

Hamilton Patrick Cabral dos Reis

Qualidade das Peças Obtidas por Torneamento CNC

Influência do CAD/CAM, Estratégias de Torneamento



Hamilton Patrick Cabral dos Reis

Qualidade das Peças Obtidas por Torneamento CNC
Influência do CAD/CAM, Estratégias de Torneamento

Mestrado em Engenharia Mecânica e Gestão Industrial

Tese de Mestrado

Orientador:

Prof. Dr. Adelino Mendes Cabral Trindade

Setembro 2022



Aos meus Pais

Resumo

A vantagem competitiva de uma empresa baseia-se em equipamentos sofisticados com tecnologia de ponta, que proporcione aos clientes produtos de alta qualidade no prazo estabelecido, com redução substancial dos recursos utilizados e desperdícios. Com o desenvolvimento das tecnologias CNC, a linha de produção veio a ser enriquecida e aprimorada e este naturalmente reflete-se na qualidade e produtividade do produto acabado. Com finalidade de contribuir para o enriquecimento da informação nesta área e complementar minha formação foi efetuado o presente trabalho. Neste, são abordados os principais conceitos e definições do corte por arranque de apra, particularmente incluídas no torneamento CNC. Foram revistas os conceitos relativos aos parâmetros de corte e do comando SSV no torneamento com intuito de investigar as influências no acabamento das peças, medidas através da rugosidade que daí resulta.

O procedimento do trabalho constituiu, em primeiro lugar, em avaliar os parâmetros de corte no torneamento e das respetivas medições das rugosidades, em cada experiência. Seguiu-se a comparação de quais apresentam melhores resultados para se obter um bom acabamento superficial das peças. Um caso especial do estudo foi o da aplicação do comando SSV nas amostras. Numa primeira análise, verificou-se que, de modo convencional, não se iriam obter grandes conclusões, uma vez que o acabamento depende em simultâneo, de várias variáveis. Então optou-se pela análise estatística, recorrendo-se à análise de variância, ANOVA, e ao teste de Tukey. Os estudos efetuados foram conclusivos relativamente a velocidade de corte, ao avanço, à ferramenta e o uso do SSV no acabamento das peças.

O estudo complementar de torneamento baseado no CAD/CAM, inicialmente proposto, foi efetuado relativamente a uma peça simples. Foram efetuadas simulações para avaliar a influência das estratégias de torneamento, disponíveis no software Mastercam, no acabamento e na produtividade.

Palavras-chave: Torno CNC, Parâmetros de Corte, Rugosidade, Mastercam



Abstract

The competitive advantage of a company is based on sophisticated equipment with state-of-the-art technology, which provides customers with high quality products on time, with a substantial reduction in resources used and waste. With the development of CNC technologies, the production line has been enriched and improved and this naturally reflects on the quality and productivity of the finished product. In order to contribute to the enrichment of information in this area and complement my instruction, the present work was carried out. In this one, the main concepts and definitions of the chip start cutting are discussed, particularly included in CNC turning. The concepts related to the cutting parameters and the SSV command in turning were reviewed in order to investigate the influences on the finishing of the parts, measured through the resulting roughness.

The work procedure consisted, in the first place, in evaluating the cutting parameters in the turning and the respective measurements of the roughness, in each experiment. It was followed by the comparison of which ones present better results to obtain a good surface finish of the parts. A special case of the study was the application of the SSV command in the samples. In a first analysis, it was verified that, in a conventional way, great conclusions would not be obtained, since the finish depends simultaneously on several variables. Then we opted for statistical analysis, using analysis of variance, ANOVA, and Tukey's test. The studies carried out were conclusive regarding the cutting speed, the feed, the tool and the use of SSV in the finishing of the parts.

The complementary study of turning based on CAD/CAM, initially proposed, was carried out in relation to a single part. Simulations were carried out to evaluate the influence of turning strategies, available in the Mastercam software, on finishing and productivity.

