

Otimização de parâmetros de corte no processo de torneamento esférico CNC

Rui Alfredo da Cunha

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 2020

Otimização de parâmetros de corte no processo de torneamento esférico CNC

Rui Alfredo da Cunha

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:

Professor Doutor João Pinto Castro Ribeiro

Outubro de 2020

Dedico este trabalho:

De modo especial, aos meus pais e ao meu irmão por todo amor, cuidado e apoio recebido, sempre me incentivando a tornar-me uma pessoa e um profissional melhor.

Agradecimentos

Abrçar e concluir este desafio não foi deveras fácil, contudo, não seria possível alcançá-lo sem a ajuda e a presença de algumas pessoas que durante estes anos estiveram incondicionalmente a meu lado.

Em primeiro lugar quero agradecer ao Professor João Ribeiro pelo apoio, por toda a ajuda prestada, pela sua disponibilidade e por estar sempre pronto a ajudar durante o desenvolvimento deste trabalho e durante toda a minha vida académica.

À professora Ana Isabel, sempre disposta a ouvir-me e a ajudar-me em algumas questões, o meu obrigado pela ajuda e pela preocupação.

Aos meus pais, que me transmitiram que trabalhar é o caminho para o sucesso, por lutarem sempre para que nunca me faltasse nada e pela preocupação de estarem sempre reunidas as condições para que eu singrasse na vida.

À Inês, minha companheira e especialmente minha grande amiga, uma pessoa que caminhou ao meu lado, sempre com a certeza de que eu era capaz de atingir todos os objetivos a que me proponha, bastava acreditar em mim.

Ao meu irmão, por toda a força que me deu, por me dizer sempre que desistir nunca é o caminho e por ser o alívio da pressão que se vive em alguns momentos no percurso académico.

Ao Engenheiro Jorge pela disponibilidade prestada para fazer os ensaios no laboratório de Tecnologia Mecânica.

Um agradecimento muito sentido aos meus amigos, em especial ao João que acompanhou diretamente o meu percurso académico e que para todo o sempre estarão nas minhas memórias.

Muito Obrigado a todos.

Resumo

Cada vez mais, os principais objetivos na indústria é a produção a baixo custo, com a máxima qualidade e com o tempo de fabrico o mais curto possível. Para atingir esta meta, a indústria recorre, frequentemente, às máquinas de comando numérico (CNC), uma vez que com esta tecnologia torna-se capaz de alcançar uma elevada precisão e um tempo de processamento mais baixo.

As máquinas ferramentas CNC podem ser aplicadas em diferentes processos de maquinagem, tais como: torneamento, fresagem, furação, entre outros. De todos estes processos, o que vai ser investigado minuciosamente neste trabalho irá ser o torneamento. Utiliza-se, normalmente, este processo para maquinar peças de revolução metálicas.

Neste trabalho, são analisados os efeitos da variação de três parâmetros no processo de torneamento (velocidade de corte, velocidade de avanço e penetração) na variação da rugosidade superficial de peças cilíndricas fabricadas em aço de construção (DIN CK45). Para essa análise é utilizado um método de otimização, o método de Taguchi.

Com este método foi construída uma matriz ortogonal L9 e, para cada parâmetro, foram definidos três níveis diferentes e realizados 9 ensaios. Após cada ensaio, faz-se a medição superficial da rugosidade da peça. Com base nos resultados obtidos das medições da rugosidade é feito um tratamento estatístico dos dados através da análise de variância (Anova) a fim de determinar a influência de cada um dos parâmetros na rugosidade superficial. Verificou-se que a rugosidade mínima medida foi de 1,05 μm .

Neste estudo foi também determinada a contribuição de cada um dos parâmetros de maquinagem e a sua interação. A análise dos valores de “F-ratio” (Anova) revela que o fator mais importante é a velocidade de avanço com uma contribuição de cerca de 95,97%.

Palavras Chaves: Torneamento, Otimização, Taguchi, Rugosidade, ANOVA

Abstract

Nowadays, the main objectives in the industry is the low-cost production, with maximum quality and with a shortest possible manufacturing time. To achieve this goal, the industry often uses numerically controlled machines (CNC), since with this technology it has been able to achieve high precision and a lower processing time.

CNC machine can be used in different machining processes, such as: turning, milling, drilling, among others. Of all these processes, which will be thoroughly investigated in this work will be turning. This process is normally used to machine metallic materials such as steel and cast iron.

In this project, the effects of the variation of three parameters in the turning process will be analysed (cutting speed, feed speed and penetration), individually, and the interaction between some of them, in the variation of roughness in DIN CK45. For this analysis, an optimization method will be introduced, the Taguchi method.

With this method an orthogonal L9 matrix was built and for each parameter three different levels were defined, and 9 tests were performed. After each test, the surface roughness is measured. Based on the results obtained from the roughness measurements, a statistical treatment of the data is made through analysis of variance (ANOVA) in order to determine the influence of each parameters on the surface roughness. It was found that the minimum roughness measured is 1.05 μm .

In this study, the contribution of each machining parameters and their interaction was also determined. The analysis of the “F-ratio” values (Anova) reveals that the most important factor is the feed speed. It has a contribution of around 95.97%.

Key-words: Turning, Optimization, Taguchi, Roughness, ANOVA

Índice

1. Introdução	1
1.1. Enquadramento.....	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Organização dos capítulos	3
2. Fundamentos Teóricos	5
2.1. Processos de maquinagem	5
2.2. Torneamento.....	8
2.3. Tipos de torno.....	12
2.3.1. Tornos paralelos ou de pontos.....	12
2.3.2. Tornos de torneamento no ar ou de refrentar	14
2.3.3. Tornos verticais	14
2.3.4. Tornos revólver	15
2.3.5. Tornos copiadores	15
2.3.6. Tornos Automáticos	16
2.4. Materiais para ferramenta de corte.....	16
2.5. Acabamento superficial	19
2.5.1. Rugosimetria.....	19
2.5.1.1. Critérios de rugosidade.....	21
2.5.2. Modelos geométricos das superfícies maquinadas	23
2.5.2.1. Aresta postiça de corte (APC)	24
2.5.3. Influência dos parâmetros de maquinagem	25
2.5.3.1. Condições de corte.....	25
2.6. Taxa de produção	26
2.7. Método de Taguchi.....	27
2.7.1. Função perda na qualidade de Taguchi	27
2.7.2. Taguchi e razão sinal-ruído.....	28
3. Materiais e Métodos	30
3.1. Matriz ortogonal L9 para os ensaios experimentais segundo o método de Taguchi	30
3.2. Ensaios e material utilizado.....	32
4. Resultados Obtidos.....	37
4.1. Resultados obtidos segundo o método de Taguchi	37
4.1.1 Rugosidade Superficial	37

4.1.2 Taxa de produção	38
4.2. Análise da geometria da ponta maquinada.....	39
5. Análise e Discussão de Resultados	41
5.1. Razão Sinal-Ruido.....	41
5.1.1 Rugosidade Superficial	41
5.1.2 Taxa de produção	44
5.2 Análise ANOVA	46
5.2.1 Análise ANOVA de rugosidade média	46
5.2.2 Análise ANOVA com todos os valores medidos de rugosidade.....	47
5.3 Confirmação dos ensaios	50
6. Conclusões e propostas para trabalhos futuros.....	53
6.1. Conclusões.....	53
6.2. Sugestões para trabalhos futuros.....	54
Referências bibliográficas.....	55
Anexos.....	59

Lista de figuras

Figura 1. Serra de fita [19].....	6
Figura 2. Furadora [18].....	6
Figura 3. Torno CNC [21].	6
Figura 4. Plaina horizontal [24].....	7
Figura 5. Fresadora CNC 3 eixos [24].....	7
Figura 6. Retificadora CNC [225].	7
Figura 7. Eletroerosão CNC por penetração [26].	8
Figura 8. Operação de torneamento cilíndrica exterior [18].	8
Figura 9. Torneamento cilíndrico externo [28].	10
Figura 10. Torneamento cilíndrico interno [28].	10
Figura 11. Sangramento axial [28].	10
Figura 12. Torneamento cónico externo [28].	10
Figura 13. Torneamento cónico interno [28].....	10
Figura 14. Facejamento [28].....	11
Figura 15. Sangramento radial [28].....	11
Figura 16. Perfilar radial [28].	11
Figura 17. Perfilar axial [28].	11
Figura 18. Torneamento curvilíneo [28].....	11
Figura 19. Torno horizontal [adaptado 22].....	14
Figura 20. Torno de torneamento no ar ou de refrentar [22].	14
Figura 21. Torno vertical [22].	15
Figura 22. Torno revólver [22].	15
Figura 23. Torno CNC [21].	16
Figura 24. Campo de aplicação de diversos materiais para ferramentas de corte [18]. .	17
Figura 25. ordens de grandeza dos defeitos geométricos do ponto de vista tecnológico [18].	19
Figura 26. Representação da definição das superfícies geométrica e efetiva e dos respetivos perfis [18].	20
Figura 27. Esquema dos diversos comprimentos de medida utilizados na rugosidade [18].	21
Figura 28. Rugosidade média [30].	21
Figura 29. Rugosidade máxima [30].	22

Figura 30. Rugosidade total [30].	23
Figura 31. Rugosidade média [30].	23
Figura 32. Esquema da formação da aresta postiça de corte [18].	25
Figura 33. Gráfico de função de perda [35].	28
Figura 34. Representação dos pontos de medição no exemplar.	32
Figura 35. Serra elétrica.	33
Figura 36. Blocos de aço cilíndricos.	34
Figura 37. Simulação obtida no Mastercam da trajetória da maquinagem.	34
Figura 38. Peça fixa no torno CNC.	35
Figura 39. Bloco de poliestireno expandido (EPS).	35
Figura 40. Medição da rugosidade superficial.	36
Figura 41. Torno de CNC - Concept Turn 260 T.	36
Figura 42. Gráfico da rugosidade superficial.	38
Figura 43. Gráfico de comparação entre a rugosidade média e a taxa de produção.	39
Figura 44. Extremidade esférica com a menor rugosidade.	39
Figura 45. Extremidade esférica com a maior rugosidade.	40
Figura 46. Extremidade esférica com uma rugosidade média.	40
Figura 47. Valor médio S/N para os diferentes parâmetros relativamente à rugosidade superficial.	43
Figura 48. Rugosidade superficial média por ensaio.	44
Figura 49. Velocidade de avanço VS Rugosidade para a rugosidade média.	47
Figura 50. Velocidade de avanço VS Rugosidade para todos os valores medidos.	48
Figura 51. Penetração VS Rugosidade para todos os valores medidos.	49
Figura 52. Velocidade de corte VS Rugosidade para todos os valores medidos.	50

Lista de tabelas

Tabela 1. Propriedades de alguns materiais para ferramentas de corte [20].	18
Tabela 2. Classes de rugosidade [31].	22
Tabela 3. Valores de referência da ferramenta de corte.	30
Tabela 4. Parâmetros e níveis.	31
Tabela 5. Tabela seletora de matriz ortogonal de Taguchi.	31
Tabela 6. Matriz ortogonal L9 segundo Taguchi.	31
Tabela 7. Matriz L9 modificada.	32
Tabela 8. Matriz L9 segundo Taguchi com os valores dos parâmetros da experiência .	32
Tabela 9. Composição química do DIN CK45.	33
Tabela 10. Valores obtidos nos ensaios para a rugosidade superficial.	37
Tabela 11. Valores obtidos nos ensaios para a taxa de produção.	38
Tabela 12. Valores S/N e rugosidade média.	42
Tabela 13. Resultados S/N para a rugosidade superficial.	43
Tabela 14. Valor da razão S/N da taxa de produção.	45
Tabela 15. Resultados S/N para a taxa de produção.	45
Tabela 16. Resultados da análise ANOVA para a rugosidade média.	46
Tabela 17. Tabela com os resultados da análise ANOVA para todos os valores medidos.	47
Tabela 18. Tabela com o teste de faixa múltipla para a velocidade de avanço usando o método de Fisher e 95% de confiança.	48
Tabela 19. Teste de faixa múltipla para a penetração (ap) usando o método de Fisher e 95% de confiança.	49
Tabela 20. Teste de faixa múltipla para a velocidade de corte usando o método de Fisher e 95% de confiança.	49
Tabela 21. Resumo dos melhores resultados de rugosidade.	50
Tabela 22. Resultados S/N para rugosidade de superfície.	51
Tabela 23. Resultados dos testes de confirmação para a rugosidade de superfície.	51
Tabela 24: Valores totais da medição da rugosidade para a análise ANOVA.	Erro!

Marcador não definido.

Acrónimos

CNC - Controlo numérico computadorizado

ASQ - American Society for Quality

ANOVA - Análise estatística da variância

CN - Comando Numérico

Al_2O_3 – Alumina

Si_3N_4 – Nitreto de silício

L – Comprimento de base

L_m – Comprimento de cálculo

L_v – Primeiro comprimento de palpagem

L_n – Último comprimento de palpagem

L_t – Comprimento de palpagem

R_a - Rugosidade média

R_y - Rugosidade máxima

R_t - Rugosidade total

APC - Aresta postiça de corte

T_p - Taxa de produção

V_c : velocidade de corte

f_z : velocidade de avanço

a_p : penetração

S/N – Razão Sinal-Ruído

CAM - Computer Aided Manufacturing

1. Introdução

1.1. Enquadramento

Uma empresa só se mantém competitiva no mercado se garantir um elevado nível de investigação e desenvolvimento no seu produto.

Um estudo realizado pela ASQ (*American Society for Quality*), sobre o futuro da qualidade para as primeiras duas décadas do século XXI, afirma que “a procura da qualidade deve mudar, tornar-se mais inovadora, flexível e rápida na implementação de soluções eficazes que conduzam a resultados nos negócios e reflitam os desejos do consumidor”. Tal investigação descreve que a inovação, a flexibilidade e a velocidade são os fatores críticos para o sucesso das empresas em adquirir vantagem competitiva, apercebem-se que mudanças são inevitáveis para que possam acompanhar todas as evoluções do mercado [1].

Entre as diferentes áreas industriais, uma das mais importantes no setor da metalomecânica são as indústrias que utilizam processos de fabrico por arranque de apara, também conhecidos por processos de maquinagem. Por esta razão, procuram-se empresas industriais de maquinagem com maior produtividade, flexibilidade de sistemas de produção, redução de custos e obtenção de peças fabricadas com melhor qualidade superficial e dimensional [2].

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 exatidão 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 [3].

Estima-se que apenas nos Estados Unidos o montante gasto anualmente com processos de maquinagem ultrapasse os 100 biliões de dólares, o que demonstra a grande importância que tais processos possuem na economia, e por si só justificaria os estudos realizados, a maioria das pesquisas teve sempre o objetivo de melhorar a taxa de remoção de material e a diminuição dos custos de fabrico [4].

De acordo com o objetivo de maquinagem e a escolha de uma ferramenta de corte, existem diferentes combinações de parâmetros, como a velocidade de corte, avanço, profundidade axial ou radial para obter-se resultados diferentes em termos de qualidade da superfície maquinada e desgaste da ferramenta. Cada combinação dos parâmetros de corte vai resultar numa rugosidade da superfície e influenciar a vida da ferramenta. No entanto, é muito difícil definir a melhor combinação que proporciona um valor inferior de rugosidade e uma vida máxima da ferramenta. Além disso, é essencial reduzir os custos, sem reduzir a qualidade dos resultados.

A qualidade da superfície maquinada é avaliada através da medição da rugosidade da superfície, sendo esta uma característica fundamental da qualidade. Normalmente, este parâmetro é obtido experimentalmente, no entanto, alguns investigadores têm tentado prever a rugosidade da superfície do processo de maquinagem por meio de algoritmos matemáticos, mas estes estudos são muito lentos e dispendiosos [5-7].

Para conseguir a melhor combinação dos parâmetros é necessário testar um grande número de combinações, o que é impraticável para a indústria. 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 [8], sendo as mais utilizadas a lógica Fuzzy [9], os algoritmos genéticos [10], o método de Taguchi [11], Análise Relacional de Grey [12] e o método de resposta de superfície [13]. Neste trabalho foi implementado o método de Taguchi.

O Método de Taguchi [14] 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, por exemplo a rugosidade [15]. Este método está, normalmente, associado a ferramentas de estatística, como a análise de variância (ANOVA) que permite modelar alguma incerteza dos resultados experimentais do modo a estimar resultados futuros.

1.2. Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é determinar os principais parâmetros de maquinagem que influenciam a rugosidade de superfícies esféricas torneadas, bem como, determinar a combinação ótima para a obtenção da menor rugosidade. Um outro objetivo

importante é o de avaliar a influência da interação entre diferentes parâmetros de maquinagem no acabamento superficial das peças. Para efetuar esses estudos utilizou-se o método de Taguchi. Com o método de Taguchi, definem-se os parâmetros do processo e respetivos níveis, bem como, a matriz ortogonal para a realização dos ensaios experimentais e a análise estatística dos dados pelo método da análise da variância (ANOVA).

