



INSTITUTO POLITÉCNICO DE BRAGANÇA
Escola Superior de Tecnologia e Gestão

Otimização de parâmetros de corte no processo de torneamento CNC

Henrique Daniel Oliveira Mendes

Dissertação apresentada à:

Escola Superior de Tecnologia e Gestão

Instituto Politécnico de Bragança

para obtenção do grau de Mestre em:

Engenharia Industrial

Área de especialização em Engenharia Mecânica

Outubro de 2019

Otimização de parâmetros de corte no processo de torneamento CNC

Henrique Daniel Oliveira Mendes

Dissertação apresentada à:

**Escola Superior de Tecnologia e Gestão
Instituto Politécnico de Bragança**

para obtenção do grau de Mestre em:

Engenharia Industrial

Área de especialização em Engenharia Mecânica

Orientadores:

Prof. Dr. João Pinto Castro Ribeiro

Prof. Dr. Luís Miguel Cavaleiro Queijo

Outubro de 2019

Dedico este trabalho:

Aos meus pais que lutaram incondicionalmente para me proporcionar a conclusão desta etapa da minha vida.

Agradecimentos

O desenvolvimento desta dissertação não seria possível sem a excelente orientação do meu orientador, Professor João Ribeiro, sempre disponível com uma palavra de incentivo e otimismo. Pela disponibilidade, pelas valiosas sugestões e ajudas fornecidas durante a preparação desta dissertação, estou lhe muito grato por todo o conhecimento transmitido e por todas as experiências partilhadas ao longo do meu percurso académico.

Agradeço ao Professor Doutor Luís Queijo pela contribuição e disponibilidade.

Ao Engenheiro Jorge Paulo (técnico de laboratório) pela disponibilidade prestada durante todos os ensaios que foram necessários realizar no laboratório.

À Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Bragança, do Instituto Politécnico de Bragança, pelas facilidades proporcionadas durante a preparação deste trabalho.

Não podia deixar de agradecer aos meus pais, pelo constante apoio, compreensão e amor transmitidos ao longo desta importante etapa da minha vida, inclusive a restante família sempre por todo o apoio.

Por fim, não poderia deixar de agradecer aos meus amigos e colegas por toda a sua amizade, companheirismo, solidariedade e espírito de entreajuda que se estabeleceu entre nós, ajudando assim à conclusão do curso.

Resumo

Na atualidade, o aumento da produtividade no menor tempo possível e com elevada qualidade é, sem dúvida, um dos maiores desafios para a indústria. Neste sentido, a indústria tem recorrido, com muita frequência, a máquinas CNC, uma vez que estes equipamentos trabalham de forma automática sendo capazes de alcançar uma elevada precisão, com um grande desempenho e rendimento.

Na presente dissertação foi realizado um estudo da rugosidade superficial e da taxa de produção durante o processo de maquinagem do DIN CK45, onde são analisados os efeitos de três parâmetros de corte no processo de torneamento (velocidade de corte, velocidade de avanço e penetração). Para esse estudo é utilizado o Método de Taguchi e a Análise Relacional de Grey.

O Método de Taguchi foi utilizado para diminuir o número de combinações possíveis e, consequentemente, o número de ensaios a realizar. Esse método é muito conhecido no setor industrial onde é utilizado para o controlo de qualidade. Apresenta conceitos interessantes, tais como robustez e perda de qualidade, sendo bastante útil para identificar variações do sistema de produção, durante o processo industrial, quantificando a variação e permitindo eliminar os fatores indesejáveis. A Análise Relacional de Grey foi utilizada para determinar a combinação ótima de parâmetros para o conjunto dos elementos de controlo.

Com o Método de Taguchi foi possível determinar a matriz dos ensaios experimentais realizados neste trabalho, foi assim construída uma matriz ortogonal L9 e, posteriormente, determinou-se a melhor combinação de parâmetros para a rugosidade superficial e para a taxa de produção. Após cada ensaio, faz-se a medição da rugosidade superficial e, posteriormente, calculou-se a taxa de material removido do bloco de aço cilíndrico.

Segundo o Método de Taguchi conclui-se que o ensaio 7 corresponde ao menor valor da rugosidade superficial ($0,66 \mu\text{m}$) e apresenta o valor mais elevado da razão S/N (3,61 dB) enquanto o ensaio 9 contém o valor mais elevado de rugosidade superficial ($5,66 \mu\text{m}$). No que diz respeito à taxa de produção o ensaio que corresponde ao maior valor é o ensaio 9 ($11,25 \text{ cm}^3/\text{min}$) e em contrapartida o ensaio 1 originou o menor valor ($0,50 \text{ cm}^3/\text{min}$).

Segundo a Análise Relacional de Grey, permite determinar a melhor combinação de parâmetros. A melhor combinação obtida é A3B1C3, ou seja, $V_c = 150 \text{ [m/min]}$, $f_z = 0,1 \text{ [mm/rot]}$ e $a_p = 0,5 \text{ [mm]}$.

Palavras Chaves: máquinas CNC, rugosidade superficial, torneamento, bloco de aço cilíndrico, taxa de produção

Abstract

These days, increasing productivity in the shortest possible time and with high quality is undoubtedly one of the biggest challenges for the industry. In this sense, the industry has very often turned to CNC machines, since these equipment's work automatically being able to reach a high precision, with a high performance and yield.

In the present dissertation a study of the surface roughness and the production rate of DIN CK45 was carried out, where the effects of three parameters in the turning process (cutting speed, feed speed and penetration) are analyzed. For this study we use the Taguchi method and the Gray Relational Analysis.

The Taguchi method was used to reduce the number of possible combinations and, consequently, the number of tests to be performed. This method is well known in the industrial sector where it is used for quality control. It presents interesting concepts such as robustness and loss of quality, being very useful to identify variations of the production system during the industrial process, quantifying the variation and eliminating the undesirable factors. Gray Relational Analysis was used to determine the optimal combination of parameters for the control elements set.

With the Taguchi method it was possible to determine the matrix of the experimental tests carried out in this work, an orthogonal matrix L9 was constructed, and later the best combination of parameters for the surface roughness and the production rate was determined. After each test, the surface roughness is measured, and the rate of material removed from the cylindrical steel block is then calculated.

According to the Taguchi method it is concluded that the test 7 corresponds to the lowest value of the surface roughness ($0.66 \mu\text{m}$) and presents the highest value of the S / N ratio (3.61 dB) while test 9 contains the highest value high surface roughness ($5.66 \mu\text{m}$). As regards the production rate, the test which corresponds to the highest value is test 9 ($11.25 \text{ cm}^3/\text{min}$) and in contrast test 1 gave the lowest value ($0.50 \text{ cm}^3/\text{min}$).

According to the Gray Relational Analysis, it allows to determine the best combination of parameters. The best combination obtained is A3B1C3, that is, $V_c = 150 \text{ [m/min]}$, $f_z = 0,1 \text{ [mm/rot]}$ e $a_p = 0,5 \text{ [mm]}$.

Keywords: CNC machines, surface roughness, turning, cylindrical steel block, production rate

Índice

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO.....	1
1.2. OBJETIVOS.....	2
1.3. ORGANIZAÇÃO DOS CAPÍTULOS	2
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	5
2.1. PROCESSOS DE MAQUINAGEM	5
2.2. TORNEAMENTO.....	8
2.3. TIPOS DE TORNO	9
2.3.1. <i>Tornos de Pontos ou Paralelos</i>	10
2.3.2. <i>Tornos de torneamento no ar ou de refrentar</i>	11
2.3.3. <i>Tornos Verticais</i>	12
2.3.4. <i>Tornos Revólver</i>	12
2.3.5. <i>Tornos Automáticos</i>	13
2.4. MATERIAIS PARA FERRAMENTAS DE CORTE.....	14
2.5. RUGOSIDADE SUPERFICIAL.....	23
2.5.1. <i>Rugosímetro</i>	25
2.6. TAXA DE PRODUÇÃO	25
2.7. MÉTODO DE TAGUCHI	25
2.7.1. <i>Função perda na qualidade de Taguchi</i>	26
2.7.2. <i>Taguchi e razão sinal-ruído</i>	27
2.8. ANÁLISE RELACIONAL DE GREY	28
3. ENSAIOS EXPERIMENTAIS.....	31
3.1. MATRIZ ORTAGONAL L9 PARA OS ENSAIOS EXPERIMENTAIS SEGUNDO O MÉTODO DE TAGUCHI	31
3.2. ENSAIOS E MATERIAL UTILIZADO.....	33
4. RESULTADOS OBTIDOS.....	37
4.1. RESULTADOS OBTIDOS SEGUNDO TAGUCHI	37
5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	41
5.1. MÉTODO DE TAGUCHI	41
5.1.1. <i>Razão Sinal-Ruído</i>	41

5.2.	ANÁLISE RELACIONAL DE GREY	45
5.3.	APARAS OBTIDAS NOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS	50
6.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	51
6.1.	CONCLUSÕES.....	51
6.2.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	52
	REFERÊNCIAS.....	53
	ANEXOS.....	57

Lista de figuras

<i>Figura 1- Serragem</i>	5
<i>Figura 2 – Furação</i>	6
<i>Figura 3 – Torneamento</i>	6
<i>Figura 4 – Aplainamento</i>	6
<i>Figura 5 – Fresagem</i>	7
<i>Figura 6 – Retificação</i>	7
<i>Figura 7 – Electroerosão</i>	7
<i>Figura 8 – Operação de torneamento cilíndrico exterior</i>	8
<i>Figura 9 – Algumas operações realizáveis no torno</i>	9
<i>Figura 10 – Torno de ponto ou paralelo</i>	10
<i>Figura 11 – Torno de torneamento no ar ou de refrentar</i>	11
<i>Figura 12 – Torno Vertical</i>	12
<i>Figura 13 – Torno Revólver</i>	12
<i>Figura 14 – Torno CNC (3 eixos)</i>	13
<i>Figura 15 – Campo de aplicação de diversos materiais para ferramentas de corte</i>	15
<i>Figura 16 - Exemplos de matérias das ferramentas de corte fabricadas em metal duro revestido</i>	20
<i>Figura 17 – Exemplos de matérias das ferramentas de corte fabricadas em “Cermets”</i> ..	21
<i>Figura 18 – Rugosímetro</i>	25
<i>Figura 19 - Genichi Taguchi</i>	26
<i>Figura 20 – Gráfico função perda de Taguchi</i>	26
<i>Figura 21 – Serra elétrica</i>	33
<i>Figura 22 – Torno convencional</i>	34
<i>Figura 23 – Bloco de aço cilíndrico</i>	34
<i>Figura 24 – Medição da Rugosidade Superficial</i>	35
<i>Figura 25 – Quatro posições de medição no bloco de aço cilíndrico</i>	35
<i>Figura 26 – Rugosímetro utilizado</i>	36
<i>Figura 27 – Torno de CNC - Concept Turn 260 T</i>	36
<i>Figura 28 - Gráfico da rugosidade superficial</i>	38
<i>Figura 29 - Gráfico da taxa de produção</i>	39

<i>Figura 30 – Valor médio S/N para os diferentes parâmetros relativamente à rugosidade superficial.....</i>	43
<i>Figura 31 - Valor médio S/N para os diferentes parâmetros relativamente à taxa de produção.....</i>	45
<i>Figura 32 – Análise Relacional de Grey.....</i>	50
<i>Figura 33 - Aparas de dois ensaios experimentais. A-Ensaio 3. B-Ensaio 16.</i>	50
<i>Figura 34 - Dados técnicos da Concept Turn 260 T.....</i>	57
<i>Figura 35 - Bloco de aço cilíndrico exibido em solidworks</i>	60
<i>Figura 36 - Bloco de aço cilíndrico apresentado no MasterCam</i>	60
<i>Figura 37 – Dimensões do material.....</i>	61
<i>Figura 38 – Ferro de desbaste</i>	61
<i>Figura 39 – Feed rate; Spindle speed</i>	62
<i>Figura 40 – Depth of cut</i>	63
<i>Figura 41 – Simulação no MasterCam®.</i>	63
<i>Figura 42 – Gerar os códigos dos ensaios experimentais</i>	64

Lista de tabelas

<i>Tabela 1 - composição química e dureza mínima dos aços rápidos, T e M, mais utilizados segundo a AISI</i>	16
<i>Tabela 2 - Características da deposição CVD e PVD</i>	17
<i>Tabela 3 – Composição química e características físicas dos carbonetos sinterizados segundo a ISO</i>	19
<i>Tabela 4 – Combinações de revestimentos mais vulgares</i>	19
<i>Tabela 5 – Propriedades dos ultraduros</i>	23
<i>Tabela 6 – Classe de rugosidade</i>	24
<i>Tabela 7 – Valores de referência do fabricante</i>	31
<i>Tabela 8 – Valores dos diferentes níveis para cada parâmetro</i>	32
<i>Tabela 9 – Matriz ortogonal L9 segundo Taguchi</i>	32
<i>Tabela 10 – Matriz L9 segundo Taguchi com os valores dos parâmetros escolhidos</i>	32
<i>Tabela 11 – Composição química do DIN CK45</i>	33
<i>Tabela 12 - Valores obtidos nos ensaios para a rugosidade superficial</i>	37
<i>Tabela 13 - Valores obtidos nos ensaios para a taxa de produção</i>	38
<i>Tabela 14 – Valor da razão S/N da rugosidade superficial</i>	42
<i>Tabela 15 - Abreviaturas para os vários níveis dos parâmetros</i>	42
<i>Tabela 16 – Resultados S/N para a rugosidade superficial</i>	43
<i>Tabela 17 - Valor da razão S/N da taxa de produção</i>	44
<i>Tabela 18 – Resultados S/N para a taxa de produção</i>	45
<i>Tabela 19 – Valores da razão Sinal-Ruido</i>	46
<i>Tabela 20 - Valores da razão S/N normalizados para a análise relacional de Grey</i>	47
<i>Tabela 21 - Coeficiente relacional de Grey</i>	48
<i>Tabela 22 - Grau relacional de Grey e a devida ordem</i>	49
<i>Tabela 23 - Tabela de resposta para o grau relacional de Grey</i>	49
<i>Tabela 24 - Valores totais da medição da rugosidade superficial</i>	58

Acrónimos

AISI – American Iron and Steel Institute
 Al_2O_3 – Alumina
ANOVA – Análise estatística da variância
 a_p - Penetração
CAM - Computer Aided Manufacturing
CN - Comando Numérico
CNC - Controlo numérico computadorizado
CVD – Deposição química em fase de vapor
 D - Débito de uma ferramenta durante a sua vida útil
 f_z – Velocidade de avanço
GRA – Grey Relational Analysis
ISO - Internacional Organization for Standardization
 L_c - Percurso de corte
MRR - Taxa de Remoção de Material
NbC – Carboneto de Níóbio
PVD – Deposição física em fase de vapor
 R_a - Rugosidade média
 S - Secção da apara
SiC - Carboneto de silício
 Si_3N_4 - Nitreto de silício
 S/N – Razão Sinal-Ruído
 T – Tempo de vida da ferramenta de corte
 t_c - Tempo de corte
TaC – Carboneto de Tântalo
TiC – Carboneto de Titânio
TiCN - Carbonitreto de titânio
TiN – Nitreto de Titânio
 T_p - Taxa de produção
 u - Índice de produtividade
 u' - Índice de longevidade

VB - Desgaste na face de saída

V_C – Velocidade de corte

V_4C_3 – Carboneto de Vanádio

WC – Carboneto de Tungsténio

Y_2O_3 - óxido de ítrio

1. Introdução

1.1. Enquadramento

No mundo global a chave da competitividade entre as empresas é a capacidade de cada uma se adaptar e distinguir-se conforme os mercados exigem[1].

A importância dos processos de maquinagem, também conhecidos por arranque de apara, tem vindo a ser evidenciada ao longo do tempo, por isso, as operações de maquinagem são o processo mais versátil e mais comum para a obtenção de geometrias complexas de elevada precisão e numa vasta gama de materiais [2].

Na indústria, existem determinados requisitos técnicos, tais como, a exigência de acabamento de superfície de elevada qualidade, a necessidade de remoção de grandes quantidades de material de forma a obter geometrias complexas, bem como, elevada precisão dimensional. No entanto, há também requisitos do ponto de vista económico uma vez que o tempo inerente ao processo limita a cadência produtiva no meio industrial. É, assim, importante realizar estudos que permitam analisar o comportamento quer do material quer da ferramenta quando sujeitas a determinadas condições de corte. O objetivo principal dos estudos de maquinabilidade é o de relacionar as condições de corte (velocidade de corte, velocidade de avanço, penetração, tipo de material, geometria da ferramenta, etc.) com alguns aspetos que condicionam o processo (forças de corte, desgaste da ferramenta, acabamento superficial, precisão dimensional, custo e taxa de produção) [3].

Dadas as constantes mudanças que ocorrem no cenário industrial, a aplicação de técnicas de otimização nos processos de corte por arranque de apara é essencial para responder à constante procura de produtos de qualidade. No processo de corte por arranque de apara é possível afirmar que é de extrema importância obter peças com elevada qualidade no menor tempo possível. Estas técnicas de otimização são consideradas vitais para um melhoramento contínuo na qualidade dos produtos e processos e incluem a criação de modelos de relação entre parâmetros do processo e determinação das condições ótimas de corte [4].

Para obter a melhor combinação dos parâmetros é necessário testar um elevado número de combinações. As técnicas de otimização são uma solução interessante para minimizar o número de combinações de ensaios experimentais. Nas últimas décadas, foram desenvolvidas muitas técnicas de otimização aplicadas à maquinagem [5], sendo as mais

utilizadas a Lógica Fuzzy [6], os Algoritmos Genéticos [7], o Método de Taguchi [8], a Análise Relacional de Grey [9] e o Método de Resposta de Superfície[10]. Neste trabalho foram implementadas a técnica de Taguchi e a Análise Relacional de Grey para a otimização da rugosidade superficial e da taxa de produção.