Keywords: CNC Lathe, Cutting Parameters, Roughness, Mastercam



Agradecimentos

Na concretização do presente trabalho, é com grande entusiasmo quero agradecer a todos que, de algum modo fizeram parte integrante deste processo e contribuíram para o seu desenvolvimento.

Quero agradecer em especial à minha família, principalmente aos meus pais, a meu irmão e aos meus tios pela paciência, compreensão e incentivo demonstrado ao longo do decorrer do Mestrado.

Quero iniciar por agradecer o departamento de Eng. Mecânica e Gestão Industrial da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu por permitir utilizar os laboratórios e por fornecer todo material necessário para elaboração deste trabalho.

Quero agradecer ao meu orientador Prof. Dr. Adelino Trindade, pela disponibilidade, orientações e sugestões durante a elaboração do mesmo, bem como pela partilha de conhecimentos, que fez com que fosse possível a conclusão.

Quero agradecer ao Eng. Nelson dos Santos pela sua disponibilidade e pelo seu apoio prestado durante os ensaios experimentais e pelas sugestões e orientações.

Por último, e não menos importante, quero estender um enorme agradecimento a todos os docentes do Mestrado, pelas experiências, acompanhamento e pelos ensinamentos, assim como a todos os meus colegas do curso.





Índice Geral

Resumo.....	iv
Abstract	v
Agradecimentos.....	vi
Índice Geral.....	viii
Índice das Figuras.....	xi
Índice Remissivo de Quadros	xv
Abreviaturas e Siglas.....	xvi
1.Introdução	18
1.1.Objetivos.....	19
1.2.Organização dos capítulos	19
2.Fundamentos Teóricos	21
2.1.Processos de Maquinagem	22
2.2.Principais Operações do Torneamento	25
2.3.Parâmetros de Corte.....	28
2.4.Fluidos de Corte	29
2.5.Qualidade Superficial das Peças.....	30
2.5.1.Integridade superficial	30
2.5.2.Rugosidade superficial	31
2.5.3.Parâmetros de rugosidade.....	35
2.6.Principais Componentes Necessários ao Torneamento	39
2.7.Características Físicas dos Materiais das Pastilhas	42
2.8.Torneamento CNC.....	45
2.9.O SSV	46
2.10.Simulação no CAD/CAM.....	48
2.11.Métodos Estatísticos	49
2.11.1.Analise da Variância (ANOVA)	49



2.11.2. Teste de Tukey	51
3. Trabalho Experimental e de Simulação	53
3.1. Material e Equipamentos	53
3.2. Métodos Experimentais	58
3.3. Simulação de uma Peça por CAD/CAM	62
4. Análise e Discussão dos Resultados Obtidos	64
4.1. Influência dos Parâmetros de Corte e do Fluido de Corte no Acabamento Superficial do Aço	65
4.1.1. Estudo de como cada parâmetro atua isoladamente na rugosidade.....	65
4.1.2. Influência da velocidade de corte no acabamento	67
4.1.3. Influência do avanço no acabamento	75
4.2. O Comando SSV e a Qualidade Superficial das Peças	79
4.3. Influência dos Parâmetros de Corte no Acabamento Superficial do Alumínio.....	88
4.4. Estudo Comparativo entre as Rugosidades Experimental (Ra) e a Analítica (Rta) ..	91
4.5. Influência dos Parâmetros de Corte na Rugosidade RSm	92
5. Torneamento CNC por CAD/CAM	94
5.1. Estratégias de Torneamento Utilizadas	95
5.1.1. Debaste longitudinal (Torneamento cilíndrico).....	95
5.1.2. Debaste perpendicular.....	99
5.1.3. Debaste por contorno	102
5.2. Comparação entre as Estratégias	105
6. Conclusão	106
7. Bibliografia	109
APÊNDICE A: Complemento da análise de $Ra = f(f, FC)$	112
APÊNDICE B: Complemento da análise de $Ra = f(f, P1 \text{ e } P2)$	114
APÊNDICE C: Complemento da análise de $Ra = f(f, P1, SSV)$	116
APÊNDICE D: Complemento da análise de $Ra = f(f, P2, FC, SSV)$	120
APÊNDICE E: Complemento da análise de $Ra = f(f, SSV, P2, L)$	122
APÊNDICE F: Complemento da análise de $Ra = f(f, P1 \text{ e } P2)$ no alumínio.....	129



