



**Implementação de Manufatura Assistida por Computador numa empresa de maquinaria**

João Araújo

UMinho | 2022



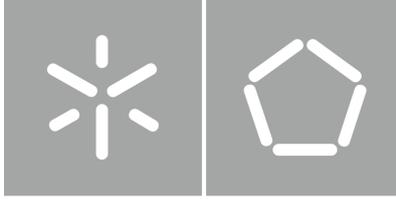
**Universidade do Minho**  
Escola de Engenharia

João Pedro Ribeiro Araújo

**Implementação de Manufatura Assistida por Computador numa empresa de maquinaria**

outubro de 2022





**Universidade do Minho**

Escola de Engenharia

João Pedro Ribeiro Araújo

**Implementação de Manufatura  
Assistida por Computador numa  
empresa de maquinagem**

Dissertação de Mestrado

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Manufatura Avançada

Trabalho efetuado sob a orientação do:

**Professor Doutor Hélder Jesus Fernandes Puga**

## **DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS**

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

### ***Licença concedida aos utilizadores deste trabalho***



**Atribuição-Não Comercial CC BY-NC**

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar, um agradecimento especial ao professor Hélder Puga por todo conhecimento e interesse despertado ao longo do percurso académico, pela disponibilidade e pelos preciosos conselhos oferecidos desde o início do projeto, que foram essenciais para superar os momentos mais difíceis.

À minha família, pois sozinho não teria sido possível chegar aqui. Aos meus pais, pela preocupação incondicional e procura de me possibilitar as melhores condições. Às minhas irmãs, por todo o apoio e alento dado desde sempre

Aos meus amigos, colegas e professores com quem tive o prazer de me cruzar ao longo desta caminhada e de forma direta ou indireta contribuíram para a tornar mais enriquecedora.

Por fim, à empresa Metaldufe pela experiência proporcionada e em particular a todos os funcionários que contribuíram para o conhecimento transmitido ao longo do estágio.

## **DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE**

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

## RESUMO

A presente dissertação surge na procura de dar resposta às necessidades de implementar novos métodos de trabalho numa empresa de maquinagem de componentes metálicos, Metaldufe, Lda. Atualmente, a empresa produz todos os seus componentes através do comando numérico manual, diretamente nas máquinas CNC que têm à disposição. O evoluir das tecnologias e a crescente exigência dos padrões de qualidade, levam as empresas de manufatura a procurar soluções, de maneira a minimizarem os custos e impulsionarem as produções.

O objetivo principal desta dissertação é de implementar novos conhecimentos CAD/CAM na empresa, que até aos dias de hoje não foi adquirido.

Deste modo, inicialmente foi definido um protocolo de trabalho através da conceção de um modelo para uma ficha de fabrico com toda a informação necessária para apoiar o operador da máquina na produção de um qualquer componente. Além disso, foi também definida uma biblioteca, com o registo das ferramentas à disposição da empresa, na qual se encontram informações como os parâmetros de corte e a geometria das pastilhas/ferramentas.

Posteriormente, foi feito o estudo para a preparação da produção de dois componentes cilíndricos, um de aço e outro de latão, nas máquinas da empresa. Esse trabalho permitiu realizar todas as etapas das ferramentas CAD/CAM necessárias para o fabrico das peças. Em primeiro lugar, foi feita uma análise dos desenhos técnicos e das respetivas exigências dimensionais e geométricas. Após a seleção das máquinas e dos respetivos sistemas de fixação, foram criadas as estratégias de corte através do *software* Fusion 360.

Por fim, depois de uma validação virtual do processo, através da confirmação da não existência de irregularidades, foi possível fazer todas as alterações necessárias no pós-processador para que a transição do CAM para a máquina ocorra sem erros.

## **ABSTRACT**

This dissertation arises in the search to respond to the needs of implementing new working methods in a company of metal machining components, Metaldufe, Lda. Currently, the company produces all the components through manual numerical control, directly in the CNC machines that they have at their disposition. The evolution of technologies and the increasing demand for quality standards, lead manufacturing companies to search for solutions, to minimize costs and boost productions.

The main target of this dissertation is to implement new CAD/CAM knowledge in the company, which until now has not been acquired.

In this way, initially it was defined a work protocol through the creation of a model for a manufacturing sheet with all the necessary information to support the machine operator in the production of any component. Moreover, a library was also defined, with the register of tools available in the company, in which information such as cutting parameters and insert/tool geometry can be found.

Subsequently, the study was carried out to prepare the production of two cylindrical components, one made of steel and the other of brass, on the company's machines. This work allowed to carry out all the CAD/CAM tooling steps required to manufacture the parts. Firstly, an analysis was made of the drawings and their dimensional and geometric requirements. After selecting the machines and their clamping systems, the cutting strategies were created using the Fusion 360 software.

Finally, after a virtual validation of the process, through the confirmation that there were no irregularities, it was possible to make all the necessary changes in the post-processor so that the transition from CAM to machine would occur without errors.

---

**KEY WORDS:** MACHINING; NUMERICAL CONTROL; MANUFACTURING; CUTTING STRATEGIES

# ÍNDICE

Agradecimentos.....	iii
Resumo.....	v
Abstract.....	vi
Índice .....	vii
Lista de Figuras.....	ix
Lista de Tabelas .....	xii
Siglas e Abreviaturas .....	xiii
1. Introdução.....	1
1.1 Enquadramento.....	1
1.2 Motivação.....	2
1.3 Objetivos .....	2
1.4 Estrutura .....	3
2. Revisão bibliográfica .....	4
2.1 Maquinabilidade .....	5
2.1.1 Máquinas ferramenta e Ferramentas de corte.....	6
2.1.1.1 Máquinas ferramenta.....	6
2.1.1.2 Ferramentas de Corte .....	11
2.1.2 Materiais.....	13
2.1.2.1 Aços ao carbono .....	14
2.1.2.2 Aços inoxidáveis.....	17
2.1.2.3 Ferros fundidos.....	18
2.1.2.4 Materiais não ferrosos.....	19
2.1.2.5 Superligas resistentes ao calor .....	20
2.1.2.6 Aços endurecidos.....	20
2.1.3 Parâmetros de corte.....	20
2.1.4 Síntese .....	26
2.2 Manufatura Assistida por Computador .....	28
2.2.1 Conceitos teóricos da manufatura assistida por computador .....	28

2.2.2 Procedimentos CAD/CAM .....	29
2.2.3 Definição de estratégias de corte .....	30
3. Metodologias e Protocolos de trabalho .....	34
3.1 Definição de um protocolo de trabalho .....	34
3.1.1 Ficha de fabrico .....	34
3.1.2 Biblioteca de ferramentas .....	36
3.2 Abordagem CAM.....	41
4. Desenvolvimento de estratégias de corte para as peças 1 e 2.....	47
4.1 Componente cilíndrico de aço .....	47
4.1.1 Considerações iniciais .....	47
4.1.2 Estratégia de corte .....	49
4.2 Componente cilíndrico em liga de latão .....	57
4.2.1 Considerações iniciais .....	57
4.2.2 Estratégia de corte .....	59
5. Conclusões e Trabalhos futuros .....	68
5.1 Conclusões.....	68
5.2 Trabalhos futuros.....	69
Bibliografia .....	70

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Instalações da empresa [3].	1
Figura 2.1 - Processo de remoção de material por torneamento.	4
Figura 2.2 - Diagrama causa-efeito da maquinabilidade e respetivos parâmetros (adaptado de [7])	5
Figura 2.3 - Máquinas (a) torno cnc [9] e (b) centro de maquinagem [10].	6
Figura 2.4 - (a) Torno cnc e respetivos eixos componentes (adaptado de [11]); (b) Sistema de fixação (adaptado de [12]); (c) torreta (adaptado de [13]).	7
Figura 2.5 - Torno vertical [14].	7
Figura 2.6 - Torno-fresa e respetivos eixos (adaptado de [15]); (b) Torno-fresa com dois <i>spindles</i> e porta-ferramentas [16].	8
Figura 2.7 - Centro de maquinagem 3 eixos (adaptado de [17]).	9
Figura 2.8 - Centro de maquinagem 5 eixos (adaptado de [19]).	9
Figura 2.9 - Principais dispositivos de fixação: (a) bucha [20], prato de fixação [21], prensa de fixação [22], prato magnético [23]. gabarito [24]	10
Figura 2.10 - Ferramentas de (a) torneamento [27] e (b) fresagem [28].	11
Figura 2.11 - Agrupamento dos materiais de referência (adaptado de [31]).	14
Figura 2.12 - Correlação entre a maquinabilidade do aço ao carbono e o seu teor em carbono (adaptado de [33]).	15
Figura 2.13 - Diagrama de fases da Crómio-Níquel- Ferro da microestrutura do aço inoxidável [33].	17
Figura 2.14 - Relação entre taxa de produção/custos e velocidade de corte (adaptado de [40]).	21
Figura 2.15 - Diagrama dos parâmetros operacionais do torneamento [42].	22
Figura 2.16 - Representação do decréscimo do diâmetro de corte numa operação de facejamento [43].	23
Figura 2.17 - Representação do avanço por rotação e avanço por dente de uma ferramenta de fresagem [44].	24
Figura 2.18 - Zonas de transferência de calor na remoção de aparas (adaptado de [8]).	25
Figura 2.19 - Programa de manufatura assistida por computador [18].	29
Figura 2.20 – Estratégia de corte de fresagem tradicional [50].	31
Figura 2.21 - Estratégia de corte de fresagem <i>trochoidal</i> . [50].	32
Figura 2.22 – Operações de torneamento por [51] (a) <i>grooving</i> e (b) acabamento externo	32
Figura 3.1 - <i>Template</i> da ficha de fabrico proposta para a empresa	35

Figura 3.2 - Organização da biblioteca de ferramentas .....	37
Figura 3.3 - Aplicação dos filtros na escolha de uma ferramenta de torneamento externo. ....	37
Figura 3.4 - Separador das informações gerais da ferramenta. ....	38
Figura 3.5 - Separador das informações da pastilha de corte.....	39
Figura 3.6 - Separador das informações do suporte da ferramenta. ....	39
Figura 3.7 - Separador dos parâmetros de corte.....	40
Figura 3.8 - Sequência de trabalho no processo de manufatura através do <i>software</i> Fusion 360 .....	41
Figura 3.9 - (a) Pasta do <i>setup</i> e (b) limites de retração da ferramenta (linha azul) e do sistema de fixação (linha verde) .....	42
Figura 3.10 – (a) Separador da ferramenta da definição das estratégias de corte, limitação geométrica ferramenta ao longo do eixo Z e X (b) e (c), respetivamente.....	43
Figura 3.11- Diferentes estratégias de desbaste: (a) facejamento, (b) “2D pocket”, (c) “3D adaptive”, (d) “3D pocket”.....	44
Figura 3.12 - Limites geométricos (a) da superfície maquinada e (b) das alturas da ferramenta. ....	44
Figura 3.13 - Simulação virtual do processo de (a) fresagem e (b) torneamento.....	45
Figura 3.14 - Seleção e configuração do pós-processador.....	46
Figura 4.1 - Modelo 3D da peça 1.....	47
Figura 4.2 - Vista do desenho técnico da peça 1.....	48
Figura 4.3 – (a) Torno-fresa cnc DMG MORI SEIKI - NLX 2500/700 e (b) sistema de fixação da peça 1. ....	49
Figura 4.4 - Sistemas de coordenadas de trabalho para o (a) segundo e (b) primeiro <i>spindle</i> .....	50
Figura 4.5 - Detecção de uma colisão entre a ferramenta e a peça.....	54
Figura 4.6 - Alteração da variável Q do ciclo de furação do pós-processador. ....	55
Figura 4.7 - Alteração à variável F do pós-processador.....	55
Figura 4.8 - Código G do ciclo de furação, G83, corrigido. ....	56
Figura 4.9 - Ficha de fabrico da peça de aço.....	56
Figura 4.10 - (a) Excerto do desenho técnico da peça 2 e (b) perspetiva do modelo 3D da peça 2. ....	57
Figura 4.11 – Modelo do centro de maquinagem vertical Akira Seiki SR XP [54]. ....	58
Figura 4.12 – Fases de fabrico da peça: (a) antes do torneamento, (b) após o torneamento, (c) após a .....	58
Figura 4.13 - Planos de trabalho para as operações de fresagem da peça 2. ....	59
Figura 4.14 - Modelo (a) real e (b) virtual dos mordentes de aperto. ....	60

Figura 4.15 - Modelo do sistema de fixação. ....	60
Figura 4.16 - Sistemas de coordenadas de trabalho da peça. ....	61
Figura 4.17 - Modelo do sistema de fixação. ....	63
Figura 4.18 – Sistemas de coordenadas para cada um dos planos das 5 peças. ....	64
Figura 4.19 - Simulação virtual do processo de maquinagem das 5 peças de latão.....	65
Figura 4.20 - Definição do tipo de sistemas de coordenadas do pós-processador. ....	65
Figura 4.21 - Linhas de código adicionadas ao ciclo de furação do pós-processador. ....	65
Figura 4.22 - Alterações no novo código gerado para o ciclo de furação (G81). ....	66
Figura 4.23 - Função criada para distinguir o modo de trabalho (G94/G95).....	66
Figura 4.24 - Ficha de fabrico da peça de latão.....	67

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.2.1 - Propriedades dos materiais das ferramentas de corte .....	12
Tabela 4.1 - Seleção das operações do primeiro <i>setup</i> e respectivas ferramentas da peça 1.....	51
Tabela 4.2 - Sequência de operações do segundo <i>setup</i> e respectivas ferramentas da peça 1. ....	53
Tabela 4.3 - Lista de operações e ferramentas no fabrico da peça 2. ....	62

## SIGLAS E ABREVIATURAS

Siglas:

CAD: Computer Aided Design (Desenho Assistido por Computador)

CAM: Computer Aided Manufacturing (Manufatura Assistida por Computador)

CNC: Controlo Numérico Computorizado

HSS: High Speed Steel (Aços rápidos)

WCS: Work Coordineta System

Abreviaturas:

$a_e$ : Espessura da apara

$a_p$ : Profundidade de corte

$D$ : Diâmetro da peça

$D_c$ : Diâmetro da ferramenta

$f_n$ : Avanço por rotação

$f_z$ : Avanço por dente

$n$ : rotações por minuto

$V_c$ : Velocidade de corte

$V_f$ : Velocidade de avanço

$z_c$ : Número de dentes

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 ENQUADRAMENTO

As tecnologias de fabrico de comando numérico computadorizado (CNC) têm sofrido avanços consideráveis com o crescimento da manufatura e da indústria em geral. Com a introdução de máquinas CNC, foi possível às empresas melhorarem a qualidade e eficácia de produção, bem como reduzir o número de erros humanos. A evolução do desenvolvimento tecnológico conduziu a novas tecnologias associadas ao controlo numérico, nomeadamente com a introdução do Desenho Assistido por Computador (CAD) e com a Manufatura Assistida por Computador (CAM). Em muitos casos, a inclusão de estratégias CAD/CAM ajudou a acompanhar a maior complexidade das peças produzidas e a otimizar os parâmetros e rotinas de corte [1,2].

Esta dissertação enquadra-se na procura de dar resposta a uma solicitação da empresa de fabrico de componentes por processos de maquinagem, Metaldufe (Figura 1.1 - Instalações da empresa Figura 1.1), para a implementação de estratégias de CAM nos processos de fabrico por manufatura subtrativa. A empresa, fundada em 1997, trabalha, até aos dias de hoje, com as tecnologias CNC através do comando numérico manual. A procura constante por uma maior elevação do padrão de qualidade leva as empresas de manufatura a mudanças na forma como gerem e abordam os desafios diários que enfrentam. É fundamental que o evoluir das tecnologias seja acompanhado pelas empresas, de modo a assegurar a competitividade e as necessidades do mercado. Será, então, neste contexto que a presente dissertação se irá concentrar, na qual será abordado todo o trabalho desenvolvido ao longo do estágio curricular, nomeadamente na adaptação de novas metodologias à realidade da empresa.



Figura 1.1 - Instalações da empresa [3].

## 1.2 MOTIVAÇÃO

O projeto proposto revelou-se um ponto de partida muito interessante para a realização de um estudo mais aprofundado dos conceitos teóricos até aqui abordados ao longo do percurso académico, bem como na aquisição de uma visão mais realista das tecnologias de fabrico.

A possibilidade de poder acompanhar de forma mais próxima o dia-a-dia de uma empresa foi determinante para a escolha do projeto. Por outro lado, a área em que se inserem as tecnologias de fabrico da empresa foi também um fator decisivo, dada a maior curiosidade e interesse que têm suscitado nesta última fase do percurso académico. Por fim, numa fase de aproximação ao mundo do trabalho, o desenvolvimento de conhecimento obtido pela prática foi algo que sempre despertou maior interesse.

## 1.3 OBJETIVOS

Esta dissertação irá focar-se no projeto desenvolvido ao longo do estágio curricular realizado na empresa Metaldufe. Dentro dos objetivos que se esperam alcançar, destaca-se a possibilidade de introdução do conhecimento CAD/CAM, que atualmente não está presente no dia-a-dia da empresa, para otimizar os processos de produção. Além disso, do facto da empresa não trabalhar com fichas de fabrico nem uma biblioteca de ferramentas, advêm os objetivos específicos da criação destes dois documentos no apoio à produção.

Assim, pretende-se, em primeiro lugar, fazer uma introdução de estratégias de CAM, nomeadamente com a ambientação ao *software*.

Seguidamente será definido um protocolo de trabalho no CAM, designadamente com a realização de um modelo base para a ficha de fabrico dos componentes a fabricar e com a criação de uma biblioteca de ferramentas.

Finalmente, após um maior domínio das ferramentas do software, será estudada a interação entre o CAM e as máquinas CNC, depois de confirmada a compatibilidade entre o pós-processamento e o tipo de máquinas e controladores presentes na empresa. Com este objetivo, pretende-se fazer uma análise de duas peças em particular, de forma a entender os benefícios que este tipo de estratégia poderá oferecer às metodologias da empresa.

## **1.4 ESTRUTURA**

Este documento encontra-se dividido em cinco capítulos. De uma maneira geral, a ordem de apresentação dos capítulos corresponde à sequência temporal do trabalho proposto, apesar de, em alguns momentos do estágio, determinados tópicos terem sido desenvolvidos em simultâneo.

Em primeiro lugar, no capítulo 1, é feita uma introdução, através do enquadramento e motivação do trabalho e da descrição dos seus objetivos, bem como da estrutura da dissertação.

Seguidamente, o capítulo 2 aborda os principais conceitos teóricos em redor da área de estudo, com o objetivo de contextualizar o trabalho que posteriormente é descrito.

O capítulo 3, reflete a metodologia e o protocolo proposto para o desenvolvimento de novos procedimentos de trabalho na empresa.

No capítulo 4, são expostos dois componentes, um de aço e outro de latão, nos quais é aplicado o procedimento de trabalho abordado no capítulo anterior, com o objetivo de validar a estratégias CAD/CAM estudadas.

Finalmente, o capítulo 5 apresenta as conclusões recolhidas de todo o desenvolvimento do projeto, abordando também as sugestões para os trabalhos futuros.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A manufatura, e em particular os processos de fabrico ligados à área da metalomecânica, são os principais responsáveis pelo desenvolvimento tecnológico de diversas indústrias como a construção civil, aviação, medicina, automóvel, entre outras. Além disso, este setor apresenta uma grande importância no que diz respeito ao desenvolvimento social dos países, contribuindo de forma indiscutível para o crescimento da economia. Os processos de fabrico mais convencionais da indústria metalomecânica podem ser divididos em diferentes áreas de atividade: maquinagem, fundição, forjamento, soldadura, estampagem, etc [4,5].

O processo de maquinagem consiste na interação entre uma ferramenta de corte e um material com menor resistência a maquinar, onde o excesso de material é removido através do movimento relativo das ferramentas/componente até se obter a geometria pretendida (Figura 2.1).



Figura 2.1 - Processo de remoção de material por torneamento.

Este processo pode ser subsequente de outros processos de fabrico como é o exemplo da fundição. Nestes casos, o material apresenta uma forma já próxima da final (pré-forma), sendo a maquinagem responsável pelo acabamento (nas zonas funcionais) que não foi possível realizar pelo processo que lhe deu forma. O material removido, denominado por aparas, desliza sobre a superfície da ferramenta, podendo realizar-se inúmeras operações diferentes de maquinagem (furação, fresagem, torneamento). Alguns exemplos das principais vantagens dos processos de maquinagem podem ser: a vasta gama de materiais possíveis de maquinar, desde os metais ferrosos e não ferrosos, até às madeiras, polímeros e compósitos; boa precisão dimensional e geométrica; boa qualidade superficial da superfície maquinada; versatilidade do processo. No entanto estão também associadas algumas limitações: sendo esta uma tecnologia de fabrico subtrativa, existe um grande desperdício de material que mais tarde pode ser reaproveitado; limitações da forma geométrica da peça a maquinar, para produções de pequenas séries pode não haver tanta rentabilidade e elevado consumo de energia [5, 6].

## 2.1 MAQUINABILIDADE

Os benefícios e limitações referentes à maquinagem estão dependentes de diversos fatores que influenciam a capacidade de se maquinar um certo material. Esta capacidade é muitas vezes referida como maquinabilidade, e pode ser definida como a aptidão de um material ser sujeito a processos de corte por arranque de apra até se atingir um acabamento superficial aceitável. Associados a esta característica, os fatores que influenciam a facilidade de maquinar um dado material, podem ser divididos da seguinte forma:

- Máquinas ferramentas e Ferramentas de corte;
- Materiais a maquinar;
- Parâmetros de corte.

A Figura 2.2 expõe o diagrama causa-efeito referente ao conjunto de fatores que afetam a maquinabilidade, no qual centra este subcapítulo.

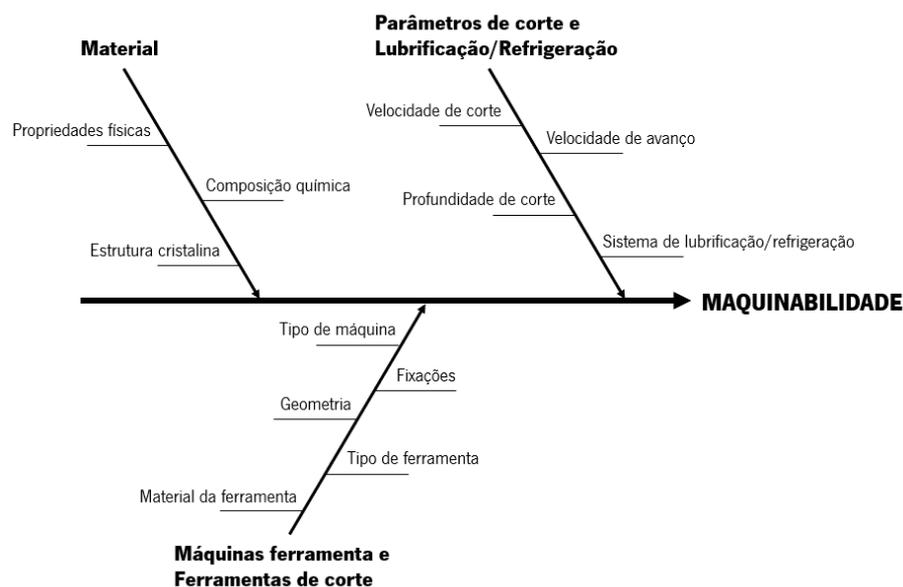


Figura 2.2 - Diagrama causa-efeito da maquinabilidade e respectivos parâmetros (adaptado de [7])

A estes fatores, estão interligadas inúmeras propriedades que tornam o processo de maquinagem complexo e difícil de avaliar. É então indispensável estimar devidamente a cadeia de processos da maquinagem em função dos fatores acima descritos, de forma a prever e evitar problemas relacionados com os custos de produção e a qualidade dos produtos. Desta forma, apesar de não existir nenhuma forma de avaliar quantitativamente a maquinabilidade, existem critérios que ajudam a determinar a maior ou menor facilidade de uma dada peça ser maquinada, como por exemplo o desgaste das ferramentas, a taxa de remoção de material, a qualidade superficial da peça, as forças de corte [8].

## 2.1.1 MÁQUINAS FERRAMENTA E FERRAMENTAS DE CORTE

### 2.1.1.1 MÁQUINAS FERRAMENTA

Atualmente, as máquinas ferramentas representam o processo de maquinagem através da sua integração com tecnologias do controlo numérico computadorizado (CNC), impulsionando uma elevada precisão e rapidez nos processos de fabrico e uma crescente capacidade de produzir peças cada vez mais complexas. Os movimentos de corte das ferramentas, que resultam na transformação geométrica de uma dada peça, são manipulados com recurso a um código numérico, o código G, que tanto pode ser programado nas próprias máquinas, como através de *softwares* de engenharia. Mais à frente, o capítulo 2.2 irá focar-se nas tecnologias CNC e na interação *software*-máquina.

Em relação às máquinas convencionais, as máquinas CNC conduziram à redução de erros humanos, já que a sua intervenção no processo de corte passou a ser praticamente nula. Além disso, levou a um aumento considerável da produtividade da indústria dada a maior rapidez, flexibilidade e diminuição dos tempos de fabrico. Desde o seu desenvolvimento, a inovação continuou a crescer, nomeadamente com o surgimento de sistemas de manufatura assistida por computador que proporcionaram a capacidade de fabricar peças com geometrias complexas com elevada exatidão.

Na indústria metalomecânica há dois principais grupos de máquinas CNC: Tornos e Centros de maquinagem. Ambas apresentam diferentes tipos de funções/operações e como tal, destinam-se à conceção de diferentes tipos de peças. A Figura 2.3 apresenta o exemplo de um torno (Figura 2.3 (a)) e um centro de maquinagem (Figura 2.3 (b)).



Figura 2.3 - Máquinas (a) torno cnc [9] e (b) centro de maquinagem [10].