O Método de Taguchi [11] possibilita a definição de matrizes ortogonais de experiências cuja combinação entre diferentes parâmetros permite a determinação da combinação ótima para um determinado fator de controlo, exemplo a rugosidade [12]. Este método está, normalmente, associado a ferramentas estatística, como a análise de variância (ANOVA) que permite modelar alguma incerteza dos resultados experimentais do modo a estimar resultados futuros.

Na Análise Relacional de Grey os parâmetros são avaliados de 0 a 1 perante a sua importância, possibilitando assim, a descoberta da melhor combinação de parâmetros. Esta ferramenta tem sido muito usada nos últimos anos, combinada com o Método de Taguchi [13].

1.2. Objetivos

O principal objetivo desta dissertação é a determinação da combinação ótima para minimizar a rugosidade superficial e maximizar a taxa de material removido de um bloco de aço de construção com geometria cilíndrica.

Para efetuar esses estudos utilizaram-se dois métodos distintos de otimização, o Método de Taguchi e a Análise Relacional de Grey. Pelo Método de Taguchi são definidos os parâmetros de maquinagem, assim como os seus níveis, bem como a matriz ortogonal que indica as combinações para os ensaios experimentais. Com a Análise Relacional de Grey, utiliza-se os valores obtidos em Taguchi e, de acordo com a importância dada aos fatores a estudar (rugosidade superficial e taxa de produção), é possível determinar qual a melhor combinação de parâmetros.

1.3. Organização dos capítulos

A dissertação encontra-se organizada em 6 capítulos, de forma a facilitar a sua compreensão. O conteúdo destes pode ser sintetizado da seguinte forma:

- O **Capítulo 1 “Introdução”**, tem a finalidade apresentar um enquadramento do trabalho, fazendo referência aos principais objetivos da dissertação e uma breve descrição da sua estrutura.

-
- O **Capítulo 2 “Fundamentos Teóricos”**, visa apresentar alguns fundamentos teóricos consideradas revelantes para a correta compreensão do estudo apresentado nesta dissertação. No início, apresenta-se uma descrição dos principais processos de maquinagem (ou corte por arranque de apara), dando mais importância ao torneamento. Seguindo-se os materiais das ferramentas de corte, os dois temas em estudo: a rugosidade superficial e a taxa de produção e, por fim, os métodos de otimização utilizados no trabalho, o Método de Taguchi e a Análise Relacional de Grey.
 - O **Capítulo 3 “Ensaio Experimentais”**, descreve a configuração experimental utilizada e os ensaios experimentais realizados no decorrer deste trabalho pelo método de Taguchi
 - O **Capítulo 4 “Resultados Obtidos”**, apresenta os resultados obtidos de cada ensaio experimental relativamente à rugosidade superficial e à taxa de produção.
 - O **Capítulo 5 “Análise e Discussão dos Resultados”**, é dedicado à análise dos resultados obtidos e são efetuadas breves considerações aos mesmos.
 - O **Capítulo 6 “Conclusões e sugestões para trabalhos futuros”**, são apresentadas as conclusões gerais do presente trabalho e apresentam-se também algumas propostas para trabalhos futuros.
 - Por último, é mencionada toda a bibliografia que serviu de suporte à elaboração desta dissertação e os anexos.

2. Fundamentos Teóricos

Este capítulo visa apresentar alguns fundamentos teóricos consideradas revelantes para a correta compreensão do estudo apresentado nesta dissertação. No início, apresenta-se uma breve descrição dos principais processos de maquinagem (corte por arranque de aparas), dando mais importância ao torneamento. Seguindo-se os materiais das ferramentas de corte, a rugosidade superficial e, por fim, os métodos de otimização utilizados no trabalho efetuado no âmbito desta dissertação, o Método de Taguchi e a Análise Relacional de Grey.

2.1. Processos de Maquinagem

Maquinagem é um termo que abrange vários processos de fabrico desenvolvidos para remover o material indesejado, geralmente sob a forma de aparas.

A maquinagem é usada para converter peças de fundição, forjamento ou mesmo blocos de metal nas geometrias pretendidas, com um bom acabamento superficial e um grande rigor dimensional [14], [15].

Os processos de maquinagem por arranque de aparas mais comuns são [15]:

- Serragem
- Furação
- Torneamento
- Aplainamento
- Fresagem
- Retificação
- Electro-erosão

A serragem (Figura 1) é uma operação que consiste no seccionamento de peças através de ferramentas multicortantes (serras) [16].

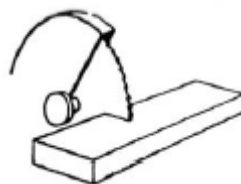


Figura 1- Serragem [15]

A maior parte das peças de construção apresentam furos. Daí a importância da operação de furar ou furação (Figura 2). A furadora, para além de furar, executa essencialmente operações de mandrilagem e roscagem [15], [17].

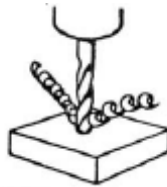


Figura 2 – Furação [15]

O torno é uma máquina-ferramenta utilizada na produção de peças com forma de corpos de revolução.

O torno permite as seguintes operações: torneamento de superfícies cilíndricas (Figura 3) ou cónicas, facejamento de superfícies planas, perfilhamento usando ferramentas apropriadas, filetagem [15].

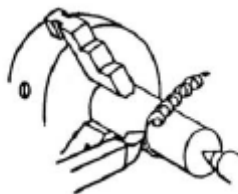


Figura 3 – Torneamento [15]

O aplainamento (Figura 4) é a operação que tem por fim obter superfícies planas [17].

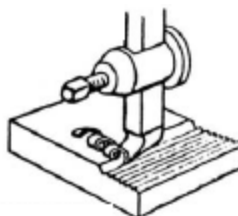


Figura 4 – Aplainamento [15]

A fresadora é uma máquina-ferramenta que para além das operações de fresagem (Figura 5), é ainda comum a realização de operações de furação, mandrilagem com mandril,

com barra ou com cabeça de mandrilar, e roscagem com macho. Através da operação de fresagem podem obter-se peças com superfícies planas, com ranhuras ou entalhes, dentes, etc. [16].

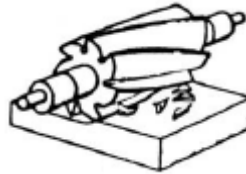


Figura 5 – Fresagem [15]

A retificação (Figura 6) é um processo de fabrico por arranque de apara que se utiliza para melhorar o acabamento e aumentar a precisão dimensional das peças. Como ferramentas de corte utiliza-se um disco rotativo a que se dá o nome de mó [15].

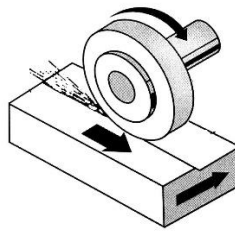


Figura 6 – Retificação [16]

A electroerosão (Figura 7) tem assumido um papel relevante em diferentes sectores da produção mecânica, nomeadamente em aplicações que utilizam materiais difíceis de maquinar (elevada dureza) e nas situações em que a finura de pormenor torna impraticável o corte por arranque de apara (torneamento, fresagem, etc.) [15], [18].

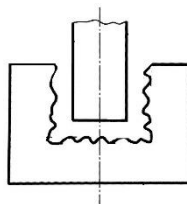


Figura 7 – Electroerosão [16]

2.2. Torneamento

O torneamento ou operação de torneiar é uma operação de corte por arranque de aparado na qual a peça roda em torno do eixo da máquina (torno) ao mesmo tempo que uma ferramenta de corte retira material da periferia, de maneira a transformá-la numa peça, conforme se pode observar na seguinte Figura 8 [16], [17].

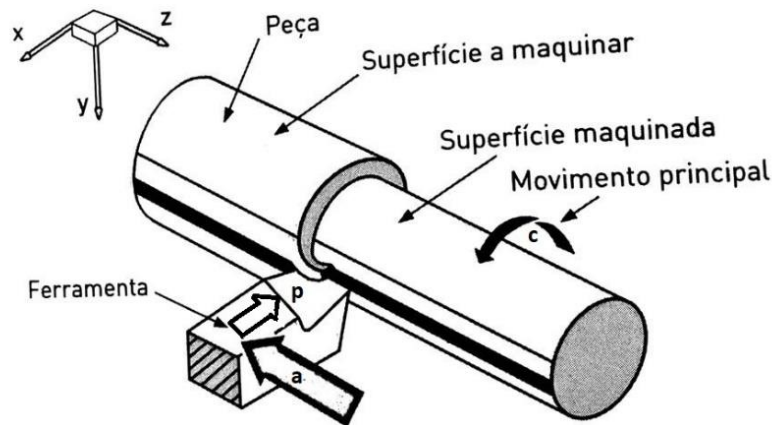


Figura 8 – Operação de torneamento cilíndrico exterior [16]

Na Figura 8 está representado, em esquema, o torneamento de uma peça cilíndrica onde é possível observar os movimentos de uma operação de torneamento [15], [17]:

- Movimento Principal – rotação da peça (corte);
- Movimentos Auxiliares – Avanço da Ferramenta e Penetramento da Ferramenta.

O movimento de rotação, realizado pela peça (indicado pela seta c) constitui o movimento de corte, o movimento da ferramenta, para manter na sua frente nova porção de material (indicado pela seta a) designa-se movimento de avanço e por fim o movimento no sentido de penetrar na peça (indicado pela seta p) chama-se movimento de penetramento [17].

O movimento de corte é o movimento principal da máquina, mas é sempre um movimento simples, sendo que dependendo do processo de maquinagem poderá ser:

- Um movimento de rotação da ferramenta;
- Um movimento de rotação da peça;
- Um movimento de translação, no caso de nem a peça nem a ferramenta se encontrarem em rotação.

O movimento de avanço é o que corresponde a uma mudança de posição relativa da peça e da ferramenta, durante a geração de uma superfície de corte. O movimento de avanço pode ser composto, capaz de se decompor nos movimentos simples e correspondentes.

Finalmente considera-se o movimento de penetramento, o que corresponde à espessura da camada de material a retirar durante o corte [16].

Através do torneamento é possível obter superfícies cilíndricas ou cónicas, facejamento de superfícies planas, perfilamento usando ferramentas apropriadas e a filetagem. Para além destas operações, é ainda possível efetuar furação e roscagem. A Figura 9 ilustra as diversas operações efetuadas no torno (facejar, torneiar cónico, perfilar, chanfrar, sangrar, roscar a buril, torneamento int. cilíndrico, furação e recartilhar), bem como a forma de atuação das respetivas ferramentas [14], [16].

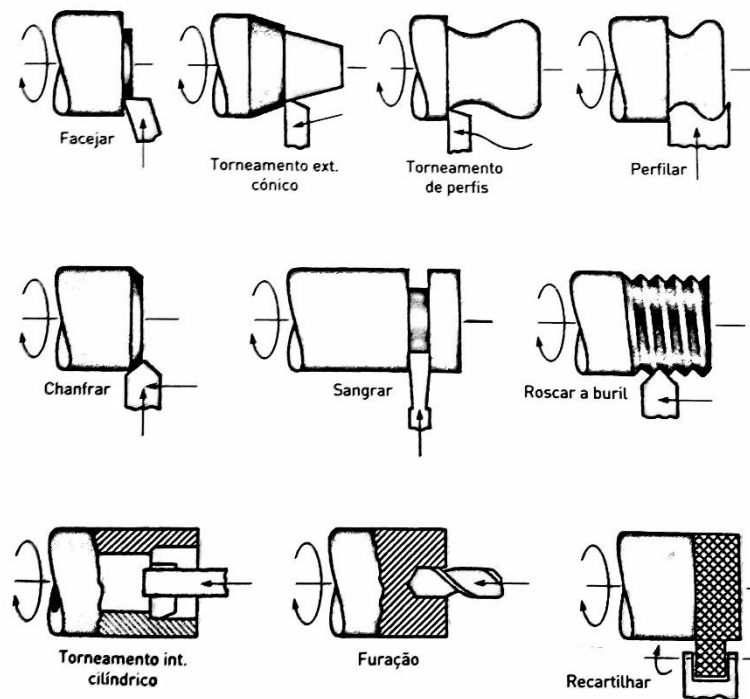


Figura 9 – Algumas operações realizáveis no torno [16]

2.3. Tipos de torno

Para os diversos trabalhos de torneamento existem diversos tipos de tornos que podem agrupar-se no seguinte modo [17], [19]:

- Tornos de Pontos ou Paralelos
- Tornos de torneamento no ar ou de refrentar
- Tornos Verticais

- Tornos Revólver
- Tornos automáticos: - Comando Numérico (CN)
- Comando Numérico Computorizado (CNC)

2.3.1. Tornos de Pontos ou Paralelos

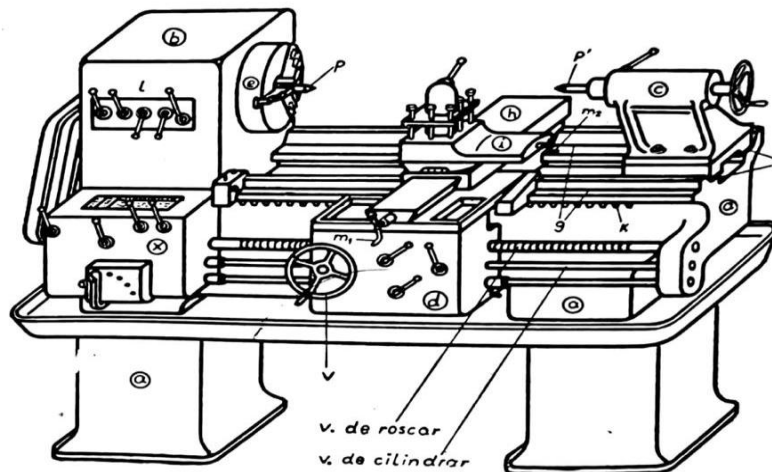


Figura 10 – Torno de ponto ou paralelo [17]

Os tornos de pontos ou paralelos (Figura 10) são caracterizados por a peça a maquinar ser apertada entre os pontos p e p' , na qual o ponto p é designado por bucha e o p' de contraponto, que são duas pontas cónicas e materializam o eixo da peça. Este tipo de tornos presta-se especialmente para cilindrar e roscar peças de grande comprimento em relação ao diâmetro. As peças de menores dimensões só necessitam de ser fixas pelo ponto p , neste caso, na bucha [16], [17].

São os tornos mais comuns nas oficinas metalomecânicas e constituem o tipo genérico dos tornos primitivos [17].

2.3.2. Tornos de torneamento no ar ou de refrentar

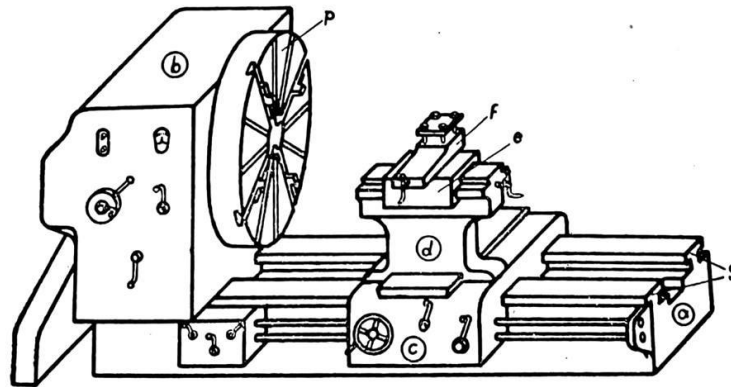


Figura 11 – Torno de torneamento no ar ou de refrentar [17]

Este torno de torneamento no ar (Figura 11) é concebido para maquinar peças de grande diâmetro e pequeno comprimento e, especialmente, para refrentar. Caracterizados por a peça a trabalhar ser montada num prato p , rodando, portanto, fixa só por um dos extremos.

O que deu origem ao aparecimento destes tornos, foi a necessidade de grande altura do veio principal, em relação ao barramento (a), para peças de grande diâmetro e pequeno comprimento, como rodas. Este fato, nos tornos de pontos, conduzia a máquinas de construção muito cara [17].

2.3.3. Tornos Verticais

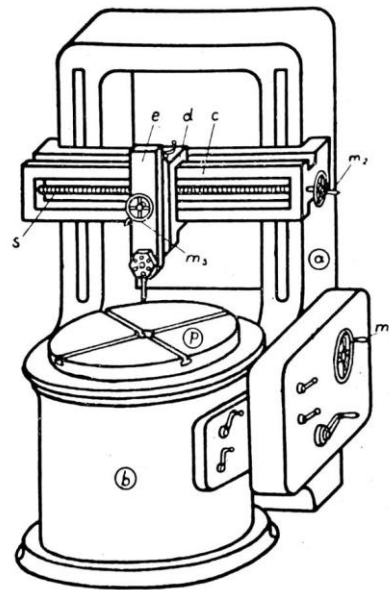


Figura 12 – Torno Vertical [17]

O que caracteriza os tornos verticais (Figura 12) é o facto de a peça a maquinar ser montada num prato p , de eixo vertical, rodando a peça também com o seu eixo na vertical.

Estes tornos são especialmente adequados para trabalhar peças pesadas, pois os outros tipos de tornos não se adaptam ao trabalho com estas peças pelos esforços a que o seu veio ficaria submetido, assim torna-se mais fácil, para o veio, suportar o peso da peça na posição vertical.

O prato p , ajusta no veio e apoia em rolamentos assentes na base da máquina, letra b [17].