Apêndice I – Código de CNC ensaio 1A.....	132
Apêndice II – Código de CNC ensaio 1B.....	133

Índice das Figuras

<i>Figura 1: Classificação dos processos de fabrico</i>	22
<i>Figura 2: Torneamento (Fonte: Daniel, (2019), pp. 6)</i>	23
<i>Figura 3: Furação (Fonte: Daniel, (2019), pp. 6)</i>	24
<i>Figura 4: Fresagem (Adaptada de: Ferreira, (2018), pp. 27)</i>	24
<i>Figura 5: Serragem (Fonte: Daniel, (2019), pp. 5)</i>	24
<i>Figura 6: Retificação tangencial plana (Fonte: Ferraresi, (1970) pp. XXXIX)</i>	25
<i>Figura 7: Representação dos movimentos relativos entre a ferramenta e a peça (adaptada de Peres et al., (2017), pp.7)</i>	26
<i>Figura 8: Torneamento cilíndrico externo e interno (Fonte: Peres et al., (2017), pp.8)</i>	26
<i>Figura 9: Faceamento externo e interno (Fonte: Souza, (2011), pp. 14)</i>	27
<i>Figura 10: Sangramento (Fonte: Ferraresi, (1970) pp. XXVII)</i>	27
<i>Figura 11: Torneamento curvilíneo (Fonte: Ferraresi, (1970) pp. XXVIII)</i>	28
<i>Figura 12: Classificação da integridade superficial (Fonte: Machado, (2009), pp. 276)</i>	31
<i>Figura 13: Grandezas de rugosidades (Fonte: Agostinho et al., (1977), pp. 196)</i>	33
<i>Figura 14: Esquema de um rugosímetro (Fonte: Tedesco (2007), pp. 31)</i>	33
<i>Figura 15: Apalpador mecânico (Fonte: Nicola (2008), pp. 36)</i>	34
<i>Figura 16: Definição dos comprimentos de avaliação da rugosidade e do Cut-off (Fonte: Nicola (2008))</i>	34
<i>Figura 17: Linha média (Fonte: Agostinho et al., (1977), pp. 202)</i>	36
<i>Figura 18: Rugosidade média aritmética Ra (Fonte: Neto (2012), pp. 91)</i>	36
<i>Figura 19: Rugosidade das irregularidades das 10 saliências Rz (Fonte: Agostinho et al., (1977), pp. 205)</i>	37
<i>Figura 20: Altura máxima das irregularidades R_{max} (Fonte: Imagem adaptada de Agostinho et al., (1977), pp. 206)</i>	38
<i>Figura 21: Rugosidade de profundidade média Rp (Fonte: Agostinho et al., (1977), pp. 206)</i>	38
<i>Figura 22: Parâmetro da rugosidade Rt (Fonte: Slideshare, (2012))</i>	38
<i>Figura 23: Parâmetro da rugosidade R_{Sm} (Fonte: Imagem adaptada de Evident (2019))</i>	39
<i>Figura 24: Exemplos de sistemas de fixação (Fonte: Batista, (2010), pp. 71)</i>	40
<i>Figura 25: Ferramenta de desbaste exterior, (Fonte: Imagem adaptada de Rocha (2016), pp. 34)</i>	41
<i>Figura 26: Ferramenta de desbaste interior, (Fonte: Imagem adaptada de Rocha (2016), pp. 35)</i>	41



