sendo que os parâmetros usados não maximizavam nem a produtividade nem minimizavam o custo unitário. Sabe-se que os parâmetros de corte devem inserir-se sempre entre os valores que garantem estes dois aspetos.

Para além da otimização dos parâmetros de corte das ferramentas de pastilhas, através da combinação de parâmetros fornecidos pelos fornecedores e outros testados durante o estudo, especificaram-se grupos de parâmetros para cada material, resultando num aumento significativo da produtividade, visto que os dados de corte usados inicialmente estavam limitados pela dificuldade de maquinagem dos materiais mais exigentes.

Por ser difícil efetuar testes de todas as combinações de ferramentas e matérias-primas, procurou-se centralizar os mesmos nos materiais e nas ferramentas mais utilizados, de modo a garantir que os ganhos resultantes tivessem maior representatividade e que se fizessem sentir em maior escala.

Assim sendo, conseguiu-se determinar grupos de parâmetros que resultaram num aumento de 118% da produtividade (218% em relação à praticada inicialmente), com um ganho superior a 500€/mês, tendo apenas por base os dois materiais mais utilizados.

No que toca às ferramentas monobloco, a sua utilização foi otimizada através da afiação das mesmas, resultando num ganho mensal estimado de 20,84€. Durante um curto período de testes, verificou-se que as ferramentas afiadas são vantajosas, tendo-se garantido um desempenho mínima de 81,6% a um custo de aproximadamente 41,5%, quando comparadas às ferramentas novas. No final do período de testes, a ferramenta testada tinha ainda potencial para maquinar, pelo que os ganhos reais serão incrementados.

Para além dos pontos principais referidos anteriormente, conseguiu-se ainda:

- Registrar o estado atual do stock de ferramentas de fresagem, criando uma base de dados organizada com toda a informação necessária disponível;
- Criar e implementar um procedimento para registo do consumo de ferramentas, sendo uma mais-valia para a avaliação do desempenho das ferramentas, identificação da reincidência de casos problemáticos, aferição de consumos periódicos, determinação de períodos para reposição de stock, entre outros;
- Identificar um método para otimização dos parâmetros de corte, baseando-se tanto em parâmetros aconselhados como em dados simulados por uma aplicação *online* de rápido acesso e simples utilização;
- Aplicar grupos de parâmetros de corte otimizados, transversalmente a todos os centros de maquinagem da empresa;
- Perspetivar grupos de parâmetros de corte otimizados para materiais não indicados às ferramentas de pastilhas em estudo, tendo por base comparações obtidas na mesma aplicação acima referida e pela atividade prévia da empresa;
- Criação de uma biblioteca de dados de corte para acesso aquando da programação do CAM de produção das peças.

Em suma, o estudo realizado trouxe tanto vantagens financeiras como a níveis de produtividade da empresa, deixando ainda margem de progressão para a realização de trabalhos futuros que visam otimizar a utilização de ferramentas em fresagem CNC.

7.2. Trabalhos futuros

Maioritariamente na reta final da execução deste estudo, diferentes tópicos acabaram por surgir, merecendo ser analisados futuramente. Por não ter sido possível aprofundá-los durante a execução deste trabalho, abaixo apresentam-se várias sugestões, dividindo-as pelo grupo de ferramentas a que se destinam:

Ferramentas de pastilhas

- Analisar a influência do desgaste dos insertos na potência de corte:
 - Em certas ferramentas, a potência de corte é alta, como analisado, no entanto, como as pastilhas são utilizadas até à falha, o poder de corte vai progressivamente diminuindo, resultando num maior esforço do equipamento na remoção do material. Assim, é fundamental verificar se a potência de corte não ultrapassa os valores recomendados, principalmente em ferramentas cuja potência de corte já se encontra próxima dos limites estipulados.
 - É complexo prever empiricamente qual a progressão do desgaste e consequente perda de poder de corte, pelo que esta análise deve ser feita experimentalmente.
- Prever parâmetros ótimos para a maquinagem de Al5083:
 - Com a crescente utilização de peças em alumínio, principalmente em componentes móveis, a representação deste material no volume de peças maquinadas na empresa ronda já os 14%, pelo que a otimização trará vantagens.
 - Apesar de terem sido determinados parâmetros de corte melhorados para a operação deste material, estes partiram de dados de corte perspetivados para o F10, ajustando apenas a velocidade de corte, pelo que a profundidade de corte e o avanço por dente permaneceram iguais.

- Deverá ser feita uma análise comparativa de pastilhas similares (geometria e material), mas que sejam aconselhadas também para a maquinagem de ligas não-ferrosas, de modo a obter parâmetros de corte comparativos.
- Prever parâmetros ótimos para a maquinagem do aço C265:
 - O facto de ser um material com pior maquinabilidade do que os restantes aços inibe a utilização de, pelo menos, velocidades de corte idênticas aos restantes. Como apenas é utilizado para uma reduzida quantidade de peças e de, geralmente, pequeno volume, a utilização de ferramentas de pastilhas é mais limitada. Ainda assim, esta acontece e poderá ser otimizada.
 - A aplicação utilizada para previsão de parâmetros não apresenta diferenças quanto à presença de elementos de liga no material, pelo que o ajuste de parâmetros terá de ser feito por comparação com catálogos e com recurso a ensaios experimentais.