2.3.4. Tornos Revólver

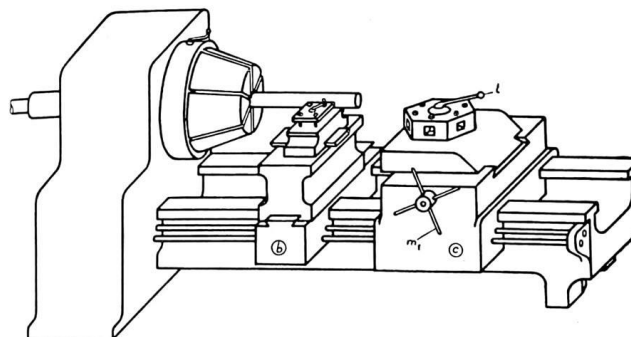


Figura 13 – Torno Revólver [17]

Os tornos revólver (Figura 13) são especialmente concebidos para o fabrico de peças pequenas, em serie e que possam fabricar-se a partir duma barra.

São tornos de configuração semelhante à dos tornos paralelos, tendo como características o facto do porta-ferramentas (*l*) ter a forma de torre giratória, à qual se podem adaptar várias ferramentas para permitir a realização de várias operações por simples movimento giratório da torre porta-ferramenta.

O veio principal é oco para a passagem da barra de fabrico das peças e tem montado no seu extremo um suporte de garras para a fácil fixação da barra durante as operações.

2.3.5. Tornos Automáticos

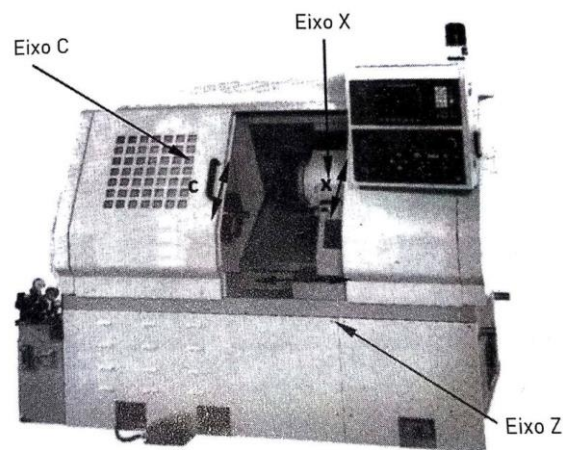


Figura 14 – Torno CNC (3 eixos) [16]

Os tornos automáticos (Figura 14) são tornos do tipo revólver em que se consegue de forma automática colocar na devida posição as sucessivas ferramentas na realização das operações e avanço do material, isto é, sem intervenção do operador. Este automatismo consegue-se por jogos de alavancas, engrenagens e discos com ressaltos, comandados pelo veio principal, os quais atuam sobre os porta-ferramentas, manobrando-os na devida altura. Há uma grande variedade de tipos de comando e em alguns tipos modernos os comandos são eletrónicos.

Compreende-se a vantagem destes comandos automáticos não só porque se economiza a mão-de-obra, pois nestas condições um operário pode tomar conta de vários tornos (apenas verificando seu funcionamento e alimenta-os de material para as peças) mas ainda porque, sendo as operações automáticas, há mais rigor na sua realização.

Estes tornos, como é compreensível, são caros e, portanto, apenas se podem empregar para o fabrico de peças em grande serie [17].

2.4. Materiais para ferramentas de corte

A escolha de matérias adequados à execução de ferramentas de corte por arranque de apra é importante na realização de uma operação de maquinagem eficiente, não só a nível tecnológicos, mas também a nível económicos. Uma escolha errada do material pode conduzir à deterioração da ferramenta e da peça a fabricar, originando custos de produção desnecessários [20].

A obtenção de um material com as características adequadas ao fabrico de ferramentas de corte apenas é possível após uma análise cuidada e ponderada de um conjunto de propriedades físicas (mecânicas) e químicas e sua evolução com a temperatura, requeridas pelas funções a desempenhar, das quais se destacam [18]:

- Tensão de rotura (à tração e aos esforços transversos)
- Tensão limite de elasticidade
- Dureza
- Tensão limite de fadiga
- Adesão
- Afinidade química (solubilidade)
- Difusão
- Oxidação

É possível, assim, estabelecer uma relação entre estas propriedades, com o comportamento da ferramenta durante o corte por arranque de apra. As principais características das ferramentas de corte, sendo em maior ou menor grau, são [18]:

- elevada resistência ao desgaste
- elevada dureza a frio e a quente
- elevada tenacidade
- baixo coeficiente de atrito
- elevada condutividade térmica
- baixo coeficiente de dilatação

O material para ferramentas devem combinar uma elevada resistência à deformação do gume com uma elevada resistência ao desgaste, a frio e a quente, e uma tenacidade apropriada às descontinuidades de corte. Porém, é impossível satisfazer estas condições

simultaneamente num só material pois, muitas vezes, são contraditórias. Posto isto, como não é possível a obtenção deste material “ideal”, é aconselhado seleccionar um material que apresente as características mais adequadas para a situação em causa, Figura 15 [21].

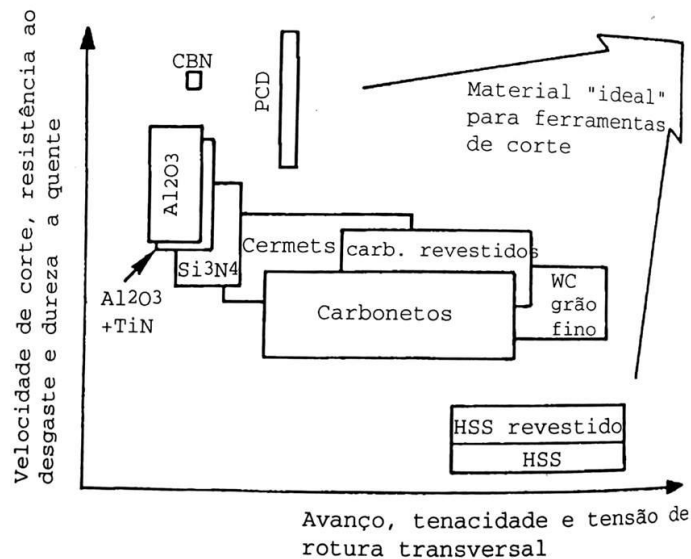


Figura 15 – Campo de aplicação de diversos materiais para ferramentas de corte [20]

Os metais para as ferramentas de corte por arranque de aparas podem ser agrupados da seguinte maneira[22]:

- Aços rápidos
- Carbonetos sinterizados (metal duro)
- “Cermets”
- Cerâmicos
- Ultraduros

- **Aços rápidos**

O principal motivo de utilização de aços rápidos é a combinação de resistência ao desgaste e a sua tenacidade[20]. Segundo a AISI (American Iron and Steel Institute), os aços rápidos são classificados em duas categorias: aços rápidos ao tungsténico (Grupo T) e aços rápidos ao molibdénio (Grupo M) [23].

Os aços rápidos ao tungsténio contêm, além deste elemento de liga (12 a 18%), crómio (4%), vanádio (1 a 5%) e, por vezes, cobalto (5 a 12%). Por sua vez, os aços rápidos ao molibdénio (3,5 % e 9,5%) têm adições de crómio (4%), vanádio (1 a 4%), tungsténio (1,75

a 6%) e cobalto (5 a 8%) [18]. A Tabela 1 apresenta a composição química e a dureza mínima dos aços rápidos, T e M, mais utilizados segundo a AISI.

Tabela 1 - composição química e dureza mínima dos aços rápidos, T e M, mais utilizados segundo a AISI [18]

QUALIDADES	Composição química (% peso) aproximada						Dureza (HV)
	C	Cr	Mo	W	V	Co	Min
Ao tungsténio							
T1	0,75	4	-	18	1	-	823
T2	0,8	4	-	18	2	-	823
T4	0,75	4	-	18	1	5	849
T5	0,8	4	-	18	2	8	869
T6	0,8	4,5	-	20	1,5	15	969
T15	1,5	4	-	12	5	5	890
Ao Molibdénio							
M1	0,8	4	8	1,5	1	-	823
M2	0,85	4	5	6	2	-	836
M4	1,3	4	4,5	5,5	4	-	849
M15	1,55	4,5	4,1	6,5	5	5	869
M34	0,9	4	8	2	2	8	869
M42	1,10	3,75	9,5	1,5	1,15	8	897

Pode afirmar-se que [18]:

- Os aços rápidos com cobalto são recomendados para maquinagem em desbaste, a elevada velocidade, devido à sua maior dureza a quente. Neste grupo de aços rápidos, para ferramentas de elevado poder de corte utilizam-se normalmente: T5, T6 e T15.
- O crómio melhora o compromisso entre dureza e tenacidade e é um dos responsáveis pela elevada temperabilidade dos aços rápidos, tornando possível o seu endurecimento completo em seções espessas.
- O vanádio melhora a dureza a quente do material.
- Finalmente, no grupo dos aços rápidos ao molibdénio, o aço rápido M2 é utilizado em uso corrente, tem elevada tenacidade e baixo custo, utilizado em ferramentas de geometria complexa, em cortes ligeiros e com menores velocidades de corte e, ainda, o M42 é, normalmente, utilizado para operações de desbaste.

Atualmente, as ferramentas de aço rápido têm sido sujeitas a desenvolvimentos com o intuito de aumentar a dureza superficial e a resistência ao desgaste. Esses desenvolvimentos consistem em fabricar ferramentas através da pulverometalurgia (prensagem e sinterização)

e o segundo progresso consiste em revestimentos através de deposição química em fase de vapor (CVD) e deposição física em fase de vapor (PVD) [18].

A pulverometalurgia é aplicada na produção de algumas qualidades de aço, utilizando processos de difusão realizados a altas pressões e temperaturas elevadas, e usando pós metálicos de elevada pureza, obtendo assim aços isentos de segregações[3]. As partículas desses pós possuem de 50 a 500 [μm] de diâmetro. A via da pulverometalurgia permite um fabrico de ferramentas de corte quase com a forma final, poupando operações de maquinagem [18].

Os revestimentos são formados por componentes de elevada resistência ao desgaste, dureza a quente e estabilidade química. Eles melhoram as propriedades das ferramentas, preservando a tenacidade do aço rápido. Os tipos de revestimentos usados são: o nitreto de titânio (TiN), carboneto de titânio (TiC), carboneto de tungstênio (WC) e alumina (Al_2O_3)[18].

A Tabela 2 representa as características mais relevantes dos processos de revestimento, CVD e PVD.

Tabela 2 - Características da deposição CVD e PVD [18]

Caraterísticas da Deposição Química em Fase de Vapor (CVD)	Caraterísticas da Deposição Física em Fase de Vapor (PVD)
• Altas temperaturas de processamentos	• Temperaturas de processamento de aproximadamente 500°C, não afetando assim o substrato de aço rápido tratado termicamente
• Ligação substrato/revestimento insatisfatória	• Boa ligação substrato/revestimento
• A espessura não é uniforme	• Espessura uniforme
• Elevados custos das instalações de deposição (CVD)	

O processo de revestimento, deposição química em fase de vapor (CVD) é inadequado perante as caraterísticas referidas na tabela anterior. Enquanto a deposição física em fase de vapor (PVD) possuiu as seguintes vantagens[18]:

- Aumento da vida de ferramentas para as mesmas condições de corte.
- Aumento da velocidade de corte, para a mesma vida, implicando uma diminuição do tempo de corte e melhoria do acabamento superficial das peças maquinadas.
- Coeficiente de atrito menor, levando a uma menor tendência à adesão, corte mais estável com forças de corte menores e vibrações menores.

A limitação no uso das ferramentas em aço rápido nos sistemas de produção modernos prende-se com o facto das velocidades de corte e dos avanços admissíveis se situarem com valores muito inferiores aos possíveis carbonetos sinterizados. No entanto, no caso de ferramentas de forma complexa, como é o caso das brocas e algumas fresas, não parece possível eliminar completamente as ferramentas em aço rápido [20].

- **Carbonetos sinterizados (metal duro)**

As ferramentas de carbonetos sinterizados são as mais utilizadas na indústria, isto devido à sua variedade de combinações de dureza a quente e frio, resistência ao desgaste e à tenacidade. Estas ferramentas são obtidas através da pulverometalurgia (metalurgia em pó) e são constituídas por um carboneto muito duro e por um elemento aglomerante. O carboneto de tungsténio (WC) que pode mostrar-se sozinho ou associados com outros carbonetos, carboneto de titânio (TiC), carboneto de vanádio (V_4C_3), carboneto de nióbio (NbC) e o carboneto de tântalo (TaC). Estes carbonetos garantem a dureza a quente e a resistência ao desgaste. Em relação ao elemento aglomerante, normalmente é o cobalto pois permite a união das partículas duras (carbonetos) e é responsável pela tenacidade do material[20].

Segundo a ISO (Internacional Organization for Standardization) os carbonetos sinterizados (metal duro) podem ser agrupados em três categorias [15].

- Grupo P – empregues na maquinagem de metais e ligas ferrosas que apresentam aparas longas e dúcteis (apara contínua e plástica).
- Grupo M – destinam-se à maquinagem de metais e ligas ferrosas que apresentam aparas longas ou curtas (é um grupo de transição).
- Grupo K – destinam-se à maquinagem de metais e ligas ferrosas que apresentam aparas fragmentadas e materiais não metálicas.

A Tabela 3 apresenta a composição química e as principais propriedades físicas e mecânicas dos carbonetos sinterizados segundo a ISO correspondente aos grupos P, M e K.

Os carbonetos sinterizados revestidos, consistem num substrato com a tenacidade adequada à base de WC + Co e, por vezes, WC + TiC + Co e de um revestimento muito resistente ao desgaste de carbonetos de Titânio (TiC) com uma espessura de ordem dos 5 a 7 μm [18]. São introduzidas técnicas de revestimentos múltiplas (deposição em fase de vapor) em que se promove uma maior aderência do revestimento ao substrato. São exemplos

destes revestimentos o nitreto de titânio (TiN), carbonitreto de titânio (TiCN) e a alumina (Al_2O_3), entre outros [24].

Tabela 3 – Composição química e características físicas dos carbonetos sinterizados segundo a ISO [20]

Designação	Composição química aproximada (%)			Características físicas (Mecânicas)				
	WC	TiC + TAC	Co	Massa vol. (g/cm^3)	Dureza Vickers (HV)	Tensão de rotura transversal (MPa)	Módulo de Young (GPa)	Coefic. de dilatação térmica ($\times 10^{-6}/K$)
P01	30	64	6	7,2	1500	750	-	-
P10	55	36	9	10,4	1600	1400	5,2	6,5
P20	76	14	10	11,9	1500	1500	5,4	6,6,00
P25	73	19	8	12,5	1500	1700	5,5	5,5
P30	82	8	10	13,0	1450	1700	5,6	5,5
P40	77	12	11	13,1	1400	1800	5,6	5,5
P50	70	14	16	12,9	1300	2000	5,2	5,5
M10	84	10	6	13,1	1650	1400	5,8	5,5
M20	82	10	8	13,4	1550	1600	5,6	5,5
M30	81	10	9	14,4	1450	1800	5,8	5,5
M40	78	7	15	16,5	1300	2000	5,5	5,5
K01	93	2	5	15,0	1750	1200	6,3	5,0
K05	92	2	6	14,6	1700	1350	6,3	5,0
K10	92	2	6	14,8	1650	1500	6,3	5,0
K20	91,5	2,5	6	14,8	1550	1700	6,2	5,0
K30	89	2	9	14,5	1450	1900	-	5,5
K40	88	-	12	14,3	1300	2100	5,8	5,5

Na Tabela 4 é possível verificar combinações de materiais de substrato e de revestimentos mais vulgares.

Tabela 4 – Combinações de revestimentos mais vulgares [18]

Tipo de Carboneto do substrato	Revestimentos						
	TiC	TiN	TiC Ti (CN) TiN	Al_2O_3	TiC Al_2O_3	TiC TiN Al_2O_3	HfN
M15	•		•	•	•	•	•
P25	•	•	•				•
P40	•		•				
K10	•	•	•		•		

As ferramentas de carbonetos convencionais ou revestidos em comparação com os aços rápidos permitem uma maior taxa de remoção de aparas, velocidades de corte superiores proporcionando um melhor acabamento superficial, um tempo de maquinagem inferior e uma maior vida útil da ferramenta, levando a uma redução dos custos de substituição ou afiamento [18]. A Figura 16 apresenta exemplos de matérias das ferramentas de corte fabricadas em material duro revestido.



Figura 16 - Exemplos de matérias das ferramentas de corte fabricadas em metal duro revestido [25]

- **“Cermets”**

Este grupo é constituído por materiais formados por agregados de cerâmica (TiC, TiN, WC, TaC, NbC) numa matriz metálica de menor ponto de fusão (Cobalto, Níquel ou Molibdénio) [26].

Os “Cermets” é um tipo de material indicado ao desgaste ligeiro e acabamento de aços ao carbono e ligados e ainda aços inoxidáveis. São, no entanto, geralmente inadequados para desbastes pesados e para maquinagem de ligas não ferrosas (Al, Cu, Ni, ...) [15].

Estes materiais apresentam as seguintes vantagens relativamente aos carbonetos sinterizados [15]:

- Menor coeficiente de atrito como consequência elevado teor em TiN.
- Maior resistência à oxidação em virtude da elevada estabilidade química do TiC.
- Maior dureza a quente.
- Menor tendência para a adesão, devido à menor solubilidade do TiC no aço.
- Velocidade de corte superior à admitida pelos carbonetos sinterizados mas menor que a aconselhada para os cerâmicos.

A Figura 17 apresenta exemplos de matérias das ferramentas de corte fabricadas em “Cermets”.