Por um lado, os tornos são máquinas com capacidade para produzir peças de revolução através do movimento rotativo da peça em relação às ferramentas de corte. Os tornos possuem por norma dois eixos Z-X (Figura 2.4 (a)). O eixo Z posiciona-se paralelamente ao eixo axial da peça e o X

perpendicularmente (paralelo ao eixo radial). Os principais elementos que constituem este tipo de máquinas são a bucha (*spindle*) (Figura 2.4 (b)) responsável por transmitir o movimento rotativo do motor para a peça, bem como fixá-la através dos grampos, a torreta (Figura 2.4 (c)) (sistema de troca automática de ferramentas) e o controlador da máquina que tem como funções fazer a preparação da maquinaagem e de uma forma geral dar as informações e instruções necessárias para o funcionamento da máquina.

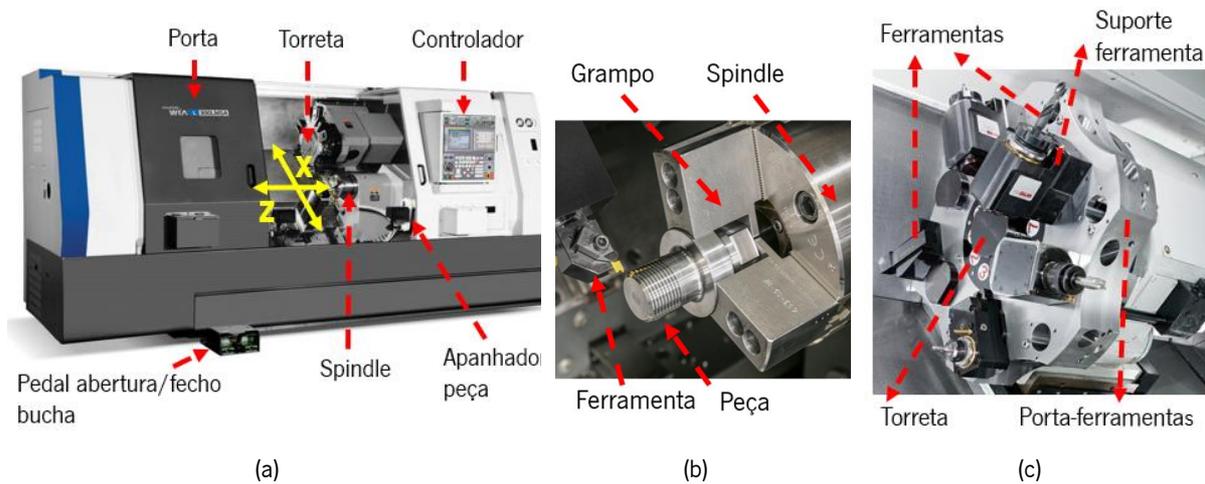


Figura 2.4 - (a) Torno CNC e respetivos eixos componentes (adaptado de [11]); (b) Sistema de fixação (adaptado de [12]); (c) torreta (adaptado de [13]).

Apesar de não serem tão comuns, os tornos verticais, como os da Figura 2.5, possuem uma configuração diferente, no sentido em que o *spindle* está posicionado num plano vertical, ao contrário do que foi descrito anteriormente. Estas máquinas são mais utilizadas para peças de média-grande dimensão.

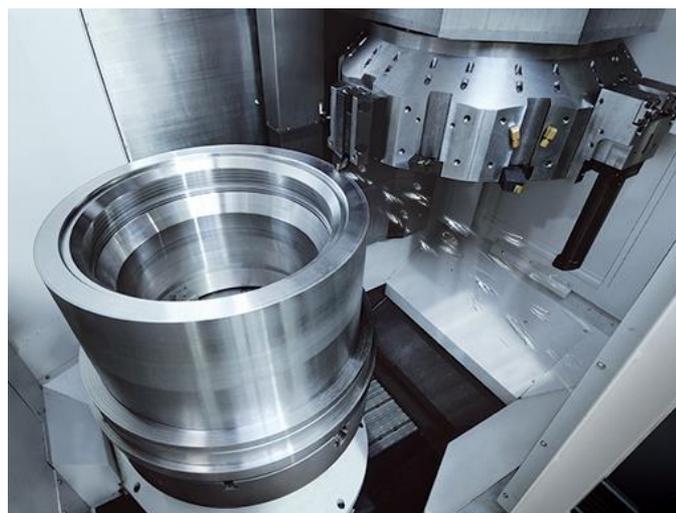


Figura 2.5 - Torno vertical [14].

Um outro tipo de torno, que combina as operações de torneamento e fresagem, é o chamado centro de torneamento. Estas máquinas apresentam de igual modo a função de torneamento, mas combinam com operações de fresagem através do uso de ferramentas em suportes motorizados que tanto podem maquinar a peça de forma radial como axial. Tal como representado na Figura 2.6 (a), o eixo C sincroniza-se com os outros dois eixos de transação da máquina de forma a realizar os movimentos de corte. A principal vantagem deste tipo de máquinas está na minimização de tempos de produção, dado que pode reduzir o número de máquinas necessárias para fabricar peças que necessitem de operações de torneamento e fresagem. A transição para um maior número de eixos, como é o caso dos tornos de 5 eixos, e a adição de um segundo *spindle* e porta-ferramentas (Figura 2.6 (b)) é também uma forma de aumentar a capacidade de fabricar peças com maior complexidade.

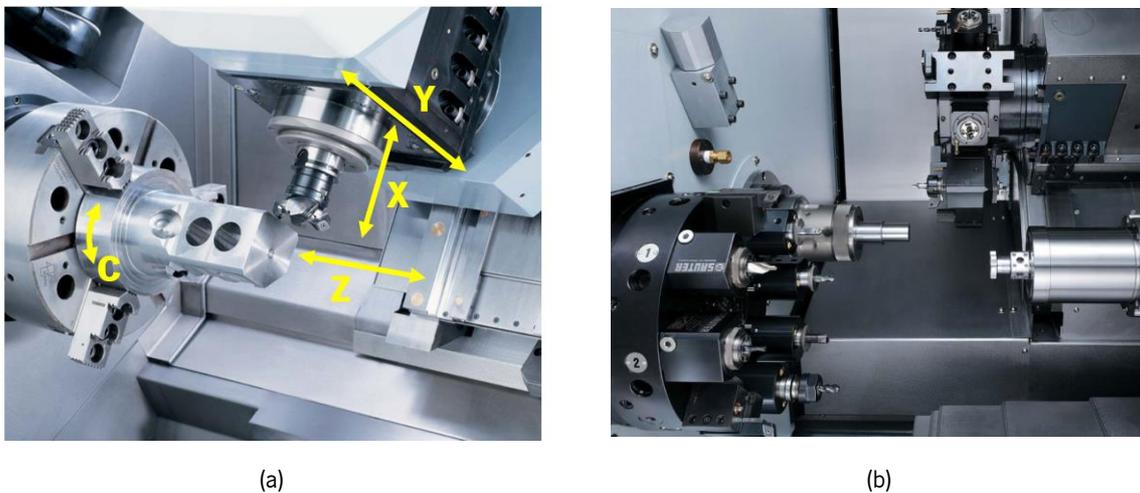


Figura 2.6 – Centro de torneamento e respetivos eixos (adaptado de [15]); (b) Torno-fresa com dois *spindles* e porta-ferramentas [16].

Por sua vez, os centros de maquinagem (Figura 2.7) são normalmente compostos por um *spindle*, responsável pelo movimento da ferramenta e pelo menos 3 eixos de transição. Tal como os tornos, os centros também são controlados através de um controlador. Outro elemento fundamental é a mesa de trabalho e o sistema de fixação da peça. As peças fabricadas neste tipo de máquinas, ao contrário dos tornos, normalmente, não são peças de revolução. Podem ser peças assimétricas, com geometrias e superfícies complexas que requisitem de operações de faceamento, furação, contorno, pocket, roscagem, etc. As versões mais avançadas dos centros de maquinagem dispõem de um quarto e quinto eixo para permitir o fabrico de formas mais precisas e complexas.

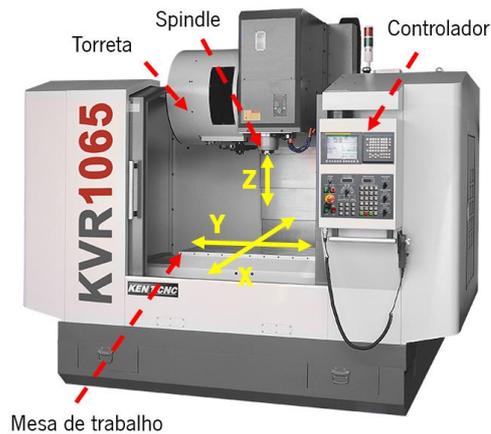


Figura 2.7 - Centro de maquinagem 3 eixos (adaptado de [17]).

Quanto aos centros com 3 eixos (fresadoras), estes são normalmente formados pelo eixo de movimento da ferramenta (eixo Z) e pelos eixos da mesa (X-Y) que movimentam a peça em duas direções. Uma variante deste tipo de máquinas é a incorporação de um quarto eixo para reposicionar a peça num plano diferente. Neste caso, as máquinas não são consideradas de 4 eixos, pois não tem capacidade de usar o eixo complementar em simultâneo com os outros três.

Os centros de maquinagem de 4 e 5 eixos contínuos, como os da Figura 2.8, incluem o(s) eixo(s) de rotação da mesa para os movimentos de corte em complemento com os outros 3 eixos de transação. Isto permite usar a combinação dos eixos de rotação para garantir um maior acesso a áreas que seriam mais difíceis de maquinar com o recurso exclusivo dos 3 eixos convencionais. É também possível controlar o ângulo de contacto entre a ferramenta e a superfície, o que influencia a qualidade superficial da peça. Outro fator favorável na qualidade superficial da peça tem a ver com a possibilidade de se usar ferramentas mais curtas em relação a máquinas com maior limitação de eixos. Além disso, permite reduzir tempos de produção, dado que possibilita maquinar diferentes tipos de operações de peça num aperto só [18].

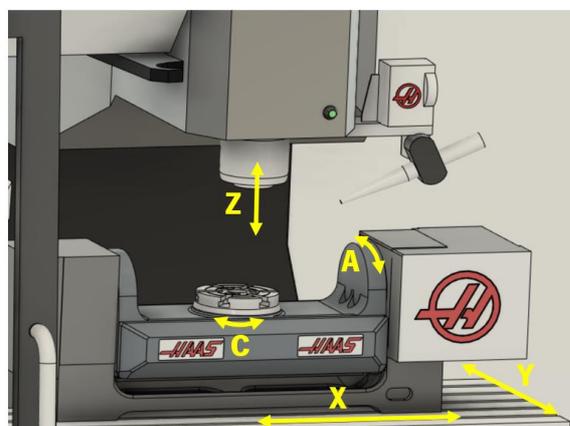


Figura 2.8 - Centro de maquinagem 5 eixos (adaptado de [19]).

Um dos elementos fundamentais das máquinas ferramenta são os sistemas de fixação, para os quais existem diversas opções de escolha. Estes dispositivos são instalados nas máquinas, podendo ser substituídos consoante o tipo de trabalho. A principal função destes sistemas é garantir a posição adequada do componente ao longo do processo de corte.

Em primeiro lugar, a seleção de uma fixação deve garantir uma boa estabilidade nas zonas de contacto com a peça de modo que não ocorram desvios nem vibrações durante os movimentos de corte. Além disso, o dispositivo de fixação desempenha um papel importante na minimização dos tempos não produtivos, devendo conceber-se um mecanismo que permita uma rápida troca das peças. Este último fator pode ser mais ou menos vantajoso consoante o tipo de produção, sendo que quanto maior o número de peças produzidas, mais relevante se tornam os tempos não produtivos. Um outro requisito diz respeito à capacidade de reprodução do posicionamento das peças em cada ciclo de produção [6].

Os exemplos de fixações mais comuns são, em primeiro lugar, para as peças cilíndricas, as buchas (Figura 2.9 (a)). Estas são maioritariamente usadas para operações de torneamento, no entanto podem ser incorporadas em centros de maquinagem. Além disso, para operações de fresagem, os principais dispositivos podem ser os pratos de fixação (Figura 2.9 (b)), as prensas de fixação (Figura 2.9 (c)), que representam o método mais utilizado graças à vasta aplicabilidade. Além disso, é possível encontrar mesas magnéticas (Figura 2.9 (d)), bem como gabaritos (Figura 2.9 (e)), muito utilizados em altas produções.

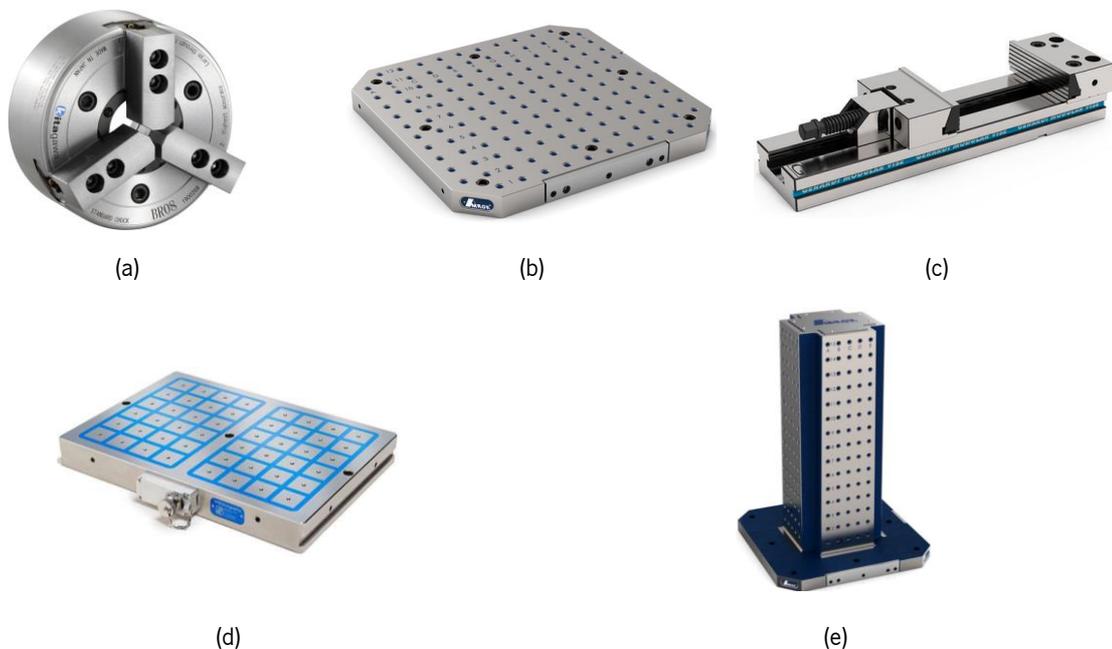


Figura 2.9 - Principais dispositivos de fixação: (a) bucha [20], (b) prato de fixação [21], (c) prensa de fixação [22], (d) prato magnético [23], (e) palete [24]

Em suma, a escolha de qualquer tipo de máquina vai influenciar diretamente a seleção das estratégias de corte, do tipo de ferramentas e fixações. Consequentemente, estes fatores irão condicionar a estabilidade do processo, a escolha dos parâmetros de corte, o tipo de refrigeração, etc.

#### 2.1.1.2 FERRAMENTAS DE CORTE

Com o decorrer do desenvolvimento industrial, as ferramentas (Figura 2.10) e os seus materiais sofreram uma grande evolução, contribuindo assim para tornar os processos de maquinagem cada vez mais produtivos e eficazes. Algumas das soluções desenvolvidas para a melhoria das ferramentas de corte passaram pela procura de novos materiais, novos revestimentos, novas geometrias. Posteriormente foram também introduzidas ferramentas com mecanismos anti-vibrações, com sistemas de lubrificação interno, etc [25].

A seleção de ferramentas de corte deve obedecer a certos fatores como por exemplo [26]:

- Máquina/operação;
- Tipo de produção (grande ou pequena série);
- Material da peça a maquinar;
- Acabamento exigido;
- Dimensões e propriedades da peça;
- Condições de corte;
- Fluido de Corte.

A partir destes pontos, é possível fazer uma escolha de ferramenta mais consciente, de forma a tentar manter o processo de corte o mais sustentável e económico possível, sem comprometer as exigências requeridas para o estado da superfície da peça.



Figura 2.10 - Ferramentas de (a) torneamento [27] e (b) fresagem [28].

Para fazer a seleção de uma ferramenta é essencial conhecer a classe de materiais disponível, bem como as respectivas características. Algumas dessas propriedades relacionam-se com a dureza a quente (a dureza da ferramenta tem de ser maior do que a da peça), tenacidade (resistência à fratura), resistência ao desgaste (relacionada com o tempo de vida da ferramenta), resistência à deformação plástica e ao choque [5].

A tabela 2.2.1 seguinte relaciona alguns dos materiais mais comuns na maquinagem com os seus atributos já mencionados. De modo a comparar de igual forma os diferentes materiais, foi usada uma escala de desempenho de 1 a 5, sendo 1 uma fraca performance e 5 muito bom [5]:

Tabela 2.2.1 - Propriedades dos materiais das ferramentas de corte (adaptado de [5]).

Propriedades	Dureza a quente	Tenacidade	Resistência ao desgaste	Resistência à deformação plástica	Resistência ao choque
HSS- Aço rápido	1	5	1	1	5
C- Carboneto sinterizado (Metal duro)	3	4	3	3	3
CG- Carboneto sinterizado revestido	4	3	4	4	3
CT- Cermet	4	2	4	4	2
Cerâmicos	5	1	5	5	1( $Al_2O_3$ ) 4( $Si_3N_4$ )

Analisando a tabela 2.2.1, é possível confirmar que as ferramentas de aço rápido são as que apresentam pior resistência ao desgaste, à deformação plástica e com menor dureza a quente. No entanto, dependendo do tipo de material a maquinar, este tipo de ferramentas podem ser a primeira escolha para um processo mais económico sem comprometer a eficiência. Dada a sua elevada resistência ao choque e tenacidade, estas ferramentas são especialmente usadas no corte de materiais com menor dureza [5]. Ainda assim, a influência de elementos de liga na sua estrutura, como o tungsténio, cobalto ou cromo, poderão potenciar as suas capacidades. É adequado usar-se velocidades de corte relativamente baixas para esta gama de materiais [25].

Os carbonetos sinterizados ou de metal duro, são atualmente as ferramentas mais comuns na maquinagem dada a sua estabilidade e boas propriedades. Este material é produzido pelo processo de fabrico da metalurgia dos pós, que consiste na operação de prensar e sinterizar uma mistura um aglomerante e carboneto. A dureza destas ferramentas depende do teor de aglomerante e do tamanho

dos pós de carboneto, sendo que valores menores da percentagem de aglomerante e da dimensão dos pós favorecem o aumento da dureza. Por sua vez, o aumento do tamanho dos grãos e do teor de aglomerante confere uma maior tenacidade. O uso de revestimentos neste tipo de material ajuda a melhorar a capacidade de resistência ao desgaste e deformação plástica e de garantir uma maior dureza a quente [5].

As ferramentas de cermet, resultam de materiais formados por aglomerados cerâmicos numa matriz metálica de cobalto, níquel ou molibdénio, por exemplo. O composto cerâmico pode ser formado por carbonetos de titânio, nitretos de titânio, carbonetos de tungsténio, etc. Em comparação com as ferramentas de metal duro, as de cermet apresentam melhor resistência à deformação plástica e ao desgaste e melhor dureza a quente. Por outro lado, a resistência ao choque e a tenacidade são propriedades que apresentam melhores valores para o metal duro. Por estas razões, a gama de operações apropriadas para estas ferramentas não é tão vasta quanto a de carboneto sinterizado. São particularmente recomendadas para operações de acabamento de materiais como o aço ou o ferro fundido, combinando avanços baixos com velocidades de corte elevadas [5].

Quanto às ferramentas cerâmicas, de notar que a tabela anterior indica dois valores para a resistência ao choque, devido à diferenciação entre os cerâmicos à base de óxido de alumínio e nitreto de silício. Estes materiais apresentam os melhores valores para a resistência ao desgaste e à deformação plástica bem como para a dureza a temperaturas elevadas, permitindo a utilização de velocidades de corte elevadas no acabamento de materiais com elevada dureza. Em contrapartida, devido ao seu comportamento frágil, a tenacidade é um ponto menos positivo nas suas propriedades [5].

### 2.1.2 MATERIAIS

O grupo de materiais a maquinar mais comum na indústria (metalomecânica) da maquinagem enquadra-se nos materiais metálicos, nomeadamente com ligas de alumínio, aço, cobre, latão, ferro fundido. No entanto outros materiais como a madeira, os compósitos e plásticos podem também ser fabricados por este processo de fabrico.

Relativamente aos materiais metálicos, estes podem, por vezes, ser ou não ser de liga. A diferença entre estas duas designações prende-se com o facto de as ligas metálicas serem compostas por dois ou mais elementos. A principal vantagem da adição de elementos de liga está na alteração das propriedades do material, nomeadamente na resistência à corrosão, dureza, ductilidade, dependendo do tipo de elemento que é adicionado. A composição química do material, tal como o processo de fabrico e tratamento térmico afetam a maquinabilidade do mesmo [29].

Na maquinagem é possível agrupar os materiais das peças a produzir em 6 grupos, de acordo com a norma ISO 513:2012 [30]. De modo a facilitar a escolha adequada das ferramentas, cada grupo tem propriedades diferentes no que diz respeito à maquinabilidade. Para qualquer grupo de material, é associada uma letra e cor, sendo que os principais grupos são: os aços, aços inoxidáveis, ferros fundidos, materiais não ferrosos, superligas resistentes ao calor e aços endurecidos [31], conforme a Figura 2.11.



Figura 2.11 - Agrupamento dos materiais de referência (adaptado de [31]).

#### 2.1.2.1 AÇOS AO CARBONO

Os aços têm como elementos base o ferro e o carbono, cuja percentagem deste último elemento varia entre os 0.05% e os 2.0%. Dentro deste grupo, pode-se encontrar diferentes tipos de classificações, de acordo com a composição química, teor de liga, estrutura cristalina, aplicação, etc. Segundo a composição química, os aços podem ser ou não de liga [32].

Os aços sem liga, também conhecidos como aços ao carbono, têm apenas o carbono como elemento, no entanto alguns componentes como o manganésio e o silício podem fazer parte da sua composição, sem ser considerados elementos de liga. De acordo com a sua composição, estes materiais podem-se dividir segundo a percentagem de carbono [32]:

- 0.05%-0.2%;
- 0.25%-0.45%;
- 0.5%-0.8%;
- 0.8% ou mais.

No primeiro caso, quando a percentagem de carbono é inferior a 0.2%, a maquinabilidade pode ser relativamente má, resultando em alguma dificuldade no processo de maquinagem. Além disso, dependendo do método de fabrico e da presença de impurezas, estes aços apresentam normalmente uma elevada ductilidade, uma das razões pela qual a maquinabilidade não é favorável. São os aços mais

económicos, pelo que apenas são selecionados para aplicações com um menor grau de exigência mecânica e pouca suscetibilidade à corrosão [32].

Os aços com um teor de carbono entre os 0.25 e os 0.45% são dos mais utilizados para o processo de maquinagem e são endurecidos através de tratamentos térmicos. São aplicados em componentes de resistência média como condutas, treliças de telhados, equipamento de elevação, molas. [32].

De seguida, os aços com uma percentagem compreendida entre os 0.5% e os 0.8% são endurecidos por tratamentos térmicos que requerem temperaturas superiores a 800°C. Este grupo de aços é usado para molas, lâminas de corte e todas as aplicações em que se exige uma dureza média ou elevada, mas a resistência ao choque não é uma condição necessária [32].

Finalmente, os aços com percentagem mínima de 0.8% são frequentemente aplicados em ferramentas de corte, mas também em ferramentas de prensa e fixações, desde que não sejam sujeitos a impactos ou ao calor [32].

A maquinabilidade do aço ao carbono é significativamente dependente do teor em carbono presente na sua composição química. O aumento do teor de carbono origina um aumento da dureza do material e, conseqüentemente diminuição da ductilidade. Esta variação é uma vantagem para a maquinabilidade, até um certo ponto [33]. A Figura 2.12 resume o efeito que o carbono tem na maquinabilidade do aço, no que diz respeito ao desgaste da ferramenta e à formação da aparas:

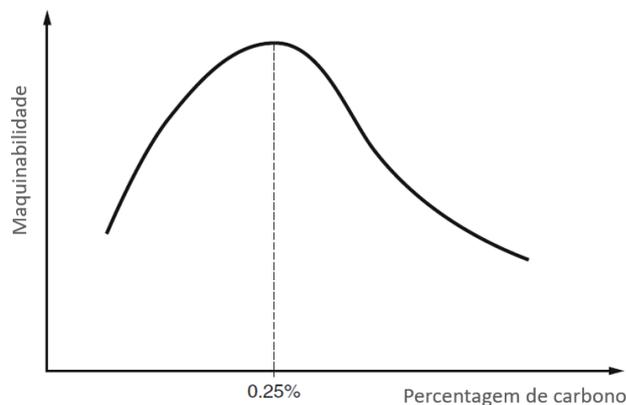


Figura 2.12 - Correlação entre a maquinabilidade do aço ao carbono e o seu teor em carbono (adaptado de [33]).

É possível dizer-se que para uma percentagem de carbono próxima dos 0.25% a maquinabilidade é mais favorável.

Para valores inferiores a 0.25% de carbono, os aços apresentam uma elevada ductilidade e baixa dureza, o que interfere negativamente na maquinabilidade. Nestes casos, há tendência para a formação da aresta postíça de corte, isto é, quando uma porção do material da peça a maquinar adere à aresta da ferramenta devido à elevada ductilidade e à utilização de velocidades de corte baixas. Este fenómeno

diminui o tempo de vida das ferramentas/pastilhas de corte e o estado da superfície da peça. Uma forma de evitar este problema é através de velocidades de corte mais elevadas [33].

Por outro lado, os aços com uma percentagem superior a 0.25% de carbono e até 0.4% apresentam uma menor deformabilidade. O aumento da dureza do material poderá resultar num maior desgaste da ferramenta por abrasão, maiores forças de corte e temperaturas na zona de contacto com a ferramenta. Ainda assim, em comparação com valores inferiores a 0.25% de carbono, a maquinabilidade poderá ser mais favorável à formação de aparas e à tendência de haver adesão de material na ferramenta, como referido anteriormente. Consequentemente, a qualidade superficial é significativamente melhor nestas condições [32, 33].