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 por finalidade apresentar um enquadramento do trabalho, fazendo referência aos seus objetivos, metodologias seguidas para os atingir e uma breve descrição da estrutura da dissertação apresentada, para que o leitor tenha desde logo uma ideia alargada do trabalho.
- O **Capítulo 2 “Fundamentos Teóricos”**, visa apresentar alguns fundamentos teóricos considerados revelantes para a correta compreensão do estudo apresentado nesta dissertação. No início, apresenta-se uma descrição dos principais processos de maquinagem, 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, o método de otimização utilizado no trabalho, o Método de Taguchi.
- 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

Neste capítulo são apresentados alguns conceitos teóricos, considerados importantes para a correta compreensão do estudo apresentado neste trabalho. No início, apresenta-se uma descrição dos principais parâmetros de maquinagem e a sua influência nas técnicas de maquinagem. Seguindo-se de uma breve introdução do método de Taguchi.

2.1. Processos de maquinagem

Maquinagem é um termo que abrange vários processos de fabrico desenvolvidos para a 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 tamanho e acabamento específico a fim de atender os requisitos de projeto. Quase todos os produtos fabricados têm componentes que necessitam de ser maquinados, muitas vezes com grande rigor dimensional. Portanto, este conjunto de processos são dos mais importantes no fabrico devido ao valor acrescentado que conferem ao produto final [16,17].

Os processos de maquinagem por arranque de avara mais comuns são [17]:

- Serragem
- Furação
- Torneamento
- Aplainamento
- Fresagem
- Retificação
- Electroerosão

A serragem consiste no corte de metais e outros materiais, é uma das operações mais utilizadas, sendo normalmente a primeira operação do processo de fabrico responsável por seccionar e dividir a matéria prima, que é adquirida em chapas, barras, varões, entre outros [18].



Figura 1. Serra de fita [19].

Muitas 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 [18].



Figura 2. Furadora [18].

O torno é uma máquina ferramenta utilizada na produção de peças com forma de corpos de revolução. O torno (Figura 3) permite as seguintes operações: torneamento de superfícies cilíndricas ou cónicas, facejamento de superfícies planas, entre outras [17].



Figura 3. Torno CNC [21].

O aplainamento (Figura 4) é a operação que tem por fim obter superfícies planas [23].



Figura 4. Plana horizontal [24].

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 mandricular, e roscagem com macho. Através da operação de fresagem podem obter-se peças com superfícies planas, com ranhuras ou entalhes, dentes, etc. [18].



Figura 5. Fresadora CNC 3 eixos [24].

A retificação é um processo de fabrico por arranque de apara que se utiliza para melhorar o acabamento e aumentar a precisão dimensional das peças. Tal como nas ferramentas de corte utiliza-se um disco rotativo a que se dá o nome de mó.



Figura 6. Retificadora CNC [225].

A eletroerosão (Figura 7) tem assumido um papel relevante em diferentes setores 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.) [17], [18].



Figura 7. Eletroerosão CNC por penetração [26].

2.2. Torneamento

O torneamento é a operação por intermédio da qual um sólido é feito rodar em torno do eixo da máquina que executa o trabalho de maquinagem, ou seja, o torno mecânico, ao mesmo tempo que uma ferramenta de corte lhe retira material perifericamente, de modo a transformá-lo numa peça bem definida, tanto em relação à forma quanto às dimensões como está representada a seguir na Figura 8.

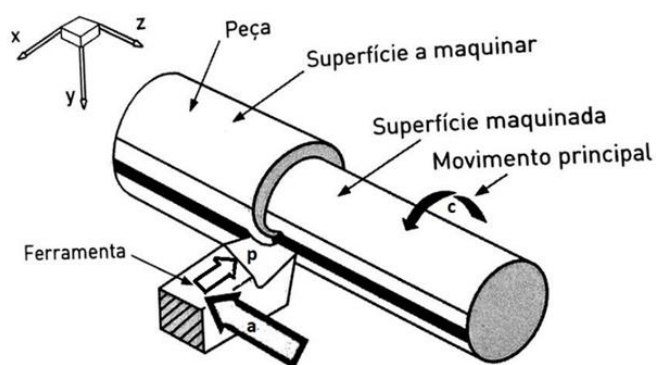


Figura 8. Operação de torneamento cilíndrica exterior [18].

Na Figura 8 está representado, em esquema, o torneamento de uma peça cilíndrica onde é possível observa os movimentos duma operação de torneamento [22]:

- 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 [22].

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 [18].

O torno executa qualquer espécie de superfície de revolução uma vez que a peça que se trabalha tem o movimento principal de rotação, enquanto a ferramenta possui o movimento de avanço e de translação. Permite, portanto, maquinar qualquer peça que deva ter seção circular e qualquer combinação de tais seções. Podem ser fabricados eixos, polias, pinos, buchas e toda a espécie de peças roscadas. Além de tornear superfícies cilíndricas externas e internas, o torno pode maquinar superfícies planas no topo das peças, superfícies cônicas, esféricas e perfiladas, facejar e realizar incisões. O torno também pode ser usado para furar, alargar, recartilhar, enrolar molas, polir peças (com uso de lima fina, lixa ou esmeril), etc. As operações fundamentais realizadas por um torno são: cilindrar, roscar a buril, facejar, sangrar, tornear cônico, perfilar, furar e recartilhar.

Passando agora à forma da trajetória, o torneamento pode ser em forma retilínea ou em forma curvilínea.

➤ Torneamento retilíneo é um processo no qual a ferramenta se desloca segundo uma trajetória retilínea. O torneamento retilíneo pode ser:

• **Torneamento cilíndrico** – Processo de torneamento no qual a ferramenta se desloca segundo uma trajetória paralela ao eixo principal de rotação da máquina. Pode ser externo (Figura 9) ou interno (Figura 10).

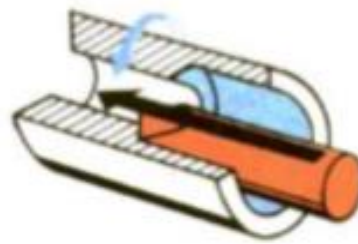
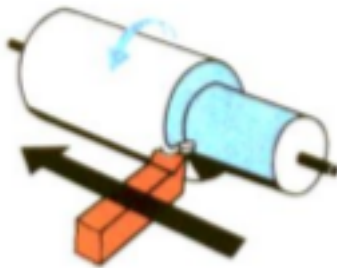


Figura 9. Torneamento cilíndrico externo [28].

Figura 10. Torneamento cilíndrico interno [28].

Quando o torneamento cilíndrico visa obter na peça uma incisão circular, na face perpendicular ao eixo principal de rotação da máquina, o torneamento é denominado sangramento axial (Figura 11).

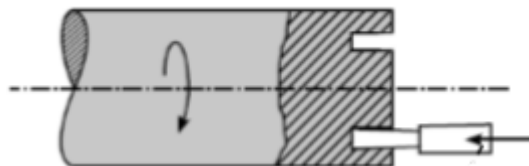


Figura 11. Sangramento axial [28].

• **Torneamento cônico** – Processo de torneamento no qual a ferramenta desloca-se segundo uma trajetória retilínea, inclinada em relação ao eixo principal de rotação da máquina. Pode ser externo (Figura 12) ou interno (Figura 13).

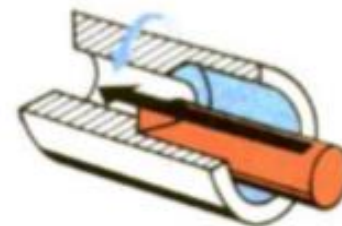


Figura 12. Torneamento cônico externo [28].

Figura 13. Torneamento cônico interno [28].

• **Torneamento radial** – Processo de torneamento no qual a ferramenta desloca-se segundo uma trajetória retilínea, perpendicular ao eixo principal de rotação da máquina.

Quando o torneamento radial visa a obtenção de uma superfície plana, o torneamento é denominado torneamento de facejamento (Figura 14). Quando o torneamento radial visa a obtenção de uma incisão circular, o torneamento é denominado sangramento radial (Figura 15).

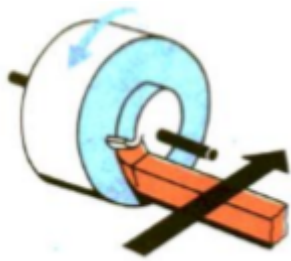


Figura 14. Facejamento [28].

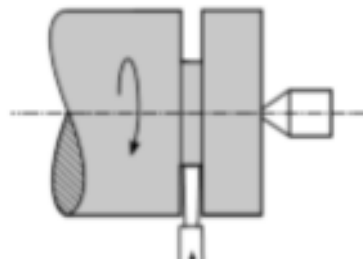


Figura 15. Sangramento radial [28].

• **Perfilar** – Processo de torneamento no qual a ferramenta desloca-se segundo uma trajetória retilínea radial (Figura 16) ou axial (Figura 17), visando a obtenção de uma forma definida, determinada pelo perfil da ferramenta.

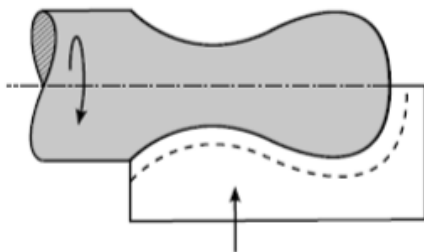


Figura 16. Perfilar radial [28].

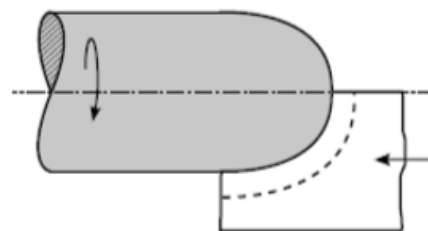


Figura 17. Perfilar axial [28].

➤ **Torneamento curvilíneo** – Processo de torneamento, no qual a ferramenta desloca-se segundo uma trajetória curvilínea (Figura 18).

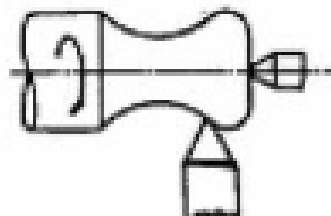


Figura 18. Torneamento curvilíneo [28].

Quanto à finalidade, as operações de torneamento podem ser classificadas ainda em torneamento de desbaste e torneamento de acabamento. Entende-se por acabamento a

operação de maquinagem destinada a obter na peça as dimensões finais, ou um acabamento superficial específico, ou ambos. O desbaste é a operação de maquinagem, anterior a de acabamento, com o objetivo de obter a peça na forma e nas dimensões próximas das finais [17].

2.3. Tipos de torno

Para atender às numerosas necessidades, a técnica moderna põe à nossa disposição uma grande variedade de tornos que diferem entre si pelas dimensões, características, forma construtiva, etc.

A escolha do tipo de torno adequado para a execução de uma determinada fabricação deverá ser feita baseando-se nos seguintes fatores:

- Dimensões das peças a produzir
- Forma das mesmas
- Quantidade a produzir
- Possibilidade de obter as peças diretamente de vergalhões (barras, perfis).
- Grau de precisão exigido.

Assim sendo a classificação mais simples dos tipos de tornos são os seguintes:

- Tornos paralelos ou horizontal ou de pontos
- Tornos de torneamento no ar ou de refrentar
- Tornos verticais
- Tornos revólver
- Tornos copiadores
- Torno automático: - Comando Numérico (CN)
- Comando Numérico Computorizado (CNC)

2.3.1. Tornos paralelos ou de pontos

Os tornos horizontais (Figura 19) são os mais comuns e mais usados. Por apresentarem dificuldade na mudança de ferramentas, não oferecem grandes

possibilidades de fabricação em série, mas por outro lado conseguem realizar um grande número de operações de maquinagem. Basicamente, o torno mecânico é constituído por uma base maciça e rígida, para resistir a deformações e apresentar capacidade suficiente de amortecimento das vibrações resultantes das operações de maquinagem. A peça a ser maquinada é fixada numa bucha, suportada pela árvore principal que faz parte do cabeçote fixo. A árvore principal é dotada de um movimento de rotação contínuo que se transfere à peça, que, por sua vez, é submetida à ação de uma ou várias ferramentas, de modo a ter material arrancado. A árvore deve ser capaz de rodar com velocidades periféricas diferentes, as quais são estabelecidas em função do diâmetro das peças que irão ser maquinadas, do tipo de acabamento desejado, do tipo de operação planeada (desbaste, acabamento etc.) do tipo de material etc.

Uma caixa de engrenagens, convenientemente localizada, permite a mudança de velocidade da árvore.

Na parte central está situado o carro porta-ferramentas, montado sobre o carro principal. O conjunto – carro porta-ferramentas e carro principal – é projetado de modo a ser dotado de movimentos longitudinal e transversal, assim, a ferramenta pode deslizar, se necessário, segundo uma linha oblíqua, ou seja, uma linha resultante dos movimentos longitudinal e transversal. O avanço da ferramenta pode ser realizado manualmente ou automaticamente. No conjunto carro porta-ferramentas e carro principal, situa-se, ainda, uma placa giratória, que roda em torno de um eixo vertical, de modo a ser colocada em qualquer ângulo em relação ao eixo da peça sob maquinagem.

Na outra extremidade do torno situa-se o cabeçote móvel, cujo objetivo é suportar as peças que giram. Compõe-se de um suporte fundido, de um contraponto e de dispositivos diversos como mangote, volante e outros. O mangote não roda, porém pode deslocar-se alguns centímetros no sentido longitudinal e ser travado na posição desejada. O cabeçote móvel é oco e possui um cone interno onde podem ser fixadas diversas ferramentas, como brocas helicoidais, alargadores além do contraponto no qual é avançado de encontro ao centro das peças [27].

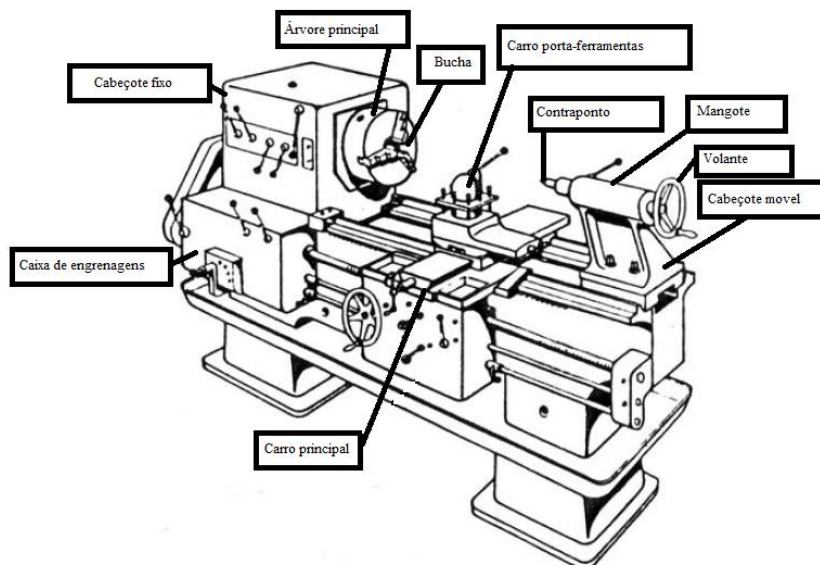


Figura 19. Torno horizontal [adaptado 22].

2.3.2. Tornos de torneamento no ar ou de refrentar

Este torno de torneamento no ar (Figura 20) é concebido para maquinar peças de grande diâmetro e pequeno comprimento e, especialmente, para refrentar. Caracterizados por a peça a ser trabalhada ser montada num prato, 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, para peças de grande diâmetro e pequeno comprimento, como rodas. Este facto, nos tornos de pontos, conduzia a máquinas de construção muito cara [22].

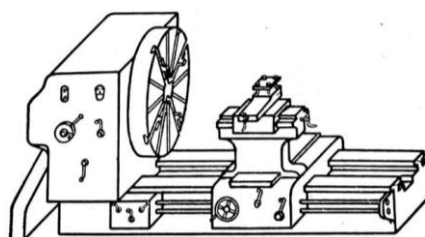


Figura 20. Torno de torneamento no ar ou de refrentar [22].

2.3.3. Tornos verticais

Os tornos verticais (Figura 21) são utilizados na maquinagem de peças de grandes dimensões, como grandes volantes, polias, rodas dentadas, as quais, devido as suas dimensões e peso, não podem ser facilmente montadas numa placa em posição vertical. Desse modo, para montar este tipo de peças utiliza-se uma plataforma redonda horizontal,

que roda. A partir da base do torno, elevam-se dois montantes, unidos na parte superior por uma ponte. Sobre as guias dos dois montantes, desliza um cabeçote móvel, onde se situa uma torre porta-ferramenta giratória. As plataformas horizontais desses tornos podem atingir vários metros de diâmetro [27].

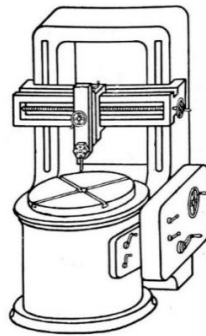


Figura 21. Torno vertical [22].

2.3.4. Tornos revólver

Os tornos revólver (Figura 22) possuem, além dos componentes básicos do torno comum, mais um carro, dotado de movimento longitudinal que leva uma torre giratória porta-ferramenta com várias posições (cinco ou seis). Para cada posição que a torre roda, apresenta-se uma nova ferramenta. Pode-se assim, repetir-se um ciclo preestabelecido de operações de maquinagem [27].