Figura 17 – Exemplos de matérias das ferramentas de corte fabricadas em “Cermets”[27]

- **Cerâmicos**

Os materiais cerâmicos mais usados para as ferramentas de corte são o óxido de Alumínio (Al_2O_3) - alumina branca, e uma mistura de óxido de Alumínio com carboneto de Titânio (TiC) - alumina preto [20]. Estes materiais apresentam uma elevada dureza a quente, elevada resistência à formação de cratera, baixa condutividade térmica e muito baixa tenacidade. A sua baixa tenacidade obriga a que limite as aplicações para este material restringindo-se ao torneamento. Contudo, é um material que permite elevadas velocidades de corte e possibilita um bom acabamento superficial. Não é aconselhado usar baixas velocidades e é inadequado ao corte de ligas de alumínio, titânio e magnésio [15].

Ultimamente, tem surgido outros cerâmicos como por exemplo o nitreto de silício (Si_3N_4), por vezes adicionado com alumina (Al_2O_3) e com óxido de ítrio (Y_2O_3) numa matriz de carboneto de titânio (TiC). Em alguns casos, as pastilhas de nitreto de silício (Si_3N_4) são revestidas com uma película de alumina (Al_2O_3) ou diamante. Outra das variedades de cerâmica de grande importância como ferramenta de corte é o SIALON, constituída por uma base de nitreto de silício em que parte do silício foi substituído por alumínio e parte do azoto por oxigénio, obtendo-se um composto de Si-Al-O-N [28], [29]. Foram ainda desenvolvidos compósitos de matriz cerâmica para utilização em ferramentas de corte. Um dos materiais deste tipo é constituído por uma matriz cerâmica de alumina (Al_2O_3) reforçada por “whiskers” de carboneto de silício (SiC) dispersas na matriz [30], [31].

Os cerâmicos ocupam um campo de aplicação ainda reduzido, tendo em consideração as necessidades de elevada potência e rigidez que as máquinas-ferramentas exigem para sua utilização. No entanto, a elevada velocidade de corte que permitem (500m/min),

especialmente no caso das aluminas brancas, possibilitam obtenção de bom acabamento superficial dispensando, muitas vezes, operações de retificação. De notar que os cerâmicos não devem ser utilizados a baixas velocidade de corte pois dão origem a desgastes mais elevados do que os carbonetos sinterizados e são totalmente inadequados ao corte de ligas de Alumínio, Titânio e Magnésio [20].

Um aspeto importante na utilização dos cerâmicos é o tipo de preparação da aresta de corte. Assim, tem-se obtido bons resultados com as arestas de corte chanfradas. Por um lado, para robustecer o gume garantindo uma maior tenacidade e por outro, polidas de forma a eliminar descontinuidades nas arestas que pudessem facilitar o seu lascamento. Outros aspetos referem-se à pré-preparação da superfície de peça (chanfro na entrada e na saída da peça), a geometria de corte negativa à ausência de lubrificação (aluminas), à eliminação de vibrações, ao aperto rígido da peça e da ferramenta e ao angulo posição da aresta de corte e raio de bico (elevados) [20].

Os materiais cerâmicos podem ser divididos em 3 grupos: cerâmicos à base de alumina, cerâmicos à base de nitreto de silício e cerâmicos reforçados com fibras. Este último grupo consiste no reforço de óxidos e nitretos com fibras de carboneto de silício (SiC), porem este material encontra-se em fase de ensaios, mas tem excelentes resultados na maquinagem de aço e ligas de níquel (Nimonic). O segundo grupo dos cerâmicos são os cerâmicos à base de nitreto de silício (Si_3N_4). Este material conserva melhor a dureza a elevadas temperaturas e possuem uma tenacidade superior aos cerâmicos tradicionais (à base de alumina). Aplicam-se em operações de torneamento e fresagem, principalmente na maquinagem de ferros fundidos, aços e ligas de níquel [18].

- **Ultraduros**

Nesta última categoria, os materiais duros mais essenciais são o nitreto de boro cubico (CBN), e o diamante sintético policristalino (PCD), ambos possuem durezas extremamente elevadas, Tabela 5, em consequência do carácter fortemente covalente das suas estruturas e simetria da rede cristalina [2].

Tabela 5 – Propriedades dos ultraduros

Propriedades Físicas (Mecânicas)	Diamante policristalino (PCD)	Nitreto de boro cubico (CBN)
Densidade (g/cm^3)	3,4	3,1
Tensão de rotura transversal (MPa)	600-1100	500-800
Dureza HV	5000	3500
Condutibilidade térmica (W/m.K)	550	100
Coefficiente de dilatação térmica ($10^{-6}/K$)	1,5	4,9

O Nitreto de boro cubico (CBN) apresenta as seguintes características: dureza a frio e a quente superior à dos cerâmicos e uma tenacidade superior à dos carbonetos, elevada condutibilidade térmica, boa estabilidade química e pequena afinidade com os aços, elevada resistência à oxidação [15], aplicado na maquinagem de materiais muito duros (ligas de cobalto e níquel, ferro fundido branco muito duro com adições de crómio e níquel de elevada abrasividade) [32], enquanto que o diamante sintético policristalino (PCD) é o material para ferramentas mais duro [33], as ferramentas PCD são as que apresentam a menor taxa de desgaste e a maior vida útil de todas as ferramentas, custo muito elevado (30 a 50 vezes o custo de pastilhas de carboneto sinterizado), não são aconselháveis para a maquinagem de ligas ferrosas, são recomendados para a maquinagem de ligas de alumínio e no corte de materiais extremamente abrasivos (por exemplo compósitos de matriz metálica, plásticos reforçados com fibras de vidro, carbonetos de tungsténio e cerâmicos) e o seu elevado custo limita bastante o seu uso [15].

2.5. Rugosidade Superficial

Na prática industrial quase todas as superfícies técnicas funcionais são obtidas por maquinagem e não possuem uma forma geométrica exata [18]. Durante o processo de fabrico, o material bruto sofre transformações de forma, de tamanho e propriedades. O método de produção interfere na aparência, na funcionalidade e nas características gerais do produto acabado [34]. Quanto melhor o acabamento a ser obtido, maior será o custo de execução da peça. Portanto, para não aumentar o custo de fabrico, as peças devem apresentar o grau de acabamento adequado à sua função [35].

A rugosidade superficial é constituída por defeitos microgeométricos resultantes do processo de corte (marcas de avanço, formação da aresta postiça de corte ou desgaste da ferramenta). A rugosidade da superfície maquinada depende de vários parâmetros, tais como,

máquina-ferramenta, propriedades do material a maquirar, geometria e material da ferramenta e, por último, a operação de maquinagem [36].

O parâmetro R_a (rugosidade media) pode ser usado quando for necessário o controlo contínuo da rugosidade nas linhas de produção como quando o acabamento apresenta fendas de maquinagem, sendo aplicável à maioria dos processos de fabrico [34].

No Sistema Internacional, a unidade de rugosidade é o micrómetro [μm] [34].

De acordo com a Norma ISO 1302 de indicação do Estado de Superfícies em Desenhos Técnicos esclarece que a característica principal (o valor) da rugosidade R_a pode ser indicada pelos números (N) da classe de rugosidade correspondente, conforme a Tabela 6. Quanto maior for o valor de N maior será o valor da rugosidade média em micrómetros [μm] que caracteriza pior acabamento superficial [34]:

Tabela 6 – Classe de rugosidade [34]

Classe	R_a [μm]
N12	50
N11	25
N10	12,5
N9	6,3
N8	3,2
N7	1,6
N6	0,8
N5	0,4
N4	0,2
N3	0,1
N2	0,05
N1	0,025

A definição matemática deste parâmetro é dada pela equação (1).

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad (1)$$

Onde:

n - Número de parâmetros

y_i - desvio do perfil de rugosidade

2.5.1. Rugosímetro

O rugosímetro é um aparelho eletromecânico que é utilizado para medir a rugosidade superficial das peças maquinadas. A medição é feita por uma agulha que, em contacto com a superfície e a uma velocidade constante, mede as irregularidades da superfície, gerando um gráfico com a rugosidade e/ou o valor numérico [37].

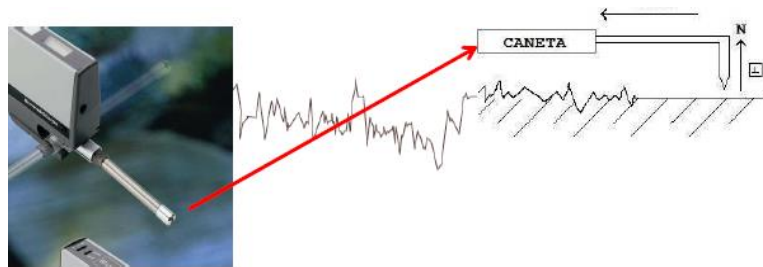


Figura 18 – Rugosímetro [38]

2.6. Taxa de Produção

A taxa de produção (T_p), que significa, taxa de remoção de material (MRR) é outro fator importante para avaliação nesta dissertação. Esta taxa consiste na quantidade de material que se consegue maquinar num período de tempo, tendo como objetivo maximizar essa taxa e pode ser calculada com a ajuda da equação (2) [39].

$$Tp = V_c \times a_p \times f_z \quad (2)$$

Onde:

Tp – Taxa de produção [cm^3/min]

V_c - Velocidade de corte [m/min]

f_z - Velocidade de avanço [mm/rot]

a_p - Penetração [mm]

2.7. Método de Taguchi

Genichi Taguchi (Tokamachi, Japão 1924-2012) foi um engenheiro e um estatístico[40].



Figura 19 - Genichi Taguchi [41]

Ele foi o responsável por desenvolver uma metodologia para melhorar a qualidade dos produtos fabricados pela aplicação de alguns conceitos estatísticos [40].

A filosofia de Taguchi tem consequências de longo alcance, mas é baseada em três conceitos simples e fundamentais. Toda a tecnologia e as técnicas surgem inteiramente a partir dessas três ideias. Esses conceitos são [42]:

- A qualidade deve ser projetada no produto e não inspecionada nele.
- A qualidade é melhor alcançada minimizando o desvio de um alvo. O produto deve ser concebido de forma a ser imune a fatores ambientais incontroláveis.
- O custo da qualidade deve ser medido em função do desvio da norma e as perdas devem ser medidas em todo o sistema.

2.7.1. Função perda na qualidade de Taguchi

Genichi Taguchi popularizou recentemente a sua metodologia da qualidade com o conceito da função perda, focalizando o impacto da variação da qualidade. Ele tem retratado a ideia de que a variação do alvo desejado acarreta perdas para a sociedade. Apesar de ser uma ferramenta passiva, na medida que ela sozinha não proporciona melhorias no processo, promove mais efeitos nos produtos do que qualquer outro conceito ou método individual apresentado [42]. A Figura 20 mostra o gráfico da função perda de Taguchi.

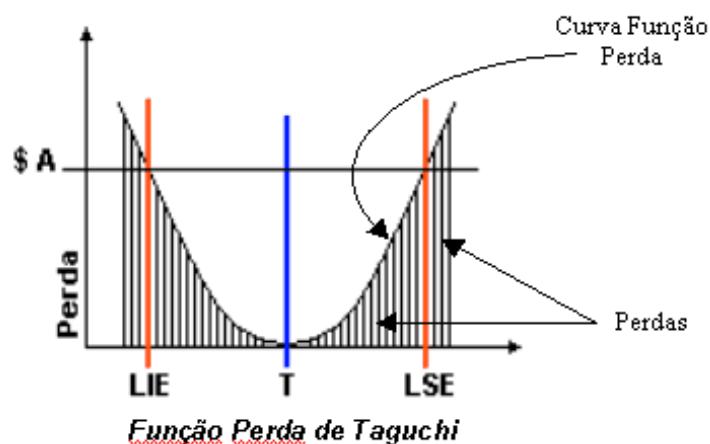


Figura 20 – Gráfico função perda de Taguchi [43]

2.7.2. Taguchi e razão sinal-ruído

Taguchi classificou o método de “*Offline quality control*”, pois a sua aplicação é realizada recorrendo a uma pequena amostra proveniente duma fase experimental, que tem níveis de qualidade com uma variância elevada quando comparada com as peças obtidas já em linha de produção (“*online quality control*”). A qualidade ideal seria, no limite, obtida fazendo com que todas as combinações possíveis de regulação do processo fossem testadas e analisadas. No entanto, isso iria implicar longos tempos de preparação e obviamente custos insuportáveis incontroláveis [9].

Tendo em conta a qualidade necessária, Taguchi incluiu no seu método algumas funções perda que fazem o cliente reconhecer o desejo de ter produtos que são mais consistentes e o desejo de fazer um produto a baixo custo [44].

A filosofia de Taguchi diz que a qualidade deve ser projetada num produto, não inspecionada para ele. A forma de o concretizar é através de projetos de sistemas, design de parâmetros de tolerância. Se um fabricante decide escolher a qualidade de “inspeção” de um produto, significa que o produto é produzido com níveis de qualidade aleatórios e aqueles estão muito longe dos níveis desejados por quem o usa. Consegue-se mais facilmente atingir a qualidade minimizando o desvio a partir de um alvo, evitando a influência de fatores incontroláveis. Assim, a razão sinal-ruído que define a relação de qualidade do produto e fatores incontroláveis deve ser elevada [44].

Existem três relações sinal-ruído para o parâmetro desejado:

- Nominal é o melhor:

$$S/N_t = 10 \times \log \left(\frac{\bar{y}^2}{s_y^2} \right) \quad (3)$$

- Maior é a melhor (maximizar):

$$S/N_L = -10 \times \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (4)$$

- Menor é a melhor (minimizar):

$$S/N_S = -10 \times \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (5)$$

Onde:

\bar{y} – Média dos dados observados

s_y^2 – Variância de y

n – Número de observações

y_i – Dados observados

O objetivo da função S/N_t é reduzir a variabilidade em torno de um alvo específico, a função S/N_L diz se o sistema é otimizado quando a resposta é tão grande quanto possível e S/N_S se o sistema é otimizado quando a resposta é tão pequena quanto possível. Quanto maior a relação S/N melhor é o resultado [44].

2.8. Análise Relacional de Grey

O método da Análise Relacional de Grey consiste em medir o grau de aproximação entre as sequências usando um grau relacional de Grey.

A Análise Relacional de Grey consiste em utilizar os resultados experimentais, como a rugosidade da superfície e o material removido e inicialmente são normalizados numa faixa entre zero e um, de acordo com a sua importância. Depois, calcula-se o coeficiente relacional de Grey a partir dos dados experimentais normalizados para revelar a relação entre os dados experimentais desejados e os dados experimentais reais. Posteriormente, o grau relacional de Grey é calculado pela média do coeficiente relacional de Grey correspondente a cada resposta do processo. A avaliação global das respostas ao processo múltiplo baseia-se no grau relacional de Grey [45].

O processo desta análise também conhecida por “GRA” (*Grey Relational Analysis*) divide-se nos seguintes passos [46]:

- O primeiro passo é o pré-processamento de dados, com o objetivo de evitar o problema de escalas e unidades.

- Depois os dados experimentais são normalizados no intervalo entre zero e um, para normalizar os dados brutos e uma normalização linear da razão S/N. A razão S/N normalizada (x_{ij}) é expressa como:

$$x_{ij} = \frac{n_{ij} - \min_{ij}}{\max_{ij}n_{ij} - \min_{ij}n_{ij}} \quad (6)$$

Onde:

x_{ij} - Razão S/N normalizada

n_{ij} - Valor normalizado

$\min_{ij}n_{ij}$ - Valor mínimo normalizado

$\max_{ij}n_{ij}$ - Valor máximo normalizado

- Em seguida, o coeficiente relacional de Grey ($\xi_i(k)$) é calculado a partir dos dados experimentais normalizados para expressar a relação entre a razão S/N normalizada (ideal) e a real, onde a característica ζ (zeta) varia na faixa de $0 \leq \zeta \leq 1$. O coeficiente relacional de Grey é calculado, da seguinte forma:

$$\xi_{ij} = \frac{\min_i \min_j |x_i^0 - x_{ij}| + \zeta \max_i \max_j |x_i^0 - x_{ij}|}{|x_i^0 - x_{ij}| + \zeta \max_i \max_j |x_i^0 - x_{ij}|} \quad (7)$$

Onde:

ξ_{ij} - Coeficiente relacional de Grey

$\min_i \min_j |x_i^0 - x_{ij}|$ - Valor mínimo normalizado

$\max_i \max_j |x_i^0 - x_{ij}|$ - Valor máximo normalizado

ζ - zeta

- O grau relacional de Grey é, então, calculado pela média dos coeficientes relacionais de Grey correspondente a cada característica do desempenho. Um grau relacional de Gray mais alto, neste âmbito, mais perto do valor um, indica que a razão S/N

correspondente está mais próxima da razão S/N idealmente normalizada. O grau relacional Grey é calculado conforme a equação(8).

$$y_i = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m w_i \xi_{ij}(i) \quad (8)$$

Onde:

y_i - Grau relacional de Grey

m – Corresponde ao número de alternativas ou elementos comparados

$w_i \xi_{ij}(i)$ – Dados observados

- A análise estatística de variância (ANOVA) é realizada para os parâmetros de entrada com o grau relacional de Grey e os parâmetros que afetam significativamente o processo são descobertos.
- Os níveis ideais dos parâmetros do processo são escolhidos.

3. Ensaaios Experimentais

Este capítulo descreve a configuração experimental utilizada e os ensaios experimentais realizados no decorrer deste trabalho pelo Método de Taguchi. Numa primeira fase, são apresentados os valores dos diferentes níveis para os diferentes parâmetros de maquinagem e a construção da matriz ortogonal segundo Taguchi. Além disso, descreve-se como se efetua a realização dos ensaios experimentais, de acordo com os valores estabelecidos nos parâmetros na matriz ortogonal e o processo de medição.