Com o aumento do teor em carbono, a partir de percentagens superiores a 0.4%, aumenta também a probabilidade de ocorrer desgaste da ferramenta, nomeadamente por desgaste de cratera. O aumento das forças de corte necessárias para a remoção da aparas, levam ao aumento da temperatura, pelo que para percentagens de carbono muito altas a ocorrência deste tipo de desgaste poderá ser comum, mesmo a velocidades de corte baixas [33].

#### -Aços de liga

Os aços consideram-se de liga quando pelo menos dois elementos de liga estão presentes na sua composição. Alguns elementos mais comuns incluem o cromo, níquel, molibdénio, tungsténio, vanádio, cobre, alumínio, etc. Através da adição de elementos de liga é possível conferir o aperfeiçoamento de algumas propriedades do aço como: aumento da maquinabilidade, aumento da resistência à corrosão e oxidação, maior resistência ao desgaste, melhoria da soldabilidade e de outras características de acordo com o uso específico [32].

Quanto ao teor de liga, podem ser de baixo, médio ou alto carbono, dependendo da percentagem de carbono.

Os aços de baixa liga apresentam uma percentagem de carbono até 0.35% e podem ser aplicados em matrizes e punções, brocas e ferramentas de corte para materiais não ferrosos, engrenagens, etc [32].

Os de médio carbono (0.4%- 0.65% de carbono) são aços mais caros e são normalmente usados quando são necessárias algumas características específicas. Alguns exemplos de utilização são veios, eixos, molas, cavilhas de alta resistência, porcas e parafusos para uso mais exigente. Alguns dos materiais têm conteúdo suficiente de carbono para serem utilizados em ferramentas de corte, gabaritos, e ferramentas de todos os tipos [32].

Os aços de alto carbono apresentam uma ductilidade baixa e são usados em aplicações em que o desgaste e as altas temperaturas são fatores a ter em conta. Um exemplo, são as ferramentas de corte de todo o tipo: fresas, brocas, machos, etc. [32].

#### 2.1.2.2 AÇOS INOXIDÁVEIS

Os aços inoxidáveis são compostos por ferro, como elemento base, e contêm pelo menos 10.5% de cromo e no máximo 1.2% de carbono. Por definição, este material é considerado um aço de alta liga graças ao elevado teor de cromo, o que lhe confere uma elevada resistência à corrosão. Segundo a sua microestrutura, os aços inoxidáveis podem ser divididos em quatro grupos: ferríticos, martensíticos, austeníticos e ferrítico-austeníticos (*duplex*) [25, 33].

Graças à elevada resistência e ductilidade, excelente resistência à corrosão e estabilidade térmica, os aços inoxidáveis são muitas vezes usados para componentes da indústria química, marinha e alimentar [33]. Apesar das propriedades favoráveis, podem apresentar uma maior dificuldade no processo de maquinagem, que é refletido na elevada taxa de desgaste das ferramentas, na baixa qualidade superficial das peças e na formação de uma geometria desfavorável das aparas de corte. Uma forma de conferir uma maior estabilidade nas condições de corte, passa pela consideração do tipo de elementos presentes na estrutura do material, pela escolha acertada dos materiais das ferramentas e parâmetros de corte [33, 34].

A maquinabilidade destes aços depende maioritariamente do teor dos elementos cromo e níquel. A Figura 2.13 relaciona o tipo de microestrutura com a variação do nível de cromo, níquel e ferro:

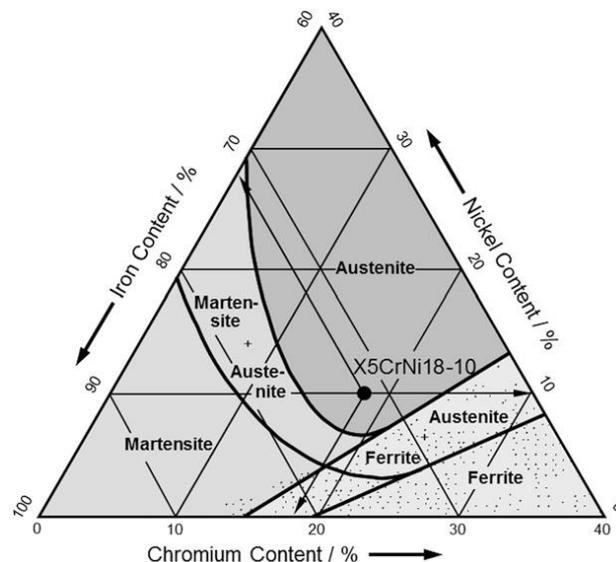


Figura 2.13 - Diagrama de fases da Crómio-Níquel- Ferro da microestrutura do aço inoxidável [33].

Como exemplo, a imagem representa o aço X5CrNi 18-10 que apresenta um teor de 72% de ferro, 10% de níquel e 18% de cromo e, por conseguinte, apresenta uma estrutura austenítica, após o tratamento térmico.

Os aços inoxidáveis ferríticos apresentam um baixo teor em carbono (abaixo dos 0.2%) e de níquel. Como tal, são considerados relativamente fáceis de maquinar em comparação com os aços austeníticos. Por outro lado, não apresentam tão boas propriedades anticorrosivas em comparação com os mesmos aços [33].

A maquinabilidade dos aços martensíticos pode ser relativamente boa com a escolha acertada do tipo de ferramenta, parâmetros de corte e fluido de refrigeração. Estes materiais contêm um valor de aproximadamente 1.2 % de carbono e podem ser endurecidos por tratamentos térmicos, o que lhes confere uma elevada dureza em comparação com os restantes aços inoxidáveis [33]. Contudo, devido ao baixo teor em cromo, não mostram ser tão resistentes à corrosão como os ferríticos e austeníticos [34].

Os aços austeníticos são os aços inoxidáveis mais comuns de se encontrar na indústria. A sua composição pode apresentar um elevado teor em níquel e, como tal a maquinabilidade pode ser dificultada graças à elevada plasticidade. A baixa condutibilidade térmica é também um fator problemático no fabrico deste material, devido à maior dificuldade em dispersar o calor formado na interface ferramenta-apara e, conseqüentemente no comprometimento da qualidade superficial [33].

Finalmente, os aços duplex, compostos por uma microestrutura ferrítica e austenítica, combinam as vantagens das duas fases, conduzindo a uma maior resistência, melhor soldabilidade e corrosão. Devido ao menor teor de níquel são também mais baratos que os austeníticos [33, 35].

### 2.1.2.3 FERROS FUNDIDOS

Os ferros fundidos são ligas de ferro e carbono, com uma quantidade mínima de 2.1% de carbono. Comercialmente, é comum encontrar a presença de outros elementos ligados ao ferro e carbono como silício, manganés, fósforo e enxofre. Estes elementos permitem conferir diferentes tipos de categorias, nomeadamente os ferros fundidos cinzentos, brancos, maleáveis ou nodular [25, 32].

O ferro fundido cinzento é o mais comum de se encontrar e é usado em situações onde o baixo custo é o principal fator. Apresenta um comportamento frágil e boa condutividade térmica. É um material que gera forças de corte baixas e apresenta uma maquinabilidade relativamente boa. O tipo de desgaste mais comum de encontrar nas ferramentas de corte é por abrasão [31, 32].

Quanto aos ferros fundidos brancos estes apresentam uma estrutura sem grafite, graças à combinação dos átomos de carbono com o ferro, formando carbonetos de ferro. Isto impõe um comportamento frágil e duro. Quando combinados com elementos como o níquel ou crómio melhora as propriedades como a resistência à abrasão [32].

Os ferros fundidos maleáveis são o resultado do tratamento térmico dado a ferros fundidos brancos que levam à quebra dos carbonetos de ferro, resultando na libertação das moléculas de grafite. Este material é menos suscetível a quebrar em relação ao ferro fundido branco, pelo que adquire uma maior ductilidade [32, 36].

Por fim, os ferros fundidos nodulares apresentam uma matriz esférica de grafite na sua estrutura, o que confere uma maior resistência mecânica e ductilidade. Ao contrário dos ferros fundidos cinzentos, que apresentam arestas nos grãos de grafite, provocando pontos de quebra e tornando assim o material mais frágil, neste tipo de ferro fundido essa propriedade é eliminada graças à sua estrutura obtida por tratamentos durante o processo de fundição [31, 32].

#### 2.1.2.4 MATERIAIS NÃO FERROSOS

Os materiais não ferrosos não contêm o ferro como principal elemento na sua estrutura. Estes destacam-se pela sua maleabilidade e apresentam vantagens em relação aos materiais ferrosos que os fazem ser a primeira escolha em muitas aplicações. Algumas das suas características são a boa resistência à corrosão, baixa densidade e, como tal, baixo peso, boa condutibilidade térmica e elétrica. Alguns exemplos destes materiais são as ligas de alumínio, o latão e o bronze [37].

As ligas de alumínio destacam-se pela sua excelente resistência à corrosão, boa condutibilidade térmica, elevada ductilidade e baixo peso. Estas propriedades são a razão pela qual o alumínio é muitas vezes preferido ao aço, por exemplo, para aplicações na indústria automóvel ou aeroespacial, onde a redução do peso é um fator essencial [37].

Durante o processo de maquinagem, é possível usar profundidades de corte elevadas graças às baixas forças de corte geradas. O facto deste material apresentar uma boa condutibilidade térmica origina uma boa dissipação do calor gerado entre a ferramenta e o material. No entanto, este material apresenta também um baixo ponto de fusão que, caso seja excedido, poderá levar ao surgimento de uma adesão indesejada do material da peça na ferramenta. Para prevenir esta situação é recomendado que sejam usados mecanismos de arrefecimento do calor gerado através dos fluidos de refrigeração. Além disso, devem ser usadas ferramentas de corte que promovam a quebra da apara, já que a mesma tende a ser

longa devido à elevada ductilidade do material. Em complemento, velocidades de corte elevadas devem ser usadas para adquirir um bom acabamento superficial [6, 33].

O latão e o bronze são ligas essencialmente compostas por cobre-zinco e cobre-estanho, respetivamente, e outros elementos de liga como zinco, alumínio fósforo, etc. Ambos os materiais apresentam excelente resistência à corrosão. O latão é mais maleável que o bronze e é muito aplicado em instrumentos musicais, na produção de válvulas, fechaduras, e como elemento de decoração [38].

#### 2.1.2.5 SUPERLIGAS RESISTENTES AO CALOR

As superligas resistentes ao calor têm como base elementos como o ferro, níquel, titânio, cobalto, entre outros. Estas ligas apresentam uma elevada resistência mecânica, ductilidade, resistência à fadiga e excelente resistência à oxidação e corrosão, mesmo quando sujeitas a elevadas temperaturas. Estas propriedades resultam na escolha destes materiais quando o aço ou aço inoxidável não conseguem satisfazer as aplicações. Como tal, as superligas tornam-se ideais para a indústria aeronáutica, submarinos reatores nucleares, matrizes para o fabrico de materiais, implantes na área da biomédica [34].

#### 2.1.2.6 AÇOS ENDURECIDOS

Os aços endurecidos são materiais com elevada dureza (45-65 HRC) submetidos a sequências de tratamentos térmicos controlados com objetivo de alterar a sua microestrutura e conseqüentemente modificar as propriedades físicas e mecânicas. Estes materiais são muito requisitados para a construção de matrizes de máquinas de forjamento, ferramentas, e peças para a indústria automóvel, graças à excelente resistência ao desgaste e estabilidade térmica [39].

A maquinagem destes materiais apresenta complicações ao nível do desgaste da ferramenta graças à dureza do material. O uso de velocidades de avanço e penetrações baixas podem ser formas de reduzir as forças de corte e minimizar o desgaste provocado nas ferramentas. Além disso, a opção pelo uso de pastilhas de corte que promovam o corte negativo pode facilitar ainda mais o processo de arranque de apara [39].

#### 2.1.3 PARÂMETROS DE CORTE

Com o progresso do grau de exigência da qualidade dos produtos fabricados por tecnologias de maquinagem, torna-se importante fazer uma seleção consciente dos diversos fatores que afetam a maquinabilidade dos materiais. Dentro dos fatores já mencionados, como os materiais da peça, das

ferramentas e das máquinas CNC existe um outro que influencia diretamente a qualidade superficial da peça, bem como o tempo de vida das ferramentas - parâmetros de corte. Os parâmetros de corte mais preponderantes e mais facilmente controláveis no processo de maquinagem são a velocidade de corte, a velocidade de avanço e a profundidade de corte, conforme apresentado na Figura 2.15.

Na indústria, é muitas vezes comum fazer-se a seleção dos parâmetros de corte tendo como base a experiência de trabalho, as rotinas e os métodos que sempre se adotaram. No entanto, o desenvolvimento crescente das características das ferramentas de corte deve ser acompanhado por novas metodologias na seleção destes parâmetros para garantir uma aproximação às condições ideais de corte.

Um processo de maquinagem ideal seria aquele que permitisse obter um acabamento superficial excelente com um desgaste da ferramenta mínimo. No entanto, na prática isto não é possível. A qualidade do acabamento superficial e o toleranciamento geométrico são duas formas de avaliar a qualidade final da peça, sendo que para valores da rugosidade relativamente baixos exigidos pelo cliente, muito dificilmente se poderá maximizar o tempo de vida da ferramenta. É então importante determinar um ponto de equilíbrio entre os parâmetros de corte e o desgaste das ferramentas, de maneira a alcançar tempos de produção e a qualidade desejados e ao mesmo tempo reduzir dentro do possível os custos associados ao desgaste das ferramentas [7]. A Figura 2.14 relaciona os diferentes custos associados à maquinagem e a taxa de produção com a velocidade de corte. A zona de maior eficiência encontra-se entre uma produção com custos mínimos associados e uma alta taxa de produção, pelo que um processo de maquinagem deve combinar os diferentes parâmetros de modo a encontrar-se dentro na zona eficiência máxima.

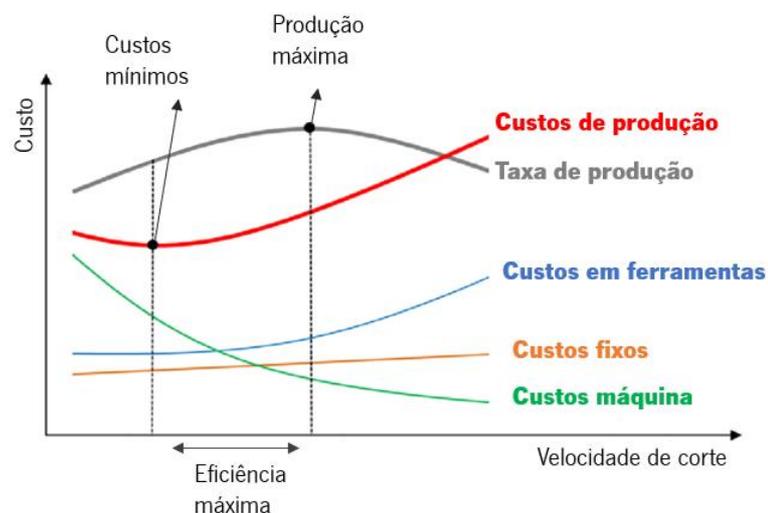


Figura 2.14 - Relação entre taxa de produção/custos e velocidade de corte (adaptado de [40]).

Para a definição dos diferentes parâmetros de corte pode-se dividir pelo tipo de operações: torneamento ou fresagem.

Quanto ao torneamento, o movimento de corte é dado pela rotação da peça, onde a velocidade de corte indica a velocidade a que o ponto de contacto da ferramenta se desloca em relação ao componente e é, por norma expressa em metros por minuto (m/min). Pode-se então definir a equação para a velocidade de corte da equação 2.1 [41]:

$$V_c = \frac{\pi \times D \times n}{1000} \quad (2.1)$$

Onde,

$V_c$  – velocidade de corte [m/min]

$D$  – diâmetro da peça [mm]

$n$  – rotações por minuto [rpm]

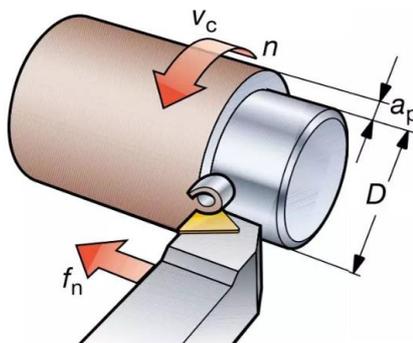


Figura 2.15 - Diagrama dos parâmetros operacionais do torneamento [42].

Os catálogos das ferramentas de torneamento apresentam os valores para a velocidade de corte e não para as rotações por minuto do *spindle*. É então importante saber relacionar estes dois parâmetros, pois para fazer alterações à velocidade de corte diretamente nas máquinas, muitas vezes o parâmetro que é pedido é a velocidade de rotação e não a de corte.

Aquando da programação de uma peça, é possível optar por trabalhar com velocidades de corte constantes ou variadas. Na programação CNC, através de ferramentas CAM, é comum usar-se velocidades constantes para respeitar os valores recomendados pelo fornecedor ao longo de todo o processo de corte. É, por isso, importante ter em atenção aos limites de rotação máximos da máquina. Isto é, à medida que uma ferramenta de torneamento realiza uma passagem de facejamento, por exemplo como se observa na Figura 2.16, o diâmetro vai diminuindo. Ora, se a velocidade de corte for constante e o diâmetro for diminuindo, então pela equação 2.1 é evidente que a outra variável, o número de rotações por minuto ( $n$ ), terá de aumentar para compensar a diminuição do valor do diâmetro. Tendo

em conta que todas as máquinas apresentam limites máximos de segurança para as rotações por minuto do *spindle*, é importante usar o comando G50 do código G de forma a restringir estes valores.

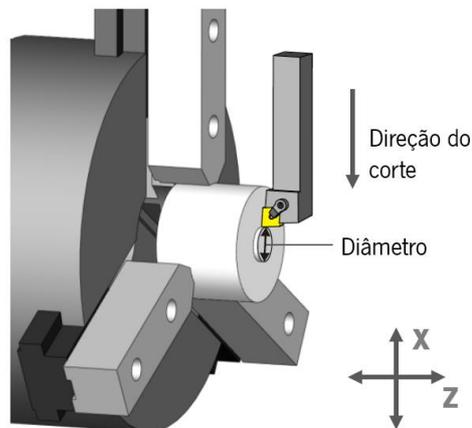


Figura 2.16 - Representação do decréscimo do diâmetro de corte numa operação de faceamento [43].

De forma semelhante, para operações de torneamento externo, ao longo de cada passagem o diâmetro não varia, no entanto à medida que se avança em profundidade (na direção do eixo x) o mesmo diminui, impondo um incremento das rotações do spindle. Por outro lado, para torneamentos internos, o diâmetro da peça vai aumentando à medida que o material é maquinado, logo as rotações por minuto do spindle diminuem em compensação.

Quanto à velocidade de avanço, esta pode ser expressa pela equação 2.2. No entanto, no torneamento é comum falar-se em avanço por rotação, que corresponde à distância, em milímetros, que a ferramenta percorre por cada rotação da peça.

$$V_f = f_n \times n \quad (2.2)$$

Onde,

$V_c$  – velocidade de avanço [mm/min]

$f_n$  – avanço por rotação [mm/rot]

Para a fresagem as equações do movimento de corte podem divergir ligeiramente. A equação da velocidade de corte corresponde à velocidade linear de uma das arestas de corte da ferramenta em relação à peça. É definida conforme a expressão 2.3 [44]:

$$V_c = \frac{\pi \times D_c \times n}{1000} \quad (2.3)$$

Onde,

$V_c$  – velocidade de corte [m/min]

$D_c$  – diâmetro da ferramenta [mm]

$n$  – rotações por minuto [rpm]

O diâmetro,  $D_c$ , corresponde ao diâmetro de corte da ferramenta, tendo influência nos valores da velocidade de corte.

A velocidade de avanço define a velocidade da ferramenta em relação à peça, em milímetros por minuto. Esta expressão (equação 2.4) relaciona-se com o avanço por dente,  $f_z$ , com as rotações por minuto,  $n$ , e o número de dentes,  $z_c$  [44].

$$V_f = f_z \times z_c \times n \quad (2.4)$$

O avanço por rotação indica a distância que uma ferramenta percorre a peça por cada rotação e é calculada, multiplicando o número de dentes da ferramenta,  $z_c$ , pelo avanço por dente. A Figura 2.17 ilustra essa expressão [44]:

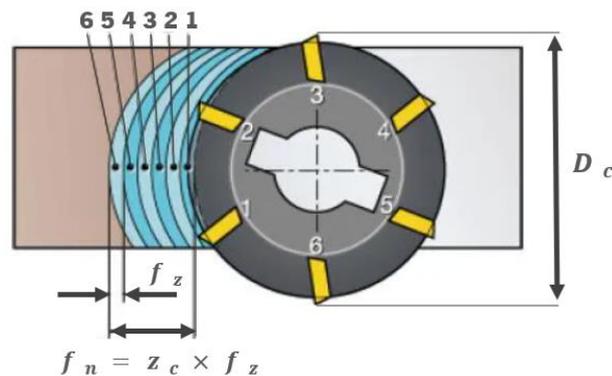


Figura 2.17 - Representação do avanço por rotação e avanço por dente de uma ferramenta de fresagem [44].

Para além dos parâmetros operacionais já referidos, há uma outra variável do processo de maquinagem que desempenha um papel muito importante: os sistemas de refrigeração/lubrificação. É possível separar em três, as zonas de onde maior transferência de calor. Relativamente à primeira zona, o processo de remoção de aparas impõe uma constante deformação plástica do material da peça a maquinar e conseqüentemente um aumento da sua temperatura. Além disso, durante este processo, a zona de contacto do material removido (apara) com a ferramenta/pastilha de corte representa a segunda região. O aumento da temperatura deve-se principalmente às forças de atrito aí presentes. A terceira região de transferência de calor acontece entre o material e o meio ambiente [8]. A Figura 2.18 representa as três zonas de condução de calor mencionadas, bem como as duas zonas de corte primária e secundária.

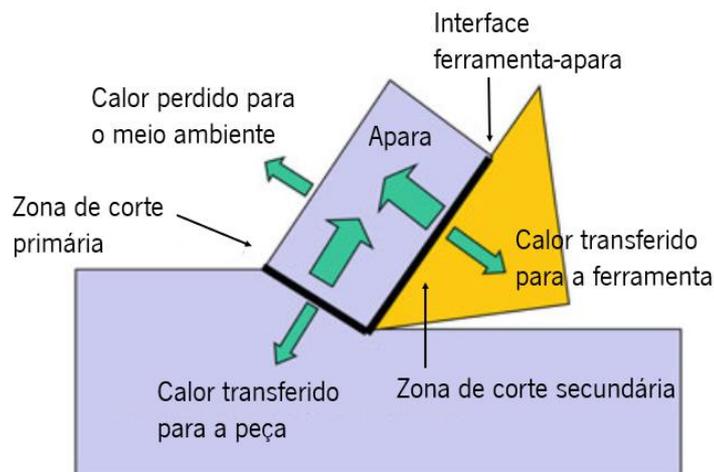


Figura 2.18 - Zonas de transferência de calor na remoção de apara (adaptado de [8])

A ação da temperatura na zona de corte primária pode resultar num mau acabamento superficial da peça. Por outro lado, a zona de corte secundária promove o desgaste das ferramentas de corte. Com o objetivo de minimizar o efeito do aumento da temperatura e da fricção criada entre a ferramenta e o material da peça de trabalho, os fluidos de corte devem ser implementados durante o processo de remoção de apara.

As principais funções dos sistemas de refrigeração/lubrificação são de [8]:

- Reduzir a temperatura gerada na ferramenta de corte;
- Diminuir as forças de corte e vibrações;
- Melhorar o acabamento superficial;
- Diminuir o desgaste gerado na ferramenta;
- Reduzir a temperatura da peça, evitando a expansão térmica;
- Facilitar a remoção de apara da zona de trabalho;

Os fluidos de corte devem, portanto, apresentar uma boa capacidade de absorção de calor e de lubrificação e ser o mais fácil possível de descartar, pelo que é importante que não sejam prejudiciais para o meio ambiente. Podem ser aplicados externamente, mas também internamente através de ferramentas com sistemas de fluidos de corte interno que promovem uma maior eficácia na refrigeração para além de auxiliar na saída das aparas [8].

Por outro lado, o uso de sistemas de refrigeração/lubrificação apresenta algumas preocupações no que diz respeito à saúde e segurança no trabalho. Nos últimos anos têm sido desenvolvidos trabalhos no sentido de melhorar a composição dos fluidos de corte para que não causem doenças da pele ou

problemas respiratórios, por exemplo. Além disso, a questão ambiental tem sido também discutida, dada a contaminação e poluição de alguns fluidos [8, 45].

#### 2.1.4 SÍNTESE

Concluindo o tópico da maquinabilidade abordado neste capítulo, pode-se dizer que o fabrico de um qualquer componente por tecnologias de maquinagem CNC envolve inúmeras interações que devem ser estudadas e compreendidas para cada caso. A maquinabilidade, tal como foi definida anteriormente, é um indicador da facilidade em fabricar um dado componente através do movimento de ferramentas de corte até alcançar uma geometria pretendida [8]. Assim, a maquinabilidade, apesar de ser dada como uma definição um pouco dúbia não é uma característica única do material a fabricar, mas sim de um conjunto de fatores que, pela estrutura deste subcapítulo, são divididos em três grandes grupos:

Em primeiro lugar, a maquinabilidade como propriedade da máquina ferramenta e da ferramenta de corte:

- O tipo de máquina selecionada irá dar maior ou menor rigidez e precisão que afetam a qualidade final dos componentes;
- Material da ferramenta de corte (carbonetos sinterizados, aços rápidos, cerâmicos, diamante policristalino, etc.);
- Geometria da ferramenta de corte. A geometria da ferramenta e da pastilha de corte tem uma grande influencia no resultado do corte de um material. Algumas das variáveis principais são o formato da pastilha, ângulo de ataque, ângulo de inclinação, raio de canto, número de dentes, etc...
- O tipo de ferramenta também é uma característica a ter em conta. Para diferentes operações devem ser escolhidas ferramentas adequadas de maneira a não comprometer a peça final nem a própria ferramenta;
- A fixação da ferramenta deve ser o mais robusta possível, de forma a evitar problemas como vibrações que resultam em acabamentos indesejáveis;
- O tipo de fixação da peça escolhido deve ser o mais adequado, de tal forma que permita o máximo de estabilidade e repetibilidade possível.