Ferramentas monobloco

- Repetir o processo de análise do desempenho das ferramentas afiadas, mas requerendo a afiação a fornecedores diferentes:
 - Basear o estudo da rentabilidade da afiação em função de apenas um único fornecedor não permite concluir se é possível obter melhores resultados com as mesmas ferramentas.
 - O revestimento e geometrias após afiação não reproduziram exatamente a ferramenta original. É necessário saber quais os resultados mais próximos que devemos expectar após afiação.
 - Cada avaliação deverá ser feita com, pelo menos 3 ferramentas iguais, de modo a obter dados mais representativos.
- Analisar possibilidade de múltiplas afiações:
 - Após selecionar o fornecedor que resulta em maior rentabilidade, solicitar a afiação das ferramentas substituídas, mas que já passaram por um processo de afiação, e verificar se o desempenho é idêntica à obtida na primeira afiação.
 - Quanto maior o número de afiações, maior a rentabilidade. Segundo a literatura, as ferramentas que passam por afiações bem sucedidas podem ser afiadas três ou mais vezes. Falta analisar se o desgaste que sofrem permite fazê-lo.
- Verificar desgaste ótimo que resulta na máxima rentabilidade:
 - Idealmente, a afiação apenas reduz o comprimento da ferramenta, mantendo o diâmetro, sendo esta diminuição tão mais pequena quanto menor for o desgaste na ponta. Quanto menor for o desgaste na ponta, menor foi a vida da ferramenta, na generalidade dos casos, incorrendo numa menor rentabilidade. Por outro lado, maior será o número de afiações possíveis, caso se verifique a possibilidade de afiar mais do que uma vez. Assim, encontrar o melhor balanço de ambos torna-se na tarefa mais importante.
 - Aferir qual a redução da altura em função do desgaste de ponta, junto dos prestadores da afiação, de modo a prever o número máximo de afiações.
 - Determinar qual a vida da ferramenta que resulta no desgaste estimado.
 - Recorrer a um modelo similar ao apresentado na equação (20), que relaciona a vida da ferramenta, número de afiações, custo da afiação, entre outros.

Referências bibliográficas

- [1] A. Carrilho, “Desafios do sector que nos salvou da crise,” *Expresso*, 2019.
- [2] M. P. Groover, *Fundamentals of Modern Manufacturing*, EUA: John Wiley & Sons, Inc., 2007.
- [3] A. Jesus, *Fundamentos do Corte Ortogonal de Metais*, Porto: FEUP, 2017.
- [4] Helion, *Catalogue G-7*, Barcelona: Helion Tools.
- [5] Destiny Tool, “Technical Information,” Destiny Tool, 2019. [Online]. Available: <https://www.destinytool.com/technical.html>. [Acedido em 15 Fev 2020].
- [6] P. Conradie, G. Oosthuizen, D. Dimitrov e M. Saxer, “Effect of milling strategy and tool geometry on machining cost when cutting titanium alloys,” *South African Journal of Industrial Engineering*, vol. 26, n° 3, pp. 137-151, 2015.
- [7] A. Daniyan, I. Tlhabadira, O. Daramola e K. Mpofo, “Design and Optimization of Machining Parameters for Effective AISI P20 Removal Rate during Milling Operation,” em *29th CIRP Design*, Póvoa de Varzim, Portugal, 2019.
- [8] KORLOY Inc., *Ferramentas de corte*, Seoul, Coreia do Sul: KORLOY Inc., 2019.
- [9] K. D. Bouzakis, I. Mirisidis, S. Hadjiyiannis, G. Skordaris, N. Michailidis, G. Erkens e R. Cremer, “Improved Coating Properties and Optimized Substrate Data, Essential Conditions for High Desempenho Cutting Tools,” *Tribology in industry*, vol. 25, n° 1&2, pp. 1-19, 2003.
- [10] Sharp Metal, *Catalog S Line*, Milan: Sharp Metal, 2017.
- [11] Sanvik Coromant, “Technical Guide - Materials ISO,” [Online]. Available: <https://www.sandvik.coromant.com/en-us/knowledge/materials/pages/workpiece-materials.aspx>. [Acedido em 8 Março 2020].
- [12] M. Debapriya, “Tool Life: Meaning, Measurement and Expectancy,” [Online]. Available: <http://www.yourarticlelibrary.com/metallurgy/tool-life-meaning-measurement-and-expectancy/96151>.
- [13] A. Jesus, *Vida das Ferramentas de Corte*, Porto: FEUP, 2017-2018.
- [14] K. S. Reddy, “Theory of Metal Cutting,” 12 Ago 2017. [Online]. Available: https://pt.slideshare.net/avutu_kunduru/theory-of-metal-cutting-78791391. [Acedido em 29 Mar 2020].
- [15] F. Koenigsbeger e S. A. Tobias, *Proceedings in the twelfth international machine tool design and research conference*, London: THE MACMILLAN PRESS LTD, 1972.
- [16] J. Lorentzon e N. Järvstråt, “Modelling the influence of carbides on tool wear,” *Computational Materials Science and Surface Engineering*, vol. 1, n° 1, pp. 29-37, 2009.
- [17] A. B. Varotsis, “Mnimizing the cost of CNC parts,” [Online]. Available: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/reducing-cnc-machining-costs-13-design-tips/>. [Acedido em 4 Abr 2020].
- [18] Gripcoil, “Advantages of using Gripcoil,” Gripcoil, 2010. [Online]. Available: http://www.gripcoil.com/thread_advantages.html. [Acedido em 4 Abr 2020].