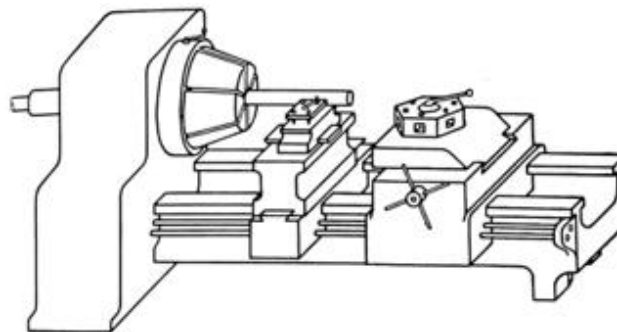


Figura 22. Torno revólver [22].

2.3.5. Tornos copiadores

Os tornos copiadores utilizam uma peça protótipo que impõe um determinado perfil na peça que está a ser maquinada, por intermédio de uma ferramenta que se movimenta automaticamente.

2.3.6. Tornos Automáticos

Os tornos automáticos (Figura 23) são tornos do tipo revólver em que se consegue de forma automática colocar na devida posição as ferramentas precisas na realização das operações e avanço do material sem ser preciso a intervenção humana no processo. 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, sempre com o mesmo rigor como se estivesse a tomar conta só de um.

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



Figura 23. Torno CNC [21].

2.4. Materiais para ferramenta de corte

A escolha de materiais 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.

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-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 discontinuidades 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 24) [29].

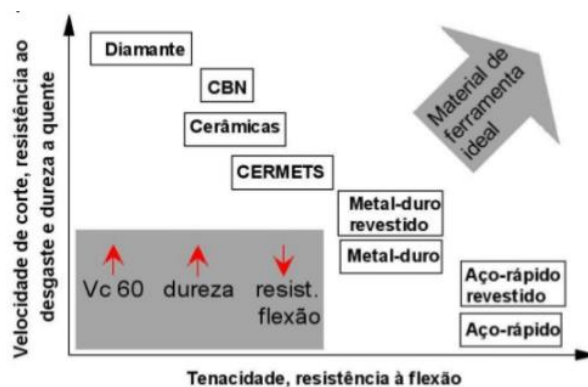


Figura 24. Campo de aplicação de diversos materiais para ferramentas de corte [18].

Basicamente, os materiais para ferramentas de corte por arranque de apra podem ser agrupados nas seguintes classes, apresentadas por ordem crescente de dureza:

- aços rápidos
- ligas fundidas (estelites)
- carbonetos sinterizados (metal duro)
- “cermets”
- cerâmicos
- ultraduros

Tabela 1. Propriedades de alguns materiais para ferramentas de corte [18].

Material	Dureza HV 10/30	Tensão de rotura transversal (MPa)	Módulo elasticidade (GPa)	Coefficiente de dilatação térmica ($\times 10^{-6}/K$)	Conduta térmica (W/m.K)
Aço rápido	700-900	2500-4000	2,6-3	9-12	15-48
Carbonetos	1200-1800	1300-3200	4,7-6,5	4,6-7,5	20-80
Si ₃ N ₄	1350-1600	600-900	2,8-3,2	3-3,3	20-35
SIALON	1350-1600	600-900	2,8-3,2	3-3,3	20-35
Al ₂ O ₃	1450-2100	400-800	3-4,5	5,5-8	10-38
Al ₂ O ₃ +TiC	1450-2100	400-800	3-4,5	5,5-8	10-38
Nitreto de Boro cúbico (CBN)	3500 400	500-800	6,8	4,9	100
Diamante policristalino (PCD)	5000 6000	600-1100	8,4	1,5	550

A Tabela 1 apresenta, resumidamente, algumas propriedades mecânicas das principais classes de materiais utilizados em ferramentas de corte. A classe mais utilizada em produção é a dos carbonetos sinterizados, ultrapassando os aços rápidos que perderam o seu destaque. Os materiais de maior dureza, nomeadamente os cerâmicos estão a ganhar relevância em determinadas aplicações, como em operações de torneamento. Destacando-se a sua elevada dureza, especialmente a quente, proporcionando velocidades de corte muito elevadas, contudo, são bastante frágeis, dificultando a sua aplicação em operações de corte intermitente. Porém, o desenvolvimento das máquinas-ferramentas e de

dispositivos de aperto das ferramentas contendo sistemas anti vibratórios permitem a sua utilização em aplicações mais generalizadas.

2.5. Acabamento superficial

Na prática industrial, quase todas as superfícies técnicas funcionais são obtidas por maquinagem e não possuem uma forma geométrica exata [18]. Qualquer que seja o processo de corte por arranque de apana, este deixa sempre as suas marcas, e por mais que se controle e se tenha o máximo de rigor a lidar com os parâmetros de maquinagem, não é possível obter uma superfície absolutamente perfeita. As características intrínsecas ao processo de maquinagem, as condições de corte, a geometria e as imperfeições associadas ao desgaste das ferramentas de corte, a dureza do material a maquinar em conjunto com o tipo de conceção, estado de conservação da máquina-ferramenta e modo de fixação da peça, condicionam a textura da superfície que não é mais do que uma combinação de defeitos de vários tipos e magnitude. A superfície real é uma combinação destes defeitos quer a nível de comprimentos de onda quer de amplitudes, como é ilustrado na Figura 25 a seguir apresentada.


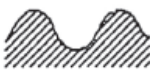

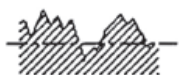
Tipo de defeito	Número de ordem	Designação	Esquema do perfil geométrico
Defeitos macro geométricos	1	Forma	
	2	Ondulação	
Defeitos micro geométricos		3	Rugosidade
	4		
Somatório de defeitos	De 1 a 4	Superfície efectiva	

Figura 25. ordens de grandeza dos defeitos geométricos do ponto de vista tecnológico [18].

2.5.1. Rugosimetria

A rugosimetria é a técnica mais comum de análise da microgeometria das superfícies técnicas. De seguida, é apresentada a terminologia utilizada e os conceitos de

superfície, perfil e comprimento de palpagem. Deste modo, podem-se diferenciar três conceitos de superfície:

- a superfície real que limita o corpo e o separa do meio ambiente.
- a superfície geométrica que é definida pelo desenho de fabricação sem considerar os defeitos geométricos da superfície.
- a superfície efetiva que é a imagem aproximada da superfície real resultante das palpagens tomadas sobre esta.

Do mesmo modo pode-se definir três tipos de perfis:

- o perfil real que é o contorno resultante da interseção da superfície real por um plano convencionalmente definido em relação à superfície geométrica.
- o perfil geométrico que é o contorno resultante da interseção da superfície geométrica por um plano convencionalmente definido em relação a esta superfície.
- o perfil obtido que é o contorno resultante da interseção da superfície efetiva por um plano convencionalmente definido em relação à superfície geométrica [18].

A Figura 26 ilustra os conceitos explicados anteriormente.

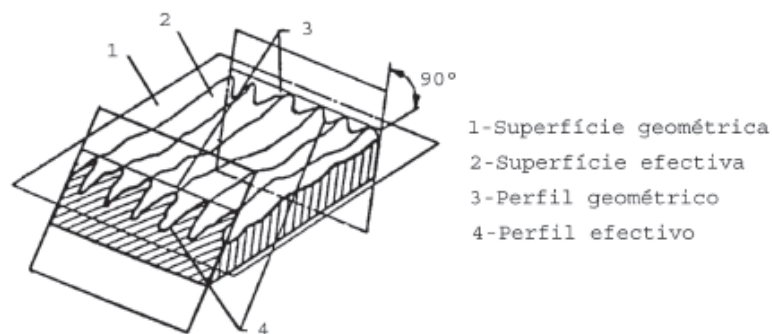


Figura 26. Representação da definição das superfícies geométrica e efetiva e dos respetivos perfis [18].

Na Figura 27 explicitam-se claramente os conceitos de comprimento de base (L), comprimento de cálculo (Lm) e comprimento de palpagem (Lt) que são indispensáveis no cálculo dos parâmetros que quantificam a microgeometria da superfície técnica [30].

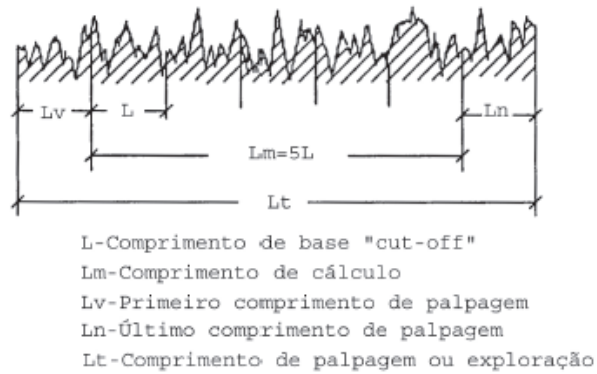


Figura 27. Esquema dos diversos comprimentos de medida utilizados na rugosidade [18].

2.5.1.1. Critérios de rugosidade

Os critérios de rugosidade estão normalizados, só assim é que é possível definir os termos e conceitos indispensáveis para a compreensão desses critérios e os procedimentos de avaliação de rugosidade. Os principais pontos dessa norma são descritos a seguir.

Rugosidade média (Ra)

A rugosidade média é o critério mais utilizado pela indústria. É a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento (y_i), dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, dentro do percurso de medição (lm). Essa grandeza pode corresponder à altura de um retângulo cuja área é igual à soma absoluta das áreas delimitadas pelo perfil de rugosidade e pela linha média, tendo por comprimento o percurso de medição (lm), como vem explicito na Figura 28 em que $Ra = \frac{(y_1+y_2+y_3+y_n)}{n}$ [30].

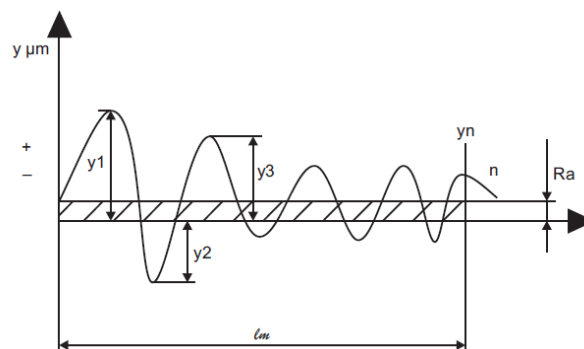


Figura 28. Rugosidade média [30].

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 Ra

pode ser indicada pelos números (N) da classe de rugosidade correspondente, conforme a Tabela 2. Quanto maior for o valor de N maior será o valor da rugosidade média em micrómetros [μm] que caracteriza pior acabamento superficial [30]:

Tabela 2. Classes de rugosidade [30].

Classe	$R_d(\mu)$
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

Rugosidade máxima (R_y)

Está definida como o maior valor das rugosidades parciais (Z_i) que se apresenta no percurso de medição (l_m). Na Figura 29 está representado um exemplo, o maior valor parcial é o Z_3 , corresponde à rugosidade R_y .

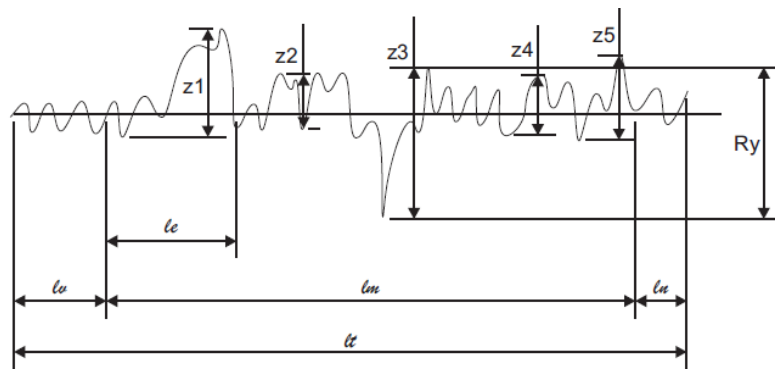


Figura 29. Rugosidade máxima [30].

Rugosidade total (R_t)

Corresponde à distância vertical entre o pico mais alto e o vale mais profundo no comprimento de avaliação (l_m), independentemente dos valores de rugosidade parcial (Z_i), como mostrado na Figura 30.

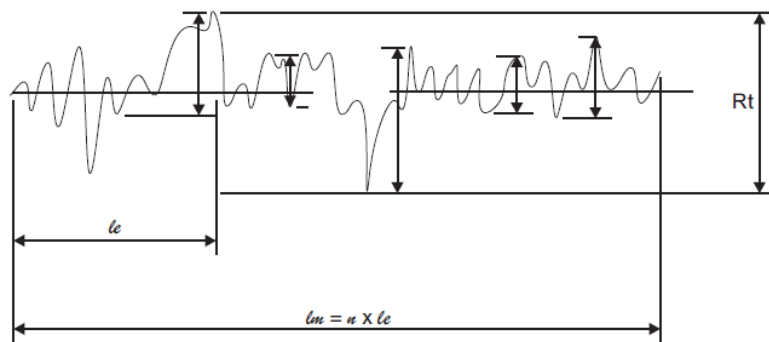


Figura 30. Rugosidade total [30].

Rugosidade média (Rz)

Corresponde à média aritmética dos cinco valores de rugosidade parcial (Z_i). Rugosidade parcial (Z_i) é a soma dos valores absolutos das ordenadas dos pontos de maior afastamento, acima e abaixo da linha média, existentes no comprimento de amostragem (cut-off). Na representação gráfica do perfil, esse valor corresponde à altura entre os pontos máximo e mínimo do perfil no comprimento de amostragem (le), em que

$$Rz = \frac{Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5}{5}, \text{ conforme mostrado na Figura 31 [18].}$$

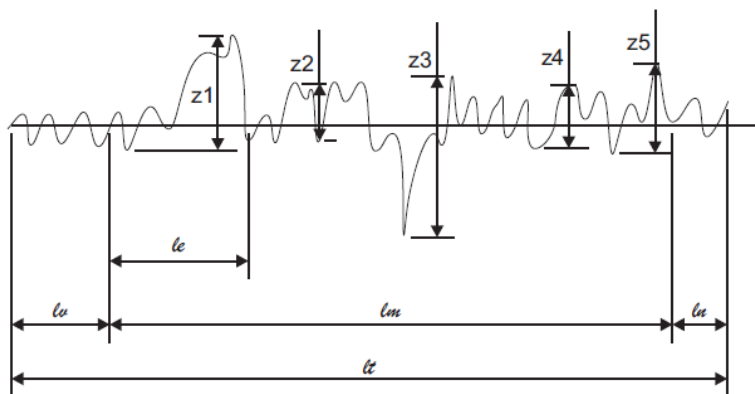


Figura 31. Rugosidade média [30].

2.5.2. Modelos geométricos das superfícies maquinadas

As operações de maquinagem podem dividir-se em desbaste e acabamento. Neste último caso, existem dois tipos distintos de acabamento e, conseqüentemente, de microgeometria da superfície obtida. O acabamento ou é produzido por uma ferramenta apenas com uma aresta de corte em contacto com a superfície a maquinar, ou por uma ferramenta com duas arestas de corte interligadas por um raio de curvatura (bico), na

maioria dos casos. O estudo do primeiro tipo de acabamento é mais simples do que o do segundo e resume-se ao estudo das “imperfeições” que podem ocorrer durante o processo de corte (aresta postiça e formação de microaparas, por exemplo), dado que, teoricamente, a superfície gerada seria perfeitamente lisa. No segundo caso existe uma contribuição geométrica para a microgeometria da superfície cujo modelo teórico se complica, à medida que nos aproximamos da realidade, conforme será visto posteriormente. Será também necessário realçar a contribuição das referidas imperfeições tecnológicas que não são desprezáveis [30].

2.5.2.1. Aresta postiça de corte (APC)

A formação da aresta postiça de corte (ou apara aderente, como é também designada) ocorre em duas etapas: Esta adesão depende da compatibilidade metalúrgica, logo da solubilidade recíproca dos materiais em presença. Como se trata de um processo em que a difusão desempenha um papel relevante, a temperatura na interface apara/ferramenta é de importância fundamental no aparecimento e na aceleração da adesão do material à face de ataque da ferramenta. No que respeita ao crescimento da aresta postiça verifica-se que a aptidão do material a ser maquinado para o encruamento (aumento da resistência mecânica por deformação plástica a frio) é uma condição essencial, entre outra, para que se forme e cresça uma apara aderente.

Na Figura 32 na secção a) está representada esquematicamente a aresta postiça de corte, podendo observa-se os pontos de adesão (microsoldaduras) e a sua típica estrutura estratificada. Na mesma figura, mas na secção b) e c) pode apreciar-se o efeito da aresta postiça de corte sobre o ângulo de ataque da ferramenta. O aparecimento da aresta postiça provoca um aumento do ângulo de ataque e, por consequência, a diminuição do módulo da força de corte e a rotação no sentido dos ponteiros do relógio da sua direção. Quando a aresta postiça é suficientemente grande, esta rotação é tal que a apara aderente comporta-se como uma viga em consola (secção d). A continuação do crescimento da apara aderente conduz a que o momento fletor na sua base seja suficiente para provocar a cedência e, então, parte da aresta postiça sai com a apara em deslizamento e outra parte é arrastada pela superfície maquinada. A formação gradual da apara aderente e o seu colapso rápido deixam marcas em forma de dente de serra na superfície (secção b) que são o contributo característico da aresta postiça de corte para a microgeometria [18].