<i>Figura 27: Ferramentas de acabamento exterior (Fonte: Imagem adaptada de Rocha (2016), pp. 35).....</i>	41
<i>Figura 28: Ferramenta de acabamento interior (Fonte: Imagem adaptada de Rocha (2016), pp. 35).....</i>	41
<i>Figura 29: Ferramentas com pastilhas ao centro (Fonte: Imagem adaptada de Rocha (2016), pp. 36).....</i>	42
<i>Figura 30: Lamina de sangrar (Fonte: Imagem adaptada de Rocha (2016), pp. 37).....</i>	42
<i>Figura 31: Extrato retirado dum catálogo / identificando as suas ferramentas de metal duro perante a norma ISO 513 (Fonte: Verginelli, (2015), pp. 24).....</i>	43
<i>Figura 32: Principais características geométricos de uma pastilha (Fonte: Imagem adaptada de Sandvik (2018)).....</i>	44
<i>Figura 33: Ângulo da pastilha vs características (Fonte: Sandvik (2018)).....</i>	44
<i>Figura 34: Nível das vibrações na peça sem SSV (Fonte: HAAS (2015)).....</i>	47
<i>Figura 35: Nível das vibrações na peça com SSV (Fonte: HAAS (2015)).....</i>	47
<i>Figura 36: SSV on vs SSV off (Fonte: HAAS (2015)).....</i>	48
<i>Figura 37: Exemplo de um relatório da análise de variância (Fonte: Minitab).....</i>	50
<i>Figura 38: Exemplo do resultado de um teste de Tukey feito no Minitab, pares de comparações.....</i>	52
<i>Figura 39: Pastilhas P1 e P2.....</i>	55
<i>Figura 40: Torno CNC HAAS Automation.....</i>	56
<i>Figura 41: Torno CNC da HAAS, vista externa.....</i>	57
<i>Figura 42: Torno CNC da HAAS, vista interna.....</i>	57
<i>Figura 43: Rugosímetro Hommel Tester T1000.....</i>	58
<i>Figura 44: Esquema ilustrativa do comprimento efetivo e de segurança de uma peça.....</i>	59
<i>Figura 45: Provette inicial, cilíndrico de aço seccionado.....</i>	59
<i>Figura 46: Desenho do provete com os troços de estudo.....</i>	60
<i>Figura 47: Influência dos valores dos avanços nos troços de uma amostra.....</i>	60
<i>Figura 48: Amostras de aço AISI 1213 resultado dos casos de $L = L_1$, com e sem SSV.....</i>	61
<i>Figura 49: Três posições de medição da rugosidade em cada troço das amostra.....</i>	61
<i>Figura 50: Medição das rugosidades com o HOMMEL Tester T1000.....</i>	62
<i>Figura 51: Ordem das operações de torneamento.....</i>	63
<i>Figura 52: Rugosidade aritmética em função da velocidade de rotação.....</i>	66
<i>Figura 53: Rugosidade aritmética em função do avanço.....</i>	67
<i>Figura 54: Relatório Minitab da ANOVA para rugosidade R_a de n sem FC.....</i>	68
<i>Figura 55: Gráfico Minitab da rugosidade sem FC em função da velocidade de rotação.....</i>	68