- [19] Sandvik Coromant, “Problemas e soluções em fresamento,” Sandvik Coromant, [Online]. Available: <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/milling/pages/troubleshooting.aspx>. [Acedido em Mar 2020].
- [20] W. Gilbert, “Economics of machining,” *Machining - Theory and Practice*, pp. 465-485, 1950.
- [21] Minaprem, “Economics of Machining - Cutting Time, Tool Changing Time, Idle Time,” Minaprem, 2020. [Online]. Available: <http://www.minaprem.com/machining/principle/economy/economics-of-machining-cutting-time-tool-changing-time-idle-time/>. [Acedido em 4 Abr 2020].
- [22] W. Grzesik, “Machining Economics and Optimization,” em *Advanced Machining Processes of Metallic Materials*, Elsevier, 2006, pp. 199-212.
- [23] A. Jesus, *Economia de maquinagem*, Porto: FEUP, 2017.
- [24] A. Sommer, “Should you perform your tool regrinding in-house?,” 29 Ago 2019. [Online]. Available: <https://www.canadianmetalworking.com/canadianmetalworking/article/metalworking/should-you-perform-your-tool-regrinding-in-house>. [Acedido em 13 Abr 2020].
- [25] S. Coromant, “Calculadora de Velocidade de corte,” Sandvik Coromant, [Online]. Available: <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/products/pages/toolguide.aspx>. [Acedido em 19 Abr 2020].
- [26] Sandvik Coromant, “Down milling vs. up milling,” Sandvik Coromant, [Online]. Available: <https://www.sandvik.coromant.com/en-us/knowledge/milling/pages/up-milling-vs-down-milling.aspx>. [Acedido em 21 Abr 2020].
- [27] Mitsubishi Materials, “Fórmulas para potência de corte,” Mitsubishi Materials, [Online]. Available: http://www.mitsubishicarbide.net/contents/mht/pt/html/product/technical_information/information/formula4.html. [Acedido em 7 Mai 2020].
- [28] Microcut, *M Series - Linear Way Vertical Machining Centers*, Samobor, Croácia: MICRO CUT Europe, 2018.
- [29] Dijet, Inc, *Dijet Carbide Tools - Indexable Tools A2 - High Feed*, Plymouth.
- [30] GenSwiss, “Precision Solid Carbide and PCD Cutting Tools,” *Cutting Tool Engineering*, 25 Fev 2016. [Online]. Available: <https://www.ctemag.com/products/precision-solid-carbide-and-pcd-cutting-tools>. [Acedido em 27 Jul 2020].