Em segundo lugar, está a maquinabilidade como característica do material a maquinar. De um modo geral, um material com características que o tornem difícil de trabalhar irá exigir maiores forças de corte e velocidades de corte mais baixas. Podem-se incluir nesta categoria:

- Propriedades físicas do material (tensão de cedência, condutividade térmica, módulo de elasticidade, expansão térmica, etc....);
- Composição química do material. Por exemplo, os aços com um baixo teor em carbono apresentam uma ductilidade elevada e baixa dureza, dificultando a maquinagem dos mesmos com a tendência à formação de aparas postiza de corte e bem como de longas aparas que podem complicar o processo de corte. A adição (até um certo ponto) de carbono na estrutura de um aço irá aumentar a sua dureza, e baixar a ductilidade, facilitando a maquinagem;
- Estrutura cristalina. A forma como a estrutura atômica de um material está organizada irá influenciar a aptidão da maquinagem. Um exemplo disso são os tratamentos térmicos a que se sujeitam os materiais que alteram a sua estrutura cristalina, podendo promover um aumento da dureza e consequentemente tornar o metal exigente de se maquinar. Para além disso, os tratamentos térmicos podem também alterar o tamanho dos grãos da estrutura do material.

Os parâmetros de corte e sistemas de refrigeração/lubrificação são também fatores que afetam a maquinabilidade:

- Os parâmetros de corte, nomeadamente, a velocidade de corte, velocidade de avanço e profundidade de corte, influenciam diversos fatores como o acabamento da peça, o tempo de ciclo de maquinação, bem como o tempo de vida da ferramenta. Um processo de maquinagem ideal permitiria conciliar valores de rugosidade baixos com tempos de vida da ferramenta elevados. É por isso importante que se tenha em conta não só o tipo de rugosidades exigidas pelo cliente, mas também as limitações da máquina no que diz respeito às velocidades de rotação.
- Outros parâmetros operacionais como a profundidade de corte devem também ser tidos em consideração neste sistema;
- Os sistemas de refrigeração/lubrificação são um bom instrumento para alongar o tempo de vida das ferramentas e melhorar o acabamento superficial das peças a maquinar. Deste modo, a seleção do tipo de refrigerante que melhor se adequa ao tipo de maquinação é indispensável para uma melhor eficácia na redução do calor gerado entre a ferramenta de corte e a peça bem como na redução do atrito através do efeito lubrificante.

É importante salientar a pertinência de avaliar de forma indireta a maquinabilidade, através de parâmetros como a medição do acabamento superficial, do desgaste das ferramentas, da taxa de remoção de aparas, do calor gerado e forças de corte envolvidas.

## 2.2 MANUFATURA ASSISTIDA POR COMPUTADOR

### 2.2.1 CONCEITOS TEÓRICOS DA MANUFATURA ASSISTIDA POR COMPUTADOR

Historicamente, os primeiros exemplos de máquinas-ferramentas automatizadas ligadas à indústria da maquinagem que se conhecem foram concebidas no século XIX. A tecnologia, inventada pelo francês Basile Bouchon para a indústria têxtil, consistia na gravação de dados em cartões na forma de furos, onde os mesmos eram utilizados para manipular e controlar uma série de operações. Estas máquinas foram mais tarde adaptadas a diferentes utilidades e revelaram-se fundamentais para o que viria a ser a computação moderna [46, 2].

Um século mais tarde, o nascimento do controlo numérico marcou o início de um novo período tecnológico. Nos anos 40, o inventor norte americano, John T. Parsons, foi o responsável por patentear o primeiro projeto ligado ao controlo numérico que mais tarde levou à criação das primeiras máquinas fresadoras por controlo numérico [2].

O momento de mudança do código numérico chegou no final dos anos 50, quando o Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT) desenvolveu as primeiras máquinas controladas eletronicamente, bem como o que viria a ser a linguagem universal do CNC (código G). Esta é a linguagem usada ainda atualmente para gerar as coordenadas das ferramentas, reduzindo assim o tempo necessário para dar instruções às máquinas [2].

Nas décadas seguintes, com o evoluir dos microcomputadores e à medida que os custos do *hardware* diminuía, a acessibilidade às máquinas CNC passou a ser maior. Esta transição para o tipo de máquinas CNC que conhecemos atualmente seguiu uma trajetória paralela ao desenvolvimento dos computadores pessoais e microcomputadores. Sem este progresso, as máquinas CNC compactas e poderosas que se encontram disponíveis hoje em dia não teriam sido possíveis de desenvolver [46, 47].

O passo seguinte da evolução das máquinas CNC aconteceu aquando do surgimento das tecnologias CAD/CAM. Em 1968, Pierre Bézier criou o primeiro sistema CAD/CAM para o fabrico de componentes automóveis para a marca francesa Renault. O primeiro programa 2D de CAD para uso de computadores pessoais foi introduzido em 1982 pela Autocad e anos seguintes, o primeiro programa compatível com desenhos 3D, oferecendo um maior controlo e rigor na produção de componentes [46, 47].

Os anos seguintes foram marcados pela criação de diversos *softwares*, permitindo uma redução significativa nos custos dos mesmos e dessa forma, um maior acesso a este tipo de tecnologias. Isto

permitiu que cada vez mais empresas fossem capazes de implementar programas de CAD/CAM nos seus processos de fabrico e assim, aumentar a sua eficiência e produtividade [48].

As máquinas de comando numérico computadorizado atuais são mais compactas e automatizadas, capazes de suportar cargas mais exigentes e de apresentar resultados mais previsíveis e exatos. Quando integradas com programas CAD/CAM permitem conceber peças de elevada complexidade.

### 2.2.2 PROCEDIMENTOS CAD/CAM

Manufatura Assistida por Computador é um termo vulgarmente usado para descrever o uso de tecnologias de comando numérico auxiliadas por *softwares* para dar instruções a máquinas/ferramentas. Há diversos tipos de *softwares* CAM associados a diferentes tecnologias de fabrico, sendo essencial eleger um programa compatível com o tipo de tecnologias e equipamento utilizado.

Além das máquinas e equipamento utilizados, há outro fator imprescindível para poder dar uso a esta tecnologia: um pós-processador capaz de converter os trajetos das ferramentas definidos no programa para uma linguagem que a máquina conheça [18].

São então três os principais intervenientes para a construção de um modelo CAM: um software CAM, um pós-processador compatível com a máquina/controlador e uma máquina que produza a peça desejada [18].

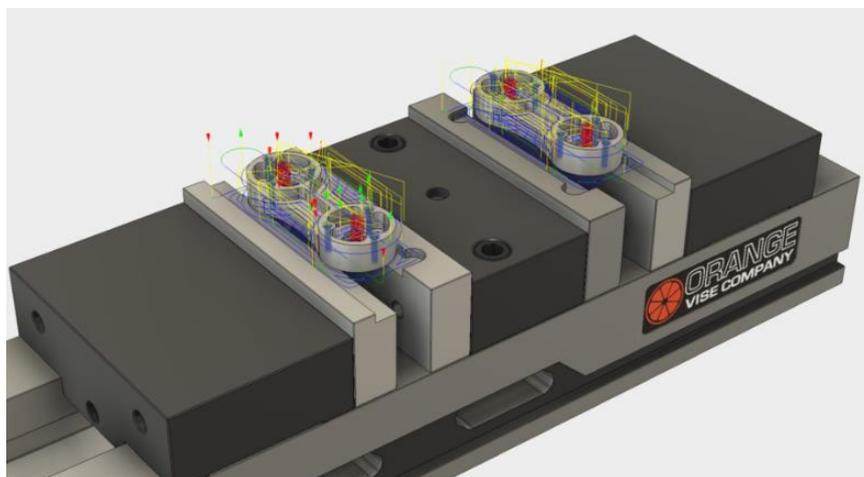


Figura 2.19 - Programa de manufatura assistida por computador [18].

O principal propósito da implementação do CAM num ambiente industrial é acelerar e otimizar as produções e os processos de fabrico. É por isso cada vez mais comum encontrar as ferramentas CAD e CAM reunidas no mesmo programa, onde a transição do desenho 3D para a programação das rotinas de trabalho é mais simples e acelerada.

De um modo geral, as ações que resultam na preparação de uma peça para a sua produção passam pelos seguintes passos [49]:

- Importação do modelo CAD para a interface do CAM. Em alguns casos, quando o CAD e o CAM não partilham o mesmo espaço de trabalho, há a necessidade de, em primeiro lugar exportar o modelo CAD e só depois importá-lo para o CAM;
- Criação de um *setup*, onde é definido o tipo de operações (torneamento/fresagem), o sistema de coordenadas da peça, o material inicial antes de iniciar a maquinagem (*stock* inicial);
- Definição das ferramentas adequadas ao processo, das rotinas e trajetos das ferramentas e dos respetivos parâmetros;
- Simulação virtual do processo, onde é verificada a existência de eventuais erros que possam comprometer a produção;
- Conversão da informação recolhida pelo software CAM para o código que a máquina consiga ler (código G). Esta etapa é intermediada pelo pós-processador conveniente ao tipo de máquina para fazer a transição para o código G.

Os softwares CAM atuais, são capazes de armazenar informações na sua base de dados, nomeadamente com a criação de bibliotecas de ferramentas personalizadas. Nestas, é possível detalhar geometricamente as ferramentas e pastilhas de corte, o tipo de suporte, os parâmetros de corte, etc. Além das ferramentas, é também possível criar bibliotecas com as máquinas, de maneira a simular com maior rigor e proximidade da realidade. Desta forma, o processo de definição das rotinas de corte torna-se mais intuitivo e simples de concretizar.

Tendo a programação finalizada, é possível em alguns casos compilar as informações mais relevantes numa ficha de fabrico, onde é resumida a sequência de operações e as respetivas ferramentas e parâmetros de corte, as informações relativas ao material e stock inicial, entre outras notas. Esta funcionalidade contribui ainda mais para uma maior eficácia da produção, nomeadamente no auxílio aos técnicos responsáveis pelo fabrico das peças.

### 2.2.3 DEFINIÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE CORTE

Como já foi referido, os *softwares* CAM impulsionaram as tecnologias de maquinagem para novas formas de trabalhar. A construção de estratégias de corte através das ferramentas CAM trouxeram inúmeras vantagens a nível económico e produtivo para a indústria em geral. Torna-se então importante

fazer uma análise do tipo de trajetórias de corte, de modo a melhorar não só o tempo e qualidade do processo de corte como também o tempo de vida das ferramentas.

Em primeiro lugar, relativamente ao processo de fresagem, a programação das rotinas de corte a partir do comando numérico manual origina trajetórias mais simples, como a que se observa na Figura 2.20, onde o controlo das forças de corte, de vibrações e da geração de calor são mais difíceis de controlar. Este tipo de abordagem leva muitas vezes ao uso de profundidades de corte ( $a_p$ ) mais baixas e a uma maior limitação dos parâmetros de corte como a velocidade de corte.

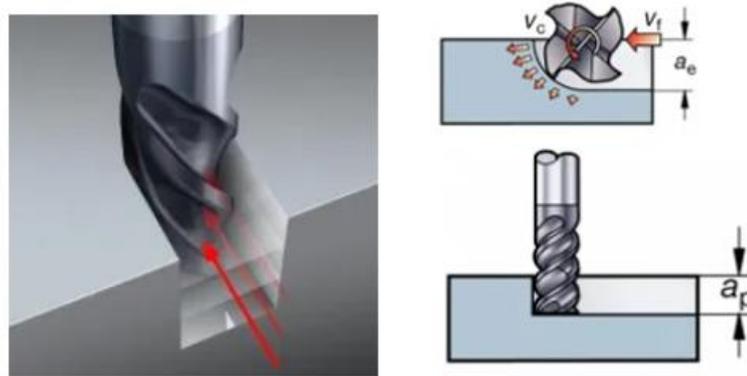


Figura 2.20 – Estratégia de corte de fresagem tradicional [50].

Por outro lado, o uso de certas estratégias de corte programáveis a partir de *softwares* CAM pode dar impulso a um processo de maquinagem muito mais otimizado. A Figura 2.21 é usada para representar o exemplo de uma trajetória de corte apenas possível de programar a partir de ferramentas CAM. Neste caso, a trajetória da ferramenta combina movimentos circulares com lineares, promovendo um corte contínuo de baixa espessura de apra ( $a_e$ ), onde as forças de corte são mais baixas e as vibrações minimizadas. Além disso, a profundidade ( $a_p$ ) pode ser distribuída por uma maior área da ferramenta, o que leva à redução da temperatura nas zonas de corte e consequentemente a um tempo de vida mais longo da ferramenta [50].

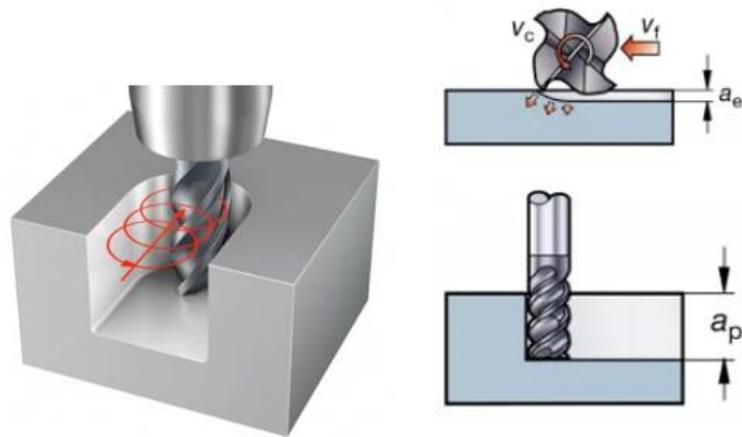


Figura 2.21 - Estratégia de corte de fresagem trocóiide. [50].

Por outro lado, para as operações de torneamento é também possível usar a programação CAM para definir estratégias que, por processos tradicionais seriam muito mais demorados. Como exemplo disso, a Figura 2.22 apresenta duas estratégias de torneamento diferentes. No primeiro caso (Figura 2.22 (a)), é representada a trajetória de uma ferramenta de *grooving*, onde é definida uma estratégia de retração por cada passagem em profundidade. Este tipo de abordagem é muito vantajosa para promover a remoção das aparas de corte, especialmente em materiais que gerem longas aparas. Além disso, a definição dos pontos de retração e das respectivas distâncias são facilmente configuradas no próprio programa CAM, ao invés da programação convencional que seria muito mais morosa [51]. Por outro lado, a Figura 2.22 (b) dá conta de uma operação de acabamento de um perfil composto por uma geometria curva que por métodos de programação manual demoraria muito mais tempo.

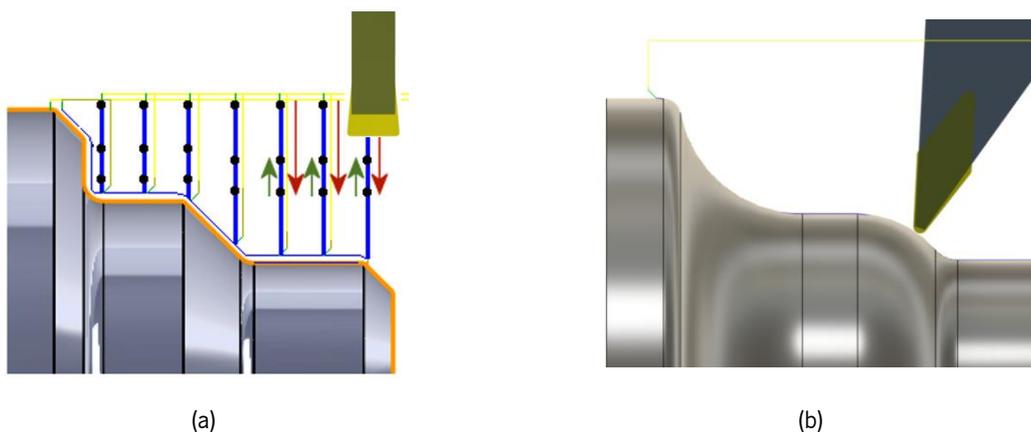


Figura 2.22 – Operações de torneamento por [51] (a) *grooving* e (b) acabamento externo

Em suma, através do uso de ferramentas CAM é possível obter resultados mais favoráveis ao nível das operações, bem como dos tempos de produção e previsão de erros. Onde, anteriormente à introdução das tecnologias CAM, seria necessário escrever manualmente dezenas de linhas de código e

calcular os movimentos para todas as operações de corte, atualmente esse processo, aliado ao conhecimento de engenharia, tornou-se não só mais simples como também mais rentável. A definição de estratégias de corte tornou-se muito mais versátil, com a possibilidade de definição de inúmeras opções consoante o tipo de ferramentas, materiais e equipamento. Exemplos de abordagens e rotinas de corte como as que foram apresentados, ajudam as empresas a melhorar as produções através da minimização do tempo de maquinagem, do desgaste das ferramentas e da qualidade dos produtos.

### **3. METODOLOGIAS E PROTOCOLOS DE TRABALHO**

Tal como foi referido no capítulo 1, pretende-se com este projeto que seja possível que a empresa adquira novos conhecimentos para a produção de peças. Atualmente a empresa realiza todas as produções através da programação manual do código G diretamente nas máquinas. Este processo pode tornar-se muito demorado, dependendo da complexidade das peças. Além disso, é mais difícil obter rotinas de corte otimizadas através da programação manual do que com o uso de *softwares* de engenharia. Outro ponto apontado como inconveniente foi o de não haver um catálogo com as ferramentas e suportes das mesmas mais adequados para cada material, operação, máquina, etc. Por outro lado, o facto de não existir um inventário com as informações necessárias das ferramentas mais apropriadas, levava ao surgimento de desgastes prematuros das mesmas, seja pelo uso de parâmetros não apropriados, seja pelo uso de ferramentas inadequadas para o tipo de operação.

Tendo claro os obstáculos presentes, pode-se organizar os requisitos do projeto da seguinte forma:

- Otimização das produções;
- Previsão de erros;
- Aumento da produtividade;
- Automação/redução da ação humana;
- Qualidade final das peças.

Desta forma, com o objetivo de alcançar as condições descritas, as metodologias de trabalho devem passar pela introdução de ferramentas CAM. Juntamente com estas estratégias, podem ser também incorporados métodos de apoio à produção através das fichas de fabrico e de bibliotecas de ferramentas. É nesse âmbito que se centra este capítulo, onde, em primeiro lugar é definido um protocolo de trabalho com a empresa através da criação de uma ficha de fabrico e da elaboração de uma biblioteca de ferramentas. Por fim, é exposta a abordagem na definição de estratégias de corte no Fusion 360.

#### **3.1 DEFINIÇÃO DE UM PROTOCOLO DE TRABALHO**

##### **3.1.1 FICHA DE FABRICO**

As fichas de fabrico representam uma ferramenta importante na organização e rentabilização de uma empresa, dando toda a informação necessária para um operador conseguir preparar uma máquina para o fabrico de uma peça. A introdução de uma ficha de fabrico nas rotinas de trabalho de uma

empresa é uma forma de minimizar os tempos de preparação, especialmente quando se trata de pequenas séries. Para empresas que se caracterizam pela produção de grandes séries, estes tempos e, conseqüentemente custos, não terão um peso tão grande. Ainda assim, uma ficha de fabrico pode ser eficaz na previsão e redução de erros [52].

Atualmente, a empresa não utiliza fichas de fabrico no seu dia a dia. Ou seja, a preparação do setup é inteiramente feita pelo operador das máquinas apenas com o suporte do desenho técnico da peça a produzir. Foi então proposta uma ficha de fabrico que fosse capaz de fornecer todas as informações para um operador poder fazer a preparação e fabrico de uma dada peça, o mais rápido possível. Estas informações podem ser observadas na Figura 3.1 do *template* criado:

<b>Responsável</b>				(IMAGEM 3D PEÇA)			
<b>Designação</b>		<b>Referência</b>					
<b>Produção/Hora</b>							
<b>Equipamento</b>							
<b>Spindle Principal</b>		<b>Sub Spindle</b>					
<b>Tempo Setup</b>		<b>Tempo Maquinação</b>					
<b>Matéria-Prima</b>		<b>Dimensões Stock</b>					
<b>Lado 1</b>							
<b>Operação</b>		<b>Ferramenta</b>			<b>Parâmetros</b>		<b>Obs.</b>
<b>Operação</b>	<b>Tool/ Offset N°</b>	<b>Suporte/Ferramenta</b>	<b>Pastilha</b>		<b>Vc (m/min)</b>	<b>Fn (mm/rot)</b>	
<b>Lado 2</b>							
<b>Operação</b>		<b>Ferramenta</b>		<b>Parâmetros</b>		<b>Obs.</b>	
<b>Operação</b>	<b>Tool/ Offset N°</b>	<b>Suporte/Ferramenta</b>	<b>Pastilha</b>	<b>Vc (m/min)</b>	<b>Fn (mm/rot)</b>		

Figura 3.1 - *Template* da ficha de fabrico proposta para a empresa

Em primeiro, devem ser descritas as informações relativas ao responsável pela produção, as designações da peça e o número previsto de peças produzidas por hora. Em segundo lugar, é indicado o equipamento no qual é realizada a produção, os tipos de fixações usadas, o tempo previsto para a preparação das máquinas e para a maquinação, o material da peça, bem como as dimensões do stock inicial. Quanto à sequência de operações, são dadas informações para cada tipo de operação: o número da ferramenta, o suporte/ferramenta e a pastilha (quando aplicado) e os parâmetros de corte (velocidade de corte, em m/min e o avanço por rotação em mm/rot).

As informações contidas na ficha de fabrico estão conforme a programação no *software* CAM, sendo o tempo de maquinação e a produção/hora uma estimativa segundo os parâmetros elegidos no

Fusion 360. A implementação da ficha de fabrico permite ao operador minimizar os tempos de preparação, na medida em que todas as ferramentas necessárias para a produção de uma dada peça se encontram devidamente listadas e identificadas. Além disso, não há necessidade de escrever o código G manualmente na máquina, já que o mesmo pode vir totalmente pronto a executar da programação no *software*.

### 3.1.2 BIBLIOTECA DE FERRAMENTAS

Ao longo da ambientação ao software CAM, foi evidente a pertinência de ter acesso às informações das ferramentas disponíveis na empresa dentro do programa. Aquando da escolha das ferramentas para a programação de uma peça, era necessário introduzir os diferentes parâmetros de corte e geométricos para cada tipo de ferramenta escolhida. Este processo tornava-se muito moroso, pois havia sempre a necessidade de primeiramente fazer uma consulta das ferramentas disponíveis na empresa e em segundo lugar de consultar os catálogos para definir corretamente todas as variáveis (geometria da pastilha, raio de corte, diâmetro da ferramenta, número de dentes de corte, geometria do suporte da ferramenta, velocidade de corte, avanço por rotação, etc.)

Deste modo, foi proposta a criação de uma biblioteca de ferramentas dentro da base de dados do Fusion 360. Atualmente a empresa trabalha quase na totalidade com apenas dois materiais: aço e latão., pelo que se limitou a escolher unicamente estes dois materiais para compor a biblioteca. Nos poucos casos que se pretenda escolher uma ferramenta para produzir uma peça de alumínio, por exemplo, pode-se selecionar uma ferramenta da gama de latão, já que os dois materiais se enquadram na mesma categoria (Materiais não ferrosos- N, segundo a norma ISO 513:2012).