3.1. Matriz ortogonal L9 para os ensaios experimentais segundo o método de Taguchi

A rugosidade superficial e a taxa de produção são umas das características mais importantes num processo de maquinagem, sendo assim, o principal objetivo a alcançar num processo de maquinagem industrial é obter a menor rugosidade superficial possível e uma elevada taxa de produção.

A velocidade de corte (V_c), velocidade de avanço (f_z) e a penetração (a_p) são os parâmetros mais comuns nos processos de maquinagem. Na Tabela 7 são apresentados os valores de referência do fabricante, neste caso da empresa CERATIZIT com o modelo das pastilhas DCMT 070204EN-SM CTCP135, em que as suas ferramentas podem trabalhar.

Tabela 7 – Valores de referência do fabricante

Valores de referência do fabricante	
Velocidade de corte (V_c)	110-230 [m/min]
Penetração (a_p)	0,05-5 [mm]
Velocidade de avanço (f_z)	0,15-0,45 [mm/rot]

Com os valores de referencia da Tabela 7, foram escolhidos os parâmetros e os níveis para este estudo (Tabela 8).

Conhecendo os parâmetros e sabendo os valores para os diferentes níveis, é possível definir qual o arranjo ortogonal adequado. Neste caso, como são 3 parâmetros, onde cada parâmetro tem três níveis, o arranjo ortogonal de Taguchi mais adequado é definido pela matriz L9.

Tabela 8 – Valores dos diferentes níveis para cada parâmetro

Parâmetros	Símbolo	Nível 1	Nível 2	Nível 3
Velocidade de corte [m/min]	A	50	100	150
Velocidade de avanço [mm/rot]	B	0,1	0,2	0,3
Penetração [mm]	C	0,1	0,25	0,5
Erro	D	-	-	-

Isto significa que são necessárias 9 combinações, como é possível ver na Tabela 9. Na matriz ortogonal L9 o símbolo D não apresenta nenhum parâmetro pois só são estudados 3 parâmetros sendo eles, a velocidade de corte (V_c), velocidade de avanço (f_z) e a penetração (a_p). Como tal, a quarta coluna fica reservada para a determinação do erro.

Tabela 9 – Matriz ortogonal L9 segundo Taguchi

Número de Ensaio	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

Depois de definir a matriz de Taguchi, os níveis de cada parâmetro foram substituídos pelos valores escolhidos, ficando definida como representa a Tabela 10 .

Tabela 10 – Matriz L9 segundo Taguchi com os valores dos parâmetros escolhidos

Número de Ensaio	Velocidade de corte [m/min]	Velocidade de avanço [mm/rot]	Penetração [mm]
1	50	0,1	0,1
2	50	0,2	0,25
3	50	0,3	0,5
4	100	0,1	0,25
5	100	0,2	0,5
6	100	0,3	0,1
7	150	0,1	0,5
8	150	0,2	0,1
9	150	0,3	0,25

3.2. Ensaio e material utilizado

Os ensaios experimentais foram realizados no Laboratório de Tecnologia Mecânica (LTM), da Escola Superior de Tecnologia e Gestão (ESTIG) do Instituto Politécnico de Bragança (IPB).

O principal objetivo a alcançar é obter a menor rugosidade superficial possível e uma elevada taxa de produção. Os testes experimentais foram realizados através de uma operação de maquinagem, o torneamento, em torno de um bloco de aço cilíndrico. Para a realização dos ensaios experimentais foi selecionado o DIN CK45 que tem a seguinte composição química (Tabela 11).

Tabela 11 – Composição química do DIN CK45

Composição química %	
Cu	Max 0.020
Ni	Max 0.025
Cr	Max 0.025
P	Max 0.025
S	Max 0.020
Mn	0,500-0,800
Si	0,170-0,370
C	0,420-0,500

Para começar os ensaios experimentais estabeleceu-se as dimensões iniciais do bloco de aço cilíndrico, sendo elas de 40 mm de diâmetro e 55 mm de comprimento. Foi necessário usar a serra elétrica (Figura 21) para cortar o bloco de aço cilíndrico com os 55mm de comprimento.



Figura 21 – Serra elétrica

Depois de cortar o bloco com as dimensões pretendidas e, devido a um baixo paralelismo entre as faces laterais do bloco de aço cilíndrico, foi necessário maquiná-las no torno convencional (Figura 22) -operação de facejamento- sendo que uma da face fica em contacto com o mordente do torno de CNC, melhorando assim a sua fixação. O mordente fixa apenas os 15mm dos 55mm de comprimento do bloco de aço cilíndrico no torno de CNC.



Figura 22 – Torno convencional

Após as operações referidas anteriormente, na Figura 23 é apresentado o bloco cilíndrico em aço obtido na fase preliminar do trabalho. Este bloco será utilizado nos ensaios experimentais e serão efetuados de acordo com as combinações da matriz ortogonal de Taguchi definidas nos pontos anteriores.



Figura 23 – Bloco de aço cilíndrico

Depois do bloco estar preparado e fixo no torno de CNC, procedeu-se à realização dos ensaios experimentais de acordo com os valores estabelecidos nos parâmetros na matriz ortogonal L9. Para implementar essas operações de maquinagem foi necessário, previamente, gerar o código CNC (código de CNC do ensaio 1A encontram-se no Anexo III) com os respetivos parâmetros para cada ensaio. Esse código é gerado num software de CAM (*Computer Aided Manufacturing*) designado por MasterCam®, onde foi, antecipadamente, efetuada a simulação de maquinagem. Depois da obtenção do código CNC, foi enviado para o torno de comando numérico via *pen usb*.

Após o processo inicial para a realização dos ensaios experimentais é possível através da Figura 24 observar o rugosímetro a medir a rugosidade superficial do bloco de aço cilíndrico.

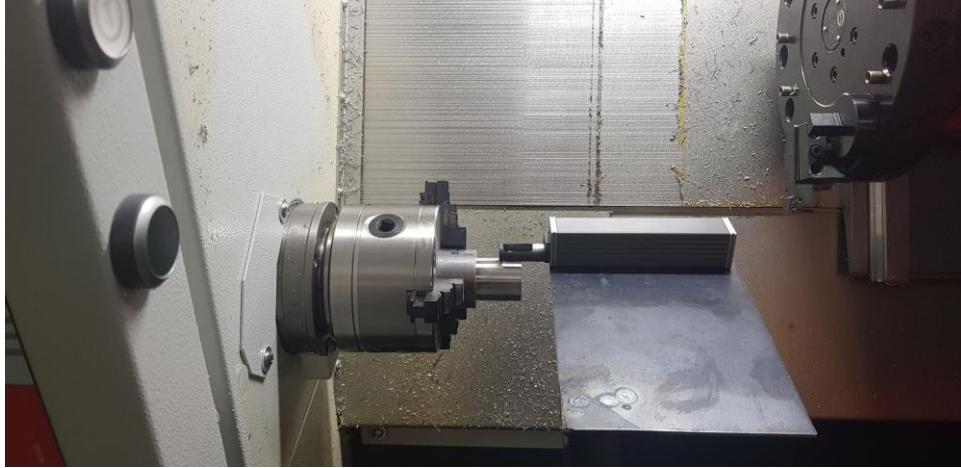


Figura 24 – Medição da Rugosidade Superficial

Durante cada ensaio experimental foi necessário pará-lo periodicamente, para registrar a rugosidade superficial de cada região do bloco. A rugosidade foi medida em quatro regiões diferentes do bloco de aço cilíndrico, com posições angulares de 0° , 90° , 180° , 270° . Na Figura 25 encontram-se representadas, esquematicamente, as posições de medição. Assim, para cada ensaio foram efetuadas 4 medições de rugosidade.

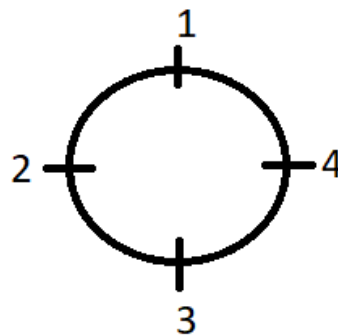


Figura 25 – Quatro posições de medição no bloco de aço cilíndrico

Estas medições foram realizadas utilizando um rugosímetro da marca Mitutoyo e modelo RJ130 (Figura 26).



Figura 26 – Rugosímetro utilizado

Os nove ensaios foram realizados no torno de comando numérico, Concept Turn 260 T (dados técnicos encontram-se no anexo I) representado na Figura 27.



Figura 27 – Torno de CNC - Concept Turn 260 T

4. Resultados Obtidos

Neste capítulo visa apresentar os resultados de cada ensaio experimental relativamente à rugosidade média e à taxa de produção segundo o Método de Taguchi.

4.1. Resultados obtidos segundo Taguchi

- **Rugosidade Superficial**

No que diz respeito aos valores da rugosidade média (R_a), os valores em cada posição foram medidos duas vezes para cada ensaio, para que se pudesse posteriormente fazer uma média, proporcionando assim obter a Tabela 12 (Valores totais da medição da rugosidade superficial encontram-se no anexo II).

Tabela 12 - Valores obtidos nos ensaios para a rugosidade superficial

Ensaio	Parâmetros			Valores médios				
	V_c [m/min]	f_z [mm/rot]	a_p [mm]	P1 [μm]	P2 [μm]	P3 [μm]	P4 [μm]	Rugosidade Média [μm]
1	50	0,1	0,1	2,97	2,74	2,77	2,63	2,78
2	50	0,2	0,25	3,69	3,58	3,70	3,54	3,63
3	50	0,3	0,5	5,62	5,34	5,66	5,61	5,56
4	100	0,1	0,25	1,21	1,54	1,26	1,42	1,35
5	100	0,2	0,5	2,18	2,23	2,24	2,19	2,21
6	100	0,3	0,1	4,74	4,66	4,39	4,54	4,58
7	150	0,1	0,5	0,69	0,65	0,64	0,66	0,66
8	150	0,2	0,1	2,26	2,22	2,21	2,24	2,23
9	150	0,3	0,25	5,64	5,70	5,61	5,69	5,66

Com base na Tabela 12, verifica-se que o ensaio em que ocorre o valor mais elevado de rugosidade é o ensaio 9 (5,66 μm) enquanto o ensaio 7 originou o menor valor de rugosidade superficial (0,66 μm). Para facilitar a visualização, os valores da Tabela 12 são apresentados em forma gráfica na Figura 28.

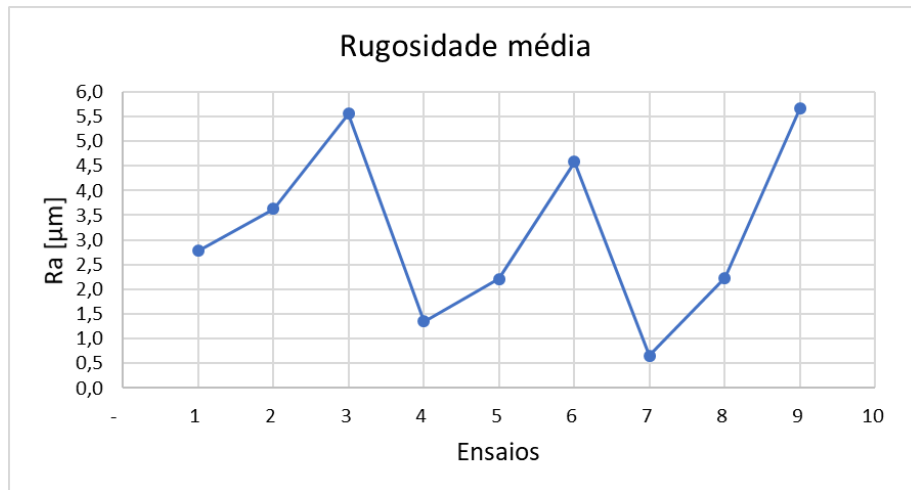


Figura 28 - Gráfico da rugosidade superficial

Conforme se pode constatar, o valor máximo corresponde ao ensaio 9, enquanto que o menor valor corresponde ao ensaio 7.

- **Taxa de produção**

Como foi abordado no capítulo 2 a taxa de produção diz respeito à velocidade de processamento e está relacionado com o período de tempo de maquinagem.

Na Tabela 13 são representados os valores da taxa de produção, estes valores foram calculados com base na equação (2), apresentada no capítulo 2 (secção 2.6):

$$Tp = V_c \times a_p \times f_z$$

Tabela 13 - Valores obtidos nos ensaios para a taxa de produção

Ensaio	Parâmetros			Tp [cm ³ /min]
	V _c [m/min]	f _z [mm/rot]	a _p [mm]	
1	50	0,1	0,1	0,5
2	50	0,2	0,25	2,5
3	50	0,3	0,5	7,5
4	100	0,1	0,25	2,5
5	100	0,2	0,5	10
6	100	0,3	0,1	3
7	150	0,1	0,5	7,5
8	150	0,2	0,1	3
9	150	0,3	0,25	11,25

Com base nos dados da Tabela 13, relativamente à taxa de produção, o ensaio que corresponde ao maior valor de taxa de produção é o ensaio 9 (11,25 cm³/min). Em contrapartida, o ensaio 1 originou o menor valor de taxa de produção (0,5 cm³/min). Para uma melhor visualização dos valores da Tabela 13 é mostrado em gráfico a Figura 29.

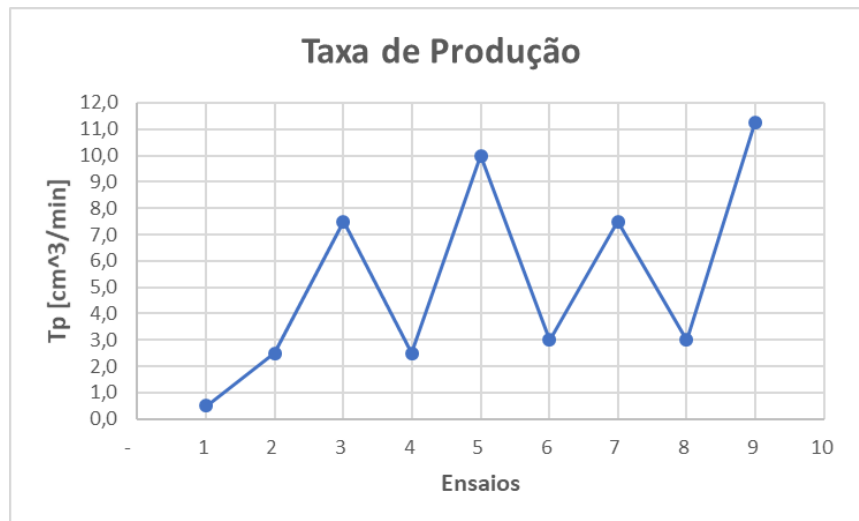


Figura 29 - Gráfico da taxa de produção

Conforme mostra a Figura 29, o maior valor da taxa de produção corresponde ao ensaio 9, sendo que o menor valor corresponde ao ensaio 1.

5. Análise e Discussão dos Resultados

5.1. Método de Taguchi

5.1.1. Razão Sinal-Ruído

Dois dos principais objetivos no processo de fabricação por maquinagem é o de minimizar a rugosidade da superfície e maximizar taxa de produção. A razão sinal-ruído mede a sensibilidade da característica de qualidade estudada (rugosidade e a taxa de produção) de uma maneira controlada relativamente aos fatores não controláveis (fatores de ruído). Existem três relações sinal-ruído para o parâmetro desejado, “nominal é o melhor”, “maior é o melhor” e “menor é o melhor”. Cada uma delas é adequado para um determinado objetivo que se pretenda alcançar. Assim, como referido, pretende-se minimizar a rugosidade superficial (“menor é o melhor”) e maximizar a taxa de produção (“maior é o melhor”).

- **Rugosidade Superficial**

Como o objetivo é obter a menor rugosidade superficial possível, por isso, a razão S/N para este parâmetro é “menor é o melhor” pois permite minimizar o valor da rugosidade. Com a ajuda da Tabela 12, onde estão representados os valores da rugosidade para os diferentes posicionamentos de medição, e da equação (9) foi possível determinar as relações sinal-ruído para os nove ensaios, obtendo assim, a Tabela 14.

$$S/N_S = -10 \times \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (9)$$

Onde:

n - Representa os quatro posicionamentos representados no bloco de aço cilíndrico (P1, P2, P3 e P4) para a medição da rugosidade

y_i - Representa o valor da rugosidade média em cada ponto definido no bloco

Segue-se o exemplo de como foi determinada a razão S/N para o ensaio número 1:

$$S/N = -10 \times \log \left(\frac{1}{4} \times (2,97^2 + 2,74^2 + 2,77^2 + 2,63^2) \right) = -8,87 [dB]$$

Tabela 14 – Valor da razão S/N da rugosidade superficial

Ensaio	P1	P2	P3	P4	Rugosidade Média [μm]	S/N [dB]
1	2,97	2,74	2,77	2,63	2,78	-8,87
2	3,69	3,58	3,70	3,54	3,63	-11,19
3	5,62	5,34	5,66	5,61	5,56	-14,90
4	1,21	1,54	1,26	1,42	1,35	-2,67
5	2,18	2,23	2,24	2,19	2,21	-6,88
6	4,74	4,66	4,39	4,54	4,58	-13,22
7	0,69	0,65	0,64	0,66	0,66	3,61
8	2,26	2,22	2,21	2,24	2,23	-6,97
9	5,64	5,70	5,61	5,69	5,66	-15,05

A partir da Tabela 14, o ensaio que apresenta o valor mais elevado da razão S/N é o ensaio 7 (3,61 dB), este resultado é confirmado pelo menor valor da rugosidade superficial, enquanto o ensaio 9 originou o menor valor da razão S/N (-15,05 dB) que por sua vez é o maior valor da rugosidade superficial (5,66 dB).