Anexos

A) Lista de ferramentas

Nº	Designação	Referência	Aplicação	Tipologia	Enquadramento	Fornecedor	Preço
1	Ferro c pastilha para chanfrar Ø16	CMN-1411100	Desbaste/ Acabamento	Fresa	Uso esporádico	B2YOU	16,41€
2	Fresa MD BCR-40-10-40-D6	BCR-40-10-40-D6	Acabamento	Fresa	Uso esporádico	B2YOU	28,75€
3	Fresa MD esférica D8 L30 S06	2 HHCB 060 300 S08	Acabamento	Fresa	Uso esporádico	B2YOU	40,54€
4	Fresa MD esférica D10 L35 S10	2 HHCB 100 350 S10	Acabamento	Fresa	Uso esporádico	B2YOU	53,42€
5	Fresa MD tórica D1.5 L0.2 S4	HT 15 02/10	Acabamento	Fresa	Uso esporádico	B2YOU	19,62
6	Fresa MD tórica D8 L19 LT60 S8	TX302080	Acabamento	Fresa	Uso esporádico	B2YOU	16,35€
7	Disco 50	SNMX1206ANN-MM	Acabamento	Pastilha	Uso esporádico	B2YOU	7,00€
8	Disco 20	XOHW 100308 PG01	Acabamento	Pastilha	Em uso	B2YOU	6,30€
9	Disco 12 (P/ PARAF. M6)	SPMT060205 PD PC3500	Desbaste	Pastilha	Em uso	B2YOU	6,58€
10	Disco 15 (P/ PARAF. M8) ou Disco 18 (P/ PARAF. M10)	SPMT07T208 PD PC3500	Desbaste	Pastilha	Em uso	B2YOU	6,58€
11	Disco 21	SPKW 06T2008 DM AM10	Desbaste	Pastilha	Em uso	AMTools	7,30€
12	Disco 13	AOMT060208R	Desbaste	Pastilha	Fora de uso	AM Tools	7,96€
13	Disco 40	APKT 100308 PDT- LT30	Desbaste	Pastilha	Fora de uso	AM Tools	5,00€
14	Disco 13	EOMT060210ZER	Desbaste	Pastilha	Em uso	Mafepre	8,25€
15	Disco 25 ou Disco 35	EPMT100312ZER	Desbaste	Pastilha	Em uso	Mafepre	8,22€
16	FR-MD-D6 Z4 R1 Enc.6	S 4 06 R1.0-ABS-3.1 C 44/18	Desbaste/ Acabamento	Fresa	Fora de uso	Ainstermann e Silva	22,44€
17	FR-MD-D6 Z4 R1.0 - HS 4 06 R1.0-ABS	9164100610	Desbaste/ Acabamento	Fresa	Em uso	Ainstermann e Silva	28,67€
19	FR-MD-D8 Z4 R1 Enc.8 - HS 4 08 R1.0-ABS-3.1 C 44/18	9164100810	Desbaste/ Acabamento	Fresa	Em uso	Ainstermann e Silva	39,60€
21	FR-MD-D10 Z4 R1 Enc.10 - HS 4 10 R1.0-ABS	9164101010	Desbaste/ Acabamento	Fresa	Em uso	Ainstermann e Silva	44,60€
22	FR-E-MD-ABS Z2 D2 R1.0	B 2 02 R1.0 02-ABS-3.1C	Desbaste/ Acabamento	Fresa	Em uso	Ainstermann e Silva	33,23€
23	FR-E-MD-ABS Z2 D4 - HB 2 04 R2.0 LONG-ABS	9262240400	Acabamento	Fresa	Em uso	Ainstermann e Silva	33,34€
24	FR-E-MD-ABS Z2 D4 R2.0	B 2 04 R2.0-ABS-3.1C	Desbaste/ Acabamento	Fresa	Em uso	Ainstermann e Silva	25,47€
25	FR-E-MD-ABS Z2 D6 - HB 2 06 R3.0 LONG-ABS	9262240600	Acabamento	Fresa	Em uso	Ainstermann e Silva	33,34€
26	FR-T-MD-ABS Z2 D4 R1.0 (LONGA)	T 2 04 R1.0 02-ABS-3.1 C	Desbaste/ Acabamento	Fresa	Em uso	Ainstermann e Silva	31,76€
27	FR-T-MD-ABS Z4 D6 R0.5 - HTH 4 06 R0.5 H-ABS	9264150650	Desbaste/ Acabamento	Fresa	Em uso	Ainstermann e Silva	32,58€
28	FR-T-MD-ABS Z4 D6 R0.5 (LONGA) - HTH 4 06 R0.5 02-ABS	9264150651	Desbaste/ Acabamento	Fresa	Em uso	Ainstermann e Silva	50,25€
29	FR-T-MD-ABS Z4 D6 R1 - HTH 4 06 R1.0 H-ABS	9264150610	Desbaste/ Acabamento	Fresa	Em uso	Ainstermann e Silva	32,58€
30	FR-T-MD-ABS Z2 D8 R0.5	T 2 08 R0.5-ABS-3.1C	Desbaste/ Acabamento	Fresa	Em uso	Ainstermann e Silva	29,98€
31	FR-T-MD-ABS Z2 D10 R1.0	T 2 10 R1.0-ABS-3.1C	Desbaste/ Acabamento	Fresa	Em uso	Ainstermann e Silva	32,03€
32	Disco 40	APKT 1003PD R-M DP30M	Desbaste	Pastilha	Em uso	Ainstermann e Silva	4,00€
33	HT 2 04 R0.5 L30 -ABS	9268134030	Desbaste/ Acabamento	Fresa	Em uso	Ainstermann e Silva	34,65€
34	HT 2 05 R0.5 -ABS	9268135025	Desbaste/ Acabamento	Fresa	Em uso	Ainstermann e Silva	38,77€
35	FR-MD-D4 Z4 R0.5	S 4 04 R0.5-ABS-3.1 C	Desbaste/ Acabamento	Fresa	Em uso	Ainstermann e Silva	29,28€
36	FR-T-MD-ABS Z4 D6 R1 - HTH 4 04 R0.5 H-ABS	9264150405	Desbaste/ Acabamento	Fresa	Em uso	Ainstermann e Silva	36,87€
37	Disco 66	PE 05 P35 ABS - 1 -1.1H	Desbaste	Pastilha	Em uso	Ainstermann e Silva	7,61€
38	Disco 52	WNMX09T316ZNN-MM	Desbaste	Pastilha	Uso esporádico	B2YOU	9,90 €