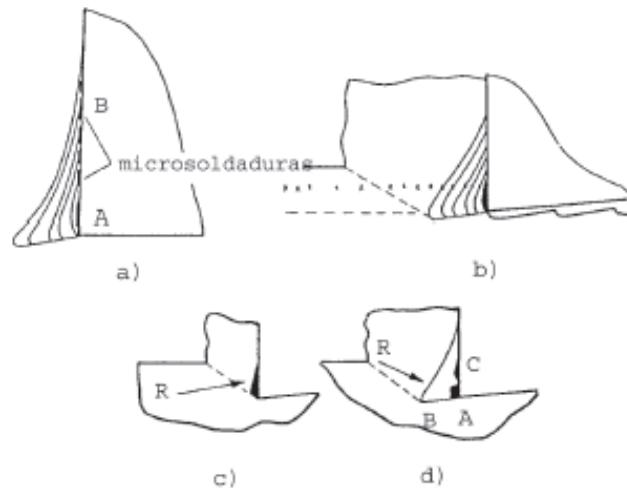


Figura 32. Esquema da formação da aresta postiça de corte [18].

Como é evidente, há todo o interesse em eliminar os fatores conducentes à formação da aresta postiça de corte. Sempre que possível devemos empregar materiais que possam sofrer endurecimento (trabalho a frio por exemplo). O aumento da velocidade de corte, do ângulo de ataque e a utilização de fluidos de corte, particularmente, a baixas velocidades de corte, permitem reduzir ou mesmo eliminar a formação da aresta postiça de corte. Outra via a destacar, será o caso dos aços que contêm quantidades significativas de aditivos, como o Enxofre aos aços permite a obtenção de melhor acabamento da superfície a baixas e intermédias velocidades de corte, prejudicando-o a altas velocidades por favorecer a formação de uma aresta postiça de corte, invulgarmente estável nessa gama de velocidades. Por outro lado, o chumbo sendo mais eficaz para pequenos avanços permite a obtenção de melhor acabamento em toda a gama de velocidades de corte. Em ambos os casos, verifica-se que em aços que sofrem trabalho a frio obtêm, teoricamente, melhor acabamento superficial [18].

2.5.3. Influência dos parâmetros de maquinagem

2.5.3.1. Condições de corte

Avanço

O avanço é a condição de corte determinante no acabamento superficial obtido dado que, por sua influência, aparecem na superfície estrias deixadas pela ferramenta de corte.

Velocidade de corte

O acabamento superficial obtido tende a melhorar com o aumento da velocidade de corte principalmente nos metais em que existe formação da aresta postiça de corte. Para baixas velocidades de corte dá-se a formação da aresta postiça de corte, conforme já foi explicado anteriormente. O metal depositado transitoriamente na face de ataque da ferramenta, tende a sair sob a forma de partículas (microaparos), que aderem à apara e à superfície maquinada. Estas partículas além de prejudicarem o acabamento superficial contribuem para o desgaste da face de saída da ferramenta, a qual degrada ainda mais o acabamento. Elevando-se a velocidade de corte, acima do seu valor crítico, haverá um aumento da temperatura de corte, a qual provoca uma recristalização e mudança de fase do material da aresta postiça de corte. Esta perde a sua dureza, diminuindo, por conseguinte, a resistência às forças de corte verificando-se assim o seu desaparecimento. No entanto, a velocidade de corte baixas e intermédias, há que ter em conta não só a referida formação da aresta postiça de corte, mas também as fraturas subsuperficiais, que provocam um aumento significativo da microgeometria da superfície. Porém, não é desejável elevar demasiado a velocidade de corte, estando o valor máximo condicionado que pelo valor do desgaste admissível nas faces de ataque e de saída da ferramenta de corte, quer pelo material a maquinar [18].

Profundidade de corte

A profundidade de corte (penetramento) é a condição de corte que influência em menor grau o acabamento superficial obtido. Geralmente, numa operação de acabamento, o penetramento é sempre inferior a 1,5 mm. Porém, se a secção de corte é reduzida (menor que $0,05 \text{ mm}^2$) pode ocorrer uma recusa ao corte. O gume da ferramenta em vez de arrancar, encalca, dando origem a uma superfície com mau acabamento [18].

2.6. Taxa de produção

A taxa de produção (Tp) diz respeito à velocidade de processamento com que uma máquina, um posto de trabalho ou um qualquer sistema, se processa durante um período de tempo [32]. No entanto, o que interessa é maximizar os proveitos, isto é, a taxa de produção (volume de material removido por unidade de tempo), apresentada na equação 1.

$$Tp = (Vc * ap * fz) \quad [1]$$

onde:

Tp : taxa de produção [cm^3/min];

Vc : velocidade de corte [m/min];

fz : velocidade de avanço [mm/rot]

ap : penetração [mm]

2.7. Método de Taguchi

Genichi Taguchi (Tokamachi, Japão 1924-2012) foi um engenheiro e um estatístico. Ele foi o responsável por desenvolver uma metodologia para melhorar a qualidade dos produtos fabricados pela aplicação de alguns conceitos estatísticos [32].

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 [33]:

- 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 incontrolláveis.
- 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 [34]. A Figura 33 mostra a evolução da função perda de Taguchi.

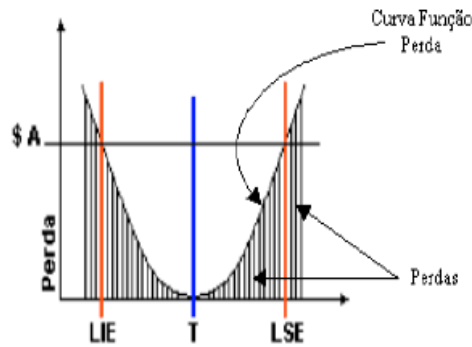


Figura 33. Gráfico de função de perda [35].

Taguchi aponta que mesmo o produto estando dentro dos limites de especificação, há um custo definido para a sociedade se a característica não está exatamente no valor nominal, quanto mais longe do nominal, maior esse o custo.

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 incomportáveis [35].

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.

A filosofia de Taguchi diz que a qualidade deve ser projetada em um produto, não inspecionada para ele. A forma de o concretizar é através de projetos de sistemas, design de parâmetros de tolerância. Se um produtor 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 [36].

Existem três relações sinal-ruído para o parâmetro desejado:

- Nominal é o melhor

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

- Maior é a melhor (maximizar):

$$S/N_L = -10 \times \log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2}\right) \quad [3]$$

- Menor é a melhor

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

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 [37].

3. Materiais e Métodos

Este capítulo descreve a configuração experimental utilizada e os testes realizados neste trabalho. No primeiro ponto, são apresentados os níveis de parâmetros e o grupo de testes. Além disso, no segundo ponto, será descrita a peça de trabalho, o posicionamento das ferramentas e o procedimento 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 algumas das características mais importantes num processo de maquinagem, sendo assim, o principal objetivo a alcançar num processo de maquinagem industrial é o de obter o valor da rugosidade superficial o mais baixo 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 3 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.

Com os valores de referência da Tabela 3, foram escolhidos os parâmetros e os níveis para este estudo (Tabela 4), tendo o cuidado de escolher os valores o mais dividido possível, abrangendo assim todas as camadas de estudo, o único parâmetro que não foi possível tomar valores próximos do máximo do fabricante foi a penetração, pois 5mm de penetração não são valores adequados para as operações de maquinagem (torneamento esférico) a realizar no âmbito deste trabalho..

Tabela 3. Valores de referência da ferramenta de corte.

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]

Para escolher o conjunto correto de Taguchi, escolhemos 3 níveis base para cada parâmetro, eles são definidos na Tabela 4.

Tabela 4. Parâmetros e níveis.

Parâmetros	Nível 1	Nível 2	Nível 3
Velocidade de corte [m/min]	100	150	200
Velocidade de avanço [mm/rot]	0,1	0,2	0,3
Penetração [mm]	0,1	0,25	0,5

Conhecendo o número de parâmetros e o número de níveis, a matriz ortogonal adequada pode ser selecionada utilizando a tabela de seletor de matriz simplificada mostrada na Tabela 5.

Tabela 5. Tabela seletora de matriz ortogonal de Taguchi.

		Número de parâmetros		
		2	3	4
Número de níveis	2	L4	L4	L8
	3	L9	L9	L9
	4	L16	L16	L16

Neste caso, 3 parâmetros com 3 níveis diferentes, a matriz ortogonal adequada de Taguchi é L9. Isto significa que são necessárias nove combinações de parâmetros, ver Tabela 6.

Tabela 6. 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

No método de Taguchi, quando o número de parâmetros é inferior às colunas na matriz ortogonal, a última coluna pode ser negligenciada. As combinações de matrizes Taguchi simplificadas são mostradas na Tabela 7.

Tabela 7. Matriz L9 modificada.

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

Depois de definir a matriz de Taguchi, os níveis de cada parâmetro foram substituídos pelos valores escolhidos, ficando definida como representa a Tabela 8.

Tabela 8. Matriz L9 segundo Taguchi com os valores dos parâmetros da experiência

Número de Ensaio	Velocidade de corte [m/min]	Velocidade de avanço [mm/rot]	Penetração [mm]
1	100	0,1	0,1
2	100	0,2	0,25
3	100	0,3	0,5
4	150	0,1	0,25
5	150	0,2	0,5
6	150	0,3	0,1
7	200	0,1	0,5
8	200	0,2	0,1
9	200	0,3	0,25

A rugosidade foi medida em quatro pontos diferentes a 90° (ver Figura 34), por cada ponto medimos seis vezes e negligenciamos o valor mais baixo e o mais elevado.

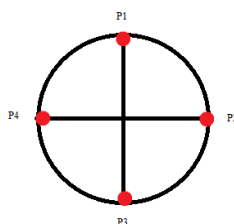


Figura 34. Representação dos pontos de medição no exemplar.

3.2. Ensaios e material utilizado

Neste capítulo, irão ser abordadas e explicadas algumas das características dos materiais e ferramentas que foram utilizadas nos ensaios experimentais.

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, mas sempre focando a superfície esférica da peça, pois é onde incide o estudo realizado neste trabalho. Os testes experimentais foram efetuados recorrendo a uma operação de maquinagem, o torneamento, em torno de um bloco de aço cilíndrico. Para a realização dos ensaios experimentais foi selecionado o aço de construção DIN CK45, que tem a seguinte composição química (Tabela 9).

Tabela 9. Composição química do DIN CK45.

Composição química %	
Cu	<i>Max</i> 0,020
Ni	<i>Max</i> 0,025
Cr	<i>Max</i> 0,025
P	<i>Max</i> 0,025
S	<i>Max</i> 0,020
Mn	0,500 – 0,800
Si	0,170 – 0,370
C	0,420 – 0,500

Para iniciar este estudo experimental estabeleceram-se novas dimensões, onde fosse possível realizar os estudos pretendidos, sem haver desperdício desnecessário de material, sendo elas de 20 mm de diâmetro e 60 mm de comprimento. Já com as medidas definidas, foi necessário usar a serra de fita (Figura 35) para cortar os blocos cilíndricos.



Figura 35. Serra elétrica.

Depois desta operação de corte, obtiveram-se 5 blocos cilíndricos idênticos (Figura 36), pois como o objetivo será trabalhar numa matriz L9 e como cada bloco irá permitir a realização de dois ensaios, um em cada extremidade, 5 blocos é um número adequado.

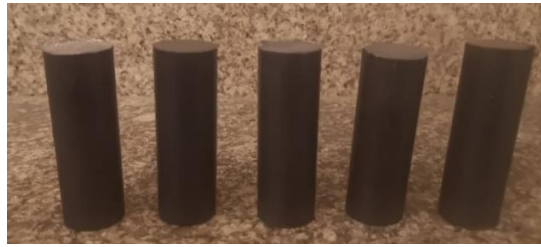


Figura 36. Blocos de aço cilíndricos.

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 encontra-se no Anexo I) com os respectivos 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. Na Figura 37 é possível observar uma das simulações de maquinagem efetuadas no software MasterCam®.

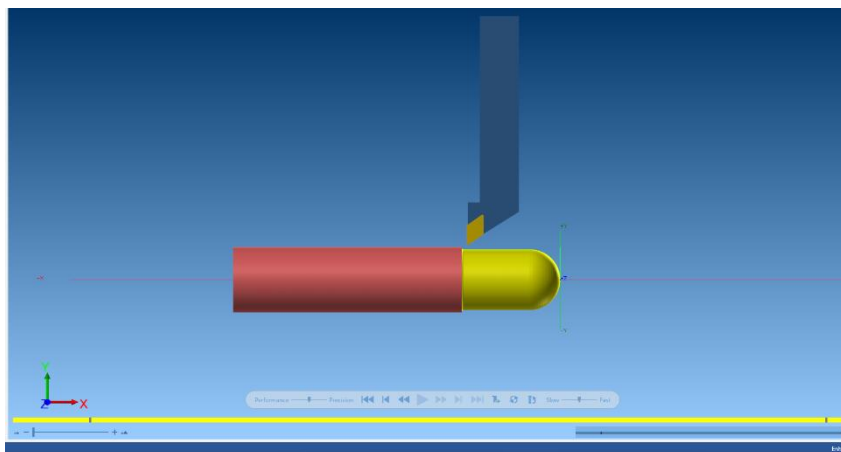


Figura 37. Simulação obtida no Mastercam da trajetória da maquinagem.

Depois da obtenção do código CNC, foi enviado para o torno de comando numérico via *pen usb*. Depois do programa ter sido carregado no torno CNC, foi colocado e fixado o varão de aço na bucha do torno (ver Figura 38), tendo sempre em atenção o aperto da bucha, ficando 25 mm do varão preso na bucha. De seguida, foi realizada uma passagem no varão de 30 mm (tornamento cilíndrico) para eliminar a sua excentricidade relativamente ao eixo do torno. Após essa operação, foi definido o “zero peça” com $x = 0$, pois o centro da peça possui o mesmo centro da bucha do torno e ainda $z = 35$ pois estava a 35 mm do zero peça do máquina. Finalmente, deu-se início aos ensaios de maquinagem (Figura 38).



Figura 38. Peça fixa no torno CNC.

Após este processo estar concluído retirou-se a peça do torno CNC e procedeu-se à medição da rugosidade, este processo levou a que se tivesse de arranjar uma forma, económica e simples, de conseguir medir a rugosidade na superfície esférica.



Figura 39. Bloco de poliestireno expandido (EPS).

Como se pode observar na Figura 39, a solução encontrada para garantir o posicionamento preciso das peças torneadas, foi o de utilizar um bloco de poliestireno expandido (EPS). À direita da Figura 39, temos o bloco inicial, correspondente a um protótipo inicial que não foi utilizado pois não garantia a repetibilidade nas medições efetuadas. À esquerda da Figura 39, encontra-se o bloco final que foi projetado no software SolidWorks® (Anexo II) e, posteriormente, fabricado também em EPS, garantindo, assim, que a peça se encontrava a 45° relativamente à mesa de medição e as medições alcançaram a repetibilidade exigida no trabalho. Colocou-se, também, um peso no rugosímetro para exercer pressão, com o objetivo de garantir que a agulha de medição mantinha o contacto constante com a superfície a medir. Na Figura 40 é possível observar-se o *set-up* para a medição da rugosidade da superfície esférica.



Figura 40. Medição da rugosidade superficial.

Estas medições foram realizadas utilizando um rugosímetro da marca Mitutoyo e modelo SJ-301.

Os ensaios experimentais foram realizados no torno de comando numérico, Concept Turn 260 T (dados técnicos encontram-se no anexo III) representado na Figura 41.



Figura 41. Torno de CNC - Concept Turn 260 T.

4. Resultados Obtidos

Neste capítulo são apresentados os resultados da rugosidade superficial e da taxa de produção segundo Taguchi, medidos após cada ensaio.

4.1. Resultados obtidos segundo o método de Taguchi

4.1.1 Rugosidade Superficial

Para minimizar o erro de medição, optou-se por medir em quatro locais diferentes com posições angulares igualmente espaçadas da peça de trabalho (0° , 90° , 180° , 270°), ver Figura 34. Em cada local, a medição da rugosidade superficial foi repetida seis vezes, sendo considerado, neste estudo, a rugosidade média, Ra . Os valores extremos (mais baixos e os mais altos) da medição foram ignorados.

Na Tabela 10 é apresentado o conjunto de testes de Taguchi com a medição de rugosidade em cada ponto (P1, P2, P3 e P4) e a média destes pontos.

Tabela 10. Valores obtidos nos ensaios para a rugosidade superficial.