Para simplificar os valores da razão S/N para os diferentes valores de parâmetros de maquinagem foram criadas abreviaturas como é possível observar na seguinte tabela (Tabela 15).

Tabela 15 - Abreviaturas para os vários níveis dos parâmetros

Designação	
A1	$V_c = 50$ [m/min]
A2	$V_c = 100$ [m/min]
A3	$V_c = 150$ [m/min]
B1	$f_z = 0,1$ [mm/rot]
B2	$f_z = 0,2$ [mm/rot]
B3	$f_z = 0,3$ [mm/rot]
C1	$a_p = 0,1$ [mm]
C2	$a_p = 0,25$ [mm]
C3	$a_p = 0,5$ [mm]

Segue-se um exemplo de como foi determinado o resultado da razão S/N para o parâmetro $V_c = 50$ [m/min] e o nível 1:

$$S/N = \frac{-8,87 - 11,19 - 14,90}{3} = -11,65 \text{ [dB]}$$

Tabela 16 – Resultados S/N para a rugosidade superficial

Parâmetros	Nível 1 [dB]	Nível 2 [dB]	Nível 3 [dB]
V_c	-11,65	-7,59	-6,14
f_z	-2,65	-8,35	-14,39
a_p	-9,69	-9,64	-6,06

A Figura 30 apresenta os valores médios da razão S/N para os diferentes parâmetros relativamente à rugosidade superficial.



Figura 30 – Valor médio S/N para os diferentes parâmetros relativamente à rugosidade superficial

Observando a Figura 30, é possível chegar à conclusão de qual é a melhor combinação para a rugosidade superficial. Essa combinação é A3B1C3, ou seja, $V_c = 150$ [m/min], $f_z = 0,1$ [mm/rot] e $a_p = 0,5$ [mm].

- **Taxa de produção**

Como já foi referido anteriormente, a taxa de produção é outro parâmetro bastante importante para a indústria, tendo como objetivo maximizar essa taxa, e por isso, a categoria da razão S/N deverá ser “maior é o melhor”. Com a ajuda da Tabela 13, onde estão representados os valores da taxa de produção e com a equação (10) é possível chegar aos valores da razão S/N para a taxa de produção, como é possível verificar na Tabela 17.

$$S/N_L = -10 \times \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (10)$$

Onde:

n - Representa um único valor da taxa de produção para cada ensaio

y_i^2 - Representa o valor da taxa de produção

Segue-se o exemplo de como foi determinada a razão S/N para o ensaio número 1:

$$S/N = -10 \times \log \left(\frac{1}{1} \times \left(\frac{1}{0,5^2} \right) \right) = -6,02 \text{ [dB]}$$

Chama-se a atenção que, neste caso particular, como foi efetuada apenas uma medição não seria necessário determinar a razão sinal/ruído. Contudo, manter a mesma uniformidade de análise da componente anterior (rugosidade) optou-se pela determinação da razão S/N também para a taxa de produção.

Tabela 17 - Valor da razão S/N da taxa de produção

Ensaio	Tp [cm ³ /min]	S/N [dB]
1	0,50	-6,02
2	2,50	7,96
3	7,50	17,50
4	2,50	7,96
5	10,00	20,00
6	3,00	9,54
7	7,50	17,50
8	3,00	9,54
9	11,25	21,02

A partir da Tabela 17 o ensaio que apresenta o valor mais elevado da razão S/N é o ensaio 9 (21,02 dB), este resultado é confirmado pelo maior valor da taxa de produção (11,25 [cm³/min]), enquanto o ensaio 1 originou o menor valor da razão S/N (-6,02 dB), que corresponde ao menor valor da taxa de produção (0,50 [cm³/min]).

Segue-se um exemplo de como foi determinada o resultado da razão S/N para o parâmetro $V_c = 50 \text{ [m/min]}$ e o nível 1:

$$S/N = \frac{-6,02 + 7,96 + 17,50}{3} = 6,48 \text{ [dB]}$$

Tabela 18 – Resultados S/N para a taxa de produção

Parâmetros	Nível 1 [dB]	Nível 2 [dB]	Nível 3 [dB]
V_c	6,48	12,50	16,02
f_z	6,48	12,50	16,02
a_p	4,35	12,3	18,33

A Figura 31 apresenta os valores médios da razão S/N para os diferentes parâmetros relativamente à taxa de produção. As abreviaturas são as mesmas da Tabela 15.

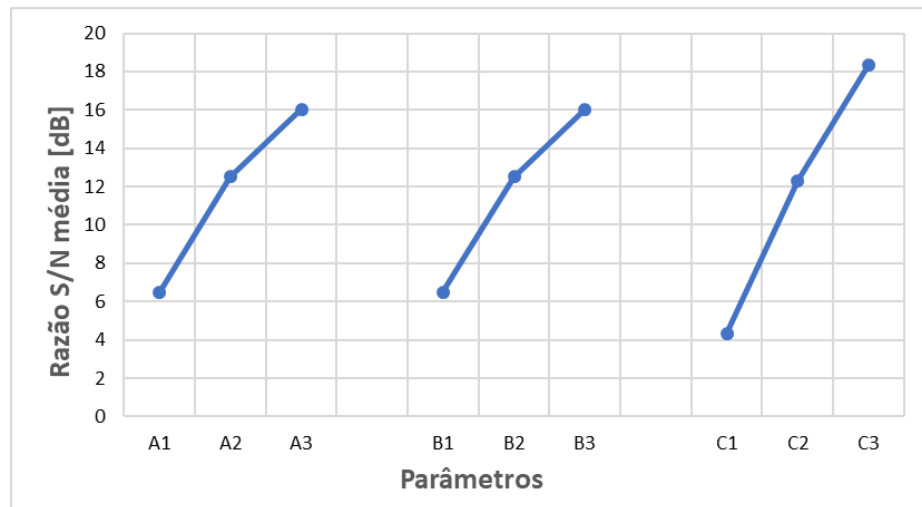


Figura 31 - Valor médio S/N para os diferentes parâmetros relativamente à taxa de produção

Perante a Figura 31, é possível chegar à conclusão de qual é a melhor combinação para a taxa de produção. Essa combinação é A3B3C3, ou seja, $V_c = 150$ [m/min], $f_z = 0,3$ [mm/rot] e $a_p = 0,5$ [mm].

5.2. Análise Relacional de Grey

Segundo o método da Análise Relacional de Grey é necessário recorrer aos valores da razão S/N da rugosidade superficial e da taxa de produção obtidos através do método de Taguchi, como mostra a Tabela 19.

Tabela 19 – Valores da razão Sinal-Ruido

Ensaio	S/N Rugosidade superficial [dB]	S/N Taxa de produção [dB]
1	-8,87	-6,02
2	-11,19	7,96
3	-14,90	17,50
4	-2,67	7,96
5	-6,88	20,00
6	-13,22	9,54
7	3,61	17,50
8	-6,97	9,54
9	-15,05	21,02

De seguida é necessário normalizar os valores da razão S/N da Tabela 19, para isso recorre-se à equação (11) obtendo assim a Tabela 20.

$$x_{ij} = \frac{n_{ij} - \min_{ij} n_{ij}}{\max_{ij} n_{ij} - \min_{ij} n_{ij}} \quad (11)$$

Onde:

n_{ij} - Representa o valor S/N para cada ensaio relativamente à Rugosidade superficial ou Taxa de produção

$\min_{ij} n_{ij}$ - Representa o valor mínimo entre os ensaios 1 a 9

$\max_{ij} n_{ij}$ - Representa o valor máximo entre os ensaios 1 a 9

Segue-se o exemplo de como foi determinado o valor da razão S/N normalizado da Rugosidade Superficial para o ensaio número 1:

$$x_{ij} = \frac{-8,87 - (-15,05)}{3,61 - (-15,05)} = 0,331 \text{ [dB]}$$

Tabela 20 - Valores da razão S/N normalizados para a análise relacional de Grey

Ensaio	S/N Rugosidade superficial [dB]	S/N Taxa de produção [dB]
1	0,331	0,000
2	0,207	0,517
3	0,008	0,870
4	0,664	0,517
5	0,438	0,962
6	0,098	0,575
7	1,000	0,870
8	0,433	0,575
9	0,000	1,000

Depois da Tabela 20, já é possível calcular o coeficiente relacional de Grey com a utilização da equação (12). Nesta mesma equação a característica ζ (zeta) varia de 0 a 1, sendo que para este projeto o valor utilizado para os dois casos (rugosidade e taxa de produção) foi de 0,5.

$$\xi_{ij} = \frac{\min_i \min_j |x_i^0 - x_{ij}| + \zeta \max_i \max_j |x_i^0 - x_{ij}|}{|x_i^0 - x_{ij}| + \zeta \max_i \max_j |x_i^0 - x_{ij}|} \quad (12)$$

Onde:

$\min_i \min_j |x_i^0 - x_{ij}|$ - Representa o valor mínimo entre os ensaios 1 a 9

$\max_i \max_j |x_i^0 - x_{ij}|$ - Representa o valor máximo entre os ensaios 1 a 9

$\zeta - 0,5$

$|x_i^0 - x_{ij}|$ - Representa o valor S/N para cada ensaio relativamente à Rugosidade superficial ou Taxa de produção

Segue-se o exemplo de como foi determinado o coeficiente relacional de Grey da razão S/N da Rugosidade Superficial para o ensaio número 1:

$$\xi_{ij} = 1 - 0,331 = 0,669 \text{ [dB]}$$

$$\xi_{ij} = \frac{|0| + 0,5 * |1|}{|0,669| + 0,5 * |1|} = 0,428 \text{ [dB]}$$

Tabela 21 - Coeficiente relacional de Grey

Ensaio	S/N Rugosidade superficial [dB]	S/N Taxa de produção [dB]
1	0,428	0,333
2	0,397	0,509
3	0,335	0,793
4	0,598	0,509
5	0,471	0,930
6	0,357	0,541
7	1,000	0,793
8	0,469	0,541
9	0,333	1,000

Por fim, com a Tabela 21 e com a equação (13) é possível chegar ao grau relacional de Grey, como é possível verificar na Tabela 22.

$$y_i = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m w_i \xi_{ij}(i) \quad (13)$$

Onde:

m – Representa o número de dados observados (Rugosidade Superficial e Taxa de Produção)

$w_i \xi_{ij}(i)$ – Representa o valor S/N da Rugosidade Superficial mais o valor S/N da Taxa de Produção para cada ensaio

Segue-se o exemplo de como foi determinado o grau relacional de Grey para o ensaio número 1:

$$y_i = \frac{1}{2} \times (1 \times (0,428 + 0,333)) = 0,381$$

Tabela 22 - Grau relacional de Grey e a devida ordem

Ensaio	Grau Relacional de Grey	Ordem
1	0,381	9
2	0,448	8
3	0,564	4
4	0,553	5
5	0,700	2
6	0,449	7
7	0,897	1
8	0,505	6
9	0,667	3

Posto isto, é possível chegar à Tabela 23 que contém a média do grau relacional de Grey para cada nível. Para além disso, a tabela também contém a média total. Com estes valores é possível chegar à melhor combinação, lembrando que quanto maior for o valor do grau relacional de Grey melhor.

Segue-se um exemplo de como foi determinado o resultado do grau relacional de Grey para o parâmetro $V_c = 50$ [m/min] e o nível 1:

$$\frac{0,381 + 0,448 + 0,564}{3} = 0,464$$

Tabela 23 - Tabela de resposta para o grau relacional de Grey

Símbolo	Parâmetros	Grau Relacional de Grey				Media total
		Nível 1	Nível 2	Nível 3	Max-Min	
A	V_c	0,464	0,567	0,689	0,225	0,574
B	f_z	0,610	0,551	0,560	0,059	
C	a_p	0,445	0,556	0,720	0,276	

Na Tabela 23 é possível verificar que a melhor combinação é A3B1C3, ou seja, $V_c = 150$ [m/min], $f_z = 0,1$ [mm/rot] e $a_p = 0,5$ [mm]. Para ser mais fácil visualizar os valores da Tabela 23 é mostrado em forma gráfica a Figura 32.

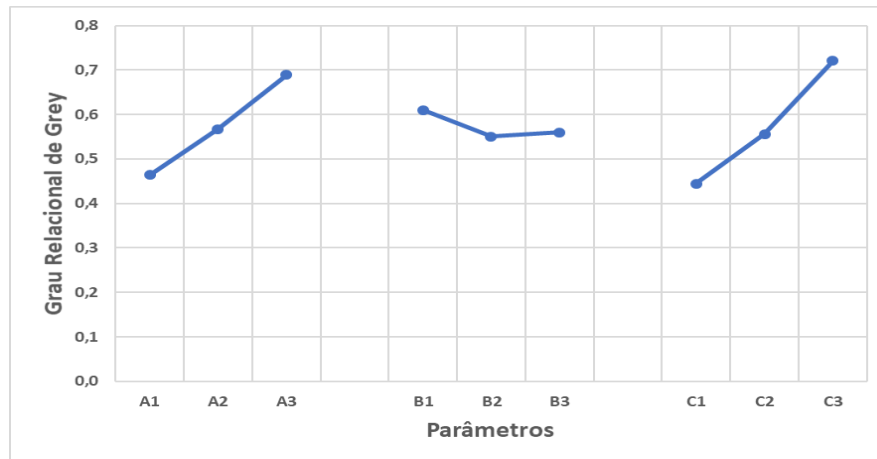


Figura 32 – Análise Relacional de Grey

Conforme se pode constatar, a melhor combinação é A3B1C3, ou seja, $V_c = 150$ [m/min], $f_z = 0,1$ [mm/rot] e $a_p = 0,5$ [mm].

5.3. Aparas obtidas nos ensaios experimentais

Durante os 9 ensaios desta dissertação, foram recolhidas amostras de aparas dos ensaios experimentais com o objetivo de verificar a sua coloração, tendo-se verificado que apresentam diferenças significativas entre os vários ensaios realizados.

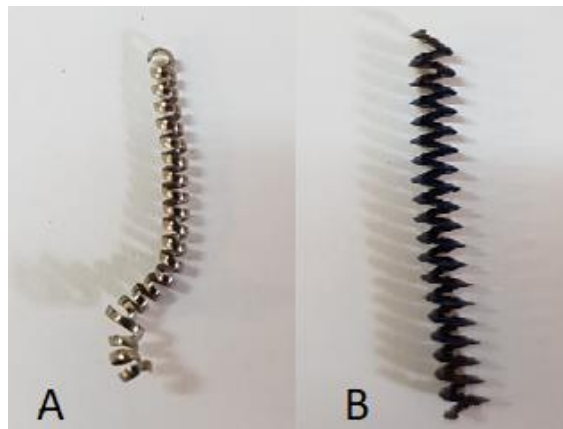


Figura 33 - Aparas de dois ensaios experimentais. A-Ensaio 3. B-Ensaio 16.

A Figura 33 envolve aparas de dois ensaios diferentes. A imagem A corresponde ao ensaio 1 onde os parâmetros foram: $V_c = 50$ [m/min], $f_z = 0,1$ [mm/rot] e $a_p = 0,1$ [mm] e a imagem B corresponde ao ensaio 3 que contém os seguintes parâmetros: $V_c = 50$ [m/min], $f_z = 0,3$ [mm/rot] e $a_p = 0,5$ [mm]. É possível reparar que as aparas possuem um tom dourado na imagem A e relativamente a imagem B, as aparas possuem um tom azulado/roxo.

6. Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

6.1. Conclusões

O trabalho aqui exposto apresenta os dois métodos de otimização utilizados nesta dissertação, o Método de Taguchi e a Análise Relacional de Grey. Antes de serem iniciados os ensaios experimentais recorrendo a estes dois métodos para a determinação das matrizes de ensaios e, sendo que o torno CNC foi uma aquisição recente da ESTIG e o trabalho aqui apresentado foi o primeiro, como tal, houve a necessidade de um período mais longo de adaptação e aprendizagem à nova máquina-ferramenta.

O uso do Método de Taguchi e a Análise Relacional de Grey comprovam que é possível otimizar os parâmetros no processo de torneamento. Estes dois métodos de otimização têm objetivos distintos, enquanto que com o Método de Taguchi pretende-se determinar, individualmente, qual a melhor combinação para a rugosidade superficial e para a taxa de produção, no caso da Análise Relacional de Grey o objetivo foi encontrar o ensaio que combine os melhores resultados para o conjunto dos dois fatores (rugosidade superficial e taxa de produção), neste trabalho, foi definido um peso semelhante para ambos.

Dos nove ensaios efetuados através do Método de Taguchi e para um valor ótimo da rugosidade superficial foi determinada a melhor combinação de parâmetros de maquinagem, assim, a melhor combinação é A3B1C3, ou seja, $V_c = 150$ [m/min], $f_z = 0,1$ [mm/rot] e $a_p = 0,5$ [mm] que diz respeito ao ensaio 7. Este ensaio corresponde ao menor valor da rugosidade superficial ($0,66 \mu\text{m}$) e apresenta o valor mais elevado da razão S/N (3,61 dB).

Um conceito interessante introduzido neste estudo é a taxa de produção. A melhor combinação é A3B3C3, ou seja, $V_c = 150$ [m/min], $f_z = 0,3$ [mm/rot] e $a_p = 0,5$ [mm].

Relativamente a Análise Relacional de Grey, foi possível chegar à combinação que suporta o melhor balanço, rugosidade superficial e taxa de produção. Essa combinação é A3B1C3, ou seja, $V_c = 150$ [m/min], $f_z = 0,1$ [mm/rot] e $a_p = 0,5$ [mm].