B) Especificações técnicas das fresas monobloco

Nº ferramenta	Referência	Especificações técnicas fresas monobloco										Desbaste				Acabamento			
		z	Diâmetro [mm]	Altura de trabalho[mm]	Altura útil [mm]	Comprimento [mm]	Raio de ponta [mm]	Material	Grado de aplicação	Velocidade de corte [m/min]	Profundidade de corte (ap)	Largura de corte (ae)	Avanço z [mm/min]	Velocidade de corte [m/min]	Profundidade de corte (ap)	Largura de corte (ae)	Avanço z [mm/min]		
16	S 4.06 R1.0-ABS-3.1 C 44/18	4	6	13	21	57	1	MD rev	P	180	9	6	0.130	220	3	0.6	0.130		
35	S 4.04 R0.5-ABS-3.1 C	4	4	11	21	57	0.5	MD rev	P	180	6	4	0.085	220	2	0.4	0.085		
22	B 2.02 R1.0.02-ABS-3.1C	2	2	3	40	80	1	MD rev	P	180	3	2	-	220	1	0.2	-		
24	B 2.04 R2.0-ABS-3.1C	2	4	4	20	57	2	MD rev	P	180	6	4	0.065	220	2	0.4	0.065		
26	T 2.04 R1.0.02-ABS-3.1 C	2	4	4	40	80	1	MD rev	P	180	6	4	0.065	220	2	0.4	0.065		
17	9164100610	4	6	15	-	60	1	MD rev	P, M	180	6	1.8	0.030	250	9	0.9	0.045		
19	9164100810	4	8	20	-	80	1	MD rev	P, M	180	8	2.4	0.040	250	12	1.2	0.055		
21	9164101010	4	10	25	-	80	1	MD rev	P, M	180	10	3	0.070	250	15	1.5	0.065		
25	9262240600	2	6	12	-	90	3	MD rev	P	-	-	-	-	220	0.3	0.3	0.030		
23	9262240400	2	4	8	-	80	2	MD rev	P	-	-	-	-	220	0.2	0.2	0.021		
33	9268134030	2	4	4	30	70	0.5	MD rev	P	75	0.6	4	0.022	200	2	0.12	0.035		
34	9268135025	2	5	6	25	70	0.5	MD rev	P	75	0.75	5	0.022	200	2.5	0.15	0.035		
36	9264150405	4	4	4	20	60	0.5	MD rev	P	120	4	0.4	0.012	270	0.4	0.2	0.035		
27	9264150650	4	6	7	20	60	0.5	MD rev	P	120	6	0.6	0.028	270	0.6	0.3	0.045		
28	9264150651	4	6	7	40	80	0.5	MD rev	P	120	6	0.6	0.028	270	0.6	0.3	0.045		
29	9264150610	4	6	7	20	60	1	MD rev	P	120	6	0.6	0.028	270	0.6	0.3	0.045		
30	T 2.08 R0.5-ABS-3.1C - 9264150850	4	8	9	22	65	0.5	MD rev	P	120	8	0.8	0.054	270	0.8	0.4	0.055		
31	T 2.10 R1.0-ABS-3.1C - 9264151010	4	10	11	24	70	1	MD rev	P	120	10	1	0.040	270	1	0.5	0.065		