Ensaio	Parâmetros			Valores médios				Ra Média [μm]
	V_c [m/min]	f_z [mm/rot]	a_p [mm]	P1 [μm]	P2 [μm]	P3 [μm]	P4 [μm]	
1	100	0,1	0,1	1,20	1,31	1,32	1,36	1,30
2	100	0,2	0,25	3,46	3,39	3,38	3,26	3,37
3	100	0,3	0,5	7,45	7,04	6,34	7,51	7,09
4	150	0,1	0,25	2,18	2,29	2,61	2,56	2,41
5	150	0,2	0,5	3,74	3,61	3,80	3,59	3,69
6	150	0,3	0,1	6,46	6,22	6,03	6,45	6,29
7	200	0,1	0,5	1,75	1,91	1,33	2,35	1,84
8	200	0,2	0,1	3,72	3,25	3,46	3,69	3,53
9	200	0,3	0,25	6,63	7,12	6,80	6,85	6,85

Com base na Tabela 10, verifica-se que o ensaio em que ocorre o valor mais elevado de rugosidade é o ensaio 3 ($7,09 \mu\text{m}$) enquanto o ensaio 1 originou o menor valor de rugosidade média superficial ($1,30 \mu\text{m}$). Para facilitar a visualização, os valores da Tabela 10 são apresentados, em forma gráfica, na Figura 42.

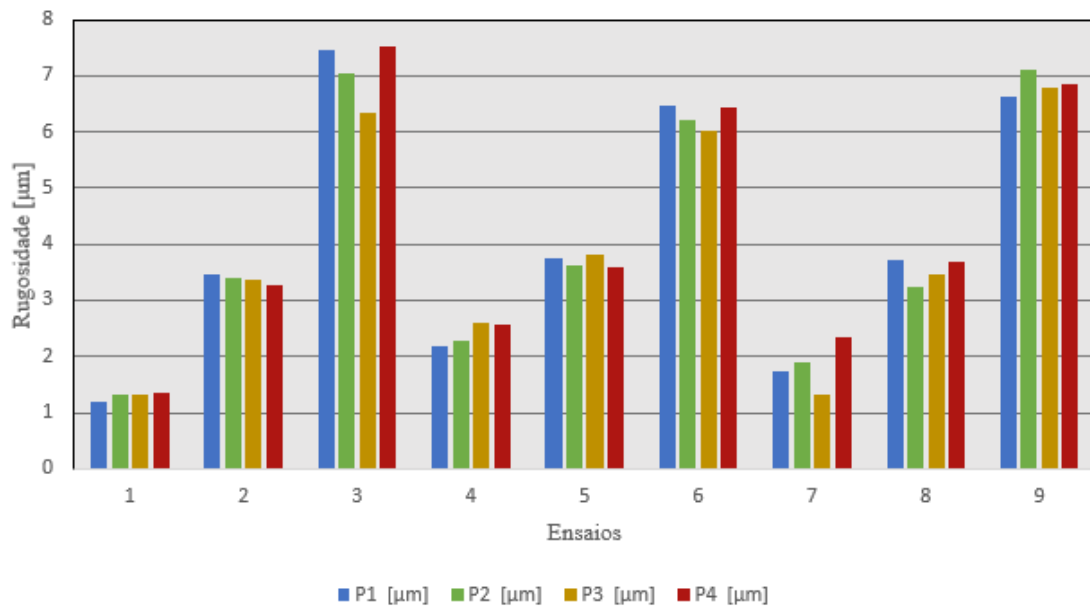


Figura 42. Gráfico da rugosidade superficial.

Conforme já foi constatado em cima, o conjunto de valores máximos corresponde ao ensaio 3 e o mínimo corresponde ao ensaio 1.

4.1.2 Taxa de produção

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

Na Tabela 11 são representados os valores da taxa de produção, estes valores foram calculados com base na equação [1], apresentada no capítulo 2 (secção 2.6):

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

Tabela 11. 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	100	0,1	0,1	1
2	100	0,2	0,25	5
3	100	0,3	0,5	15
4	150	0,1	0,25	3,75
5	150	0,2	0,5	15
6	150	0,3	0,1	4,5
7	200	0,1	0,5	10
8	200	0,2	0,1	4
9	200	0,3	0,25	15

Com base nos dados da Tabela 11, relativamente à taxa de produção, o ensaio que corresponde ao maior valor de taxa de produção é o ensaio 3, 5 e 9 ($15 \text{ cm}^3/\text{min}$). Em contrapartida, o ensaio 1 originou o menor valor de taxa de produção ($1 \text{ cm}^3/\text{min}$). Para uma melhor visualização dos valores da Tabela 11 é mostrado em gráfico na Figura 43.

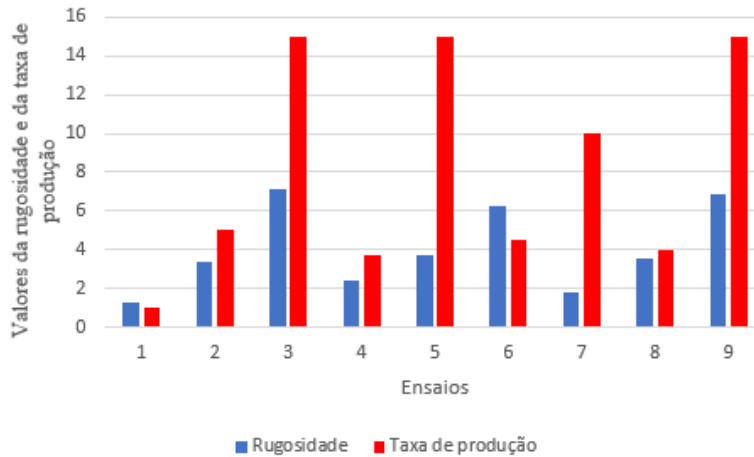


Figura 43. Gráfico de comparação entre a rugosidade média e a taxa de produção.

Conforme mostra a Figura 43, o maior valor da taxa de produção corresponde aos ensaios 3, 5 e 9 sendo que o menor valor corresponde ao ensaio 1.

4.2. Análise da geometria da ponta maquinada

Em seguida é analisado a geometria da ponta maquinada e ilustrado as diferentes superfícies que foram obtidas nos ensaios

Nas figuras abaixo exibidas estão apresentados três ensaios, o primeiro ensaio com a menor rugosidade, o segundo com a maior rugosidade obtida e um terceiro com uma rugosidade intermédia.



Figura 44. Extremidade esférica com a menor rugosidade.

Na Figura 44 está ilustrado o ensaio 1 com uma rugosidade de $1.30 \mu m$, pode-se observar que o ensaio tem uma geometria esférica bem visível e que, a olho nu, não se consegue observar ondulações na superfície maquinada que podem originar uma elevada rugosidade.



Figura 45. Extremidade esférica com a maior rugosidade.

Na Figura 45 conseguimos visualizar o ensaio que teve maior rugosidade, o ensaio três, com um valor de $7.09 \mu m$, neste ensaio já é bastante perceptível as ondulações do torneamento deixadas no varão, não é necessário nenhum aparelho eletrônico para se observar que este ensaio originou uma rugosidade elevada.



Figura 46. Extremidade esférica com uma rugosidade media.

Na Figura 46 está representado o ensaio 5, pois foi o ensaio que, ao relacionar a taxa de produção com a rugosidade, obteve melhores valores, ou seja, $3.69 \mu m$ de rugosidade e $15 \text{ cm}^3/\text{min}$ de taxa de produção.

5. Análise e Discussão de Resultados

A análise de Taguchi envolve duas abordagens. A primeira é a relação sinal-ruído de avaliação que permite definir o nível de variação para cada parâmetro. A segunda baseia-se na análise da variação, que é usada para definir a influência de cada parâmetro. Neste capítulo analisaram-se as duas abordagens.

5.1. Razão Sinal-Ruído

Dois dos principais objetivos no processo de fabrico 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”).

5.1.1 Rugosidade Superficial

Como foi referido anteriormente, no processo de fabrico por maquinagem, um dos objetivos mais importantes é minimizar a rugosidade da superfície. Por isso, o fator de controlo mais adequado é quanto menor for, melhor é relação sinal-ruído (S/R), definida pela Equação 5.

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

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

De maneira a compreender melhor, segue-se um exemplo de como foi determinada a razão S/N para o primeiro ensaio:

$$S/N = -10 \times \log\left(\frac{1}{4} \times (1,20^2 + 1,31^2 + 1,32^2 + 1,36^2)\right) = -2,27 \text{ [dB]}$$

Na Tabela 12 são apresentados os resultados da rugosidade superficial média e os resultados S/N calculados, obtidos.

Tabela 12. Valores S/N e rugosidade média.

Ensaio	V_c [m/min]	f_z [mm/rot]	a_p [mm]	Rugosidade Média R_a [μm]	S/N [dB]
1	100	0,1	0,1	1,30	-2,27
2	100	0,2	0,25	3,37	-10,56
3	100	0,3	0,5	7,09	-17,03
4	150	0,1	0,25	2,41	-7,66
5	150	0,2	0,5	3,69	-11,33
6	150	0,3	0,1	6,29	-15,98
7	200	0,1	0,5	1,84	-5,44
8	200	0,2	0,1	3,53	-10,97
9	200	0,3	0,25	6,85	-16,72

Analisando a Tabela 12, pode-se identificar o teste número 1 com o maior valor S/N . Esse resultado é comprovado pelo menor valor da rugosidade média R_a , já em sentido contrário, podemos reparar que é no ensaio 3 onde se encontra o menor valor de S/N , também atestado pois é onde se encontra a maior rugosidade média.

Em seguida comparou-se os valores da razão S/N para os diferentes parâmetros relativamente à rugosidade superficial

Segue-se um exemplo de como foi determinado o resultado da razão S/N para o parâmetro $V_c = 100$ [m/min]:

$$S/N = \frac{-2,27 - 10,56 - 17,03}{3} = -9,95 \text{ [dB]}$$

Tabela 13. Resultados S/N para a rugosidade superficial.

Velocidade de corte [m/min]	100	150	200
Média [dB]	-9,95	-11,66	-11,04
Velocidade de avanço [mm/rot]	0,1	0,2	0,3
Média [dB]	-5,12	-10,95	-16,58
Penetração [mm]	0,1	0,25	0,5
Média [dB]	-9,74	-11,65	-11,26

Na Figura 47 estão representados, graficamente, os valores médios de S/N para os diferentes níveis de parâmetros, obtidos através do *software Minitab*. É possível verificar que a influência da velocidade de avanço é maior em função da grande variação observada no ensaio quando vai de 0,1 mm/rot a 0,3 mm/rot, pois o valor desloca-se de $-5,12\text{ dB}$ a $-16,58\text{ dB}$, também pode-se observar que os valores da velocidade de corte não variam muito sendo o valor a destacar de $-9,95\text{ dB}$. Além disso, os resultados indicam um melhor desempenho de maquinagem ao usar um valor mais baixo de profundidade do que valores mais elevados, embora se verifique uma melhoria dos resultados aumentando a profundidade (penetração) de 0,25 mm para 0,5 mm.

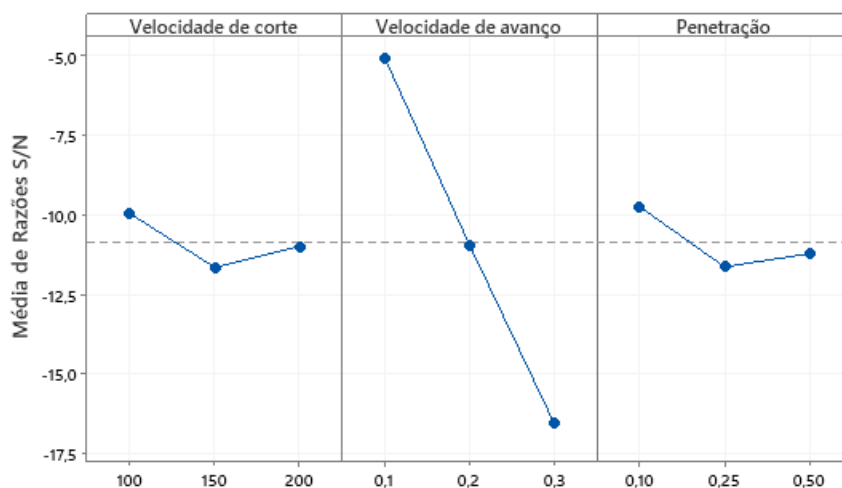


Figura 47. Valor médio S/N para os diferentes parâmetros relativamente à rugosidade superficial.

Outra comparação possível diz respeito à média total dos ensaios. Na Figura 48 é apresentada a média total da rugosidade superficial para cada ensaio.

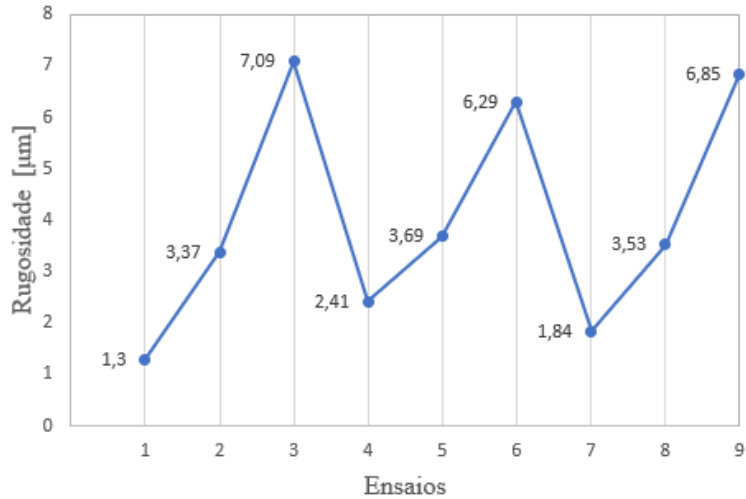


Figura 48. Rugosidade superficial média por ensaio.

Os resultados mostram um melhor desempenho para o teste número 1, com um valor médio de rugosidade de $1,3 \mu m$, em sentido contrário temos os testes 3, 5 e 9 como os ensaios com os valores mais altos, isso corrobora com a análise apresentada anteriormente.

5.1.2 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 11, onde estão representados os valores da taxa de produção e com a equação abaixo apresentada é possível chegar aos valores da razão S/N para a taxa de produção, como é possível verificar na Tabela 12.

$$S/N_L = -10 \times \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad [6]$$

Onde:

η - 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 1:

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

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

Tabela 14. Valor da razão S/N da taxa de produção.

Ensaio	T_p [cm^3/min]	S/N [dB]
1	1	0,00
2	5	13,98
3	15	23,52
4	3,75	11,48
5	15	23,52
6	4,5	13,06
7	10	20,00
8	4	12,04
9	15	23,52

A partir da Tabela 14 o ensaio que apresenta o valor mais elevado da razão S/N é o ensaio 3, 5 e 9 (23,52 dB), este resultado é confirmado pelo maior valor da taxa de produção (15 cm^3/min), enquanto o ensaio 1 originou o menor valor da razão S/N (0 dB), que corresponde ao menor valor da taxa de produção (1 cm^3/min).

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

$$S/N = \frac{0 + 13,98 + 23,52}{3} = 12,5 \text{ [dB]}$$

Tabela 15. Resultados S/N para a taxa de produção.

Parâmetros	Nível 1 [dB]	Nível 2 [dB]	Nível 3 [dB]
V_c	12,5	16,02	18,52
f_z	10,49	16,51	20,03
a_p	8,37	16,33	22,35

Analisando a Tabela 15 é possível chegar à conclusão de que os valores mais elevados para a taxa de produção encontram-se no nível 3, posto isto, a combinação ótima é: $V_c = 150 m/min$, $f_z = 0,3 mm/rot$ e $a_p = 0,5 mm$.

5.2 Análise ANOVA

A primeira análise ANOVA é calculada com os valores médios da rugosidade da superfície. A segunda análise será determinada com todas as medidas de rugosidade, nove valores para cada teste. Os parâmetros e a rugosidade da superfície para todas as medições são representados no anexo IV.

5.2.1 Análise ANOVA de rugosidade média

Esta análise foi realizada utilizando os valores médios totais de rugosidade superficial, visto que o objetivo principal é identificar o parâmetro mais influente.

Este estudo é baseado na análise ANOVA da rugosidade da superfície usando o software estatístico MiniTab® versão 19.2020.1.0.

Os dados para esta análise são apresentados na Tabela 12, sendo os resultados da análise ANOVA representados na Tabela 16.

Tabela 16. Resultados da análise ANOVA para a rugosidade média.

Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor- P
V. corte [m/min]	2	0,0708	0,19%	0,0708	0,0354	0,16	0,859
V. avanço [mm/rot]	2	37,0926	97,36%	37,0926	18,5463	86,20	0,011
ap [mm]	2	0,5034	1,32%	0,5034	0,2517	1,17	0,461
Erro	2	0,4303	1,13%	0,4303	0,2151		
Total	2	38,0971	100,00%				

Onde,

GL – Graus de liberdade

SQ (Seq) – Soma dos quadrados dos erros

SQ (Aj.) – Soma dos quadrados ajustada

QM (Aj.) – Quadrados médios ajustados

Valor F - O valor de F é a estatística de teste usado para determinar se o termo está associado com a resposta.

Valor- P - O valor-p é uma probabilidade que mede a evidência contra a hipótese nula. As probabilidades inferiores fornecem evidências mais fortes contra a hipótese nula.

Com esta análise pode-se identificar que o fator mais importante é a velocidade de avanço, com Valor-P = 0,011, ou seja, menor que 0,05 confirmando, assim, a importância deste parâmetro nesta análise.