Foi, também, efetuada uma análise introdutória e superficial das aparas obtidas nos ensaios experimentais. Relativamente a este estudo, não sendo um dos objetivos desta dissertação, conclui-se que para a mesma velocidade de corte ($V_c = 50$ [m/min]) e comparando o ensaio 1 e 3 a pastilha exerce uma força de corte superior no ensaio 3 para retirar o material desejado. Isto porque o ensaio 3 corresponde a um maior valor relativamente à velocidade de avanço e à penetração, o que significa que o processo de corte

sofreu uma temperatura superior à do ensaio 1, daí a avara ter ficado com um tom de cor azulado/roxo.

6.2. Sugestões para trabalhos futuros

O objetivo deste estudo foi avaliar a rugosidade superficial e a taxa de material removido, tendo sido um trabalho inicial utilizando uma máquina-ferramenta nova e com um conhecimento relativamente modesto sobre as suas características e potencialidades. Nesse sentido, seria interessante realizar o mesmo tipo de ensaios com materiais e ferramentas distintas, bem como, operações de maquinagem diferentes das realizadas neste estudo.

Duas análises muito importantes em trabalhos futuros seriam o estudo do desgaste de ferramentas e, se a ESTIG no futuro adquirisse um dinamómetro, seria a medição das forças de corte para diferentes condições de maquinagem.

Como o estudo das avaras não era um dos objetivos desta dissertação optou-se por apresentar alguns exemplos e sugerir este estudo para trabalhos futuros. Na secção 5.3 fez-se uma breve análise da mudança de tonalidade cromática da avara, função da combinação dos diferentes parâmetros. Contudo, seria interessante efetuar uma análise mais extensiva e exaustiva.

Por fim, outra vertente bastante interessante para trabalhos futuros era estudar a temperatura das pastilhas para diferentes combinações de parâmetros de maquinagem, para isso, poderia recorrer-se à utilização de uma câmara termográfica.

Referências

- [1] “Annual Quality Congress,” 2000. Foresight XXI website: <http://www.asq.org>.
- [2] E. M. Trent and P. K. Wright, *Metal Cutting*, 4^a. London, 2000.
- [3] P. Soares, *Aços*, 6^o edição. 2010.
- [4] P. K. MUKHERJEE, I. & RAY, “A review of optimization techniques in metal cutting processes.,” *Comput. Ind. Eng.*, 2006.
- [5] A. Aggarwal and H. Singh, *Optimization of machining techniques — A retrospective and literature review*, 6th ed. 2005.
- [6] K. Palanikumar, L. Karunamoorthy, R. Karthikeyan, and B. Latha, *Optimization of machining parameters in turning GFRP composites using a carbide (K10) tool based on the taguchi method with fuzzy logics. Metals and Materials International*. 2006.
- [7] X. Wang and I. S. Jawahi, *Web-based optimization of milling operations for the selection of cutting conditions using genetic algorithms. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2004.
- [8] W. H. Yang and Y. S. Tarng, *Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method. Journal of Materials Processing Technology*. vol.84, 1998.
- [9] C. Tzenga, “Optimization of turning operations with multiple performance characteristics using the Taguchi method and Grey relational analysis.” 2009.
- [10] H. Öktem, T. Erzurumlu, and H. Kurtaran, *Application of response surface methodology in the optimization of cutting conditions for surface roughness*. 2005.
- [11] P. J. Ross, “Taguchi techniques for quality engineering,” *McGraw-Hill*. 2^a Edição, 1996.
- [12] J. Ribeiro, H. Lopes, L. Queijo, and D. Figueiredo, “Optimization of Cutting Parameters to Minimize the Surface Roughness in the End Milling Process Using the Taguchi Method.” vol.61, pp. 30–35, 2017.
- [13] H. S. Lu, C. K. Chang, N. C. Hwang, and C. T. Chung, *Grey relational analysis coupled with principal component analysis for optimization design of the cutting parameters in high-speed end milling*. vol. 209, 2009.
- [14] V. Chiaverini, *Tecnologia mecânica - Processos de Fabricação e Tratamento*, 2^a edição. São Paulo, 1986.
- [15] J. Ribeiro, “Tecnologia Mecânica II.” Instituto Politecnico de Bragança (Engenharia

Mecânica).

- [16] A. C. A. F. J. P. Davim, *Tecnologia de Fabrico*. Portp, 2009.
- [17] A. T. da Rocha, *Tecnologia Mecânica*, 6ª Edição. Coimbra, 1994.
- [18] J. P. Davim, *Princípios da Maquinagem*. Coimbra, 1995.
- [19] H. Gerling, *Alrededor de Las maquinas-Herramientas*, 2º edição. Barcelona, 1992.
- [20] J. P. Davim and A. E. Correia, *Maquinagem a Alta Velocidade*. 2006.
- [21] R. D. Mesquita, “O desgaste das ferramentas de corte e sua relação com as forças de corte.” Lisboa, 1988.
- [22] D. Ferraresi, *Fundamentos da Usinagem dos Metais*. Brasil, 1977.
- [23] Anselmo Eduardo Diniz, F. C. Marcondes, and N. L. Coppini, *Tecnologia de Usinagem Dos Materiais*. São Paulo.
- [24] W. A. Glaeser, “Materials for tribology.” London, 1992.
- [25] S. Coromant, “Materiais das ferramentas de corte ‘Metal duro revestido.’” [Online]. Available: https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/materials/cutting_tool_materials/coated_cemented_carbide/pages/default.aspx. [Accessed: 05-Jan-2019].
- [26] Á. R. Machado and M. B. da Silva, “Usinagem dos Metais,” p. 257, 2004.
- [27] S. Coromant, “Materiais das ferramentas de corte ‘Cermets.’” [Online]. Available: https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/materials/cutting_tool_materials/cermet/pages/default.aspx. [Accessed: 05-Jan-2019].
- [28] D. H. Jack, *Sialon tool materials*, Vol 9. Metals Technology, 1982.
- [29] E. D. Whitney, *Modern ceramic cutting tool materials*, Vol 15. Powder Metallurgy International, 1983.
- [30] R. F. . Silva and J. M. Vieira, *Materiais de corte - Lugar de cerâmicos*. Universidade de Aveiro, 1988.
- [31] J. G. Baldoni and S. T. Buljan, *Ceramics for machining*. Ceramic Bulletin, 1988.
- [32] R. D. Mesquita, *Novos materiais para ferramentas de corte - nitreto de boro cubico (CBN)*. 1984.
- [33] R. Eduards, *Cutting tools*. London: The Institute of Materials, 1993.
- [34] J. C. da S. Neto, *Metrologia e Controle Dimensional*. 2012.
- [35] S.-S. N. de A. Industrial, “Metrologia.” São Paulo: Escola Senai Roberto Simonsen, 2004.
- [36] A. R. Machado, A. M. Abrão, R. T. Coelho, and M. B. Silva, *Teoria da Usinagem*

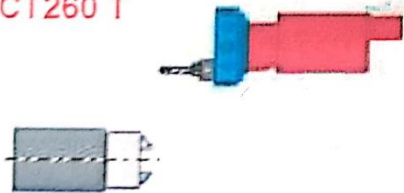
- dos Materiais*, 1º edição. 2009.
- [37] P. Guedes, *Metrologia Industrial*. Lisboa, 2011.
- [38] “Catálogo Mitutoyo.” [Online]. Available: website: http://www.eacampos.pt/fotos/%0Aeditor2/metrologia/10_Medicao_Rugosidade_e_Forma_340-359_P14001.pdf. [Accessed: 20-Jan-2019].
- [39] S. Coromant, “Fórmulas e definições gerais de torneamento.” [Online]. Available: <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/machining-formulas-definitions/pages/general-turning.aspx>. [Accessed: 15-May-2019].
- [40] C. M. C. William Y. Fowlkes, *Engineering Methods for Robust Product Design: Using Taguchi Methods in Tecnology and Product Development*. .
- [41] Toolshero, “Genichi Taguchi.” [Online]. Available: <https://www.toolshero.com/toolsheroes/genichi-taguchi/>. [Accessed: 12-Feb-2019].
- [42] R. K. Roy, *A Primer on the Taguchi Method*. New York, 1990.
- [43] Datalyzer, “Metodologia de Taguchi,” 2010. [Online]. Available: <http://www.datalyzer.com.br/site/suporte/administrador/info/arquivos/info22/22.html>. [Accessed: 12-Feb-2019].
- [44] J. C., “Método de Taguchi: Qualidade voltada para p projeto do produto e do processo.” 1989.
- [45] C. L. Lin, *Use of the Taguchi Method and Grey Relational Analysis to Optimize Turning Operations with Multiple Performance Characteristics*. 2004.
- [46] S. K. Nayak, J. K. Patro, S. Dewangan, and S. Gangopadhyay, *Multi-objective Optimization of Machining Parameters During Dry Turning of AISI 304 Austenitic Stainless Steel Using Grey Relational Analysis*. 2014.

Anexos

Anexo I - Dados técnicos da Concept Turn 260 T



CT260 T



EMCO Concept TURN 260 T

PC-controlled 2 axis CNC-lathe with interchangeable control:
WinNC not included!

- 12-station tool turret VDI16 directional logic
- pneumatic through-hole clamping cylinder
- Main spindle power 5,5 kW
- Main spindle speed 60-6300 rpm
- Travel X: 100 mm
- Travel Z: 300 mm
- Machine lamp
- Central lubrication
- Tool holding shaft 12x12mm for external and $\varnothing 16$ mm for internal cutting tools
- Fully enclosed working area
- Integrated PC
- 21,5" TFT touch screen incl. Easy2control on screen keyboard
- Safety devices according to CE
- Possibility for remote control

Tailstock is not retrofittable on the CT260 T!

Figura 34 - Dados técnicos da Concept Turn 260 T

Anexo II - Valores totais da medição da rugosidade superficial

Tabela 24 - Valores totais da medição da rugosidade superficial

Ensaio	Parâmetros			Medição			
	Velocidade de corte [m/min]	Velocidade de avanço [mm/rot]	Penetração [mm]	P1	P2	P3	P4
1A	50	0,1	0,1	2,92	2,85	2,76	2,66
1B	50	0,1	0,1	3,01	2,63	2,77	2,60
2A	50	0,2	0,25	3,60	3,39	3,74	3,44
2B	50	0,2	0,25	3,78	3,77	3,65	3,63
3A	50	0,3	0,5	5,85	5,56	5,72	5,39
3B	50	0,3	0,5	5,39	5,11	5,60	5,83
4A	100	0,1	0,25	1,05	1,59	1,32	1,44
4B	100	0,1	0,25	1,37	1,48	1,19	1,39
5A	100	0,2	0,5	2,19	2,23	2,27	2,19
5B	100	0,2	0,5	2,16	2,23	2,21	2,19
6A	100	0,3	0,1	4,72	4,74	4,44	4,79
6B	150	0,3	0,1	4,75	4,58	4,34	4,28
7A	150	0,1	0,5	0,71	0,64	0,65	0,69
7B	150	0,1	0,5	0,67	0,66	0,63	0,63
8A	150	0,2	0,1	2,26	2,24	2,21	2,22
8B	150	0,2	0,1	2,25	2,20	2,20	2,26
9A	150	0,3	0,25	5,70	5,66	5,51	5,66
9B	150	0,3	0,25	5,57	5,74	5,70	5,71

Anexo III - Código de CNC do ensaio 1A

%

O0000

(PROGRAM NAME - 1A)

(DATE=DD-MM-YY - 11-03-19 TIME=HH:MM - 15:27)

(MCX FILE -

C:\USERS\LTM\DESKTOP\1_CLOUD\SEAFILE\SCAN_JORGE.PAULO\DISCO AMOVIVEL\3TRABALHO\6BOLSA_FCT\4LTM\1TRABALHOS\2TORNO_CNC\2019_03\H_DANIEL\1_H_DANIEL.EMCAM)

(NC FILE -

C:\USERS\LTM\DESKTOP\1_CLOUD\SEAFILE\SCAN_JORGE.PAULO\DISCO AMOVIVEL\3TRABALHO\6BOLSA_FCT\4LTM\1TRABALHOS\2TORNO_CNC\2019_03\H_DANIEL\0_ZERO.NC)

(MATERIAL - ACO MM - 2024)

G71

(TOOL - 1 OFFSET - 1)

(1_FERRO_ESQUERDO INSERT - DCMT 070204EN)

G0 T0101

G97 S390 M04
G0 G54 X40.8 Z2.865
G92 S6300
G96 S50
G99 G1 Z.865 F.1
Z-30.
X41.
X43.828 Z-28.586
G0 Z2.946
X40.6
G1 Z.946
Z-30.
X41.
X43.828 Z-28.586
G0 Z2.987
X40.4
G1 Z.987
Z-30.
X41.
X43.828 Z-28.586
G0 Z3.
X40.2
G1 Z1.
Z-30.
X40.8
X43.628 Z-28.586
G0 Z3.
X40.
G1 Z1.
Z-30.
X40.6
X43.428 Z-28.586
G0 Z3.
X39.8
G1 Z1.
Z-30.
X40.4
X43.228 Z-28.586
G0 Z3.
X39.6
G1 Z1.
Z-30.
X40.2
X43.028 Z-28.586
G28 U0. W0. M05
T0100
M30
%

Anexo IV - Processo Prático

Este anexo pretende mostrar um pequeno tutorial de como se procedeu o processo prático para a realização dos ensaios experimentais.