C) Especificações técnicas das fresas de pastilhas

Nº ferramenta	Referência	Especificações técnicas pastilhas											Dímetro efetivo de corte [mm]	Nº de pastilhas por disco				
		Nº de arestas de corte	Forma	Ângulo de folga [°]	Tolerância	Tipo de quebra avara	Altura [mm]	Espessura [mm]	Largura [mm]	Raio de ponta [mm]	Ângulo de ataque [°]	Ângulo da aresta secundária [°]			Ângulo de fuga da aresta secundária [°]	Sentido de rotação	Aplicação ótima nos grades	Material
7	SNMX1206ANN-MM	8	Quadrada	0	M	X	12.7	6.35	12.7	0	90	45	0	Neutro	P30, P40, M20, M30, K20, S20	PC5300	50	4
8	XOHW 100308 PG01	2	Especial	13	H	W	10	3.18	-	0.8	90	90	30	Neutro	P, M, K, S	PC5300	20	3
38	WNMX 09T316 ZNN-MM	6	Poligonal 80º	0	M	X	9.525	3.97	9.525	1.6	90	Especial	0	Neutro	P, M, K, S	PC5300	52	6
9	SPMT060205 PD PC3500	4	Quadrada	11	M	T	6.2	2.38	6.2	0.5	90	90	15	Neutro	P30	PC3500	12	2
10	SPMT07208 PD PC3500	4	Quadrada	11	M	T	7.5	2.78	7.5	0.8	90	90	15	Neutro	P30	PC3500	15	2
11	SPKW 06T2008 DM AM10	4	Quadrada	11	K	W	6	2.78	-	0.8	90	60	-	Neutro	P10, P20	AM10	21	3
12	ADMT060208R	2	Paralelogramo 85º	13	M	T	6	2.38	4.2	0.8	90	-	-	Direita	P10, P20	IN2505	13	3
13	APKT 100308 PDTR- LT30	2	Paralelogramo 85º	11	K	T	10	3.18	-	0.8	90	90	15	Direita	P, M, K, N, H, S	LT30	40	2
14	EOMT060210ZER	2	Losangular 75º	13	M	T	6.5	2.38	4.3	1.0	90	~90	20	Direita	P, M, K	JC8118	13	3
15	EPMT10031ZZER (Disco 25)	2	Losangular 75º	11	M	T	10	3.2	6	1.2	90	~90	20	Direita	P, M, K	JC8118	19.5	5
15	EPMT10031ZZER (Disco 35)	2	Losangular 75º	11	M	T	10	3.2	6	1.2	90	~90	20	Direita	P, M, K	JC8118	29.5	5
32	APKT 1003 PD R-M DP30M	2	Paralelogramo 85º	11	k	T	10	3.18	6.70	0.50	90	90	15	Direita	P30	DP30M	40	2
37	PE 05 P35 ABS - 1-1.1H	5	Pentagonal	15	-	-	12	4.76	12	2	90	66	-	Direita	P	P35	66	5

Nº ferramenta	Referência	Desbaste (tabelados)			Acabamento (tabelados)			Desbaste (usados)			Acabamento (usados)		
		RPM	Profundidade de corte [ap] [mm]	Avanço z [mm/rot]	RPM	Profundidade de corte [ap] [mm]	Avanço z [mm/rot]	RPM	Profundidade de corte [ap] [mm]	Avanço z [mm/rot]	RPM	Profundidade de corte [ap] [mm]	Avanço z [mm/rot]
7	SNMX1206ANN-MM	1241	6	0,25	-	-	-	-	-	-	1000	3	0,25
8	XOHW 100308 PG01	3820	1,5	0,25	3820	0,5	0,2	-	-	-	4000	0,3	0,19
38	WNMX 09T316 ZNN-MM	1530	1,5	0,25	-	-	-	1000	0,70	0,50	-	-	-
9	SPMT060205 PD PC3500	3979	1	0,1	-	-	-	2300	1,00	0,17	-	-	-
10	SPMT07208 PD PC3500	3183	1	0,1	-	-	-	2100	1,00	0,19	-	-	-
11	SPKW 06T2008 DM AM10	2000	0,5	1,167	-	-	-	2100	0,25	0,24	-	-	-
12	ADMT060208R	3700	0,3	0,360	4000	0,2	0,25	3400	0,25	0,25	-	-	-
13	APKT 100308 PDTR- LT30	1500	0,5	0,267	1600	0,5	0,125	2200	0,20	0,27	-	-	-
14	EOMT060210ZER	6131	0,381	0,508	-	-	-	3600	0,25	0,40	-	-	-
15	EPMT10031ZZER (Disco 25)	3049	0,76	0,635	-	-	-	2000	0,42	0,69	-	-	-
15	EPMT10031ZZER (Disco 35)	2001	0,76	0,635	-	-	-	1600	0,42	1,04	-	-	-
32	APKT 1003 PD R-M DP30M	1750	1	0,250	-	-	-	2200	0,20	0,27	-	-	-
37	PE 05 P35 ABS - 1-1.1H	1030	3	0,3	-	-	-	1200	2,00	0,25	-	-	-

D) Tabela de registo do consumo de ferramentas

	Nº ferramenta	Vida da ferramenta - CNC 1			
		Data da 1ª utilização	Data de troca	Motivo de troca [N-desgaste normal; A-desgaste anormal; Q-quebra]	Observações [Usou-se a ferramenta em alguma situação crítica? Material inadequado? Suspeita de ferramenta com defeito? Parâmetros usados estavam fora dos valores aconselhados? Colisão? Etc.]
CNC1_1					
CNC1_2					
CNC1_3					
CNC1_4					
CNC1_5					
CNC1_6					
CNC1_7					
CNC1_8					
CNC1_9					
CNC1_10					
CNC1_11					
CNC1_12					
CNC1_13					
CNC1_14					
CNC1_15					
CNC1_16					
CNC1_17					
CNC1_18					

E) Tabela para comparação de taxas de remoção de material e vidas de ferramenta segundo os parâmetros de corte usados na empresa e os aconselhados pelos fornecedores/fabricantes