<i>Figura 56: Relatório Minitab da rugosidade em função da velocidade de rotação a $f = 0.1$ mm/rot e sem FC</i>	68
<i>Figura 57: Relatório Minitab da ANOVA para rugosidade Ra com FC</i>	69
<i>Figura 58: Gráfico Minitab da rugosidade Ra com FC em função da velocidade de rotação</i>	69
<i>Figura 59: Relatório Minitab da rugosidade em função da velocidade de rotação com FC ..</i>	69
<i>Figura 60: Relatório Minitab da ANOVA para rugosidade com interação entre os valores da velocidade de rotação “n” com e sem FC</i>	70
<i>Figura 61: Gráfico Minitab dos efeitos principais para análise do “n” e da presença do FC, segundo a rugosidade Ra</i>	71
<i>Figura 62: Gráfico Minitab da interação da velocidade de rotação e do FC, segundo a rugosidade</i>	71
<i>Figura 63: Teste de Tukey no Minitab, comparação de pares para valores de “n” sem FC..</i>	74
<i>Figura 64: Teste de Tukey no Minitab, comparação de pares para valores de “n” com FC .</i>	74
<i>Figura 65: Gráfico Minitab de interação dos valores de avanço e do FC, segundo a rugosidade</i>	76
<i>Figura 66: Gráfico Minitab dos efeitos principais para análise dos valores de f e c/FC, na rugosidade</i>	76
<i>Figura 67: Gráfico de interação dos valores de avanço e de $P1$ e $P2$, na rugosidade</i>	78
<i>Figura 68: Gráfico dos efeitos principais para análise dos valores de avanço e de $P1$ e $P2$, segundo a rugosidade</i>	78
<i>Figura 69: Gráfico dos efeitos principais para análise dos valores de avanço com e sem SSV, sem FC, para $P1$ na rugosidade da amostra de $L = 61$ mm</i>	80
<i>Figura 70: Gráfico dos efeitos principais para análise dos valores de avanço com e sem SSV segundo a rugosidade, s/FC para $P1$ na amostra de 90 mm</i>	81
<i>Figura 71: Gráfico comparativo dos resultados da rugosidade sem e com SSV nas amostras de 61 e 90 mm, s/FC para $P1$</i>	82
<i>Figura 72: Relação entre os valores da rugosidade de avanço com e sem FC e c/SSV, na amostra de $L = 61$ mm para $P2$.....</i>	83
<i>Figura 73: Gráfico dos efeitos principais de rugosidade devido os valores de avanço, com e sem FC e ao SSV, na amostra de 61 mm com $P2$</i>	84
<i>Figura 74: Gráfico dos efeitos principais para $Ra = F(f, SSV, P2)$, em $L = 61$ mm e s/FC...</i>	86
<i>Figura 75: Gráfico dos efeitos principais $Ra = F(f, SSV, P2)$, em $L = 120$ mm e s/FC</i>	86
<i>Figura 76: Gráfico dos efeitos principais $Ra = F(f, SSV, P2)$, em $L = 200$ m e s/FC</i>	86
<i>Figura 77: Gráfico comparativo das interações dos valores de avanço com e sem SSV nas amostras de 61, 120 e 200 mm com $P2$ e s/FC</i>	87



<i>Figura 78: Gráfico dos efeitos principais para análise dos valores de avanço e da P1 e P2, na amostra de alumínio com 61 mm.....</i>	89
<i>Figura 79: Gráfico comparativo entre os valores de avanço e da P1 e P2, na amostra de alumínio com 61 mm</i>	89
<i>Figura 80: Gráfico comparativo das interações dos valores de avanço segundo a rugosidade, nas amostras do aço e do alumínio com 61 mm.....</i>	90
<i>Figura 81: Gráfico comparativo entre a rugosidade Ra e Rta</i>	91
<i>Figura 82: Rugosidade RSm em função da velocidade de rotação, com e sem FC, com a P1</i>	92
<i>Figura 83: Rugosidade RSm em função do avanço, com e sem FC, com a P1.....</i>	93
<i>Figura 84: Dimensões da peça de Xadrez</i>	94
<i>Figura 85: Peça de Xadrez.....</i>	94
<i>Figura 86: Ajuste da peça em bruto relativo às dimensões da peça e definição da bucha</i>	95
<i>Figura 87: Seleção dos parâmetros de corte para a operação de facejamento, assim como a ferramenta</i>	96
<i>Figura 88: Seleção da pastilha para a operação facejamento</i>	97
<i>Figura 89: Seleção dos parâmetros de corte e da ferramenta para o acabamento da estratégia de desbaste longitudinal</i>	97
<i>Figura 90: Definição de movimentos e de acabamento para a estratégia do desbaste longitudinal.....</i>	98
<i>Figura 91: 1ª fase de operação de desbaste longitudinal</i>	98
<i>Figura 92: 2ª fase da estratégia de desbaste longitudinal</i>	99
<i>Figura 93: Seleção dos parâmetros de corte e da ferramenta utilizada na estratégia de desbaste frontal</i>	100
<i>Figura 94: Seleção dos parâmetros de corte da rugosidade para a estratégia do desbaste perpendicular</i>	100
<i>Figura 95: Seleção dos parâmetros de corte e da ferramenta para o acabamento da estratégia de desbaste perpendicular</i>	101
<i>Figura 96: Operação de desbaste perpendicular.....</i>	101
<i>Figura 97: Percurso da ferramenta na estratégia de desbaste perpendicular</i>	102
<i>Figura 98: Seleção dos parâmetros de corte e da ferramenta para a estratégia de desbaste por contorno</i>	103
<i>Figura 99: Operação de desbaste por contorno</i>	103
<i>Figura 100: Percurso da ferramenta na estratégia de desbaste por contorno e acabamento</i>	104
<i>Figura 101: Árvore das operações em Mastercam</i>	104