A ideia inicial era dividir as ferramentas por material a maquinar e depois subdividir pelo tipo de operação/ferramenta, dentro de cada material. No entanto, o programa não permite criar pastas dentro de outras pastas. Assim, optou-se por organizar a biblioteca da seguinte forma, como se pode observar pela Figura 3.2:

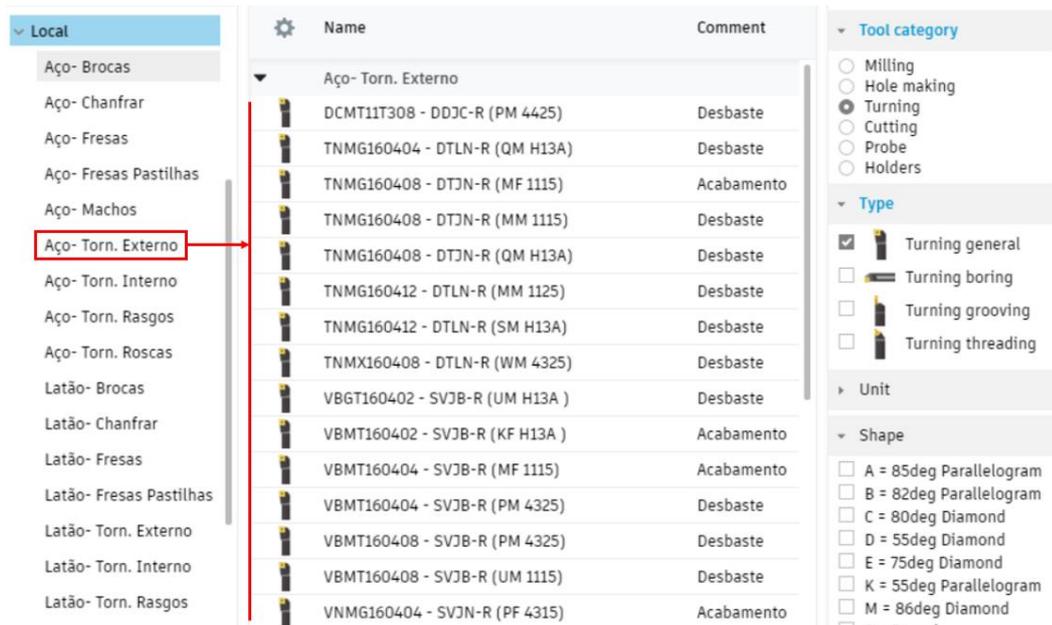


Figura 3.2 - Organização da biblioteca de ferramentas

Dentro de cada pasta pode ser encontrada a lista de ferramentas, identificadas pelo código ISO. De forma a facilitar a procura da ferramenta que se pretende escolher, podem ser usados os filtros (lado direito da Figura 3.3). Por exemplo, caso se pretenda uma pastilha de torneamento exterior, com uma geometria triangular- T, pode-se aplicar esse mesmo filtro de maneira a suprimir todas as opções que não tenham essa geometria. Além disso, para cada pastilha de torneamento interno e externo adicionou-se um comentário relativo ao tipo de operação (acabamento ou desbaste) para simplificar a sua escolha. A imagem seguinte ilustra este mesmo exemplo, onde todas as ferramentas visíveis na lista apresentam um formato triangular:

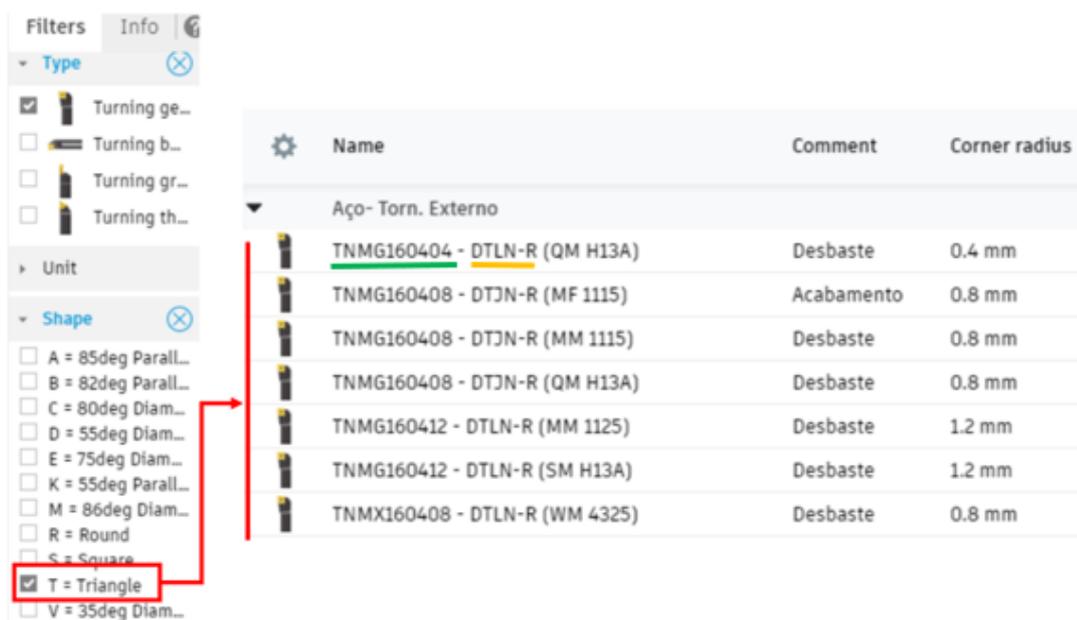


Figura 3.3 - Aplicação dos filtros na escolha de uma ferramenta de torneamento externo.

O nome das pastilhas tem como base a norma ISO 13399, que define que todas as ferramentas de corte são parametrizadas por um formato independente para melhorar a comunicação entre a indústria [53]. Este código é gerado automaticamente quando são definidos os parâmetros do inserto da ferramenta (sublinhado a verde na Figura 3.3) e do suporte do inserto (sublinhado a laranja). Cada uma das letras e números indica um parâmetro da pastilha/suporte. É por isso importante entender a nomenclatura presente em cada caso, de maneira a visualizar com maior clareza a biblioteca de ferramentas. Usando como exemplo a figura anterior, pode-se observar que quando se aplicou o filtro do formato triangular apenas as pastilhas com o código iniciado por “T” (*Triangle*) ficaram disponíveis, dado que a primeira letra do código representa o formato da pastilha. Em certos casos como as pastilhas de fazer rasgos/sangramentos ou roscas, o software não reconhece a nomenclatura. Nestas situações fez-se toda a identificação do nome da ferramenta, escrevendo manualmente o código fornecido pelo vendedor.

Relativamente às informações da cada ferramenta, no caso de serem ferramentas de torneamento com pastilhas de corte, estas estão divididas em seis separadores (Figura 3.4): o primeiro para as informações gerais da pastilha/ferramenta, depois segue-se o separador dos parâmetros da pastilha, do suporte da ferramenta, do setup, dos parâmetros de corte e finalmente do pós-processador.

Aço- Torn. Externo / TNMX160408 - DTLN-R (WM 4325)	
General   Insert   Holder   Setup   Cutting data   Post processor	
Description	WM 4325
Vendor	Sandvik
Product id	6696652
Product link	

Figura 3.4 - Separador das informações gerais da ferramenta.

O primeiro separador, visível na figura anterior, agrega a descrição da ferramenta, o vendedor, o código usado pelo fornecedor e finalmente um espaço para o link do artigo. Para as ferramentas de torneamento externo e interno, optou-se por usar o espaço da descrição para inserir informações complementares ao tipo de pastilha (identificada pelo código WM 4325 na figura anterior). Este código indica o tipo de quebra apara da pastilha (primeiras duas letras- WM) e a classe das mesmas (4325), auxiliando também na escolha da gama de materiais possíveis de maquinar. Deste modo, tendo este código e o da nomenclatura ISO 13399 visível na listagem das ferramentas, torna-se mais simples fazer a seleção da ferramenta requerida, podendo ainda fazer uso dos filtros disponíveis pelo software.

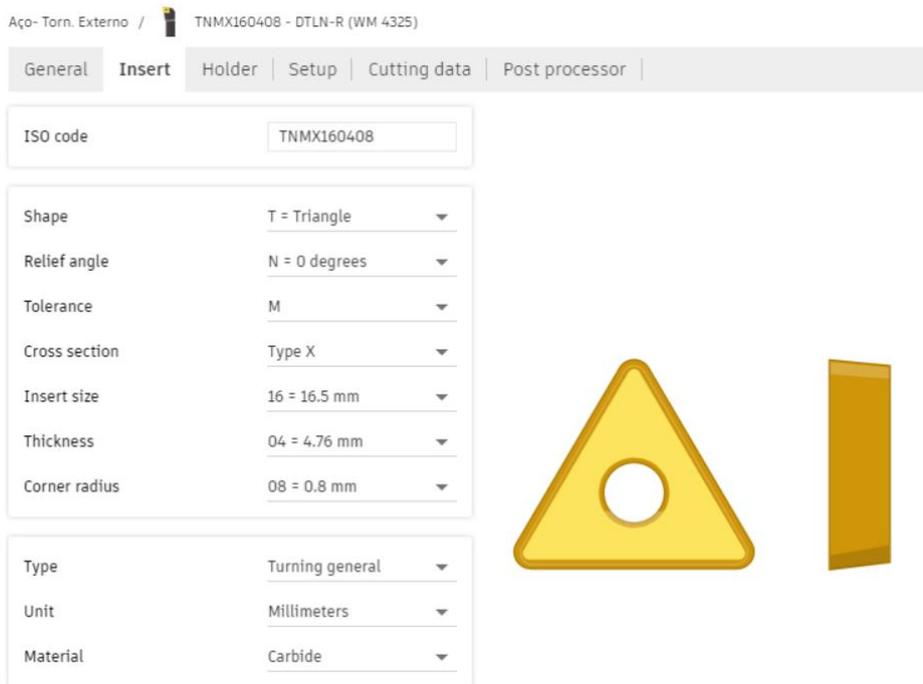


Figura 3.5 - Separador das informações da pastilha de corte.

O segundo separador contempla a geometria da pastilha de corte. Tal como referido anteriormente, no caso das pastilhas de torneamento externo/interno, basta inserir o código ISO, segundo a norma ISO 1832:2017, para que as informações seguintes fiquem devidamente compostas sem ser necessário inseri-las individualmente. No final da página deste separador é indicado o tipo de geometria, as unidades de medida e o material da pastilha.

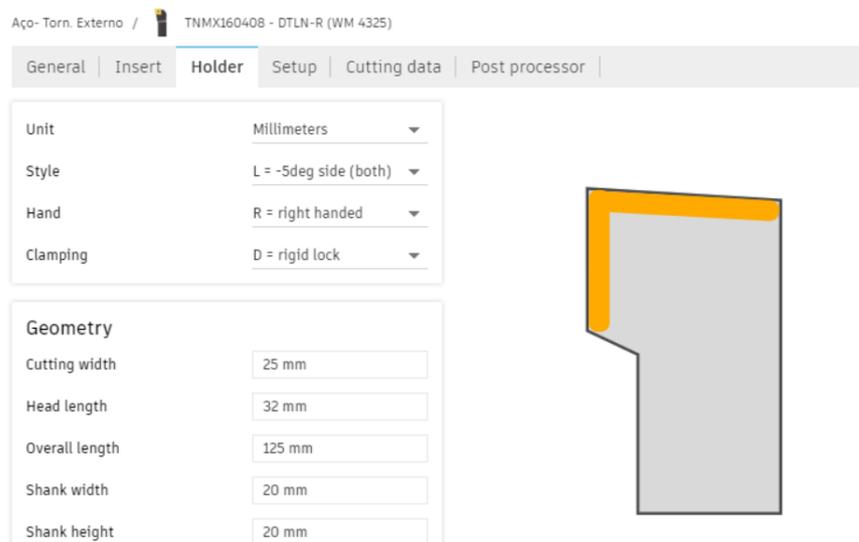


Figura 3.6 - Separador das informações do suporte da ferramenta.

O separador seguinte, relativo ao suporte da ferramenta (Figura 3.6), à semelhança da pastilha de corte, também é designada segundo a norma ISO 13339 . No entanto é necessário assinalar

singularmente as informações relativas ao tipo de aperto, estilo do suporte, à mão (direita, esquerda ou neutra). De seguida, é importante inserir corretamente as medidas geométricas do suporte para que, aquando da simulação, o software consiga detetar eventuais colisões da forma mais realista possível.

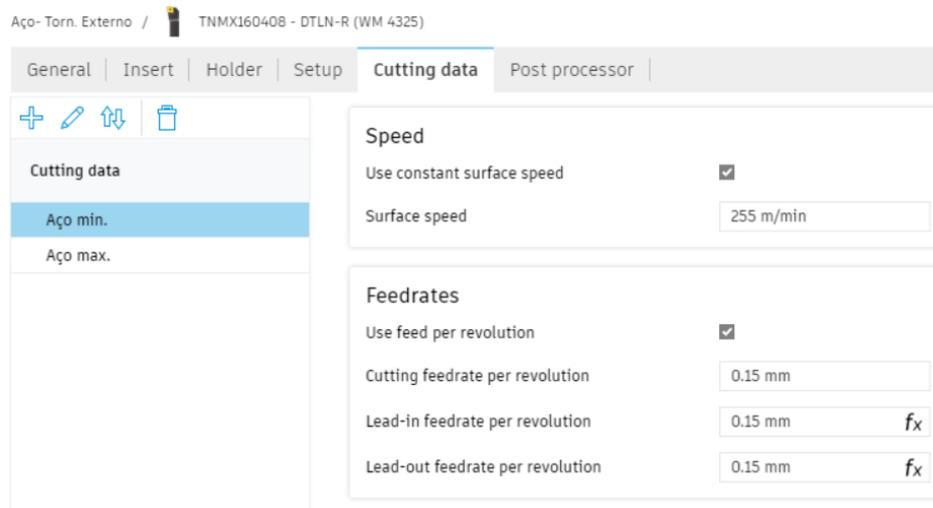


Figura 3.7 - Separador dos parâmetros de corte.

O quinto separador das ferramentas é destinado aos parâmetros de corte, nomeadamente para a velocidade de corte, em m/min e para o avanço por rotação, em mm. Pode-se optar por escolher uma velocidade de corte constante ou não. Caso se selecione esta preferência, é associado um limite à velocidade de corte, de forma a não ultrapassar valores de rotações por minuto do spindle da máquina. Esta definição está disponível quando se faz a escolha da estratégia de corte.

Relativamente aos valores predefinidos da velocidade de corte e avanço por rotação, optou-se por eleger dois valores: um máximo e um mínimo para cada material possível de maquinar, baseados nas informações fornecidas pelo vendedor. Assim, quando for necessário escolher um valor para estes parâmetros, tem-se como referência a informação dos fornecedores. No exemplo da figura anterior estão demonstrados os valores máximos para o aço.

A página do setup tem como propósito indicar a orientação da ferramenta na torreta, o tipo de compensação e a direção de rotação do *spindle*. Finalmente, no separador do pós-processador define-se o número da ferramenta usado para depois ser selecionado na máquina.

De uma maneira geral a organização das ferramentas de corte, quer de torneamento, quer de fresagem ou furação, foi feita de forma a tentar minimizar ao máximo o tempo gasto na procura e seleção das ferramentas que melhor se indicam para cada trabalho. No caso de fresagem, por exemplo, podem ser usados os filtros para selecionar as ferramentas com os parâmetros desejados (diâmetro, material, número lâminas, comprimento, etc).

### 3.2 ABORDAGEM CAM

O Fusion 360 é uma plataforma de engenharia e design capaz de incorporar capacidades de CAD, CAM e CAE (Engenharia Auxiliada por Computador). Como ferramenta de manufatura, este *software* permite integrar o CAD e CAM no mesmo espaço, simplificando a transição entre ambos.

Tal como foi referido no último capítulo, os programas CAM normalmente incorporam um conjunto de funcionalidades comuns entre eles. No entanto, cada um apresenta o seu próprio esquema e interface e poderá apresentar mais ou menos funcionalidades. Este subcapítulo destina-se a abordar os procedimentos de trabalho inerentes ao Fusion 360 durante a programação de diferentes tipos de peças.

As etapas de trabalho vão desde a criação de ficheiros CAD, no próprio programa, à elaboração de *setups*, escolha do tipo de rotinas de corte e respetivos parâmetros, seguida de uma simulação virtual do processo completo, acabando com a criação do código G, através do pós-processador adequado à máquina e ao controlador da mesma.

O esquema seguinte, da Figura 3.8 resume as principais ordens de trabalho abordadas ao longo deste subcapítulo durante a construção de um modelo virtual no Fusion 360, para a maquinagem de uma peça.

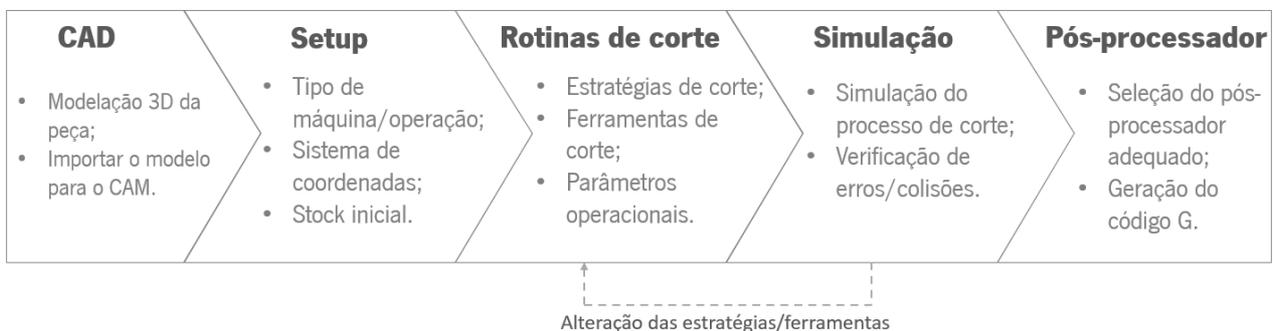


Figura 3.8 - Sequência de trabalho no processo de manufatura através do *software* Fusion 360

O primeiro passo no processo de conceção de uma peça por maquinagem passa pela criação de um ficheiro CAD. O Fusion 360 permite a criação de modelos 3D com diferentes tipos de complexidade dentro do espaço de trabalho “Design”.

Antes de iniciar a fase de programação das rotinas de corte, é importante refletir sobre a forma mais lógica de fabricar uma peça. Alguns critérios como o tipo e quantidade de fixações e a sequência de operações devem ser tidos em conta para facilitar a construção de uma ordem de trabalhos. Para tal, é imprescindível ter em consideração o tipo de máquina que se vai usar para fabricar uma peça.

Estando já no espaço de trabalho da manufatura e tendo um esboço pensado para a sequência de operações, o primeiro procedimento a fazer é a criação de um *setup* (Figura 3.9), onde é definido o tamanho do *stock*, o sistema de coordenadas, o tipo de operação, etc.

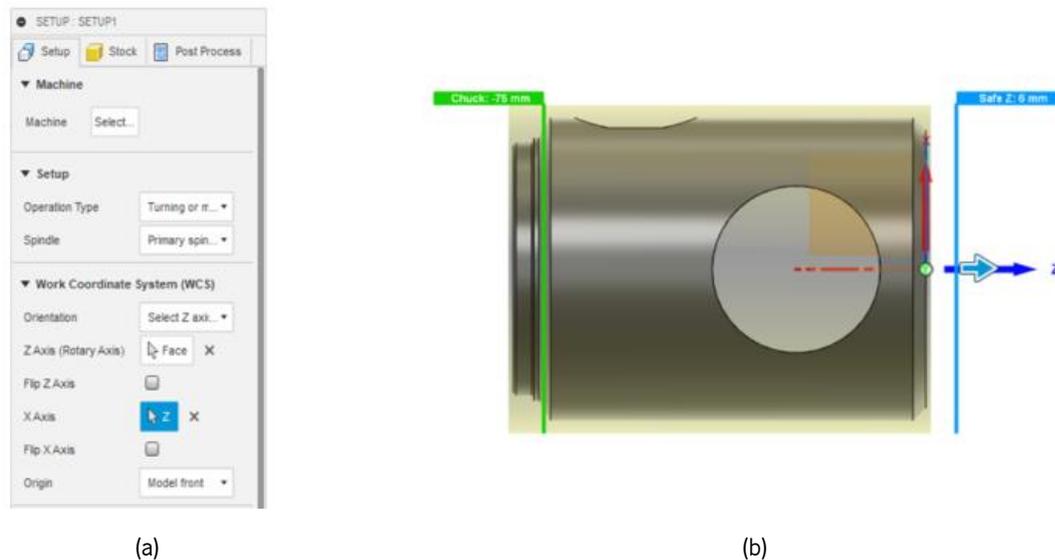


Figura 3.9 - (a) Pasta do *setup* e (b) limites de retração da ferramenta (linha azul) e do sistema de fixação (linha verde)

A pasta do *Setup*, representada na figura anterior, está então dividida em três separadores: *Setup*, *Stock* e Pós-processador. Em primeiro lugar, pode-se definir o tipo de máquina, sendo que o Fusion 360 inclui já algumas na sua biblioteca. Caso a biblioteca não contenha nenhuma máquina adequada ao processo, pode-se definir a própria através das configurações fornecidas pelo programa, com a possibilidade de associar um pós-processador. De seguida, define-se o tipo de operação e a orientação do sistema de coordenadas, onde se seleciona a direção dos eixos x e z, respeitando os eixos de coordenadas presentes na máquina. Para processos de torneamento, a origem normalmente está definida no centro da face do *stock* da peça. Este tipo de definição simplifica o trabalho do operador da máquina durante a definição do sistema de coordenadas, já que permite que se faça a medição direta da origem, sem necessitar de fazer ajustes às coordenadas medidas. É também delimitada a distância de retração entre a ferramenta e a face da peça, para garantir um posicionamento de segurança nos recuos e avanços da ferramenta (representado na Figura 3.9 (b) pela linha azul), bem como a posição de referência do sistema de fixação (linha verde da Figura 3.9 (b)). Finalmente, é caracterizada a dimensão inicial da peça a maquinar (*stock*).

Concluindo a fase do *setup* da peça, segue-se a escolha das operações de corte onde são escolhidas as ferramentas, os parâmetros de corte, número de passagens, etc...

O menu do torneamento apresenta diversas opções para a seleção da operação mais adequada. Algumas destas escolhas englobam operações de facejamento, desbaste, acabamento, rasgo, roscagem

e sangramento que podem ser selecionadas à medida que se vai construindo o sistema de rotinas de corte.

A definição de operações é dividida em cinco fases: ferramenta, geometria, raios, passagens e ligações.

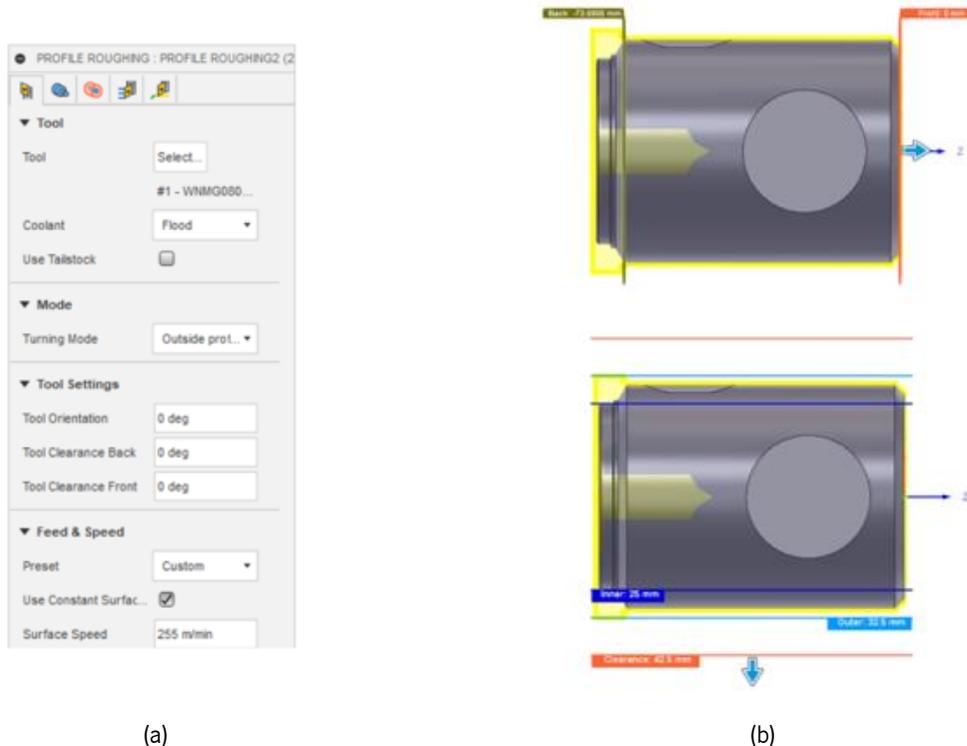


Figura 3.10 – (a) Separador da ferramenta da definição das estratégias de corte, limitação geométrica ferramenta ao longo do eixo Z e X (b) e (c), respetivamente.

O primeiro separador (Figura 3.10 (a)), da ferramenta, tem como função fazer a escolha da ferramenta adequada à operação. Além disso, é possível selecionar o tipo de operação de torneamento (exterior ou interior), a orientação apropriada da ferramenta e os parâmetros de corte (velocidade de corte e avanço por rotação). É também possível fazer a delimitação dos trajetos da ferramenta ao longo dos eixos Z e X, como representado na Figura 3.10 (b). Os últimos dois passos servem para especificar as estratégias escolhidas para a operação, com por exemplo a definição do sentido de corte, da profundidade máxima das passagens, da presença ou não de uma espessura de material para posteriormente fazer o acabamento.

No Fusion 360, quando se pretende construir um modelo para a maquinagem por fresagem, o setup da peça pode ser realizado à semelhança do que foi apresentado para o torneamento, com a diferença na seleção do tipo de operação, naturalmente, e na definição do stock inicial. Neste tipo de operações é comum surgirem peças já pré-fabricadas, ora vindas de outros processos de fabrico como a fundição, ora vindas de operações de maquinagem como torneamento.

As operações de fresagem disponíveis podem ser divididas em três categorias: “2D”, “3D” e “Multi-axis”. A primeira contém essencialmente estratégias de corte onde a ferramenta apenas se movimenta em dois eixos durante a remoção de material, geralmente utilizada em peças com formas geométricas planas. As operações “3D”, são mais usadas para maquinar modelos com superfícies mais complexas, como por exemplo superfícies curvas. Todos os 3 eixos lineares podem mover-se enquanto o material é removido. Quando as máquinas têm capacidade para integrar eixos rotativos, pode ser introduzida a terceira categoria, “Multi-axis”.

Para uma dada geometria é possível optar mais do que uma estratégia de corte. A Figura 3.11 exibe 4 tipos de operações diferentes, tanto “2D” como “3D”, para maquinar a mesma geometria.

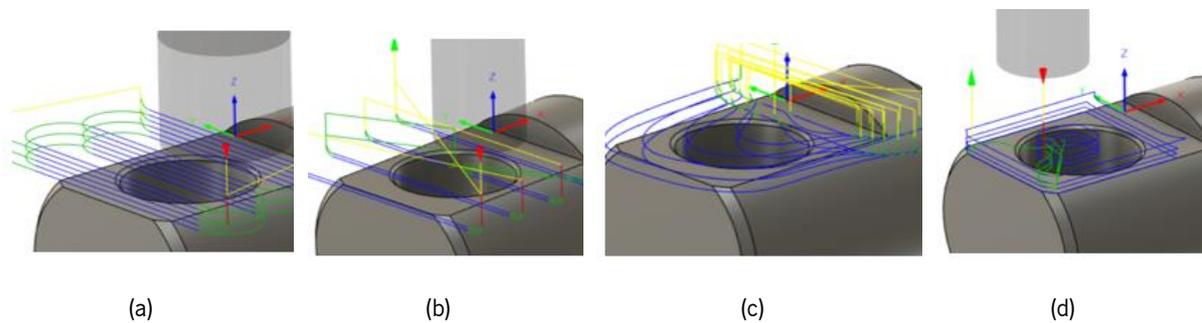


Figura 3.11- Diferentes estratégias de desbaste: (a) facejamento, (b) “2D pocket”, (c) “3D adaptive”, (d) “3D pocket”.