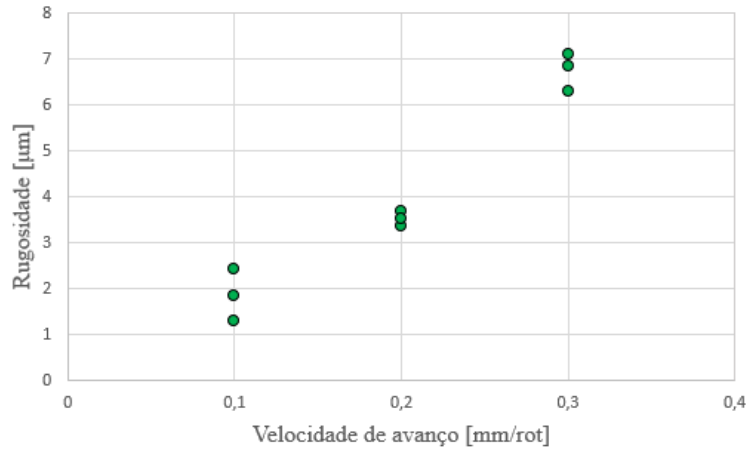


Figura 49. Velocidade de avanço VS Rugosidade para a rugosidade média.

Na Figura 49 está representado os diferentes valores de rugosidade com as suas respectivas velocidades de avanço. Pode-se, também, verificar que o menor valor de rugosidade superficial foi obtido para a velocidade de avanço de 0,1 [mm / rot], a outra conclusão que se tira desta figura é que, com o aumento da velocidade de avanço mais elevada será a rugosidade.

5.2.2 Análise ANOVA com todos os valores medidos de rugosidade

Na Tabela 17 está representada a análise ANOVA com todos os valores medidos de rugosidade, nove valores para cada teste.

Tabela 17. Tabela com os resultados da análise ANOVA para todos os valores medidos.

Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor- P
V. corte [m/min]	2	0,492	0,14%	0,492	0,246	2,08	0,133
V. avanço [mm/rot]	2	335,875	95,97%	335,875	167,938	1417,97	0,000
ap [mm]	2	4,860	1,39%	4,86	2,430	20,52	0,000
Erro	74	8,764	2,50%	8,764	0,118		
Total	80	349,992	100,00%				

Os valores apresentados na Tabela 17 mostram que o fator mais influente para a rugosidade da superfície é a velocidade de avanço seguida da penetração (a_p). Outro

resultado interessante é o valor-P = 0,000 associado à penetração (a_p), pois com este valor é possível comprovar com 95% de confiança que (a_p) também é um parâmetro estatisticamente importante para este grupo de testes. Além disso, a velocidade de avanço mostra-se como o parâmetro mais importante (valor-P = 0,0000) e com uma contribuição de 95,97%, enquanto a influência da velocidade de corte não é tão significativa, pois apresenta um valor-P= 0,133.

Tabela 18. Tabela com o teste de faixa múltipla para a velocidade de avanço usando o método de Fisher e 95% de confiança.

V. avanço [mm/rot]	N	Média	Agrupamento
0,3	27	6,743	A
0,2	27	3,513	B
0,1	27	1,837	C

Na Tabela 18 está apresentada uma comparação entre diferentes valores de velocidades de avanço com as médias da rugosidade. As diferenças são muito maiores nos testes a 0,3 mm/rot do que nos outros testes de velocidades de avanço, sendo o teste que apresente menor valor o de 0,1 mm/rot. A mesma conclusão pode ser obtida observando-se a rugosidade superficial para todos os ensaios da Figura 50.

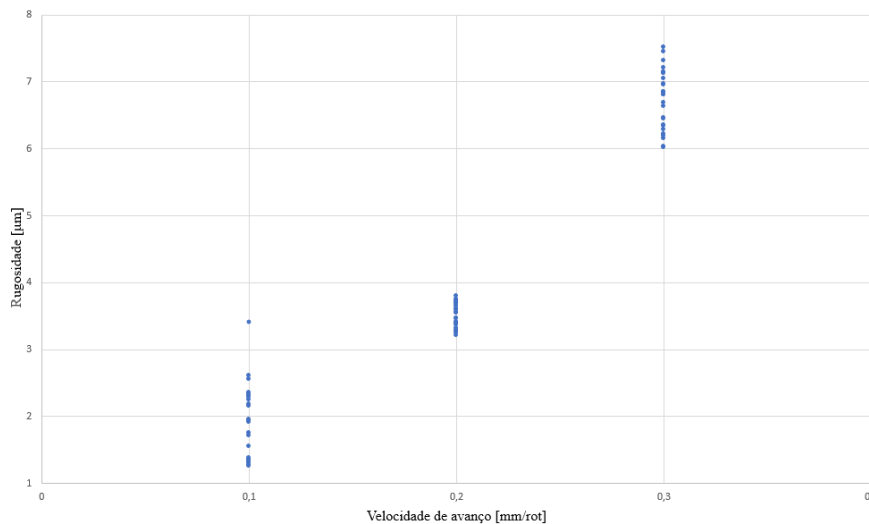


Figura 50. Velocidade de avanço VS Rugosidade para todos os valores medidos.

Na Tabela 19 estão representados os resultados do teste de Fisher com um intervalo de confiança de 95% para o parâmetro de penetração (a_p), pois como foi concluído anteriormente é o segundo critério mais significativo deste estudo para este grupo de testes.

Tabela 19. Teste de faixa múltipla para a penetração (a_p) usando o método de Fisher e 95% de confiança.

ap [mm]	N	Média	Agrupamento
0,25	27	4,229	A
0,50	27	4,179	A
0,10	27	3,686	B

Com a Tabela 19 pode-se comparar as médias da rugosidade com os diferentes valores de penetração. Analisando a tabela repara-se que a melhor média de valores corresponde ao valor de 0,1 mm, outro pormenor a destacar desta análise é o valor da média correspondente à penetração de 0,5 mm, pois é inferior ao valor obtido da média da penetração de 0,25 mm, para visualizar melhor esse efeito está representado graficamente na Figura 51.

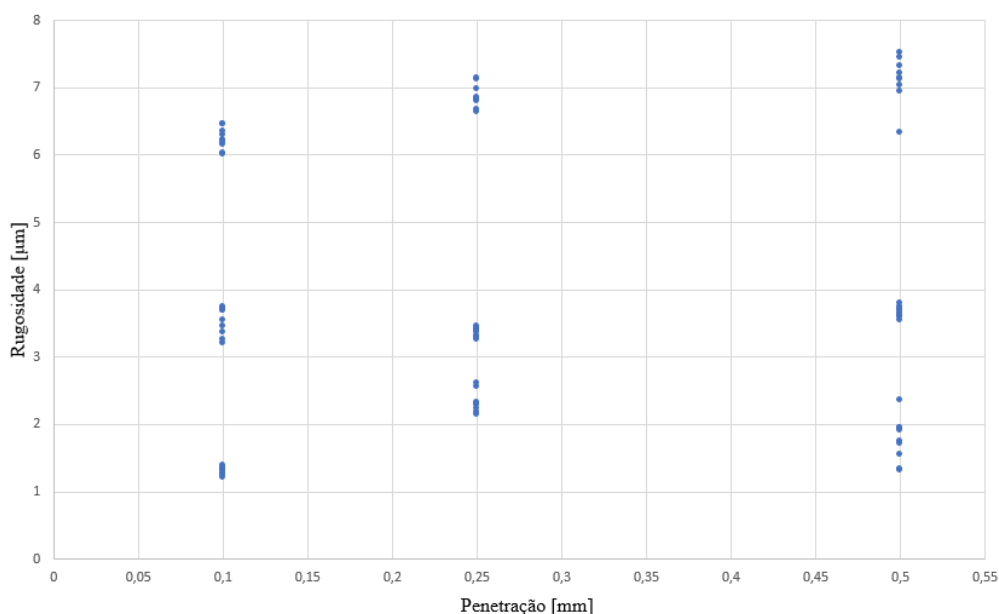


Figura 51. Penetração VS Rugosidade para todos os valores medidos.

Para concluir esta análise, o último parâmetro a observar é a velocidade de corte, pois, como se viu anteriormente, é o menos influente neste grupo de testes.

Tabela 20. Teste de faixa múltipla para a velocidade de corte usando o método de Fisher e 95% de confiança.

V. Corte [m/min]	N	Média	Agrupamento
150	27	4,117	A
200	27	4,049	A B
100	27	3,928	B

Pela Tabela 20 conclui-se que a média para 100 m/min é de 3,928 μm , para 150 m/min é de 4,117 μm e por fim para 200 [m/min] é de 4,049 μm , valores todos muito próximos como está ilustrado na Figura 52.

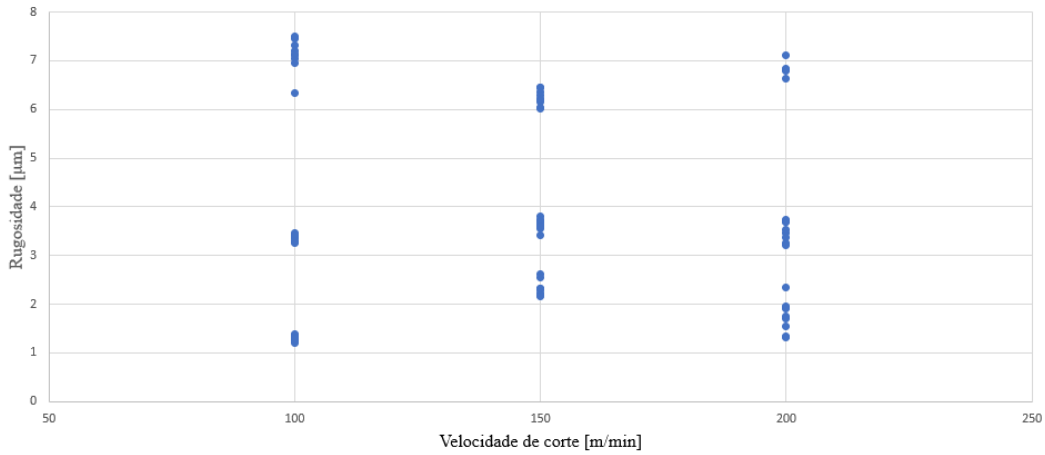


Figura 52. Velocidade de corte VS Rugosidade para todos os valores medidos.

Resumindo (Tabela 21), no grupo de testes que foi realizado neste estudo o valor mais baixo para Ra foi obtido na experiência número 1, seguido da experiência 7 e 4.

Tabela 21. Resumo dos melhores resultados de rugosidade.

Ensaio	Vc [m/min]	f_z [mm/rot]	a_p [mm]	Rugosidade Média Ra [μm]
1	100	0,1	0,1	1,30
4	150	0,1	0,25	2,41
7	200	0,1	0,5	1,84

5.3 Confirmação dos ensaios

Uma vez selecionado o nível ideal dos parâmetros de projeto, a etapa final é validar a melhoria da qualidade do processo de torneamento usando o nível ideal dos parâmetros. A razão S/N estimada ($\hat{\eta}$) usando o nível ideal dos parâmetros de projeto pode ser calculada utilizando a equação seguinte [40].

$$\hat{\eta} = \eta_m + \sum_{t=1}^q (\bar{\eta}_i - \eta_m) \quad [7]$$

Onde:

η_m - Média total da razão S/N ;

$\bar{\eta}_i$ - Razão S/N média para o nível ótimo; e

q- Número dos principais parâmetros de projeto que afetam a característica de qualidade. É útil para trabalhar com os dados S/N , como mostra a Tabela 22.

Tabela 22. Resultados S/N para rugosidade de superfície.

Razão média S/N [dB]					
Parâmetros	Nível 1	Nível 2	Nível 3	Max - Min	Média Total
Velocidade de Corte	-9,953	-11,657	-11,043	1,703	-10,884
Velocidade de Avanço	-5,123	-10,953	-16,577	11,453	
Penetração	-9,740	-11,647	-11,267	1,907	

A proporção estimada S/N utilizando os parâmetros de corte ótimos para a rugosidade de superfície (Ra) podem então ser obtidas e o valor de rugosidade correspondente (y) também pode ser calculado usando a equação anterior apresentada. Neste caso: $\eta = -10,884 + ((-9,953 + 10,884) + (-5,123 + 10,884) + (-9,740 + 10,884)) = -3,048$ e o valor previsto é $y = 1,395$. Os resultados estão visíveis na Tabela 23.

Tabela 23. Resultados dos testes de confirmação para a rugosidade de superfície.

	Valores experimentais	Valores previstos
Nível	Vc =100 m/min $f_z = 0,1$ mm/rot $a_p = 0,1$ mm	Vc =100 m/min $f_z = 0,1$ mm/rot $a_p = 0,1$ mm
Rugosidade [μm]	1,3	1,395
Razão S/N [dB]	-2,27	-3,048
Melhoria razão S/N		0,778

Analisando a Tabela 23 chega-se à conclusão de que, como previsto, os níveis de parâmetros para a combinação (velocidade de corte = 100 m/min, velocidade de avanço = 0,1mm/rot e penetração = 0,1 mm) correspondem ao número do ensaio 1, sendo este o melhor resultado obtido.

Realizou-se uma segunda vez o ensaio 1 a fim de se verificar se o valor de rugosidade se aproximava do valor previsto, calculado anteriormente. No final do ensaio o valor da rugosidade é de 1,34 μm , valor este que não se altera muito do valor previsto.

6. Conclusões e propostas para trabalhos futuros

6.1. Conclusões

A aplicação do método de Taguchi comprova que é possível otimizar os parâmetros no processo de torneamento. Com base nos resultados experimentais foi possível retirar algumas conclusões: o método de Taguchi mostrou ser bastante robusto e permitiu neste estudo determinar a contribuição de cada um dos parâmetros de maquinagem e a sua interação.

O método Taguchi é uma boa solução para a indústria, pois permite reduzir o custo e melhorar a qualidade dos produtos. No entanto, a eficiência dos resultados dependerá do conjunto de valores escolhido, ou seja, se o valor da contribuição que foi apresentada na análise ANOVA foi válida para estes parâmetros, ou se mudarmos os valores dos parâmetros o valor da contribuição da análise ANOVA pode mudar drasticamente.

Através da análise ANOVA revelou-se que o fator mais influente é a velocidade de avanço com um valor de contribuição de 97,36% para os valores da rugosidade média utilizados durante este trabalho, já se utilizarmos todos os valores medidos que estão no anexo IV, o valor da contribuição baixa para 95,97%.

Dos nove ensaios efetuados, usando o Método de Taguchi, foi possível determinar a combinação ótima de parâmetros de maquinagem para minimizar a rugosidade superficial. Assim sendo, a melhor combinação é: $V_c = 100$ m/min, $f_z = 0,1$ mm/rot e $a_p = 0,1$ mm, correspondente ao ensaio 1. Este ensaio apresenta o menor valor da rugosidade superficial ($1,3 \mu\text{m}$) e origina o valor mais elevado da razão S/N (-2,27 dB).

Um conceito interessante introduzido neste estudo é a taxa de produção. A melhor combinação é: $V_c = 200$ m/min, $f_z = 0,3$ mm/rot e $a_p = 0,5$ mm.

Não foi verificado nenhum desgaste substancial da ferramenta utilizando a lupa de oficina. No entanto, se tivesse usado sistemas de medição com maior sensibilidade (p. ex. microscópio ótico) para medir o desgaste ocorrido na ferramenta, poder-se-ia ter observado alguma deterioração. Apesar desta limitação, procurou-se estimar o desgaste nas pastilhas por meio da perda de massa. Porém, os resultados mostraram que ocorre um

aumento de massa, isto pode ser explicado pelo fenômeno da aresta postiça de corte como se encontra referido nos fundamentos teóricos.

6.2. Sugestões para trabalhos futuros

Será muito importante implementar mais testes com diferentes níveis de parâmetros para entender porque razão a influência dos parâmetros depende de seus níveis e se existe alguma tendência especificada. Optando por um número mínimo de 3 permite avaliar a tendência da rugosidade, especialmente se não tiver comportamento linear. Uma sugestão era utilizar uma matriz ortogonal maior do que a L9, por exemplo, a L27.

Um dos objetivos deste estudo foi avaliar a rugosidade na superfície esférica de uma peça cilíndrica, mas devido à impossibilidade da utilização do microscópio a laser, as medições podem ter sido pouco precisas pois foi utilizado um método que não é o mais adequado para a medição de rugosidade em superfícies esféricas. Portanto, propõe-se para trabalhos futuros que a análise da rugosidade superficial neste tipo de superfície seja realizada com o microscópio laser, pois os resultados deverão ser mais precisos e rigorosos.

Um parâmetro que seria, também, importante analisar dado o perfil esférico de torneamento realizado neste trabalho, seria o da geometria da ferramenta de corte. Assim, acreditamos que com uma geometria de ferramenta diferente os resultados sofreriam alterações significativas.