Índice Remissivo de Quadros

<i>Tabela 1: Tipos de defeitos geométricos (Fonte: Davim (1995), pp. 195)</i>	32
<i>Tabela 2: Composição química do aço EN 11SMn28 (Fonte: Favorit, (n.d.)).....</i>	54
<i>Tabela 3: Composição química do alumínio EN AW 6082 (Fonte: Lanema (2019)).....</i>	54
<i>Tabela 4: Valores de referência do fabricante para P1 (Fonte: Hoffmann (n.d.)).....</i>	56
<i>Tabela 5: Valores de referência do fabricante para P2 (Fonte: YG-1 (2018))</i>	56
<i>Tabela 6: Parâmetros de Corte</i>	58
<i>Tabela 7: Resultados da rugosidade em função da velocidade de rotação, com o avanço de 0.1 mm/rot para L = 61 mm</i>	65
<i>Tabela 8: Resultados da rugosidade em função dos valores de avanço para L = 61 mm.....</i>	66
<i>Tabela 9: Resultado das rugosidades a partir de “n” e de FC</i>	72
<i>Tabela 10: Sumário Excel relativo ao tratamento de dados com fator duplo com repetição..</i>	72
<i>Tabela 11: Relatório Excel da ANOVA da interação dos valores de “n”, sem e com FC na rugosidade</i>	73
<i>Tabela 12: Tabela comparativa de Ra e Rta</i>	91
<i>Tabela 13: Tabela comparativa dos tempos das estratégias de desbaste</i>	105
<i>Tabela 14: Tabela resumo dos ensaios experimentais de Ra.....</i>	106
<i>Tabela 15: Tabela resumo dos ensaios experimentais de RSm.....</i>	108

Abreviaturas e Siglas

A	Área (m ²)
AISI	American Iron and Steel Institute (Instituto Americano de Ferro e Aço)
ANOVA	Análise da Variância
CNC	Comando numérico computadorizado
d	Diâmetro médio de corte (mm)
DEMGI	Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial
DIN	Deutsches Institut für Normung (Instituto Alemão para Normalização)
<i>f</i>	Avanço (mm/rot)
FC	Fluido de corte
h	Altura
IC	Intervalo de Confiança
ISO	International Organization for Standardization (Organização Internacional de Normalização)
L	Comprimento (mm)
<i>l_e</i>	Comprimento da amostra (mm)
<i>l_m</i>	Comprimento total de avaliação (mm)
<i>l_t</i>	Comprimento total (mm)
n	Velocidade de rotação (rpm)
P1	Pastilha 1
P2	Pastilha 2
r	Raio da ponta da pastilha (mm)
SSV	Spindle Speed Variation
<i>v_c</i>	Velocidade de corte (m/min)
<i>v_f</i>	Velocidade avanço (mm/min)

1. Introdução

Com o decorrer dos anos, a qualidade das peças e dos equipamentos tem sido um ponto chave para o desenvolvimento tecnológico. Como tal, durante a história dos processos de maquinagem e o desenvolvimento das máquinas-ferramentas tem proporcionado ferramentas importantes para colmatar as necessidades dos respetivos sectores de produção e, naturalmente, as necessidades dos clientes. Pois, a qualidade dos produtos concebidos pelas máquinas-ferramentas, como consequência, originou soluções que permitiram aumentar a produtividade e a redução do desgaste dos equipamentos e das ferramentas assim como a redução dos desperdícios durante as operações.