1. Desenhar o bloco de aço cilíndrico em Solidworks.

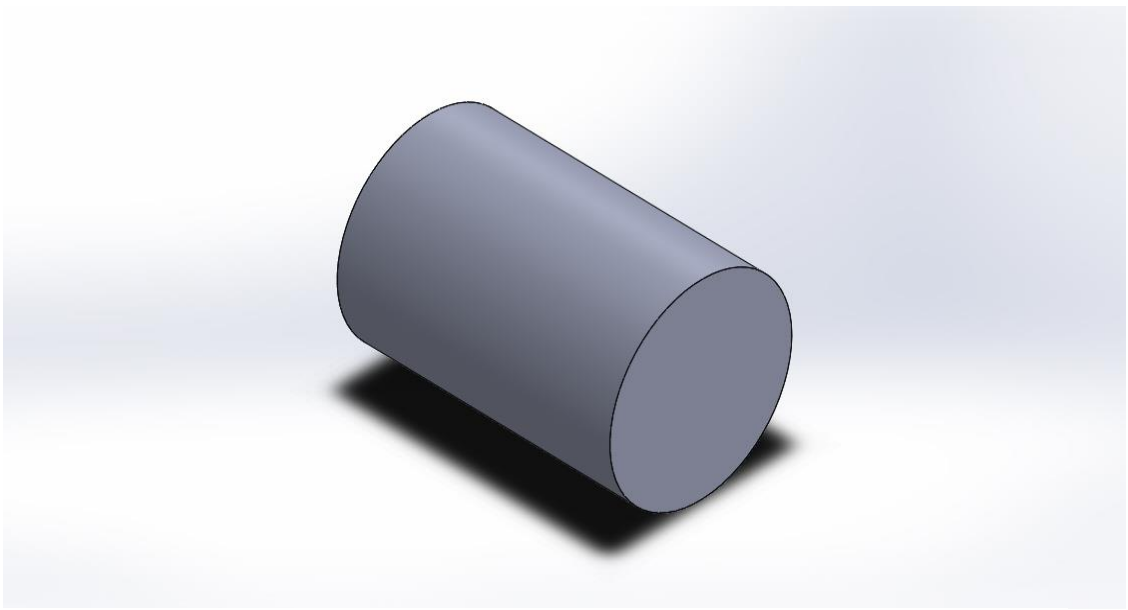


Figura 35 - Bloco de aço cilíndrico exibido em solidworks

2. Exportar o bloco de aço cilíndrico para o MasterCam®.

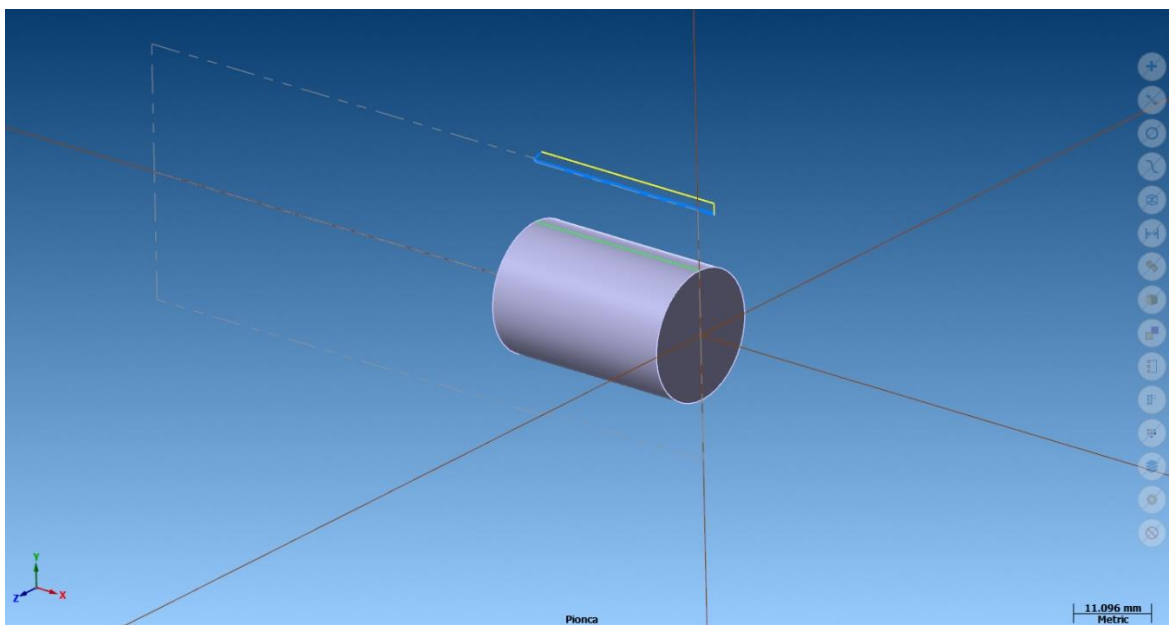


Figura 36 - Bloco de aço cilíndrico apresentado no MasterCam

3. Escolher as dimensões do material inicial.

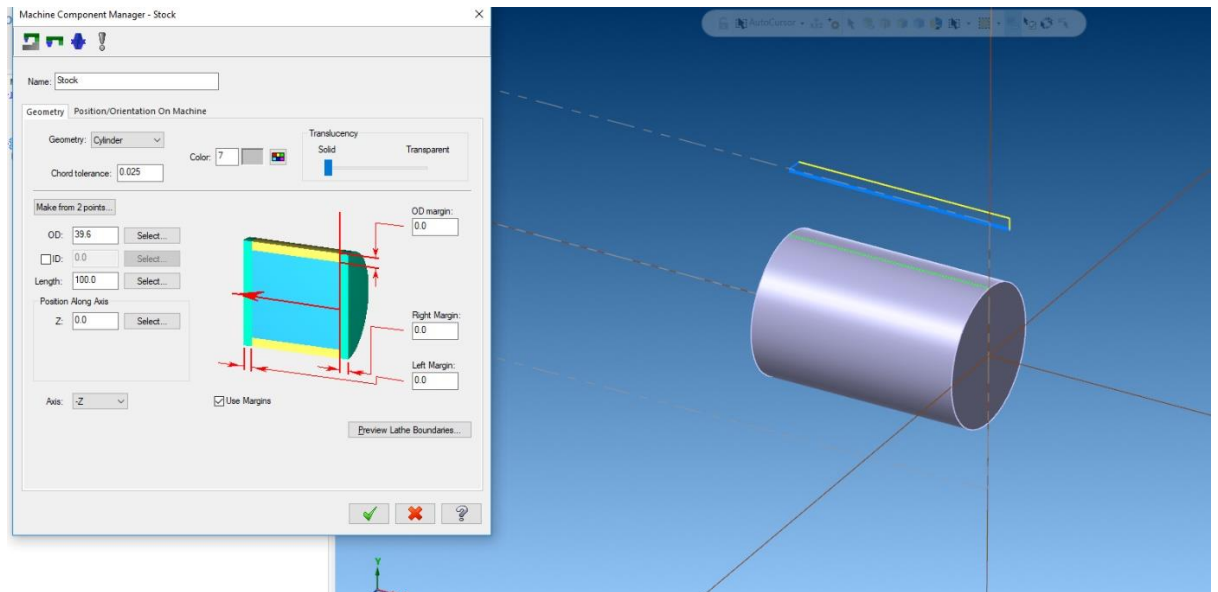


Figura 37 – Dimensões do material

4. Escolher o processo (Processo de Desbaste).

4.1. Escolher o ferro de desbaste.

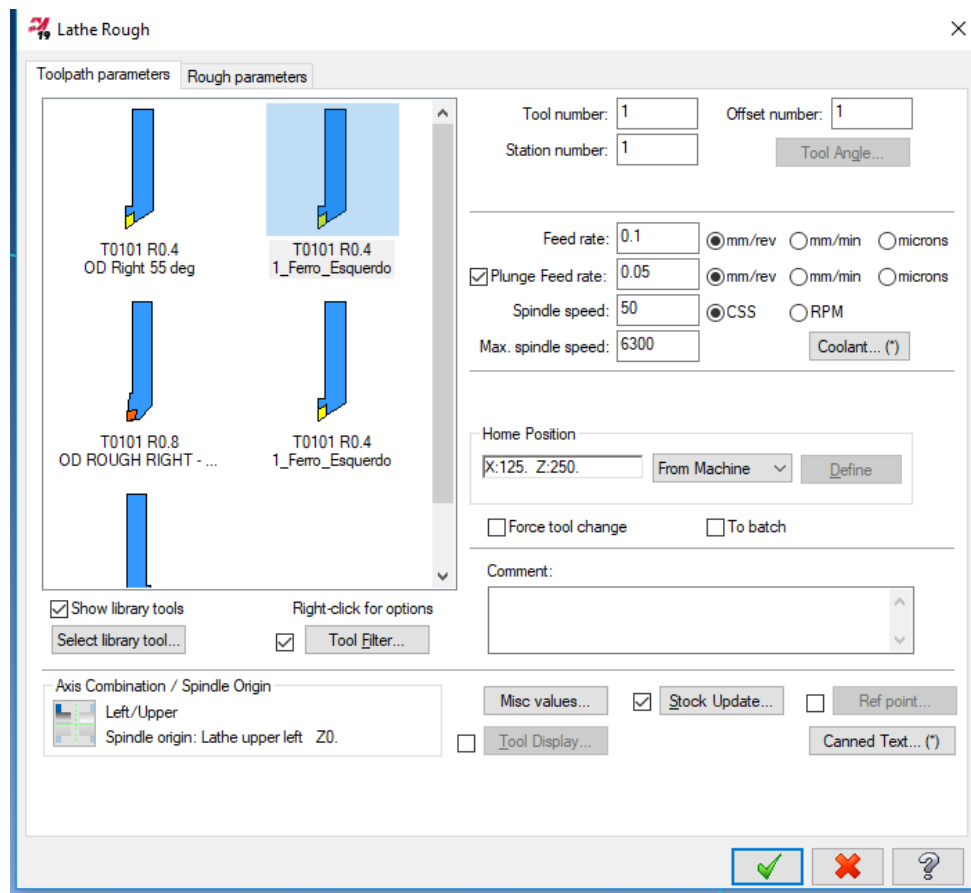


Figura 38 – Ferro de desbaste

4.2. Escolher o valor inicial da velocidade de avanço (Feed rate) e da velocidade de corte (Spindle speed) de acordo com a Tabela 10, à medida que se realiza os ensaios experimentais altera-se, consoante a mesma tabela, os valores iniciais para os valores pretendidos.

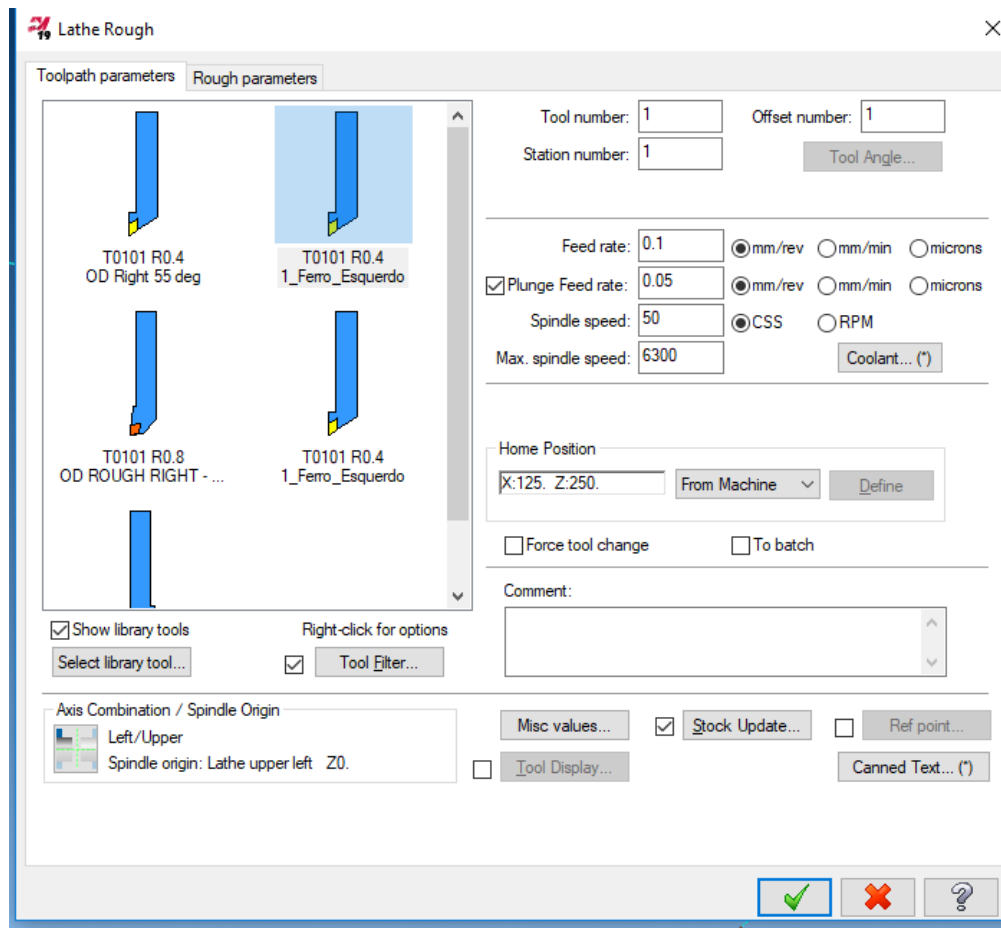


Figura 39 – Feed rate; Spindle speed

4.3. Escolher o valor inicial da penetração de acordo com a Tabela 10, à medida que se realiza os ensaios experimentais altera-se, consoante a mesma tabela, o valor inicial para o valor pretendido.

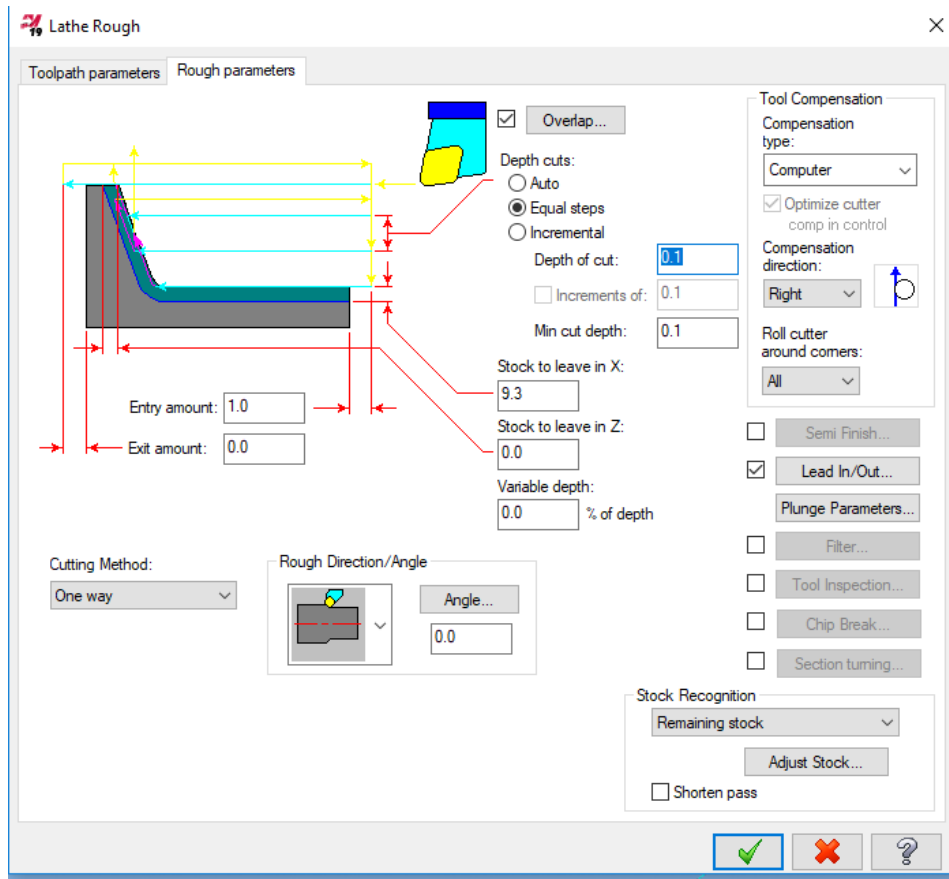


Figura 40 – Depth of cut

5. Simular o processo prático.

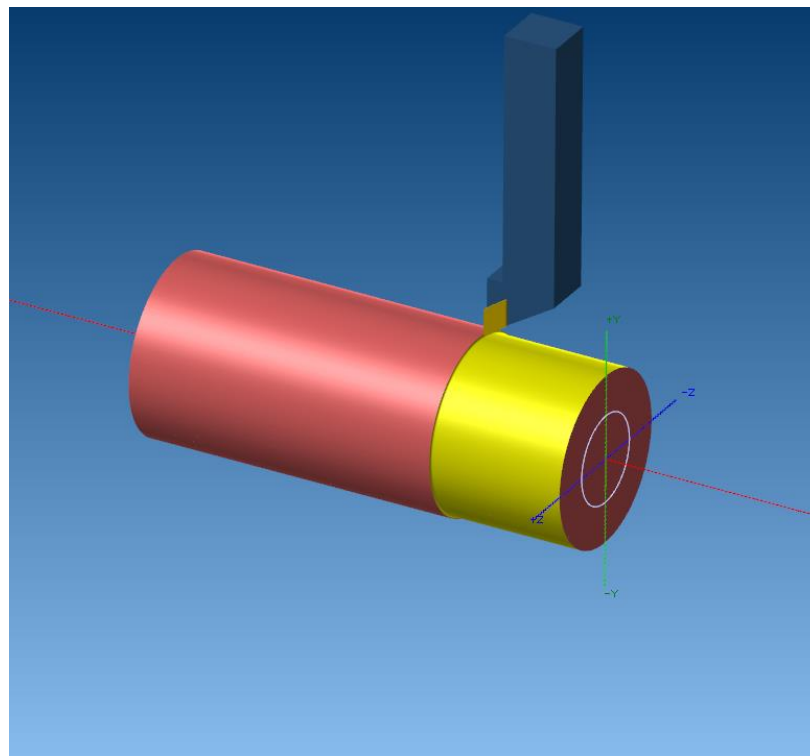


Figura 41 – Simulação no MasterCam®.

6. Gerar os códigos dos ensaios experimentais para posteriormente ser executado no torno de cnc.

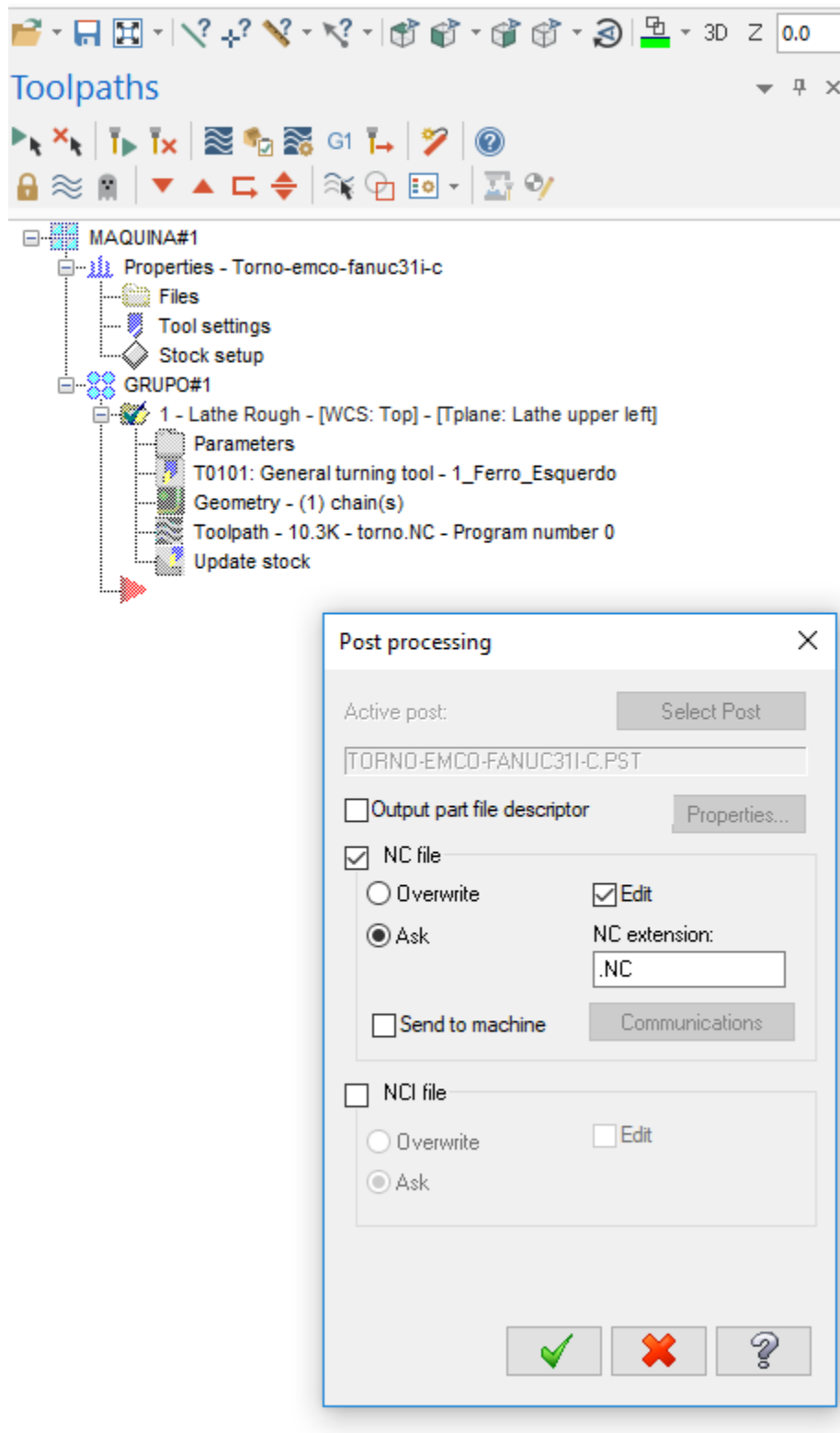


Figura 42 – Gerar os códigos dos ensaios experimentais