Nº	Designação	Referência	P [€]	z	P _t [€]	T _t [min]	Material Sandvik equivalente	Com valores recomendados pelos fornecedores/fabricantes			Segundo valores usados na empresa				
								Q _{fo} [mm ³ /min]	T _{fo} [min]	Custo de utilização por fresa C _{fo} [€/min]	Q _u [mm ³ /min]	T _u para F10 [min]	T _u para PM300 [min]	Custo de utilização por fresa em C _{fu} [€/min]	Custo de utilização por fresa em PM300 C _{fu} [€/min]
11	Disco 21	SPKW 06T2008 DM AM10	7,30€	3	1,83€	0,87	GC1130	17150	40	0,14€	1852	130 *	100 *	0,04 €	0,05 €
14	Disco 13	EOMT060210ZER	8,25€	3	4,13€	0,97		10798	47	0,26€	3276	130 *	100 *	0,10 €	0,12 €
15	Disco 25	EPMT100312ZER	8,22€	5	4,11€	0,83	GC4330	25753	49	0,42€	10143	110 *	80	0,19 €	0,26 €
15	Disco 35	EPMT100312ZER	8,22€	5	4,11€	0,83		23664	42	0,49€	17123	27	12	0,76 €	1,71 €
32	Disco 40	APKT 1003PD R-M DP30M	4,00€	2	2,00€	0,77	GC1130	12250	47	0,09€	3360	27	15	0,15 €	0,27 €
37	Disco 66	PE 05 P35 ABS - 1 -1,1H	7,61€	5	1,52€	0,58		42827	38	0,20€	27720	29	20	0,26 €	0,38 €
38	Disco 52	WNWX09T316ZNN-MM	9,90€	6	1,65€	0,65	GC4330	20889	47	0,21€	12740	68	44	0,15 €	0,23 €

*valor aproximado

F) Estimativa das constantes da *Lei de Taylor*

Nº	Designação	Referência	Simulação pela aplicação da Sandvik						
			Material equivalente	ap, ae, fz	Vc [m/min]	RPM	T [min]	n	C
11	Disco 21	SPKW 06T2008 DM AM10	GC1130	Parâmetros aconselhados pelo fabricante ae=0.7D	100	1520	79	0,405	587
					115	1750	56		
					132	2000	40		
					145	2200	31		
					160	2430	25		
14	Disco 13	EOMT060210ZER	GC4330	Parâmetros aconselhados pelo fabricante ae=0.7D	207	5070	75	0,404	1185
					233	5700	56		
					250	6130	47		
					275	6730	37		
					300	7350	30		
15	Disco 25	EPMT100312ZER	GC4330	Parâmetros aconselhados pelo fabricante ae=0.7D	144	2350	95	0,399	884
					156	2550	77		
					187	3050	49		
					214	3500	35		
					245	4000	25		
15	Disco 35	EPMT100312ZER	GC4330	Parâmetros aconselhados pelo fabricante ae=0.7D	139	1500	85	0,405	839
					162	1750	58		
					185	2000	42		
					209	2250	31		
					228	2460	25		
32	Disco 40	APKT 1003PD R-M DP30M	GC1130	Parâmetros aconselhados pelo fabricante ae=0.7D	181	1440	77	0,402	1040
					201	1600	60		
					220	1750	47		
					239	1900	39		
					261	2080	31		
37	Disco 66	PE 05 P35 ABS - 1 -1.1H	GC1130	Parâmetros aconselhados pelo fabricante ae=0.7D	180	868	58	0,413	962
					198	955	46		
					214	1030	38		
					238	1150	29		
					260	1255	24		
38	Disco 52	WNMX 09T316 ZNN-MM	GC4330	Parâmetros aconselhados pelo fabricante ae=0.7D	188	1150	97	0,397	1155
					221	1350	65		
					250	1530	47		
					286	1750	34		
					327	2000	24		

G) Tabela de K_c para diferentes materiais

Material	Resistência à Tração e Dureza (MPa)	Coeficiente de Força Específica K_c (MPa)				
		0.1 (mm/dente)	0.2 (mm/dente)	0.3 (mm/dente)	0.4 (mm/dente)	0.6 (mm/dente)
Aço Baixo Carbono (com ligas especiais)	520	2200	1950	1820	1700	1580
→ Aço Baixo Carbono	620	1980	1800	1730	1600	1570
Aço Duro	720	2520	2200	2040	1850	1740
Aço Ferramenta	670	1980	1800	1730	1700	1600
Aço Ferramenta	770	2030	1800	1750	1700	1580
Aço Cromo-Manganês	770	2300	2000	1880	1750	1660
Aço Cromo-Manganês	630	2750	2300	2060	1800	1780
→ Aço Cromo-Molibdênio	730	2540	2250	2140	2000	1800
Aço Cromo-Molibdênio	600	2180	2000	1860	1800	1670
→ Aço Níquel Cromo-Molibdênio	940	2000	1800	1680	1600	1500
Aço Níquel Cromo-Molibdênio	352HB	2100	1900	1760	1700	1530
Aço Inoxidável Austenítico	155HB	2030	1970	1900	1770	1710
Ferro Fundido	520	2800	2500	2320	2200	2040
Ferro Fundido Meehanite	46HRC	3000	2700	2500	2400	2200
Ferro Fundido Duro	360	2180	2000	1750	1600	1470
Ferro Fundido Cinzento	200HB	1750	1400	1240	1050	970
Latão	500	1150	950	800	700	630
Ligas Leves (Al-Mg)	160	580	480	400	350	320
Ligas Leves (Al-Si)	200	700	600	490	450	390
Ligas Leves (Al-Zn-Mg-Cu)	570	880	840	840	810	720