A principal chave da competitividade de uma empresa é baseada na capacidade de se adaptar às exigências do mercado e trazer, junto a si, a tecnologia de ponta que permita satisfazer e colmatar essas necessidades num curto período de tempo e com a qualidade desejada. No mundo da metalomecânica, o torneamento tem tido um papel importante no processo de corte por arranque de aparas. Pois, na indústria, existem determinados requisitos técnicos nomeadamente a exigência do acabamento superficial com elevada qualidade e produtividade. Deve-se à necessidade de remoção de elevadas quantidades de material, de forma a obter geometrias complexas com elevada precisão dimensional, Henrique (2019).

O presente trabalho consistiu em analisar as rugosidades provenientes das amostras de aço AISI 1213 e do alumínio Al 6082, torneadas num torno CNC da HAAS. O principal propósito é de averiguar quais são os parâmetros que proporcionam melhor acabamento superficial das peças. Para tal, foram estabelecidos valores iniciais para análise da velocidade de rotação, avanço e penetramento, com intuito de encontrar a melhor conjugação dos mesmos e alcançar a menor rugosidade dos metais em estudo. Neste estudo, foram usadas duas pastilhas diferentes, sem e com fluido de corte e, ainda, o comando SSV (*Spindle Speed Variation*). Este comando pode trazer novas possibilidades para ajudar a melhorar a eficiência do acabamento superficial das peças.

Para quantificar e qualificar as leituras das rugosidades obtidas em cada ensaio, o estudo baseou-se na utilização dos métodos estatísticos, com o ANOVA e o teste de Tukey. Estes métodos, possibilitam as bases que permitem fazer análises críticas e conclusivas do estudo. O final do estudo,

faz-se com o desfecho de quais são os parâmetros que correspondem à situação mais ideal. Na simulação através de CAD/CAM, foi utilizado o software Mastercam para testar a produtividade das estratégias de torneamento através dos tempos de execução.

1.1. Objetivos

O principal objetivo desta dissertação é analisar a rugosidade das peças através dos parâmetros de corte, do SSV e das pastilhas utilizados durante o torneamento.

Para análise dos resultados, foram utilizados dois métodos para análise estatística, o método ANOVA e o teste de Tukey. Pelo método ANOVA consegue-se determinar se existe alguma diferença estatisticamente significativa entre as médias das leituras com uma análise de variância. Fez-se pela comparação do P-Value (ou P-Valor) com o nível de significância $\alpha = 5\%$ e com a ajuda dos gráficos de interação e dos efeitos principais. O teste de Tukey faz comparações entre médias das amostras. Este, é um método bastante rigoroso que testa toda e qualquer diferença nas médias e que se usa para complementar o estudo da análise de variância.

As estratégias de torneamento disponíveis pelo CAM eram três e, com elas, mais duas operações complementares (facejamento e acabamento). Nestas simulações estratégicas de torneamento, usou-se sempre a mesma peça de revolução.

1.2. Organização dos capítulos

A dissertação encontra-se dividida em seis capítulos para facilitar a leitura e a compreensão do mesmo. Todavia, de forma sintetizada, os conteúdos são descritos:

- *No Capítulo 1 “Introdução”*, tem como propósito apresentar um enquadramento do presente trabalho, com uma breve descrição da sua estrutura e exibir os principais objetivos da dissertação.

- *No Capítulo 2 “Fundamentos Teóricos”*, apresentam-se alguns fundamentos teóricos ao título da dissertação, de forma a tornar mais fácil a compreensão do estudo que é desenvolvido. Inicialmente, apresenta-se uma descrição dos princípios relativos aos processos de maquinagem, nomeadamente do torneamento. Seguem-se os parâmetros de corte por arranque da apara, o SSV e

a medição das rugosidades. Por fim, é feita uma abordagem dos métodos utilizados na análise de resultados obtidos a partir das medições efetuadas.

- *No Capítulo 3 “Trabalho Experimental e de Simulação”* descrevem-se os materiais e equipamentos utilizados durante os ensaios experimentais e a estratégia utilizada para averiguar as diferentes hipóteses de torneamento e dos métodos de medição e análise utilizados. São, ainda, abordados os métodos utilizados para a simulação das estratégias de torneamento por CAD/CAM.