As duas primeiras operações representam estratégias de corte a duas dimensões, a primeira facejamento e a segunda “2D pocket”. As duas seguintes são rotinas de corte 3D, “Adaptive” e “Pocket”, respetivamente. Fazendo uma comparação das estratégias disponíveis no Fusion 360, é possível eleger a que melhor se adequa para um dado contexto, tendo em vista o tipo de ferramenta, o desgaste que cada uma impõe às mesmas, o tempo de maquinação, o acabamento superficial, etc...

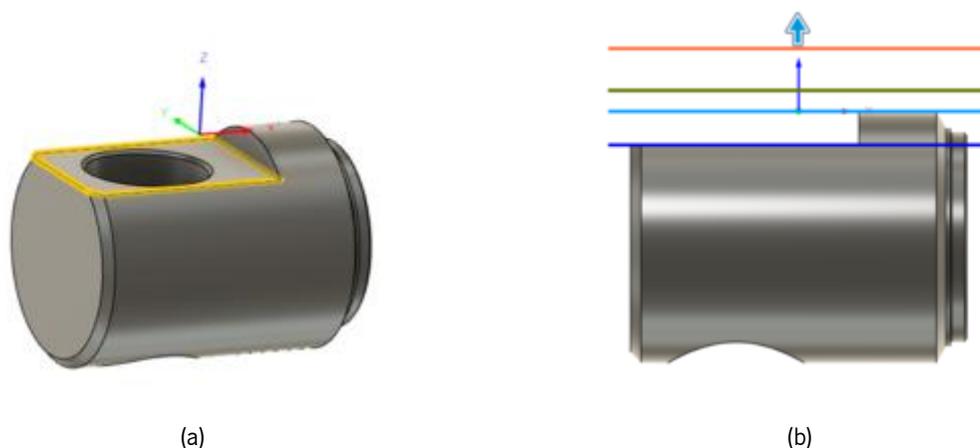


Figura 3.12 - Limites geométricos (a) da superfície maquinada e (b) das alturas da ferramenta.

Comparativamente com o menu das operações de torneamento, os separadores para a fresagem estão distribuídos de forma semelhante, com a exceção do separador dos raios que neste caso é definido

como “alturas”. A Figura 3.12 exemplifica um modelo para os separadores “geometria” e “alturas”, onde se define a secção de trabalho na peça e as limitações da ferramenta ao longo do eixo Z, respetivamente.

Após a finalização da etapa de escolha das rotinas de corte, segue-se a simulação virtual da maquinação (Figura 3.13).

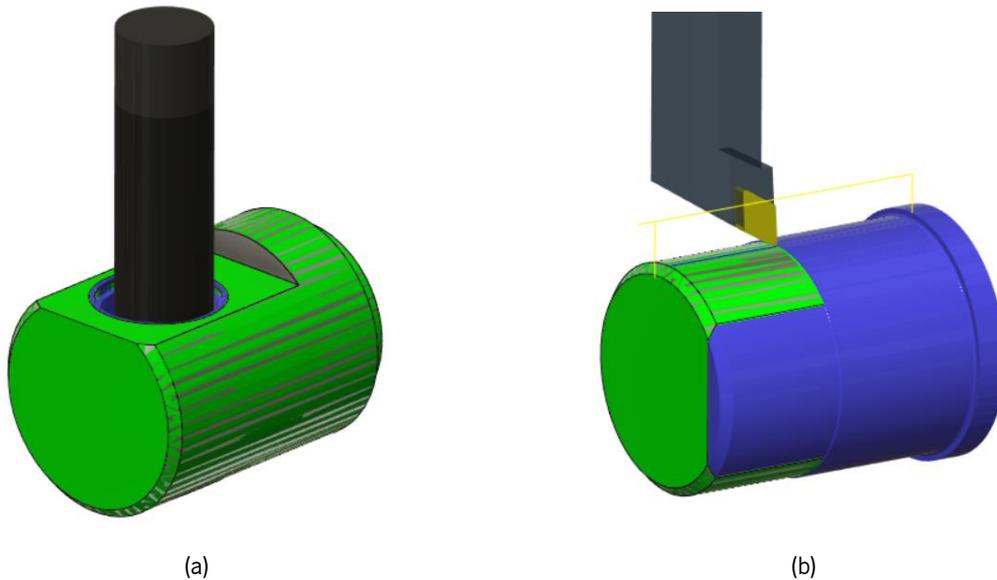


Figura 3.13 - Simulação virtual do processo de (a) fresagem e (b) torneamento.

O software permite selecionar um conjunto de máquinas já existentes na base de dados, ou mesmo fazer a construção do próprio modelo. Ainda que o programa não tenha a possibilidade de detetar colisões entre as ferramentas e a máquina, a visualização da mesma é sempre vantajosa para uma maior aproximação à realidade. No entanto, é permitido fazer a integração de qualquer modelo de fixação, identificando-o na fase do setup. Assim que carregado e devidamente posicionado, é possível obter a informação relativa a possíveis contactos entre a ferramenta e a fixação. Para além disso, a simulação deteta também possíveis contactos indesejáveis entre a própria peça e a ferramenta. É também nesta fase que é possível verificar o tempo total de maquinação.

O último passo para concluir o trabalho no Fusion 360 consiste na geração do código G através do pós-processador (Figura 3.14).

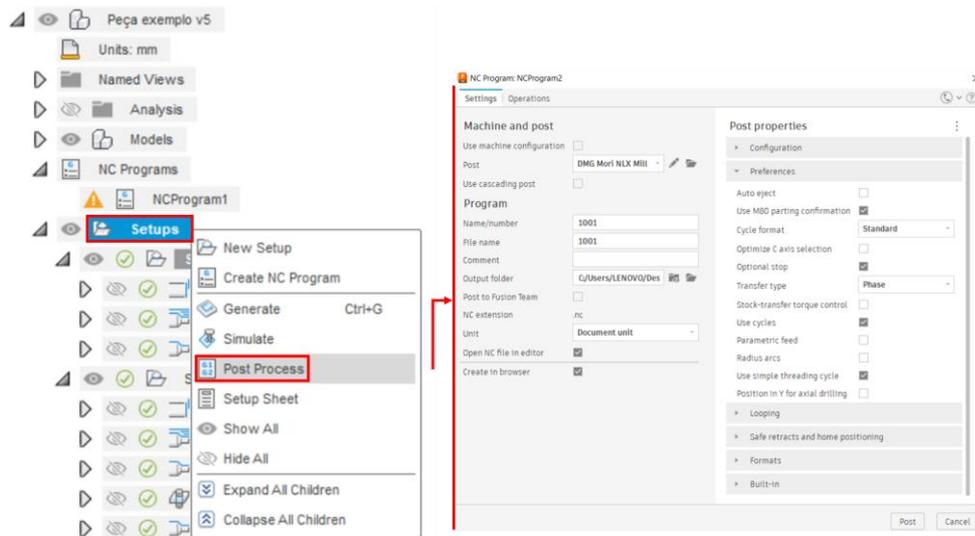


Figura 3.14 - Seleção e configuração do pós-processador

Para tal, basta seleccionar os *setups* desejados e usar o atalho para a criação do programa de comando numérico, como demonstra na figura anterior. De seguida, selecciona-se um pós-processador da biblioteca do Fusion 360, ou caso não esteja disponível nenhum compatível com a máquina, importa-se um pós-processador adequado. Gerando o código, o programa está pronto a ser carregado na máquina para iniciar a produção da peça.

## 4. DESENVOLVIMENTO DE ESTRATÉGIAS DE CORTE PARA AS PEÇAS 1 E 2

Este capítulo visa abordar a fase de implementação de estratégias de corte através das ferramentas CAM, proposta para o desenvolvimento das novas metodologias da empresa. Assim, pode-se dividir este capítulo em duas partes. Em primeiro lugar, no sub-capítulo 4.1 é apresentado um projeto relativo ao fabrico de uma peça de aço fabricada num centro de torneamento. No segundo projeto, do sub-capítulo 4.2, é exposta a estratégia definida para o fabrico a peça de latão.

Em primeiro lugar, é feita uma descrição das peças em estudo, bem como das máquinas e equipamentos selecionados. Após a análise de cada desenho técnico e das respetivas tolerâncias e do desenvolvimento do modelo tridimensional das peças no Fusion 360, são estudadas as estratégias que melhor se adequam a cada um dos projetos. Assim que terminadas as etapas de programação, conforme os procedimentos explicados no capítulo 3.2, é feita uma análise do pós-processador de cada uma das máquinas e as alterações necessárias para que o código gerado pelo programa esteja pronto para ser carregado na máquina. Por fim, para cada peça é exposta a ficha de fabrico com todas as informações necessárias para servir de suporte ao responsável da produção.

### 4.1 COMPONENTE CILÍNDRICO DE AÇO

#### 4.1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAS

O primeiro projeto trata-se de uma peça de aço (CK45) de revolução. As figuras seguintes mostram o modelo 3D da peça (Figura 4.1) e uma vista do desenho técnico (Figura 4.2)



Figura 4.1 - Modelo 3D da peça 1.

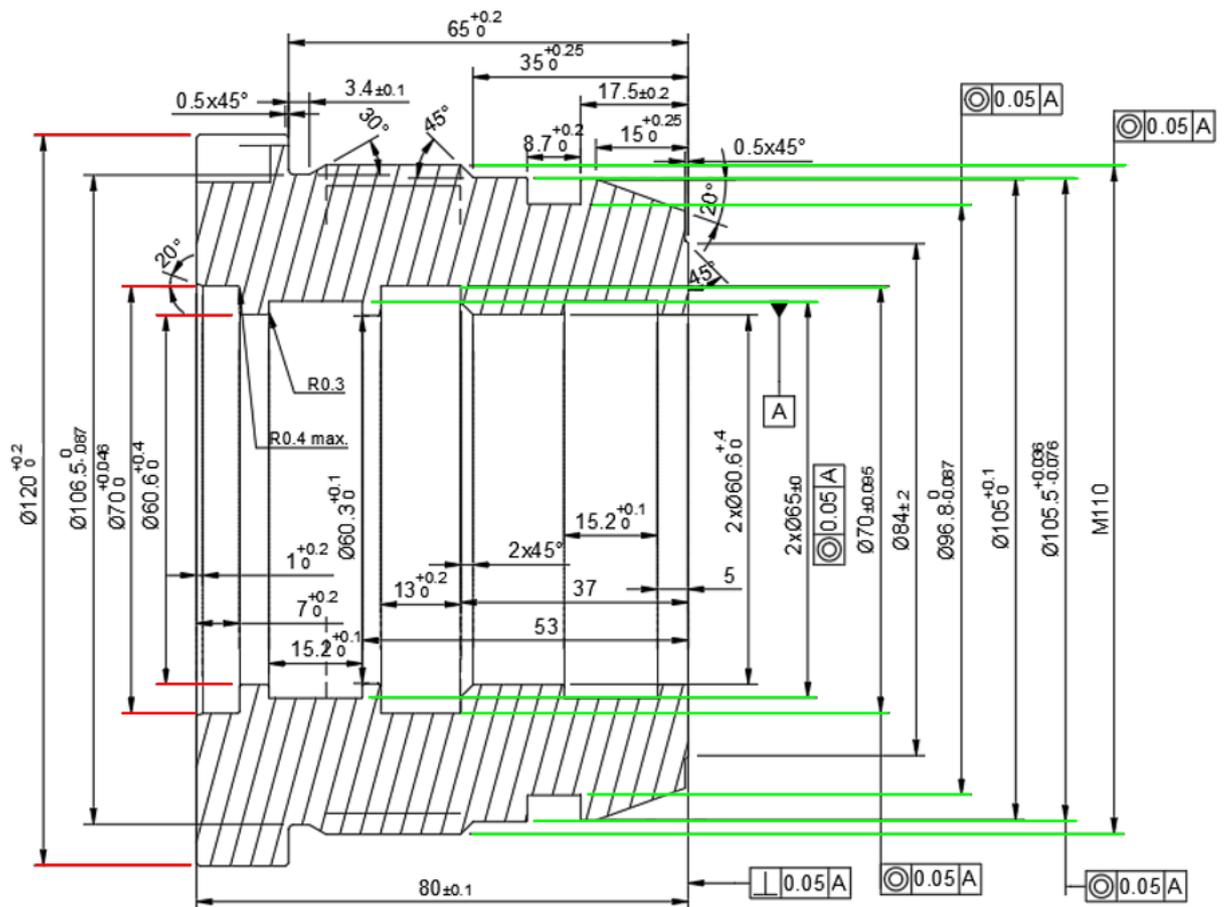


Figura 4.2 - Vista do desenho técnico da peça 1.

Uma das exigências pedidas pelo cliente é de garantir a concentricidade das zonas indicadas no desenho técnico. Como tal, foi especificamente solicitado que o fabrico se fizesse através de duas fixações diferentes, onde uma compreende todos os diâmetros que exigem o toleranciamento da concentricidade.

Além disso, são exigidas outras condições que devem ser tidas em conta antes de iniciar a escolha das estratégias de corte. É também exigida a não existência de rebarba nas arestas, pelo que será necessário ter o cuidado de as “quebrar”. Quando não é especificado, o raio das arestas deve ser de 0.2 milímetros. O raio dos cantos deve ter no máximo 0.4 milímetros. A rugosidade geral solicitada, em Ra (Rugosidade média), é de 3.2 micrómetros ( $\mu\text{m}$ ), a não ser que seja especificado outro valor para alguma superfície em específico. O toleranciamento angular é de  $\pm 2^\circ$ .

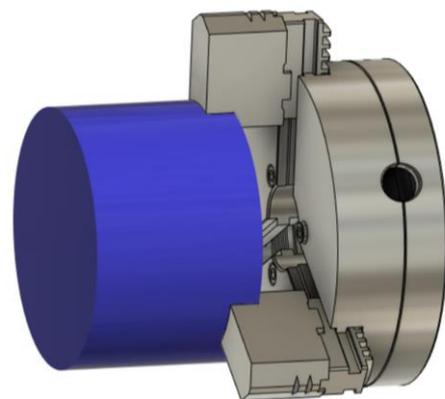
Recolhidas as informações iniciais necessárias, é agora possível escolher a máquina adequada ao fabrico da peça. Poder-se-ia realizar o fabrico desta peça recorrendo a um torno para maquinagem toda a superfície de revolução e de seguida um centro de maquinagem para fresar os rasgos laterais. Em alternativa, esta peça pode ser totalmente maquinada numa máquina torno-fresa pela da combinação de estratégias de torneamento e fresagem com as ferramentas rotativas. Optou-se pela última opção,

pois é a que apresenta maior produtividade e minimiza os erros dimensionais, já que não há necessidade de fazer uma mudança de máquina ferramenta. Pela inspeção do desenho do modelo, rapidamente se percebe que, inevitavelmente a maquinação da peça em duas fixações diferentes é a melhor forma de a produzir. Dentro do conjunto de opções disponível na empresa, a máquina que se enquadrava melhor neste projeto era a DMG MORI SEIKI - NLX 2500/700. A Figura 4.3 (a) representa o modelo da máquina pensado para o fabrico da peça. Este torno-fresa apresenta dois *spindles* e uma torreta com capacidade para doze estações de ferramentas.

Quanto ao tipo de fixação, foi escolhida uma bucha com três grampos maquinados semelhante ao representado no modelo Figura 4.3 (b). Em ambos os *spindles* são escolhidos grampos que garantam o contacto, tanto na face lateral como na base da peça, de forma a garantir uma maior estabilidade da maquinação.



(a)



(b)

Figura 4.3 – (a) Torno-fresa CNC DMG MORI SEIKI - NLX 2500/700 e (b) sistema de fixação da peça 1.

#### 4.1.2 ESTRATÉGIA DE CORTE

A primeira peça em estudo, tal como referido, é um componente cilíndrico de aço (CK45). Para as dimensões do bruto do material, procura-se sempre usar as mais próximas possíveis das medidas do componente para haver o mínimo desperdício. Neste caso, o diâmetro mínimo possível de adquirir deste material é de 125 mm. Para o comprimento podem ser cortados cilindros de 82 mm, tendo apenas de se retirar 1 mm em cada face da peça. O torneamento da peça foi definido para ser feito em duas fixações diferentes, para as geometrias anteriormente referidas, ambas através de grampos maquinados.

Estando definidas as bases para o início do fabrico, é possível avançar para a fase da seleção das estratégias de maquinação. Em primeiro lugar, na definição do *setup*, pode-se dizer que esta produção

está dividida em dois *setups* diferentes, consoante as fixações. Isto, porque quando se alterna de um *spindle* para outro, o sistema de coordenadas de trabalho (WCS) também muda. O sistema de coordenadas de trabalho diz respeito ao ponto zero-peça que define o posicionamento da peça e é definido para qualquer operação de maquinagem CNC. No caso do torneamento, este ponto é tipicamente definido no centro da face do *stock* ou do componente. Na programação dos *setups* da presente peça, optou-se por usar o centro da face do *stock* como zero-peça, conforme a Figura 4.4:

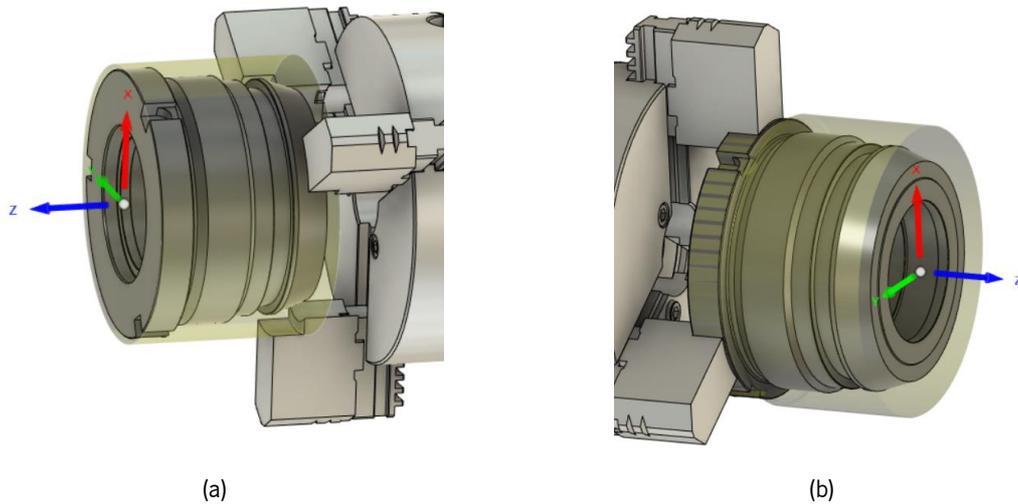
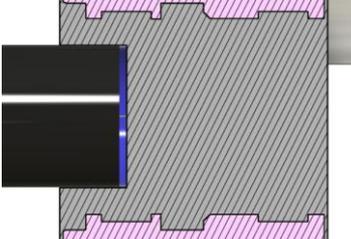
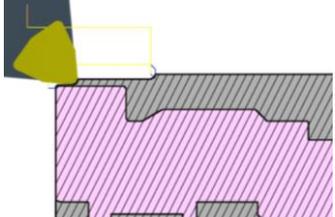
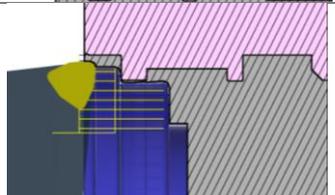
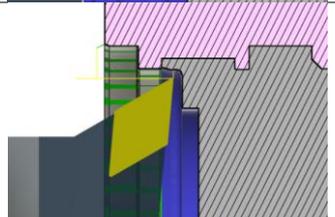
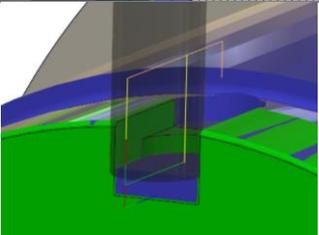
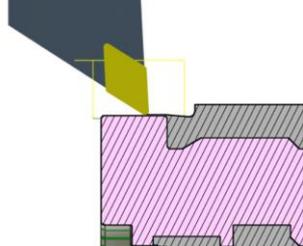
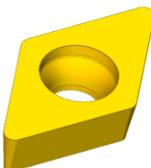


Figura 4.4 - Sistemas de coordenadas de trabalho para o (a) segundo e (b) primeiro *spindle*

Dada a exigência geométrica de garantir a concentricidade da peça nas zonas descritas pelo desenho técnico, a cada uma das fixações associou-se a geometria que melhor se adequava de maneira a respeitar o toleranciamento solicitado. É importante referir que o *spindle* secundário da máquina se encontra com problemas no seu funcionamento, nomeadamente com o surgimento de vibrações que resultavam num estado menos desejável da superfície do material. Tendo em conta que o primeiro *setup* engloba menos operações e material a remover, optou-se por usar o *spindle* secundário para realizar as mesmas.

A fase seguinte da programação CAM consiste na seleção das pastilhas e ferramentas, consultando a biblioteca de ferramentas criada, e na definição das operações de corte. Quanto ao primeiro *setup*, a Tabela 4.1 resume a sequência de maquinagem e as ferramentas selecionadas:

Tabela 4.1 - Seleção das operações do primeiro *setup* e respectivas ferramentas da peça 1.

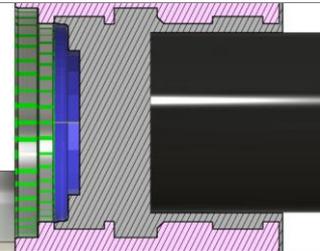
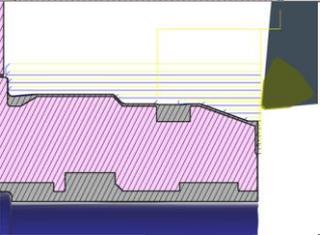
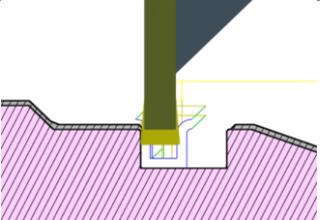
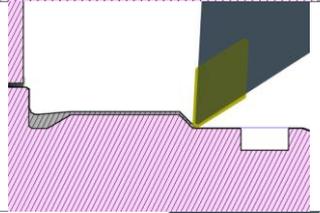
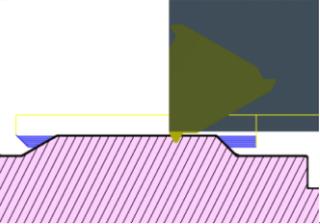
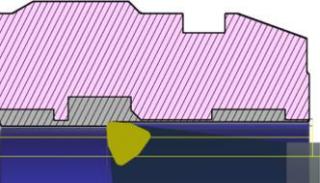
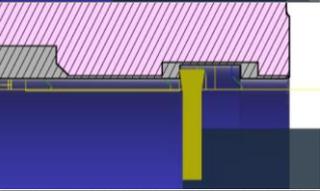
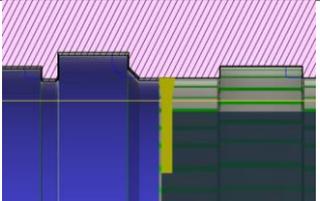
Operação		Ferramenta/Pastilha
	Furação	
	Torneamento Externo	
	Desbaste interior	
	Acabamento interior	
	Fresagem rasgos	
	Acabamento exterior	

Para a primeira operação de furação, foi selecionada uma broca de pastilhas de 40 mm de diâmetro, tendo sido atribuída uma profundidade de 16 mm. A razão pela qual não se optou por fazer um furo passante tem a ver com o facto de a geometria da ferramenta não permitir alcançar um comprimento de 82 mm (comprimento total do stock). Além disso, as brocas da mesma gama com um comprimento superior não são compatíveis com a geometria da máquina, podendo ocorrer colisões com elementos da máquina. Optou-se então por limitar o furo à geometria que não é abrangida pelo toleranciamento da concentricidade exigida no desenho técnico. As operações seguintes de desbaste consistiram, em primeiro lugar, no facejamento seguido de um torneamento externo. De seguida, efetuou-se um torneamento interno com o mesmo tipo de pastilha de desbaste, mas com um suporte para operações internas de torneamento. Para terminar o primeiro *setup*, os rasgos laterais são maquinados com o auxílio de um suporte rotativo para dar movimento de corte à fresa de 10 mm de diâmetro. São feitas passagens de 2,5 mm de profundidade, terminando com uma última passagem de acabamento. Por fim, foi definida uma passagem de acabamento na face exterior da peça para conferir uma melhor rugosidade superficial. O motivo desta ter sido a última operação, prende-se com o facto de haver a necessidade de quebrar as aparas que resultaram da operação de fresagem dos rasgos.

Terminada a programação do primeiro *setup*, é possível iniciar a escolha das operações do segundo lado da peça. Antes desta etapa, é necessário dar ordens ao cabeçote que contém o *spindle* principal para se aproximar do secundário e fixar os grampos à peça na face exterior já maquinada. De seguida, os grampos do segundo *spindle* deixam de fazer pressão na peça, ficando a mesma livre para ser transportada para a base da primeira bucha. A programação desta fase pode ser feita a partir do Fusion 360, sendo apenas necessário dar entrada aos parâmetros necessários como a distância a que os grampos devem fixar a peça.

Relativamente à segunda parte do fabrico do componente, foram novamente selecionadas as ferramentas e pastilhas de corte, bem como a ordem de produção das estratégias de corte. A Tabela 4.2 sintetiza essa informação:

Tabela 4.2 - Sequência de operações do segundo *setup* e respectivas ferramentas da peça 1.