H) Resultado dos testes de desgaste

Nº	Designação	Referência	Matéria prima	Teste	aP [mm]	fz [mm/rot]	Ks [MPa]	Vc [mm/min]	N [RPM]	V _f [mm/min]	Q [mm ³ /min]	V material removido [mm ³]	Duração [min]	Desgaste de flanco [µm]	Potência de corte estimada completo [kW]	Binário de corte estimado completo [Nm]	V esparado de material necessário para o teste [mm ³]	Custo da matéria-prima [€]	Placa de material suporta executar teste	V da placa suporta [mm ³]	Custo da placa suporta [€]	Expectativa de duração de testes [min]						
14	Disco 13	ECMT0602J0ZER	F10	1			1585	233	5700	2896	10039	562203	56	206,36	0,88	1,48	1508225	12,59 €	76*181*118	1623208	13,54 €	140						
				2			1585	250	6130	3114	10787			507444	47	132,17	0,95	1,48										
				3			1585	275	6730	3419	11853	438578	37	141,01	1,04	1,48												
				4			1550	275	6730	3419	11853	201509	17	1413,02	0,95	1,48												
				5			1550	250	6130	3114	10787	280714	26	599,65	0,95	1,48												
				6			1550	225	5500	2794	9687	329361	34	243,42	0,85	1,48												
15	Disco 25	EPMT10031ZER	F10	1			1565	187	3050	1937	25759	1262190	49	112,89	3,73	11,69	3141304	26,21 €	40*350*200	2800000	23,36 €	109						
				2			1565	214	3500	2223	29559	1034574	35	143,97	4,28	11,69												
				3			1565	245	4000	2540	33782	844550	25	158,84	4,90	11,69												
				4			1483	245	4000	2540	33782	168910	5	1208,4	4,90	11,69												
				5			1483	214	3500	2223	29559	266033	9	702,57	4,28	11,69												
				6			1483	172	2800	1778	23647	429653	18	382,94	3,43	11,69												
				7			1483	147	2400	1524	20269	506730	25	228,65	2,84	11,69												

I) Dados utilizados para cálculo dos ganhos financeiros

Nº	Designação	Referência	P [€]	z	P _{-t} [€]	T _{-t} [min]	Segundo valores usados na empresa				Segundo valores finais para implementação em F10				Segundo valores finais para implementação em PM300				Ganho F10 [€/mm³]	Ganho PM300 [€/mm³]
							Q _u [mm³/3/min]	T _u para F10 [min]	T _u para PM300 [min]	Custo de utilização por fresa em F10 C _{fu} [€/min]	Custo de utilização por fresa em PM300 C _{fu} [€/min]	Q _f [mm³/3/min]	T _f [min]	Custo de utilização por fresa C _{ff} [€/min]	Q _f [mm³/3/min]	T _f [min]	Custo de utilização por fresa C _{ff} [€/min]			
11	Disco 21	SPKW 0612008 DM AM10	7,30€	3	1,83€	0,87	5557	130	100	0,04€	0,05€	62512	25	0,22€	37507	25	0,22€	0,0000538	0,0000518	
14	Disco 13	EOMT0602102ER	8,25€	3	4,13€	0,97	9828	130	100	0,10€	0,12€	34671	39	0,32€	23302	30	0,41€	0,0000203	0,0000122	
15	Disco 25	EPMT100312ZER	8,22€	5	4,11€	0,83	50715	110	80	0,19€	0,26€	133000	45	0,46€	101346	25	0,82€	0,0000028	-0,0000007	
15	Disco 35	EPMT100312ZER	8,22€	5	4,11€	0,83	85613	27	12	0,76€	1,71€	145432	25	0,82€	87259	25	0,82€	0,0000022	0,0000005	
32	Disco 40	APKT 1003PD R-M DP30M	4,00€	2	2,00€	0,77	6720	27	15	0,15€	0,27€	29120	31	0,05€	17472	31	0,13€	0,0000702	0,0000615	
37	Disco 66	PE 05 P35 ABS - 1 -1,1H	7,61€	5	1,52€	0,58	138600	29	20	0,26€	0,38€	154077	29	0,26€	92446	29	0,26€	0,0000004	-0,0000022	
38	Disco 52	WMNX09T316ZNN-MM	9,90€	6	1,65€	0,65	76440	68	44	0,15€	0,23€	163800	24	0,21€	98280	24	0,41€	0,0000030	0,0000009	