Referências bibliográficas

- [1] ASQ, “Annual Quality Congress,” 2000 [Online]. Available: <http://www.asq.org> [Accessed: 20-Jan-2020].
- [2] G. J. Besseris, “Product Screening to Multicustomer Preferences: Multiresponse Unreplicated Nested Super-ranking,” *International Journal of Quality, Statistics, and Reliability*, vol. 2008, 16p, 2008.
- [3] P. Soares, *Aços – Características e Tratamento (6º edição)*. Porto: Publindústria, 2010.
- [4] P. E. Degarmo, T. J. Black and A. R. Kosher, *Materials and Processes in Manufacturing*. Eighth edition, NJ: Prentice.Hall, 1997.
- [5] P. V. S. Suresh, P. V. Rao and S. G. Deshmukh, “A genetic algorithmic approach for optimization of surface roughness prediction model,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 42, pp. 675-680, May 2002.
- [6] P. G. Benardos and C. G. Vosniakos, “Predicting surface roughness in machining: a review,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 43, pp. 833-844, June 2003.
- [7] D. Singh and P. V. Rao, “A surface roughness prediction model for hard turning process,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 32, pp. 1115-1124, 2007.
- [8] A. Aggarwal and H. Singh, “Optimization of machining techniques – A retrospective and literature review,” *Sadhana*, vol. 30, pp. 699-711, December 2005.
- [9] 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*, vol. 12, pp. 846-852, 2006.
- [10] 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*, vol. 218, pp. 647-655, June 2004.

- [11] J. Ribeiro, M.B. César, H. Lopes, “Optimization of machining parameters to improve the surface quality”, *Procedia Structural Integrity*, vol. 5, pp. 355-362, 2017.
- [12] D. Pereira, L. Queijo, J. E. Ribeiro, “Otimização de parâmetros de fresagem usando o método de Taguchi com a análise relacional de Grey”, *Iberoamerican Journal of Industrial Engineering*, vol. 10, nº 19, pp. 56-70, 2018.
- [13] H. Öktem, T. Erzurumlu, and H. Kurtaran, “Application of response surface methodology in the optimization of cutting conditions for surface roughness,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 170, pp. 11-16, December 2005.
- [14] P. J. Ross, *Taguchi techniques for quality engineering 2a Edição*. Michigan: McGraw-Hill, 1996.
- [15] 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,” *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, vol. 61, pp. 30–35, 2017.
- [16] V. Chiaverini, *Tecnologia mecânica - Processos de Fabricação e Tratamento*, 2a edição. São Paulo, 1986.
- [17] H. El-Hofy, “Fundamentals of Machining Processes: Conventional and Nonconventional Processes”, Second Edition, CRD Press: New-York, 2014.
- [18] J.P. Davim, “Princípios da Maquinagem”, 2ª Edição, Publindústria, Porto, 2008.
- [19] Chave Vertical, “Serrote de fita 2 velocidades F780XL Femi”, 2012 [Online]. Available: <https://www.chavevertical.com/produto/serrote-de-fita-2-velocidades-f780xl-femi/> [Accessed: 19-Feb-2020].
- [20] Akakçe, “Einhell TE-BD 750 E Tezgah Matkap”, 2005 [Online]. Available: <https://www.akakce.com/matkap/en-ucuz-einhell-te-bd-750-e-tezgah-fiyati,368863090.html> [Accessed 21-Feb-2020].
- [21] Mindiamart, “Automatic EMCO Concept Turn-260 Lathe Machine”, 2004 [Online]. Available: <https://www.indiamart.com/proddetail/concept-turn-260-lathe-machine-17358438912.html> [Accessed 28-Feb-2020].

- [22] A. T. da Rocha, *Tecnologia Mecânica*, 6a Edição. Coimbra, 1994.
- [23] Made-in-China, “Plana Modelagem de metal mecânica Horizontal Shaper Máquina (BC6066),” 2009 [Online]. Available: https://pt.made-in-china.com/co_schulermachinery/product_Planer-Horizontal-Mechanical-Metal-Shaping-Shaper-Machine-BC6066-_enguhsugy.html [Accessed 1-Mar-2020].
- [24] Direct Industry, “Fresadora de 3 eixos vertical”, 2003 [Online]. Available: <https://www.directindustry.com/pt/prod/heller-maquina-herramienta-sl/product-50287-1364045.html> [Accessed 1-Mar-2020].
- [25] Soluções Industriais, “Retificadora CNC”, 2007 [Online]. Available: <https://www.solucoesindustriais.com.br/empresa/metal-mecanica-e-usinagem/hdt-industria-e-comercio-de-maquinas-e-equipamentos-industriais-ltda/produtos/maquinas-ferramenta/afiadora-retificadora-cnc> [Accessed 3-Mar-2020].
- [26] Direct Industry, “Máquina de eletroerusão por penetração CNC”, 2003 [Online]. Available: <https://www.directindustry.com/pt/prod/aristech/product-22930-398656.html> [Accessed 3-Mar-2020].
- [27] G. E. Dieter, “*Metalurgia Mecânica*”, 2ª Edição. New York: Mcgraw-Hill, 1986.
- [28] D. Ferraresi, *Fundamentos da Usinagem dos Metais*. Brasil, 1977.
- [29] R. D. Mesquita, “O desgaste das ferramentas de corte e sua relação com as forças de corte,” Tese de Doutorado, Instituto Superior Técnico (IST), Lisboa, 1-125, 1988.
- [30] J. C. da S. Neto, *Metrologia e Controle Dimensional 2ª Edição*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.
- [31] A. Hasçahk and U. Çaydas, Optimization of turning parameters for surface roughness and tool life based on the Taguchi method. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 38, pp. 896-903, 2008.
- [32] W. Y. Fowlkes and C. M. Creveling, *Engineering Methods for Robust Product Design: Using Taguchi Methods in Tecnology and Product Development*. Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company, 1995.
- [33] R. K. Roy, *A Primer on the Taguchi Method*. New York: Van Nostrand Reinhold, 1990.

- [34] Datalyzer, “Metodologia de Taguchi,” 2010. [Online]. Available: <http://www.datalyzer.com.br/site/suporte/administrador/info/arquivos/info22/22.html>. [Accessed: 12-Mar-2020].
- [35] G. Taguchi, A. E. Elsayed and T. Hsiang, Taguchi - Engenharia da Qualidade em Sistemas de Produção. São Paulo: Mc Graw Hill 1990.
- [36] C. M. A. Cook, C. M. Borrer and D. C. Montgomery, “Response surface design evaluation and comparison,” *Journal of Statistical Planning and Inference*, vol. 139, pp. 629-641, February 2009.
- [37] H. S. de Almeida e J. C. de Toledo, “Método de Taguchi: Qualidade voltada para o projeto do produto e do processo,” *Revista de Administração*, vol. 24, pp. 62-68, dezembro 1989.
- [38] Ascamm selector de materiales Guía de aceros y matrices, 2004 [Online]. Available: http://selector.ascamm.org/material_detail.php?codigoWnr=1.2738 [Accessed: 17-Jun-2020].

Anexos

Anexo I - Código de CNC do ensaio 1A

```
%  
O0000  
(PROGRAM NAME - 1A_)  
(DATE=DD-MM-YY - 11-03-20 TIME=HH:MM - 12:00)  
(MCX FILE -  
C:\USERS\LTM\DESKTOP\1_CLOUD\SEAFILE\SCAN_JORGE.PAULO\DICO_A  
MOVIVEL\3TRABALHO\6BOLSA_FCT\4LTM\1TRABALHOS\2TORNO_CNC\20  
20_03\RUI\1_RUI.EMCAM)  
(NC FILE -  
C:\USERS\LTM\DESKTOP\1_CLOUD\SEAFILE\SCAN_JORGE.PAULO\DICO_A  
MOVIVEL\3TRABALHO\6BOLSA_FCT\4LTM\1TRABALHOS\2TORNO_CNC\20  
20_03\RUI\1A_.NC)  
(MATERIAL - ALUMINUM MM - 2024)  
G71  
(TOOL - 1 OFFSET - 1)  
(1_FERRO_ESQUERDO INSERT - DCMT 070204EN)  
G0 T0101  
M8  
G97 S2894 M03  
G0 G54 X22. Z.81  
G92 S3600  
G96 S200  
G99 G1 X-.8 F.1  
G0 Z1.31  
X22.  
Z.62  
G1 X-.8  
G0 Z1.12  
X22.  
Z.43  
G1 X-.8  
G0 Z.93  
X22.  
Z.24  
G1 X-.8  
G0 Z.74  
X22.  
Z.05  
G1 X-.8  
G0 Z.55  
M9  
X19.394  
Z3.038  
G1 Z1.038 F.2  
Z-29.9
```

X20.
X22.828 Z-28.486
G0 Z3.05
X18.788
G1 Z1.05
Z-29.9
X19.794
X22.622 Z-28.486
G0 Z3.05
X18.182
G1 Z1.05
Z-7.418
G3 X18.7 Z-9.65 I-9.491 K-2.232
G1 Z-29.9
X19.188
X22.016 Z-28.486
G0 Z3.05
X17.576
G1 Z1.05
Z-6.388
G3 X18.582 Z-8.579 I-9.188 K-3.263
G1 X21.41 Z-7.165
G0 Z3.05
X16.97
G1 Z1.05
Z-5.635
G3 X17.976 Z-7.018 I-8.885 K-4.015
G1 X20.804 Z-5.604
G0 Z3.05
X16.364
G1 Z1.05
Z-5.023
G3 X17.37 Z-6.111 I-8.582 K-4.628
G1 X20.198 Z-4.697
G0 Z3.05
X15.758
G1 Z1.05
Z-4.5
G3 X16.764 Z-5.415 I-8.279 K-5.15
G1 X19.592 Z-4.
G0 Z3.05
X15.152
G1 Z1.05
Z-4.042
G3 X16.158 Z-4.837 I-7.976 K-5.607
G1 X18.986 Z-3.422
G0 Z3.05
X14.546
G1 Z1.05
Z-3.634

G3 X15.552 Z-4.338 I-7.673 K-6.016
G1 X18.38 Z-2.924
G0 Z3.05
X13.94
G1 Z1.05
Z-3.267
G3 X14.946 Z-3.899 I-7.37 K-6.383
G1 X17.774 Z-2.484
G0 Z3.05
X13.334
G1 Z1.05
Z-2.933
G3 X14.34 Z-3.505 I-7.067 K-6.717
G1 X17.168 Z-2.091
G0 Z3.05
X12.728
G1 Z1.05
Z-2.628
G3 X13.734 Z-3.149 I-6.764 K-7.022
G1 X16.562 Z-1.736
G0 Z3.05
X12.122
G1 Z1.05
Z-2.348
G3 X13.128 Z-2.826 I-6.461 K-7.302
G1 X15.956 Z-1.412
G0 Z3.05
X11.516
G1 Z1.05
Z-2.091
G3 X12.522 Z-2.53 I-6.158 K-7.559
G1 X15.35 Z-1.116
G0 Z3.05
X10.91
G1 Z1.05
Z-1.854
G3 X11.916 Z-2.258 I-5.855 K-7.796
G1 X14.744 Z-.844
G0 Z3.05
X10.304
G1 Z1.05
Z-1.635
G3 X11.31 Z-2.008 I-5.552 K-8.015
G1 X14.138 Z-.594
G0 Z3.05
X9.698
G1 Z1.05
Z-1.434
G3 X10.704 Z-1.777 I-5.249 K-8.216
G1 X13.532 Z-.363

G0 Z3.05
X9.092
G1 Z1.05
Z-1.248
G3 X10.098 Z-1.565 I-4.946 K-8.402
G1 X12.926 Z-.151
G0 Z3.05
X8.486
G1 Z1.05
Z-1.076
G3 X9.492 Z-1.368 I-4.643 K-8.574
G1 X12.32 Z.046
G0 Z3.05
X7.88
G1 Z1.05
Z-.919
G3 X8.886 Z-1.188 I-4.34 K-8.731
G1 X11.714 Z.226
G0 Z3.05
X7.274
G1 Z1.05
Z-.775
G3 X8.28 Z-1.021 I-4.037 K-8.875
G1 X11.108 Z.393
G0 Z3.05
X6.668
G1 Z1.05
Z-.643
G3 X7.674 Z-.868 I-3.734 K-9.007
G1 X10.502 Z.545
G0 Z3.05
X6.062
G1 Z1.05
Z-.524
G3 X7.068 Z-.729 I-3.431 K-9.127
G1 X9.896 Z.685
G0 Z3.05
X5.456
G1 Z1.05
Z-.415
G3 X6.462 Z-.601 I-3.128 K-9.235
G1 X9.29 Z.813
G0 Z3.05
X4.85
G1 Z1.05
Z-.318
G3 X5.856 Z-.486 I-2.825 K-9.332
G1 X8.684 Z.929
G0 Z3.05
X4.244

G1 Z1.05
Z-.232
G3 X5.25 Z-.381 I-2.522 K-9.418
G1 X8.078 Z1.033
G0 Z3.05
X3.638
G1 Z1.05
Z-.156
G3 X4.644 Z-.287 I-2.219 K-9.494
G1 X7.472 Z1.127
G0 Z3.05
X3.032
G1 Z1.05
Z-.09
G3 X4.038 Z-.205 I-1.916 K-9.56
G1 X6.866 Z1.209
G0 Z3.05
X2.426
G1 Z1.05
Z-.034
G3 X3.432 Z-.133 I-1.613 K-9.616
G1 X6.26 Z1.282
G0 Z3.05
X1.82
G1 Z1.05
Z.012
G3 X2.826 Z-.07 I-1.31 K-9.662
G1 X5.654 Z1.344
G0 Z3.05
X1.214
G1 Z1.05
Z.048
G3 X2.22 Z-.018 I-1.007 K-9.698
G1 X5.048 Z1.397
M8
G96 S100
G0 Z2.
X-.8
G1 Z0. F.1
G3 X18.5 Z-9.65 K-9.65
G1 Z-30.
X21.328 Z-28.586
M9
G28 U0. W0. M05
T0100
M30
%

Anexo II – Desenho de definição e projeto do bloco de EPS

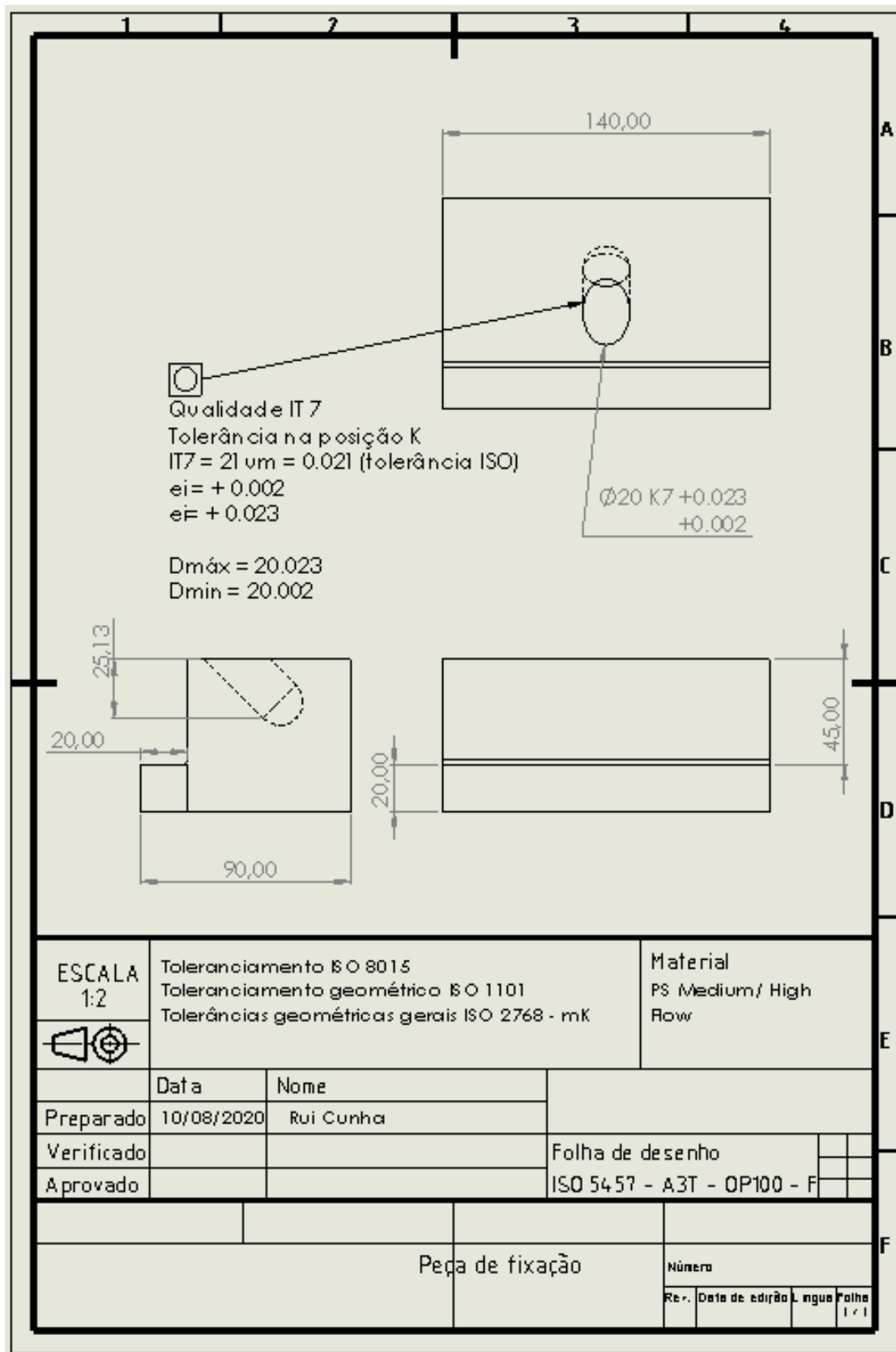


Figura AII.1. Desenho definição do apoio de fixação da peça

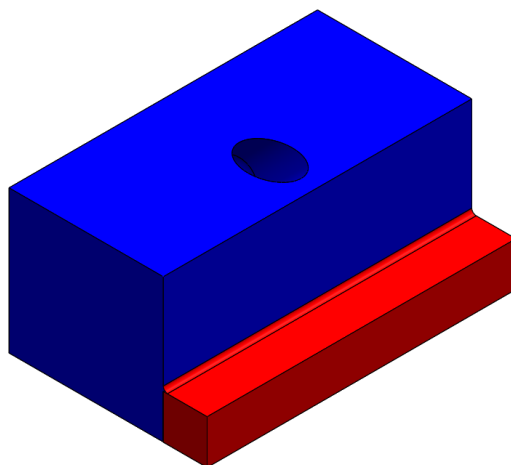


Figura AII.2. Bloco de EPS exibido em Solidworks®.