Operação		Ferramenta/Pastilha
	Furação	
	Torneamento externo	
	Torneamento rasgo	
	Acabamento externo	
	Roscaçom	
	Desbaste interno	
	Desbaste rasgos	
	Acabamento interno	

A segunda parte do fabrico da peça é iniciada novamente com uma broca de pastilhas para fazer a furação. Desta vez, é escolhida uma broca de 42 mm de diâmetro, já que as restrições dimensionais da máquina anteriormente descritas não se verificam no lado do *spindle* principal. Além disso, a estratégia de furação foi diferente da anterior. Neste caso foi definida uma estratégia de *Peck Drilling* que obriga a ferramenta a recuar até um plano de retração após uma profundidade especificada, neste caso 20 mm, com o objetivo de remover as aparas e assim facilitar a operação. A partir dessa distância, os sucessivos movimentos de avanço são seguidos pelo recuo da ferramenta, sendo que em cada passagem a distância de corte diminui gradualmente. As operações de torneamento externo seguintes consistem, em primeiro lugar no facejamento e desbaste total do perfil externo da peça, seguido do torneamento do rasgo exterior e em terceiro no acabamento. A operação seguinte passa pela roscagem da rosca M110. Quanto torneamento interno, é removido o material até ao diâmetro das ranhuras interiores para, de seguida, serem removidos os rasgos através de uma pastilha apropriada. Nestas duas operações de desbaste foi especificada uma quantidade de 0.5 mm de espessura de material para ser removido na última passagem. Pela imagem da última operação da tabela 4.2, é possível verificar que é feita uma passagem de acabamento de toda a geometria interior da peça (tirando as faces já maquinadas no primeiro *setup*). A escolha de se fazer a operação de acabamento interior numa só passagem (e não uma passagem dos rasgos e da restante superfície separadamente) deve-se à necessidade de garantir a concentricidade dessa mesma zona. O uso da mesma ferramenta/suporte para maquinar uma superfície também ajuda a cumprir o toleranciamento exigido, dada a possibilidade de existirem desvios entre as ferramentas.

Terminada a etapa da caracterização das estratégias de corte, pode ser feita uma simulação virtual de toda a sequência de maquinagem para a deteção de colisões. Neste caso, apenas foi necessário realizar alterações à estratégia de saída/entrada das ferramentas no material. A Figura 4.5 exemplifica um momento da deteção de uma colisão, sinalizada pela cor vermelha da ferramenta.

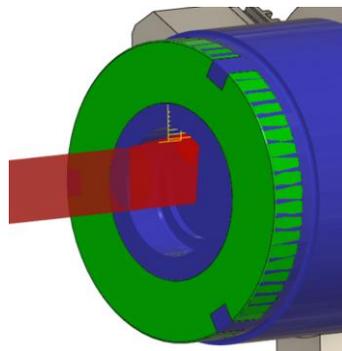


Figura 4.5 - Deteção de uma colisão entre a ferramenta e a peça.

Após a validação das operações de corte é possível submeter o pós-processador da máquina no *software* para converter toda a informação anteriormente definida, num código que a máquina consiga entender. O pós-processador compatível com a máquina e controlador foi descarregado a partir dos ficheiros disponíveis na base de dados do Fusion 360. No entanto, após uma primeira leitura do código gerado, deu-se conta de algumas alterações necessárias ao pós-processador. Além disso, comparou-se o código que estava a ser gerado com um já existente para outra peça da máquina de maneira a tentar aproximar ao máximo as informações.

Em primeiro lugar, para o ciclo de furação foi necessário fazer alterações na formatação do código gerado. Para o ciclo de *Peck Drilling* configurado para o segundo furo, está associado uma variável Q que representa a profundidade do primeiro movimento de furação (de 20 mm). A escala usada para representar este valor não era a pretendida, pelo que se fizeram as alterações necessárias para configurar esta variável (Figura 4.6). A especificação “scale” define um fator que é multiplicado pelo valor da primeira profundidade, tendo sido alterada de 1000 para 1. Além disso, a especificação “width” diz respeito ao valor mínimo de caracteres do código (neste caso os milímetros do primeiro movimento de furação).

```
Antes:
var qFormat = createFormat({ (...) trim:false, width:4, zeropad:true, scale:(unit == MM ? 1000 : 10000)});
Depois:
var qFormat = createFormat({ (...) trim:false, width:2, zeropad:true, scale:(unit == MM ? 1 : 1)});
```

Figura 4.6 - Alteração da variável Q do ciclo de furação do pós-processador.

Além disso, a variável F estava definida como velocidade de avanço, em m/min, e não como avanço por rotação, em mm/rotação, como era pretendido. Para tal, foi necessário procurar a função que definia os avanços e fazer a alteração para todos os tipos de furações do pós-processador. A Figura 4.7 representa as funções G99 e G98 que definem, respetivamente velocidades de avanço e avanço por rotação. É também apresentada a alteração feita para todos os ciclos de furação:

```
case "FEED_MODE_MM_REV":
    return 99;
case "FEED_MODE_MM_MIN":
    return 98;
```

```
Antes:
var F = (gFeedModeModal.getCurrent() == 99 ? cycle.feedrate / spindleSpeed : cycle.feedrate);
Depois:
var F = (gFeedModeModal.getCurrent() == 98 ? cycle.feedrate / spindleSpeed : cycle.feedrate);
```

Figura 4.7 - Alteração à variável F do pós-processador.

Após as duas alterações feitas, o código gerado relativo ao ciclo de furação (G83) sofreu a seguinte modificação (Figura 4.8):

Antes:

**G83 Z-68.2 R-1.3 Q20000 F142.95 M68**

Depois:

**G99 G83 Z-68.2 R-1.3 Q20 F0.13 M68**

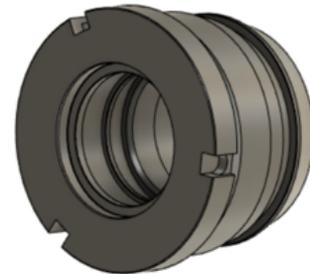
Figura 4.8 - Código G do ciclo de furação, G83, corrigido.

Finalizado todo o trabalho de definição dos *setups*, ferramentas, operações e estratégias de corte é agora possível resumir toda a informação necessária para o fabrico da peça, através da ficha de fabrico (Figura 4.9). Nesta, para além da sequência de maquiagem e respetivas ferramentas e parâmetros, é possível verificar o tempo de maquiagem total para um ciclo de trabalho da peça.

<b>Responsável</b>	João Araújo		
<b>Designação</b>	-	<b>Referência</b>	-
<b>Produção/Hora</b>	4 peças/h	<b>Peso Bruto</b>	7899 g

<b>Equipamento</b>	DMG NLX 2500/700		
<b>Spindle Principal</b>	Grampos Ø120 ext.	<b>Sub Spindle</b>	Grampos Ø125 ext.
<b>Tempo Setup</b>	-	<b>Tempo Maquinagem</b>	14:35 min.
<b>Matéria-Prima</b>	Aço CK45 (1045)	<b>Dimensões Bruto</b>	Ø125 x 82 mm



Lado 1 (Sub-Spindle)							
Operação		Ferramenta			Parâmetros		Obs.
Operação	Tool/Offset N°	Suporte/Ferramenta	Pastilha		Vc (m/min)	Fn (mm/rot)	
Furação (Ø40)	T0121	(Sandvik) 880-D4000L40-02	880-080508H-C-GM	880-0805W08H-P-GM	155	0.2	
Facejamento	T0222	(Sandvik) DWLNL 2525M 08	WNMG 08 04 12-PR 4425		500*	0.15	
Desbaste Exterior	T0222	(Sandvik) DWLNL 2525M 08	WNMG 08 04 12-PR 4425		500*	0.15	
Desbaste Interior	T0323	(Sandvik) A20T-SCLCR 4	WNMG 08 04 12-PR 4425		260	0.15	
Acabamento Interior	T0424	(Sandvik) A25T-SDQCR 11HP-R	DCMT 11 T3 08 PM 4425		300	0.07	
Fresagem Rasgos	T0525	(IZAR) fresa de 10	-		30	0.11	
Acabamento Exterior	T0626	(Sandvik) SDJCL 2525M 11	DCMT 11 T3 08 PM 4425		600*	0.07	

\*Velocidade acima do recomendado por causa do problema técnico do *spindle*

Lado 2 (Spindle)							
Operação		Ferramenta			Parâmetros		Obs.
Operação	Tool/Offset N°	Suporte	Pastilha		Vc (m/min)	Fn (mm/rot)	
Furação (Ø42)	T0101	(Sandvik) 880-D4200L40-02	880-09 06 W12H-P-GR 4334	880-09 06 08H-C-LM 1044	155	0.15	
Facejamento	T0202	(Sandvik) DWLNL 2525M 08	WNMG 08 04 12-PR 4425		250	0.15	
Desbaste Exterior	T0202	(Sandvik) DWLNL 2525M 08	WNMG 08 04 12-PR 4425		250	0.15	
Rasgo Exterior	T0303	(Iscar)TGDR 2525-3M	TGMF 402/404		200	0.13	
Acabamento Exterior	T0404	(Sandvik) SDJCL 2525M 11	DCMT 11 T3 08 PM 4425		320	0.07	
Roscagem Exterior	T0505	(Sandvik)266RFG-123B (25/25)	266-RG-16UN01A200M				
Desbaste Interior	T0606	(20) A20T-SCLCR 4	WNMG 08 04 12-PR 4425		200	0.15	
Desbaste Rasgos Interior	T0707	(Iscar) TGIR 32C-3	TGMF 402		200	0.18	
Acabamento Interior	T0808	(Iscar) TGIR 25C-3	TGMF 302		200	0.1	

Figura 4.9 - Ficha de fabrico da peça de aço.





Figura 4.11 – Modelo do centro de maquinagem vertical Akira Seiki SR XP [54].

Tendo em conta que a peça está pré-fabricada, não há necessidade de realizar todas as operações de corte no centro de maquinagem. Neste caso, as dimensões iniciais da matéria-prima antes da primeira fase de fabrico no torno apresentavam o mesmo diâmetro exterior, pelo que, após o corte do material, apenas houve necessidade de realizar as operações de faceamento das duas faces, tendo atenção aos raios e chanfros das arestas, e a furação do furo de 18.2 milímetros. Assim, a Figura 4.12 representa as três fases do processo de fabrico desta peça, pelo que no capítulo seguinte, das estratégias de corte, serão detalhadas as sequencias de maquinagem das operações relativas ao centro de maquinagem.

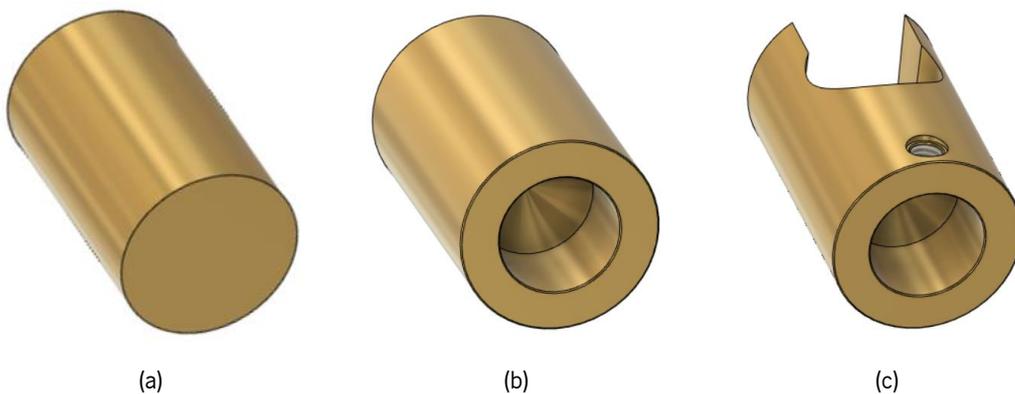


Figura 4.12 – Fases de fabrico da peça: (a) antes do torneamento, (b) após o torneamento, (c) após a fresagem.

#### 4.2.2 ESTRATÉGIA DE CORTE

É importante referir que a produção deste componente corresponde a uma quantidade de 100 peças. Apesar de não ser considerada uma grande produção, é sempre importante ter em especial atenção à otimização dos tempos produtivos de corte quando se fizer o estudo das rotinas de corte.

Outro fator relevante, está relacionado com o tipo de fixação. Um dos cuidados a ter prende-se com a tentativa de fabricar o maior número de peças, com menos fixações possível. A máquina responsável pelo fabrico desta peça é um centro de maquinagem com 3 + 1 eixos. Ou seja, o eixo rotativo pode auxiliar no posicionamento da peça em vários planos sem haver a necessidade de realizar várias fixações. Foi então esboçada uma estratégia que compreendesse todos os planos a maquinar numa só fixação. Os planos necessários estão representados na Figura 4.13, onde para cada um deles está associada a região a maquinar (a azul):

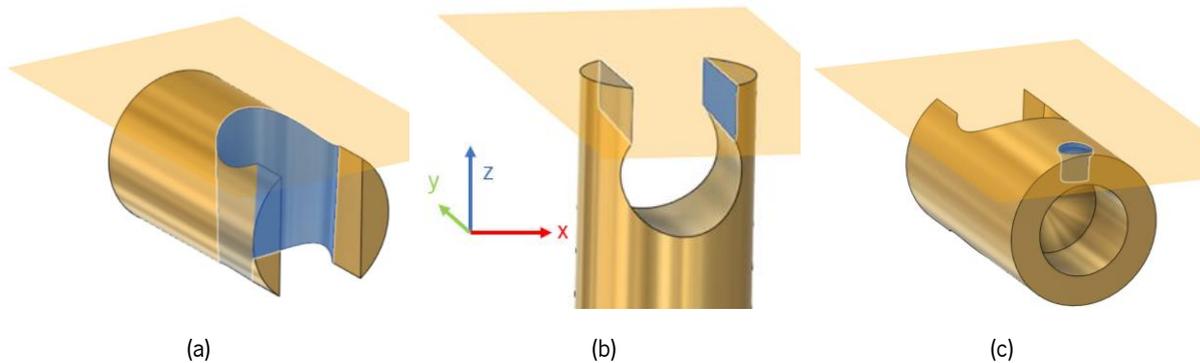


Figura 4.13 - Planos de trabalho para as operações de fresagem da peça 2.

A partir deste ponto, foi necessário elaborar o sistema de fixação, a partir dos dispositivos ao dispor na empresa. Neste caso, o tipo de fixação disponível que melhor se adequava a este projeto eram os mordentes de aperto em aço com capacidade até 5 peças, consoante o tamanho das mesmas. Tendo em conta o diâmetro de 30 mm da peça, verificou-se a possibilidade de usar a totalidade da capacidade para maquinar 5 peças num mesmo sistema de fixação. A Figura 4.14 exhibe o modelo dos mordentes usado, bem como a respetiva modelação, feita no Fusion 360.

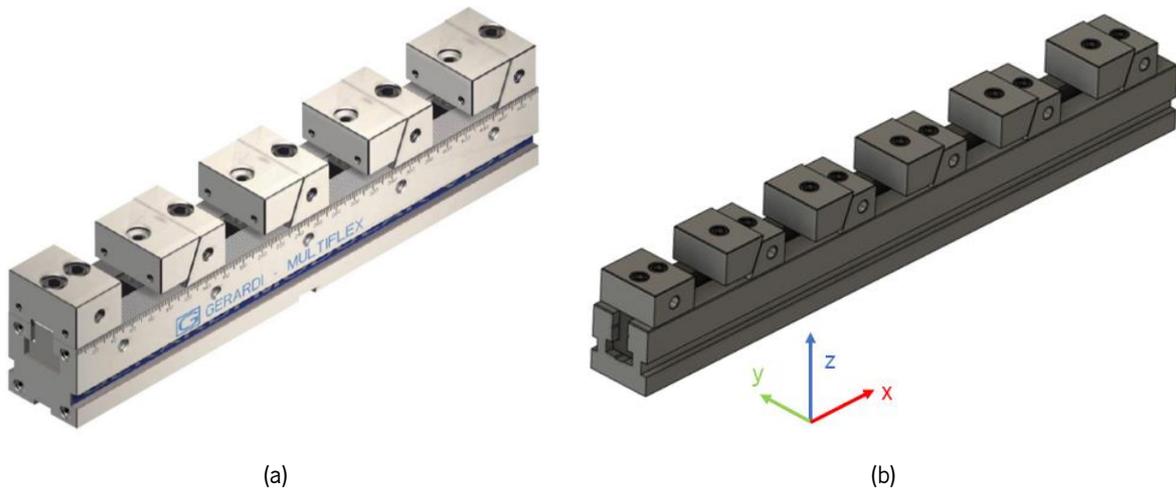


Figura 4.14 - Modelo (a) real e (b) virtual dos mordentes de aperto.

O passo que se segue consiste na idealização de uma forma de garantir a posição constante das peças cada vez que se realiza um ciclo de maquinagem. Em primeiro lugar, pode-se assumir que cada par de mordente é responsável pelo contacto tangente à peça na face lateral. A terceira zona de contacto, na base da peça, garante a posição em z da peça. Ainda assim, é necessário uma outra zona de contacto para fixar a posição da peça ao longo do eixo y, conforme o eixo representado na figura anterior. Para tal, utilizou-se um batente fixo nos mordentes para assegurar o posicionamento da peça. Após uma análise das dimensões e posições do componente em cada operação, chegou-se à conclusão da necessidade de adicionar um segundo batente na base da peça. Desta forma, é assegurado que as ferramentas são capazes de alcançar todas as regiões sem a obstrução dos batentes ou dos mordentes. A Figura 4.15 apresenta o sistema de fixação completo com o posicionamento da peça.

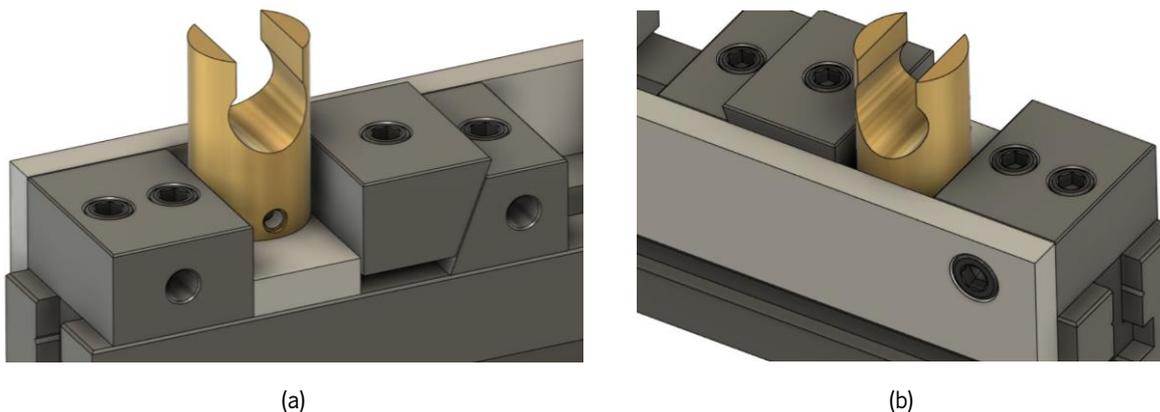


Figura 4.15 - Modelo do sistema de fixação.

Tendo os posicionamentos e fixações da peça definidos, é agora possível avançar para a fase da definição das estratégias de corte. A sequência de maquinagem pode ser dividida em três partes, conforme os planos de trabalhos referidos em cima. Em primeiro lugar, pode ser realizado o furo cónico, através de duas operações de furação e fresagem. De seguida, o rasgo da face superior da peça pode

ser maquinado através de duas operações de desbaste e acabamento. Finalmente, são feitos os dois furos laterais relativos ao último plano de trabalho, bem como a roscagem M6.

A cada uma das partes está associado um setup diferente, tendo em conta a necessidade de definir três sistemas de coordenadas de trabalho. Para o caso do centro de maquinagem selecionado, definição do WCS é feita com o auxílio de uma sonda que toca nas faces da peça até obter o valor dos pontos de coordenadas necessários. Assim, na fase de definição dos *setups* foram selecionados os seguintes WCS, como se pode ver pela Figura 4.16:

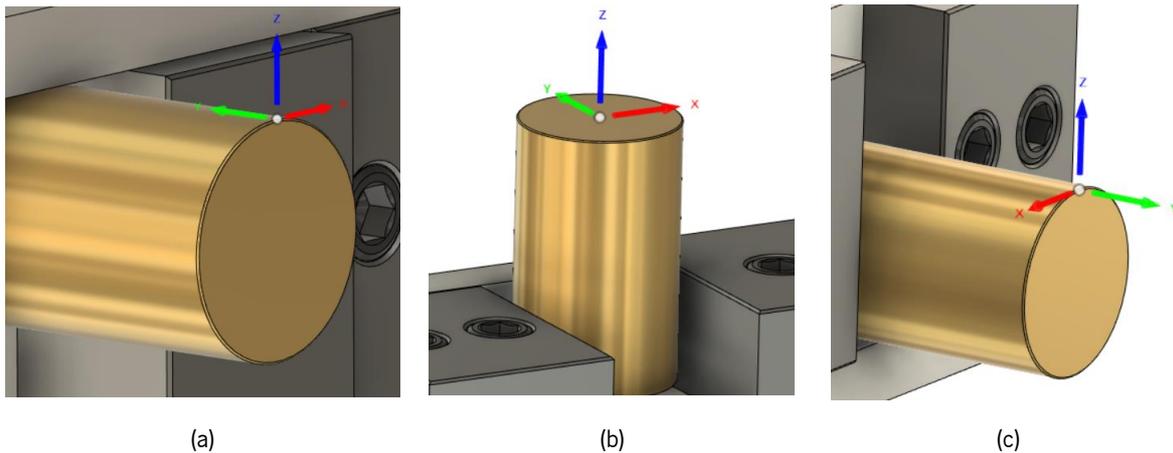
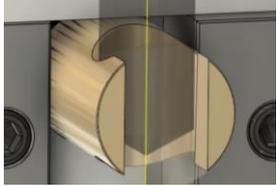
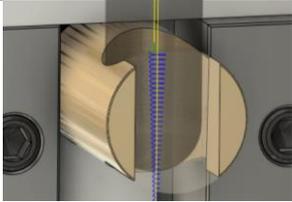
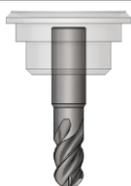
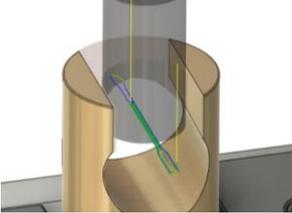
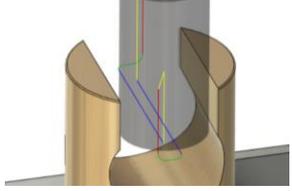
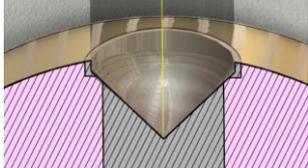
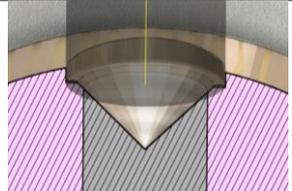
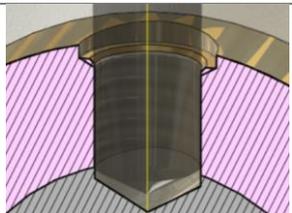
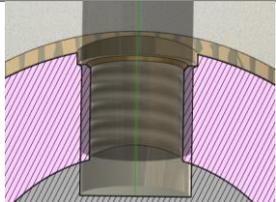


Figura 4.16 - Sistemas de coordenadas de trabalho da peça.

À medida que se muda de sistema de coordenadas, a mesa de trabalho do centro de maquinagem roda, através do 4º eixo, para posicionar a peça.

O passo seguinte passa pela seleção de ferramentas para cada estratégia de corte. Relativamente ao primeiro sistema de coordenadas, foi escolhida uma broca de metal duro de 20 mm de diâmetro para realizar um furo passante, antes da fresagem da superfície cônica feita por uma fresa de topo esférico de 20 mm de diâmetro. No segundo posicionamento, foi eleita uma fresa de aço rápido de 16 mm para realizar o desbaste do rasgo. Finalmente, para o último *setup*, foram selecionadas duas brocas, uma fresa e um macho para a rosca. A primeira broca tem como função marcar o ponto do furo antes de perfurar o material com a fresa de 6.5 mm. O ciclo termina com a roscagem do furo de 5 mm, contabilizando-se um total de 7 ferramentas para 8 operações. A Tabela 4.3 apresenta, por ordem de operação as ferramentas selecionadas, bem como as respetivas estratégias de corte.

Tabela 4.3 - Lista de operações e ferramentas no fabrico da peça 2.

WCS	Operação	Ferramentas
1	 Furação	 Broca, Ø20 mm (Metal Duro)
	 Fresagem cônica	 Broca de topo esférico, Ø20 mm (HSS)
2	 Fresagem Rasgo	 Fresa de topo plano, Ø16 mm (HSS)
	 Acabamento Rasgo	
3	 Escarear 45°	 Broca de ponto, Ø6 mm, 90° (HSS)
	 Fresagem caixa	 Fresa topo plano, Ø6.5 mm (HSS)
	 Furação	 Broca helicoidal, Ø5 mm (HSS)
	 Roscagem	 Macho M6 (HSS)

Relativamente às estratégias de corte, para a primeira operação de furação, foi selecionada uma broca de metal duro dada a maior velocidade de avanço que este material permite atingir. Além disso, apesar de ser mais dispendiosa, apresenta um tempo de vida maior em comparação com as ferramentas de aço rápido (HSS).

Quanto à operação de desbaste, do segundo *setup*, optou-se pela estratégia “Adaptive”. Este tipo de rotina de corte apresenta um movimento circular à medida que a ferramenta avança, provocando uma menor espessura da apra removida e como tal não necessita de forças de corte tão elevadas. Além disso, em comparação com outros movimentos de corte convencionais, esta estratégia impõe menos vibrações e temperaturas mais baixas. Permite também o uso de velocidades de corte e avanço mais elevadas. A Figura 4.17 representa um trajeto da ferramenta com movimentos “Adaptive” e movimentos convencionais para o desbaste da mesma geometria.

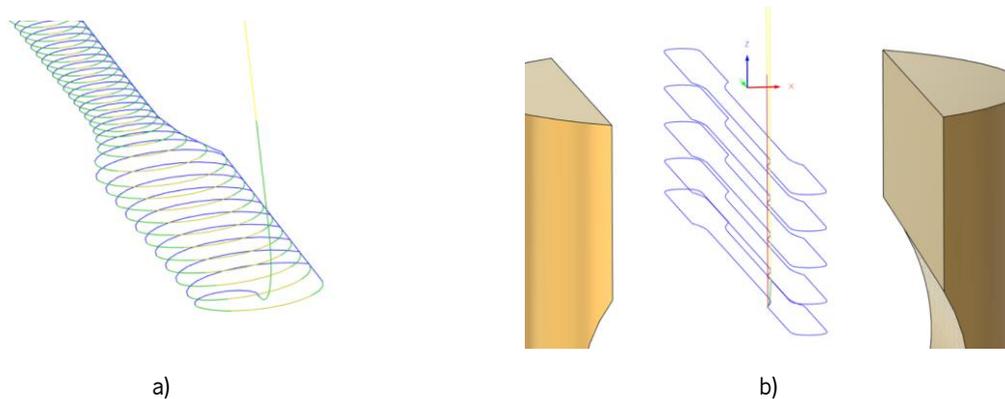
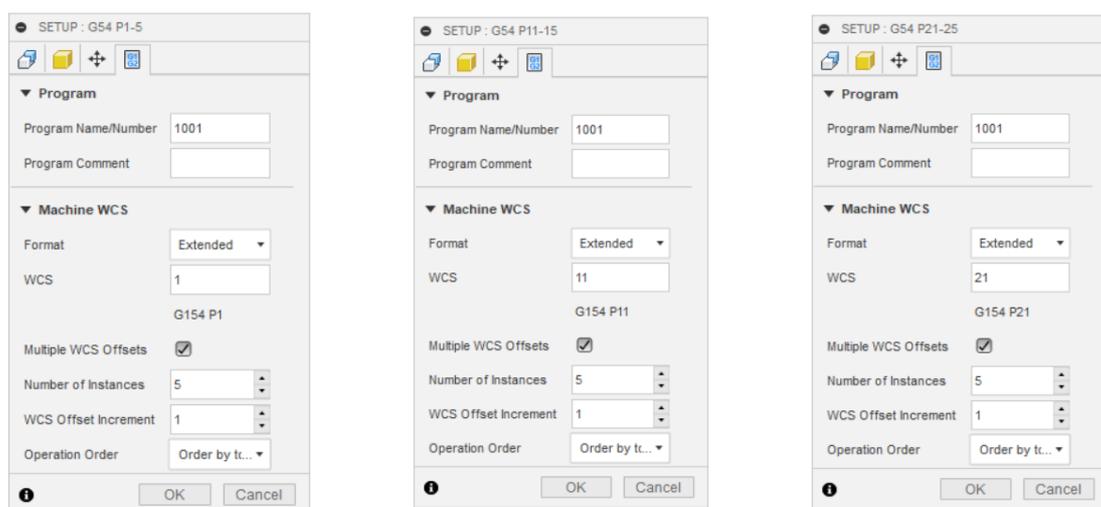


Figura 4.17 – Estratégias CAM vs Estratégia convencional.

Comparando as duas estratégias, pode se afirmar que a “Adaptive” tem a capacidade de usar a totalidade da profundidade à medida que a ferramenta avança. Por outro lado, a segunda operação, dado que exige forças de corte maiores, obriga a dividir a profundidade do corte em várias passagens. Para além das implicações já referidas, o tempo de maquinagem é menor para a estratégia “Adaptive” (1:03 min.) em relação à convencional (2:05 min.).

No terceiro plano de trabalho, optou-se por usar uma broca de ponto em primeiro lugar para escarear a parte superior do furo da rosca. Graças a esta primeira operação, a fresagem do furo de 6.5 mm também acaba por ser facilitada dado que grande parte do material foi removido. Além disso, auxilia na marcação do furo seguinte, impedindo que ocorra deslocamento da broca. A operação seguinte consiste na furação do furo precedente à roscagem. O diâmetro do furo, de 5 mm, foi definido a partir do valor normalizado para o tipo de roscas M6. O ciclo é finalmente terminado com a operação de roscagem.

Finalizada a caracterização das estratégias de corte, é necessário fazer alterações a cada *setup* de maneira a incluir 5 peças em simultâneo num mesmo ciclo. Como já foi visto cada peça tem 3 sistemas de coordenadas, associados aos planos de trabalho. Assim, de igual forma, para cada uma das 5 peças é necessário definir 3 planos, resultando num total de 15 WCS diferentes. Por norma, os códigos G relacionados com os sistemas de coordenadas são o G54, G55, G56, e assim sucessivamente até ao G59. No entanto, certos controladores, como é o caso, permitem selecionar um formato diferente de maneira a poder-se estender o número de WCS. Este formato pode ser definido como, por exemplo, G54.1 P1, G54.1 P2, G54.1 P3 e assim em diante. Desta forma, para cada um dos *setups*, no separador do pós-processador, fez-se a alteração do formato para “Extended”. Além disso, como demonstra a Figura 4.18, selecionou-se a opção de trabalho com sistemas de coordenadas múltiplos, onde se definiu um número de 5 instâncias (para cada peça de trabalho). O valor do incremento foi definido como 1. A lógica para se ter escolhido 1 pode ser explicada através do seguinte exemplo: para o primeiro WCS, G54.1 P1 (primeira peça), ao adicionar-se 1 valor, o mesmo passa para G54.1 P2 (segunda peça). Se este processo for repetido 5 vezes (para as 5 instâncias), o último sistema de coordenadas será o G54.1 P5 (quinta peça). Finalmente, quanto à sequência de trabalho poder-se-ia escolher ordenar por ferramenta ou por operação. De forma a reduzir o tempo de maquinagem, foi selecionada a ordem por ferramentas de maneira a minimizar ao máximo a troca das mesmas. Na eventualidade de ser escolhida a ordem por operação, o que aconteceria seria uma troca constante de ferramentas à medida que as operações fossem realizadas. Assim, repetindo o processo para os outros dois *setups* fica-se com um total de 15 sistemas de coordenadas: G54.1 P1 a 5 (plano de trabalho 1); G54.1 P11 a 15 (plano de trabalho 2); G54.1 P21-25 (plano de trabalho 3). A Figura 4.18 resume a informação acima descrita:



(a)

(b)

(c)

Figura 4.18 – Sistemas de coordenadas para cada um dos planos das 5 peças.

Após uma verificação da simulação do processo completo (Figura 4.19) e da confirmação da não existência de inconformidades, foi possível avançar para a fase da geração do código G.

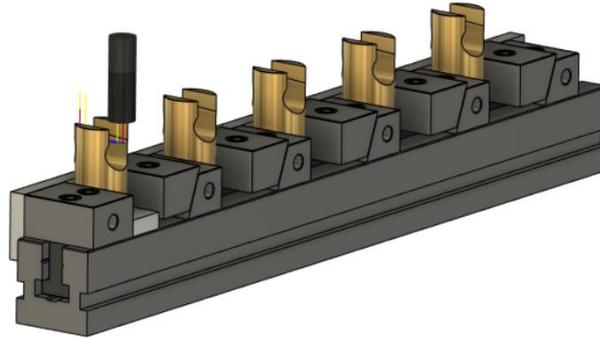


Figura 4.19 - Simulação virtual do processo de maquinagem das 5 peças de latão.

Em primeiro lugar, foi preciso confirmar se o pós-processador disponível para o controlador da máquina continha este tipo de formatação, pelo que se confirmou que sim, como indica a Figura 4.20.

```
// wcs definiton
wcsDefinitions = {
  useZeroOffset: false,
  wcs
    : [
      {name: "Standard", format: "G", range: [54, 59]},
      {name: "Extended", format: "G54.1 P", range: [1, 96]}
    ]
}
```

Figura 4.20 - Definição do tipo de sistemas de coordenadas do pós-processador.

Após uma primeira visualização do código gerado, verificou-se que todas as operações estavam a trabalhar em milímetros por minuto (G94) para a velocidade de avanço. No entanto, foi solicitado que, para as operações de furação, o programa trabalhasse em avanço por rotação (G95). Assim, adicionou-se a informação destacada no retângulo verde da Figura 4.21, para que, antes de qualquer ciclo de furação fosse dada a indicação para a máquina trabalhar com o G95.

```
writeBlock(gFeedModeModal.format(95));
var F = (gFeedModeModal.getCurrent() == 95 ? cycle.feedrate / spindleSpeed : cycle.feedrate);

writeBlock(
  gRetractModal.format(98), gAbsIncModal.format(90), gCycleModal.format(81),
  getCommonCycle(x, y, z, cycle.retract),
  feedOutput.format(F)
);
break;
```

Figura 4.21 - Linhas de código adicionadas ao ciclo de furação do pós-processador.

Este procedimento repetiu-se para todos os tipos de furação (*drilling, counter-boring, deep drilling...*). As alterações verificadas no novo código gerado podem ser vistas na Figura 4.22:

Antes:

```
G98 G81 X0. Y15. Z-36.249 R5. F344.
```

Depois:

```
G95  
G98 G81 X0. Y15. Z-36.249 R5. F0.2
```

Figura 4.22 - Alterações no novo código gerado para o ciclo de furação (G81).

Com estas alterações, sempre que era realizada uma operação de furação, o programa mudava o seu funcionamento para avanços por rotação. No entanto, verificou-se mais tarde que, sempre que tal ocorria, nas operações seguintes o programa não revertia o modo de operar para milímetros por rotação, o que não era desejável para operações de fresagem. Assim, de modo a corrigir este obstáculo, foi criada uma função (Figura 4.23) que, após qualquer troca de ferramenta, indicasse o modo de trabalho (G94/G95). Caso se tratasse de uma furação, é digitado o código G95, caso contrário é inserido o G94.

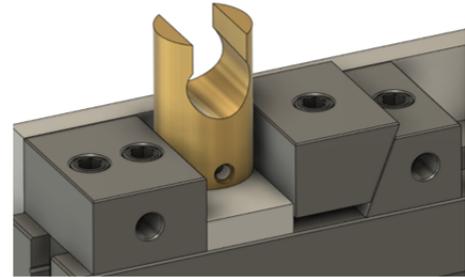
```
if (insertToolCall) {  
  gFeedModeModal.reset();  
}  
var feedMode;  
if ((currentSection.feedMode == FEED_PER_REVOLUTION) || tapping) {  
  feedMode = gFeedModeModal.format(95);  
} else {  
  feedMode = gFeedModeModal.format(94);  
}
```

Figura 4.23 - Função criada para distinguir o modo de trabalho (G94/G95).

Terminadas as etapas de trabalho da programação é então possível criar a ficha de fabrico com as informações necessárias para auxiliar o responsável pela produção. A posição da mesa para realizar cada *setup* está especificada nas observações. Outras informações como o número de peças por hora estão também descritas na ficha, abaixo representada pela Figura 4.24.

<b>Responsável</b>	João Araújo		
<b>Designação</b>	-	<b>Referência</b>	-
<b>Produção/Hora</b>	15 peças/h	<b>Peso Bruto</b>	294 g

<b>Equipamento</b>	AKIRA SEIKI		
<b>Fixação</b>	Mordentes		
<b>Tempo Setup</b>	-	<b>Tempo Maquinagem</b>	(3:58 x 5) min (19.50 min)
<b>Matéria-Prima</b>	Latão	<b>Dimensões Bruto</b>	Ø30 x 49 mm



<b>Setup 1, 2, 3</b>					
<b>Operação</b>		<b>Ferramenta</b>	<b>Parâmetros</b>		<b>Obs.</b>
<b>Operação</b>	<b>Tool/Offset N°</b>	<b>Ferramenta</b>	<b>Vc (m/min)</b>	<b>Fn (mm/rot)</b>	<b>Setup/Posição mesa</b>
Furação 20	T01	Broca Ø 20 mm	120	0.2	G54.1 P1-5/ 90°
Fresagem Cone	T02	Fresa Esférica Ø 20 mm	80	0.10	G54.1 P1-5/ 90°
Desbaste Rasgo	T03	Fresa Plana Ø 16 mm	80	0.10	G54.1 P11-15/ 0°
Acabamento Rasgo	T03	Fresa Plana Ø 16 mm	100	0.08	G54.1 P11-15/ 0°
Marca Ponto	T04	Broca Ø 8.5 mm	120	0.15	G54.1 P21-25/ -90°
Furação 6,5	T05	Broca Ø 6.5 mm	120	0.15	G54.1 P21-25/ -90°
Furação 5	T06	Broca Ø 5 mm	120	0.15	G54.1 P21-25/ -90°
Roscagem M6	T07	Macho M6	30	-	G54.1 P21-25/ -90°

Figura 4.24 - Ficha de fabrico da peça de latão.

## 5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

### 5.1 CONCLUSÕES

Tal como referido no primeiro capítulo, o principal objetivo deste trabalho foi de atribuir novos conhecimentos CAD/CAM, numa empresa onde as tecnologias de CNC para o fabrico de componentes metálicos se realizam por meio do comando numérico manual. Apesar de não ter sido possível validar o trabalho desenvolvido através da fase de produção das duas peças, considera-se que os procedimentos expostos seriam o suficiente para testar o fabrico dos componentes nas respetivas máquinas.

Ainda assim, podem-se tecer algumas conclusões acerca do trabalho desenvolvido. Em primeiro lugar, no que diz respeito à proposta para um protocolo de trabalho, pode-se dizer que a criação da ficha de fabrico cumpriu o propósito, podendo ser usada para servir de apoio ao fabrico de diferentes componentes. Este tipo de suporte técnico pode ser uma mais-valia na organização da sequência de operações, na seleção de ferramentas e na definição dos parâmetros de corte, mesmo para produção de peças a partir da programação manual. Além disso, com a criação de uma biblioteca de ferramentas, foi possível organizar as informações das ferramentas à disposição na empresa.

Relativamente ao desenvolvimento de estratégias de corte para as peças de aço e latão, abordado no capítulo 4, o estudo permitiu realizar toda a preparação necessária para o fabrico das mesmas. Na fase de criação de estratégias de corte foi usado o Fusion 360 como ferramenta CAD/CAM. Nesta etapa, foram criados as rotinas de corte que melhor se adequavam, tentando sempre procurar estratégias de otimização, como a que foi apresentada para a fresagem da peça de latão. A escolha dos parâmetros de corte é baseada no catálogo dos fornecedores das ferramentas, mas também nos métodos de trabalho da empresa (e limitações das máquinas). A simulação virtual do processo foi importante para corrigir alguns erros e para validar o processo através da confirmação da não existência de colisões ou outras anomalias.

Finalmente, os ajustes criados nos dois pós-processadores das máquinas/controladores revelaram-se essenciais para a preparação das produções. Após as alterações realizadas e revisões feitas ao código gerado, pôde-se confirmar que ambos os processos estavam operacionais para o fabrico

Em suma, embora o objetivo principal de implementar o estudo realizado para ambas as peças na produção não tenha sido possível de alcançar, esta dissertação contribuiu para uma maior perceção de novos métodos de trabalho possíveis de adquirir através das ferramentas CAD/CAM. Apesar de não se ter introduzido por completo o CAM nas produções, foi possível executar com sucesso alguns testes

de estratégias de corte mais complexas de programar manualmente, através da cópia de excertos do código G gerado no Fusion 360 para as máquinas.

## **5.2 TRABALHOS FUTUROS**

A proposta para a continuação do projeto passa, naturalmente, pela testagem e validação do estudo realizado para as duas peças nas respetivas máquinas.

Assim, numa fase inicial, é proposto que se verifique o correto funcionamento das rotinas de corte e dos comandos definidas na programação. Seguidamente, deve ser realizado o controlo dimensional e geométrico para validar a produção de ambas as peças. Propõe-se também a revisão das estratégias definidas com o objetivo de procurar otimizar o tempo de maquinagem de cada uma das peças.

Além disso, durante a fase de manipulação do pós-processador, sentiram-se algumas dificuldades, dado o desconhecimento no tipo de linguagem de programação. Uma maior compreensão da comunicação entre o pós-processador e a máquina/controlador é proposta como trabalho futuro.

Finalmente, é proposta a obtenção e preparação dos pós-processadores para as restantes máquinas disponíveis na empresa, para, futuramente, ser possível dar uso na totalidade às ferramentas de engenharia CAD/CAM.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Bethany, The History of CAM—Past, Present and Future, *Scan2CAD*. <https://www.scan2cad.com/blog/cad/history-of-cam/> (acedido 13 de outubro de 2022).
- [2] B. Tools, History of CNC Machining, *CNC Life*. <https://medium.com/cnc-life/history-of-cnc-machining-part-1-2a4b290d994d> (acedido 13 de outubro de 2022).
- [3] Metaldufe- Experts in Metalworking. <https://www.metaldufe.com/pt/index.html> (acedido 30 de outubro de 2022).
- [4] VYNMSA, The Metal Mechanic Industry, <https://www.vynmsa.com/blog/en/industry/metalmechanic-industry/>
- [5] W. Grzesik, Advanced machining processes of metallic materials, Second edi, Jow Hayton, Cambridge, 2016.
- [6] A. Macedo, Estudo dos parâmetros de corte no processo de maquinagem por fresagem de peças fundidas em ligas de alumínio. Universidade do Minho, 2021.
- [7] K. Harish, A. Mohd, M. Dr. Aas, e Z. J. Hasan, Optimization of cutting parameters in CNC Turning, vol. 3, 2013.
- [8] A. Y. C. Nee, Handbook of manufacturing engineering and technology. New York: Springer, 2014.
- [9] CNC Turning Center Guide, The Difference Between CNC Turning Center and CNC Lathes. <https://www.dajinprecision.com/news/53-cnc-turning-center-guide-the-difference-between-cnc-turning-center-and-cnc-lathes> (acedido 13 de outubro de 2022).
- [10] AKIRA SEIKI Machine Tool Sources, 5 axis CNC Machining Center. <https://www.akiraseiki.com/others.htm> (acedido 13 de outubro de 2022).
- [11] CNC Lathes Lease/Finance Or Buy On. [https://www.vxdeal.com/?product\\_id=206732197\\_70](https://www.vxdeal.com/?product_id=206732197_70) (acedido 13 de outubro de 2022).
- [12] Haas Automation Inc., CNC Machine Tools <https://www.haascnc.com/index.html> (acedido 13 de outubro de 2022).
- [13] Pinterest, Cnc lathe tool turret. <https://www.pinterest.pt/pin/214132157254963152/> (acedido 26 de outubro de 2022).
- [14] Mazakusa, Turning. <https://www.mazakusa.com/machines/process/turning/> (acedido 26 de outubro de 2022).

[15] Biglia, Smart Turn II. <https://www.bigliaspa.it/en/products/smart-turn-ii/> (acedido 13 de outubro de 2022).

[16] Sneakers, Two Spindle Twin-Turret CNC Lathe. <https://www.sneakers123.ga/ProductDetail.aspx?iid=268185479&pr=21.88> (acedido 26 de outubro de 2022).

[17] Kent CNC, Shop Heavy-Duty High-Speed Vertical Machining Centers. <https://kentcnc.com/cnc-vertical-machining-centers/box-way-vertical-machining-centers/> (acedido 13 de outubro de 2022).

[18] M. Deans, What is CAM (Computer-Aided Manufacturing)?, Fusion 360 Blog. <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/blog/computer-aided-manufacturing-beginners/> (acedido 13 de outubro de 2022).

[19] E. Suzuki, Machining Fundamentals: Introduction to Toolpaths, Fusion 360 Blog. <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/blog/machining-fundamentals-toolpaths/> (acedido 13 de outubro de 2022).

[20] Kitagawa, BR series machine tool Products. [https://www.kitagawa.com/en/mtools/csd/brbr-plus\\_series.html](https://www.kitagawa.com/en/mtools/csd/brbr-plus_series.html) (acedido 28 de outubro de 2022).

[21] Grid Plates, Advanced Machine & Engineering Co. <https://www.ame.com/grid-plates> (acedido 28 de outubro de 2022).

[22] DirectIndustry, GERARDI - Machine tool vise. <https://www.directindustry.com/prod/gerardi-spa/product-11911-1972718.html> (acedido 28 de outubro de 2022).

[23] Magnetic Workholding for Production Parts. <https://www.productionmachining.com/articles/magnetic-workholding-for-production-parts> (acedido 28 de outubro de 2022).

[24] Martin Trunnion Tables, AMROK Cross Column HMC Tombstone Fixture. <https://www.trunniontable.com/crosstombstone.html> (acedido 28 de outubro de 2022).

[25] R. Batista, «Tendências do Corte por Arranque de Apara - Maquinagem». Universidade do Porto, 2010.

[26] Metal Partss, Choosing the Right Tool for CNC Machining. [https://metalspartss.com/Choosing\\_the\\_Right\\_Tool\\_for\\_CNC\\_Machining/](https://metalspartss.com/Choosing_the_Right_Tool_for_CNC_Machining/)

- [27] Sandvik Coromant releases new range of tool holders. <https://www.canadianmetalworking.com/canadianmetalworking/product/metalworking/sandvik-coromant-releases-new-range-of-tool-holders> (acedido 26 de outubro de 2022).
- [28] Fractory, Milling Cutters & Tools - Types and Their Purposes (with Images). <http://https%253A%252F%252Ffractory.com%252Fmilling-cutters-and-tools%252F> (acedido 26 de outubro de 2022).
- [29] Britannica, Alloy- Definition, Properties, Examples, & Facts. <https://www.britannica.com/technology/alloy>
- [30] ISO, ISO 513:2012, <https://www.iso.org/cms/render/live/en/sites/isoorg/contents/data/standard/05/99/59932.html>
- [31] Sandvik Coromant, Workpiece materials. <https://www.sandvik.coromant.com/en-us/knowledge/materials/pages/workpiece-materials.aspx>
- [32] R. B. Ross, *Metallic Materials Specification Handbook*, 4th ed. New York, NY: Springer, 2013.
- [33] L. Laperrière e G. Reinhart, *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*. Heidelberg: Springer, 2014.
- [34] H. A. Youssef, *Machining of Stainless Steels and Super Alloys: Traditional and Nontraditional Techniques*. Hoboken: John Wiley and Sons, 2015.
- [35] Matmatch, Duplex Stainless Steel: Properties, Standards & Applications. <https://matmatch.com/learn/material/duplex-stainless-steel> (acedido 13 de outubro de 2022).
- [36] Cast Iron Types | Metal Casting Resources. <https://www.reliance-foundry.com/blog/cast-iron> (acedido 13 de outubro de 2022).
- [37] Fractory, Ferrous and Non-Ferrous Metals. <http://https%253A%252F%252Ffractory.com%252Fferrous-metals-non-ferrous-metals-with-examples%252F> (acedido 13 de outubro de 2022).
- [38] ThoughtCo, What Is Brass? Composition and Properties. <https://www.thoughtco.com/brass-composition-and-properties-603729> (acedido 13 de outubro de 2022).
- [39] R. Suresh, S. Basavarajappa, V. Gaitonde, G. L. Samuel, e J. Davim, State-of-the-art research in machinability of hardened steels, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, vol. 227, pp. 191–209, fev. 2013, doi: 10.1177/0954405412464589.

- [40] P. Conradie, E. Uheida, G. Oosthuizen, e D. Dimitrov, «EVALUATING THE EFFECT OF MILLING STRATEGY ON PROCESS EFFICIENCY IN MACHINING TITANIUM ALLOYS -A COST MODELLING APPROACH», *J. New Gener. Sci.*, vol. 18, mar. 2021, doi: 10.47588/jngs.2003.01.01.
- [41] L. Virasak, Unit 2: Speed and Feed. <https://openoregon.pressbooks.pub/manufacturingprocesses45/chapter/unit-2-speed-and-feed/> (acedido 13 de outubro de 2022)
- [42] Miyawon, Influence of cutting parameters on machining, Miya's. <https://lantis-cuttool.com/influence-of-cutting-parameters-on-machining/> (acedido 13 de outubro de 2022).
- [43] Fundamentals of CNC Machining, A Practical Guide for Beginners, Autodesk CAM. 2014.
- [44] Sandvik Coromant, Milling formulas and definitions. <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/machining-formulas-definitions/pages/milling.aspx> (acedido 13 de outubro de 2022).
- [45] Industr, Influence of coolant in CNC machining. <https://www.industr.com>. <https://www.industr.com/en/influence-of-coolant-in-cnc-machining-2391453> (acedido 14 de outubro de 2022).
- [46] Ukessays, The History Of Cnc Machines. <https://www.ukessays.com/essays/information-technology/examining-the-history-of-cnc-machines-information-technology-essay.php> (acedido 13 de outubro de 2022).
- [47] B. Tools, History of CNC Machining, Part 2, CNC Life. <https://medium.com/cnc-life/history-of-cnc-machining-part-2-the-evolution-from-nc-to-cnc-4b9fe1653536> (acedido 13 de outubro de 2022).
- [48] B. Tools, History of CNC Machining, Part 3, CNC Life. <https://medium.com/cnc-life/history-of-cnc-machining-part-3-from-the-factory-floor-to-the-desktop-b16cc35ef7be> (acedido 13 de outubro de 2022).
- [49] U. Morais, Development of Working Procedures of a 5 Axis CNC Milling Machine, Universidade do Minho, 2020.
- [50] Sandvik Coromant, Slicing and trochoidal milling. <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/milling/milling-holes-cavities-pockets/pages/slicing-trochoidal-milling.aspx> (acedido 29 de outubro de 2022).
- [51] Autodesk, Fusion 360 Help- Turning Groove Dialog. <https://help.autodesk.com/view/fusion360/ENU/?guid=GUID7F733F24-48FB-436F-802C-51116831F616> (acedido 29 de outubro de 2022).

[52] B. Warfield, The Art of the Setup Sheet, CNCCookbook: Be A Better CNC'er. <https://www.cnccookbook.com/art-setup-sheet/> (acedido 13 de outubro de 2022).

[53] Sandvik Coromant, Cutting tool parameters. <https://www.sandvik.coromant.com/en-us/knowledge/machining-formulas-definitions/pages/cutting-tool-parameters.aspx> (acedido 16 de outubro de 2022).

[54] AKIRA SEIKI CNC Machine Tools, Solutions.SR32 XP. <https://www.akiraseiki.com/vertical-machining-center-jr-sr/vmc-sr32-xp.html> (acedido 19 de outubro de 2022).