Anexo III- Dados técnicos da Concept Turn 260 T

Work area	
Swing over bed	Ø 250 mm (9.8")
Swing over cross-slide	Ø 85 mm (3.3")
Distance between centres	405 mm (16.0")
Maximum turning diameter	Ø 85 mm (3.3")
Max. part length TC / TCM	270 / 255 mm (10.6 / 10")
Maximum bar diameter	Ø 25.5 mm (1.0")
Travel	
Travel in X	100 mm (4.0")
Travel in Z	300 mm (11.8")
Main spindle	
Speed range	60 – 6300 rpm
Spindle torque	35 Nm (25.8 ft/lbs)
Spindle nose	Ø 70 h5
Spindle bore	Ø 30 mm (1.1")
C axis (Option)	
Circular axis resolution	0.01°
Rapid speed	100 rpm
Main motor	
Drive performance	5.5 kW (7.4 hp)
Tool turret	
Number of tool positions	12
VDI shaft (DIN 69880)	16
Tool cross section	12 x 12 mm (0.4 x 0.4")
Shank diameter for boring bars	Ø 16 mm (0.6")
Turret indexing time	1.0 sec.
Driven tools (option)	
Number of tool stations	0 or 6
Power	1.2 kW (1.6 hp)
Torque	4 Nm (3.0 ft/lbs)
Speed range	200 – 6000 rpm
Feed drives	
Rapid speed X / Z	15 / 24 m/min
Feed force in the X / Z axis	3000 / 3500 N
Acceleration time	0.1 sec
Position variation Ps (according to VDI 3441) X / Z	0,003 / 0,004 mm (0.00011811 / 0.00015748")
Tailstock	
Quill stroke	120 mm (4.7")
Quill diameter (with integrated live centre)	Ø 35 mm (1.3")
Quill thrust	2500 N
Coolant system	
Tank volume	140 litres
Pump performance	0.57 kW (0.8 hp)
Dimensions	
Height of centres above floor	1131 mm (44.5")
Machine height	1820 mm (71.6")
Machine installation area (W x D)	1700 x 1270 mm (67.0 x 50.0")
Total weight	1100 kg (2425.1 lb)
EMCO WinNC controls	
SIEMENS Operate 840D sl / 828D	
FANUC Series 31i	
FAGOR 8055 TC	

Figura AIII.1. Dados técnicos da Concept Turn 260 T.

Anexo IV- Dados para a análise ANOVA

Tabela AIV.1. Valores totais da medição da rugosidade para a análise ANOVA.

Teste	Velocidade de corte	Velocidade de avanço	Penetração	Rugosidade
	100	0,1	0,1	1,2
	100	0,1	0,1	1,31
	100	0,1	0,1	1,32
	100	0,1	0,1	1,36
Teste número 1	100	0,1	0,1	1,33
	100	0,1	0,1	1,27
	100	0,1	0,1	1,38
	100	0,1	0,1	1,25
	100	0,1	0,1	1,29
	100	0,2	0,25	3,46
	100	0,2	0,25	3,39
	100	0,2	0,25	3,38
	100	0,2	0,25	3,26
Teste número 2	100	0,2	0,25	3,31
	100	0,2	0,25	3,29
	100	0,2	0,25	3,37
	100	0,2	0,25	3,4
	100	0,2	0,25	3,41
	100	0,3	0,5	7,45
	100	0,3	0,5	7,04
	100	0,3	0,5	6,34
	100	0,3	0,5	7,51
Teste número 3	100	0,3	0,5	7,32
	100	0,3	0,5	6,95
	100	0,3	0,5	7,12
	100	0,3	0,5	7,21
	100	0,3	0,5	7,14
	150	0,1	0,25	2,18
	150	0,1	0,25	2,29
	150	0,1	0,25	2,61
	150	0,1	0,25	2,56
Teste número 4	150	0,1	0,25	2,31
	150	0,1	0,25	3,41
	150	0,1	0,25	2,24
	150	0,1	0,25	2,32
	150	0,1	0,25	2,15
	150	0,2	0,5	3,74

	150	0,2	0,5	3,61
	150	0,2	0,5	3,8
	150	0,2	0,5	3,59
Teste número 5	150	0,2	0,5	3,69
	150	0,2	0,5	3,55
	150	0,2	0,5	3,65
	150	0,2	0,5	3,71
	150	0,2	0,5	3,59
	150	0,3	0,1	6,46
	150	0,3	0,1	6,22
	150	0,3	0,1	6,03
	150	0,3	0,1	6,45
Teste número 6	150	0,3	0,1	6,35
	150	0,3	0,1	6,29
	150	0,3	0,1	6,15
	150	0,3	0,1	6,01
	150	0,3	0,1	6,19
	200	0,1	0,5	1,75
	200	0,1	0,5	1,91
	200	0,1	0,5	1,33
	200	0,1	0,5	2,35
Teste número 7	200	0,1	0,5	1,95
	200	0,1	0,5	1,55
	200	0,1	0,5	1,32
	200	0,1	0,5	1,94
	200	0,1	0,5	1,71
	200	0,2	0,1	3,72
	200	0,2	0,1	3,25
	200	0,2	0,1	3,46
	200	0,2	0,1	3,69
Teste número 8	200	0,2	0,1	3,37
	200	0,2	0,1	3,54
	200	0,2	0,1	3,21
	200	0,2	0,1	3,74
	200	0,2	0,1	3,68
	200	0,3	0,25	6,63
	200	0,3	0,25	7,12
	200	0,3	0,25	6,8
	200	0,3	0,25	6,85
Teste número 9	200	0,3	0,25	6,81
	200	0,3	0,25	7,14
	200	0,3	0,25	6,84
	200	0,3	0,25	6,68
	200	0,3	0,25	6,97

Anexo V - Processo Prático

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

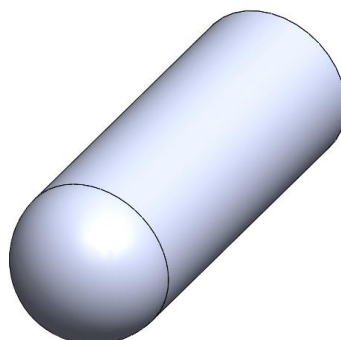


Figura AV.1. Peça exibida em SolidWorks.

Depois de o bloco cilíndrico ser exportado para o MasterCam[®] a próxima fase é escolher as dimensões do material inicial, como esta representado na Figura 62.

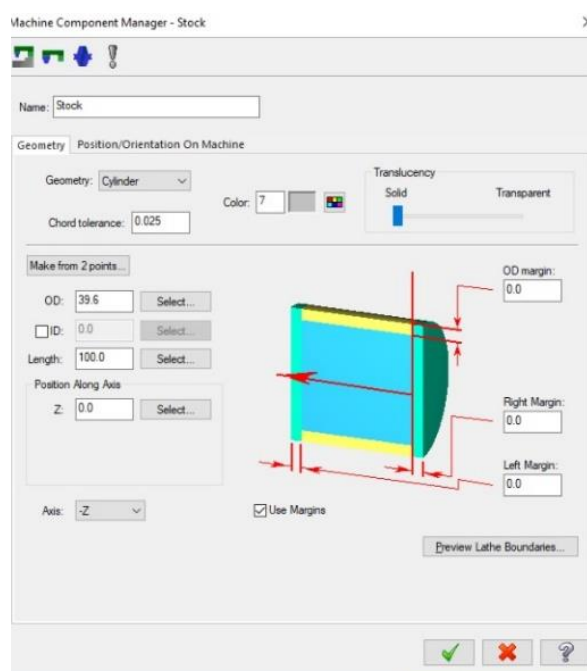


Figura AV.2. Dimensões do material.

Em seguida passamos para o processo de desbaste em que a primeira operação a realizar é a escolha da ferramenta adequada para o processo que queremos executar.

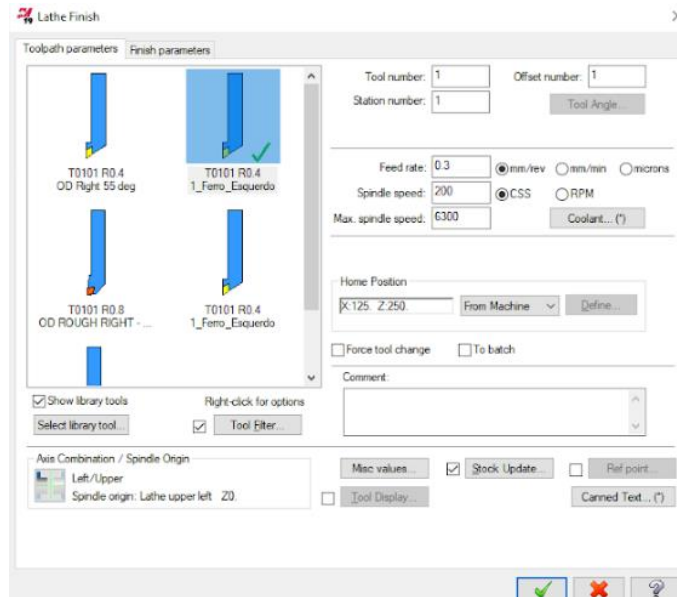


Figura AV.3. Ferramenta utilizada neste estudo.

É nesta fase que também colocamos os valores dos diferentes parâmetros. Escolher o valor inicial da velocidade de avanço (Feed rate) e da velocidade de corte (Spindle speed) na Figura 63 podemos observar que o teste que estava a ser realizado era com 0,3 [mm / rot] de velocidade de avanço e com 200 [m/min] de velocidade de corte, à medida que se realiza os ensaios experimentais altera-se, consoante os valores propostos no decorrer do estudo.

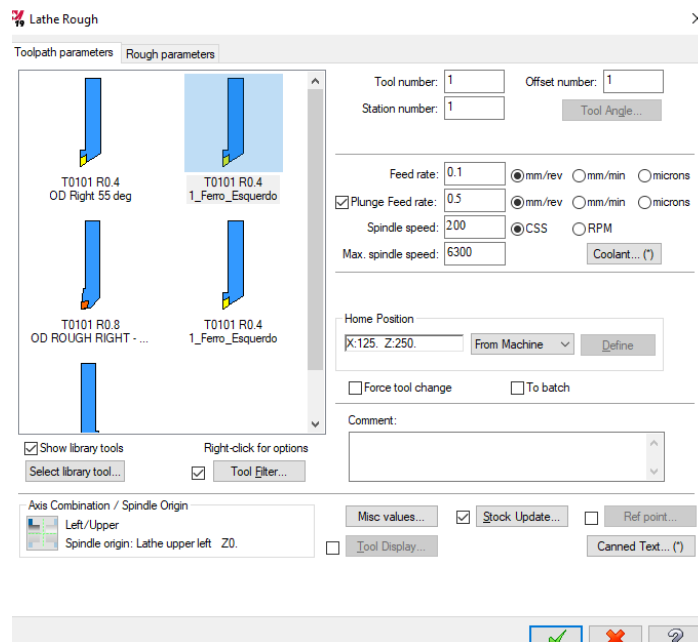


Figura AV.4. Feed rate e Spindle speed.

Depois de definir a velocidade de corte e a velocidade de avanço fica a faltar a penetração como se pode observar na Figura 65, à medida que se realiza os ensaios experimentais altera-se, consoante o valor pretendido.

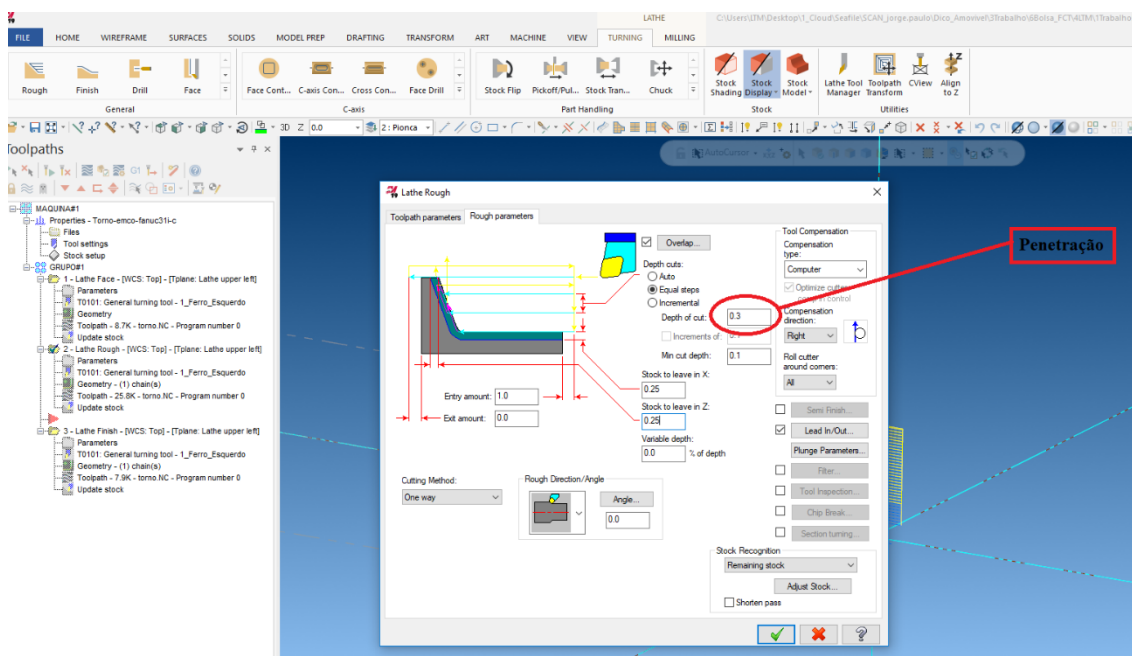


Figura AV.5. Escolha da penetração.

E por fim simulamos e passamos o código gerado para o torno CNC.

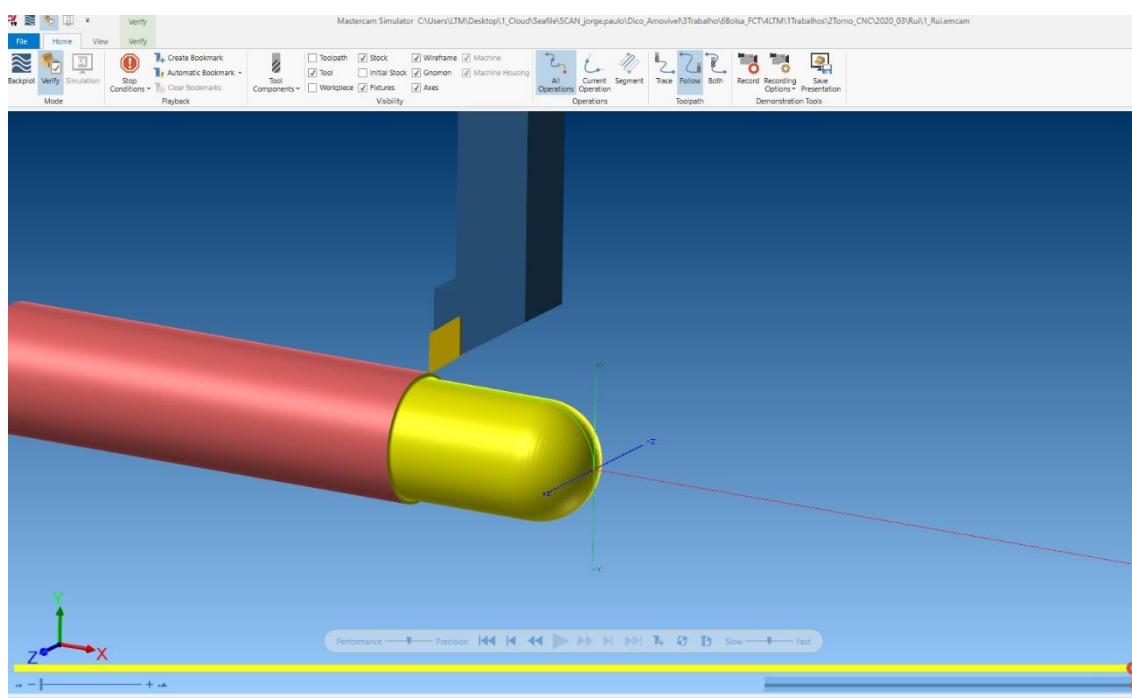


Figura AV.6. Simulação no MasterCam®.