- *No Capítulo 4 “Análise e Discussão dos Resultados Obtidos”*, apresentam-se os resultados das rugosidades obtidos de cada ensaio experimental, provenientes dos parâmetros de corte, das ferramentas e das outras variáveis utilizadas. No final, fazem-se as análises estatísticas.

- *No Capítulo 5 “Torneamento CNC por CAD/CAM”*, apresenta-se um caso de estudo de simulação com as estratégias de torneamento disponíveis no software Mastercam. A sua finalidade é tirar conclusões objetivas à produtividade, na mesma peça.

- *No Capítulo 6 “Conclusão”*, são apresentadas as conclusões gerais obtidos durante a elaboração da dissertação.

2. Fundamentos Teóricos

Com o desenvolvimento tecnológico, no fabrico de ferramentas e peças por corte com arranque de apara, houve grande necessidade de automatizar os processos e aumentar a eficiência. Contudo, nos dias correntes, a indústria tem-se modernizado, com desenvolvimento dos processos de fabrico. Como tal, necessitam de ferramentas de corte mais adequadas e com melhores parâmetros de corte. É essencial, para se conseguir vantagem competitiva e satisfação dos clientes, ter em consideração a relação entre as necessidades de produção e a redução substancial dos custos.

Em 1950 iniciou-se a era dos processos automatizados, Costa (2014). Foi nos Estados Unidos de América, no Instituto de Tecnologia de Massachussets (MIT), que se deu o desenvolvimento do comando numérico. Resultou de alguns projetos desenvolvidos com a Força Aérea dos Estados Unidos e a Parsons Corporation, com uma ideia simples do controlo sistemático da posição dos fusos de uma máquina-ferramenta. Após o ano 1957, houve um desenvolvimento exponencial de novos sistemas e de máquinas com *hardware* apropriado para receberem o controlo numérico. O intensificador disto foi o desenvolvimento de novos computadores, que se baseavam nas, então, recentes descobertas na microeletrónica. Em especial, desenvolveram-se microprocessadores que possibilitaram melhores gerações de sistemas de controle numérico.

Nos dias correntes, inúmeros setores de produção baseiam-se nas tecnologias CNC, usando o CAD e o CAM, que representam um papel fundamental na maquinagem com alta exigência de precisão. Em consequência disso, há elevada qualidade nas peças e uniformização da produção, tendo em consideração a grande vantagem na agilidade em comutar e intercalar as tarefas com baixo consumo de recursos associados. As exigências nos prazos de entrega, assim como na precisão da maquinagem, obrigam a ter níveis de produção mais elevados, pois a diversidade e a complexidade de produtos impõem um sistema dinâmico de produção, mais flexível e com erros reduzidos, Rocha (2016). Pode-se imaginar a imensa utilidade, ao associar uma destas tecnologias numa nuvem de banco de dados e, quase em simultâneo, a máquina-ferramenta responder aos comandos pré-estabelecidos. Do mesmo modo, há troca de informação em tempo real, relatando o estado do processo. Esta tecnologia pode incluir-se no conceito da indústria 4.0.

2.1. Processos de Maquinagem

A maquinagem é um termo que abrange vários processos de fabrico para dar forma à peça pretendida, incluindo os convencionais, através do corte por arranque da avara, como na classificação da figura 1. Na indústria, existe uma grande variedade de materiais com diversas aplicações, que se podem enquadrar nas necessidades e características da finalidade desejada, o produto final. Esses materiais podem ser: aços; ligas de alumínio; ligas de cobre; ferro fundido; ligas de titânio; ligas de níquel; entre outros.

A classificação dos processos de fabrico, apresentada na figura 1, e que originam alteração de forma, podem ser categorizados em:

- Processos de fabrico com remoção de material, denominado por corte por arranque de avara;
- Processos de fabrico sem remoção de material, que englobam a conformação plástica e o corte por arrombamento.

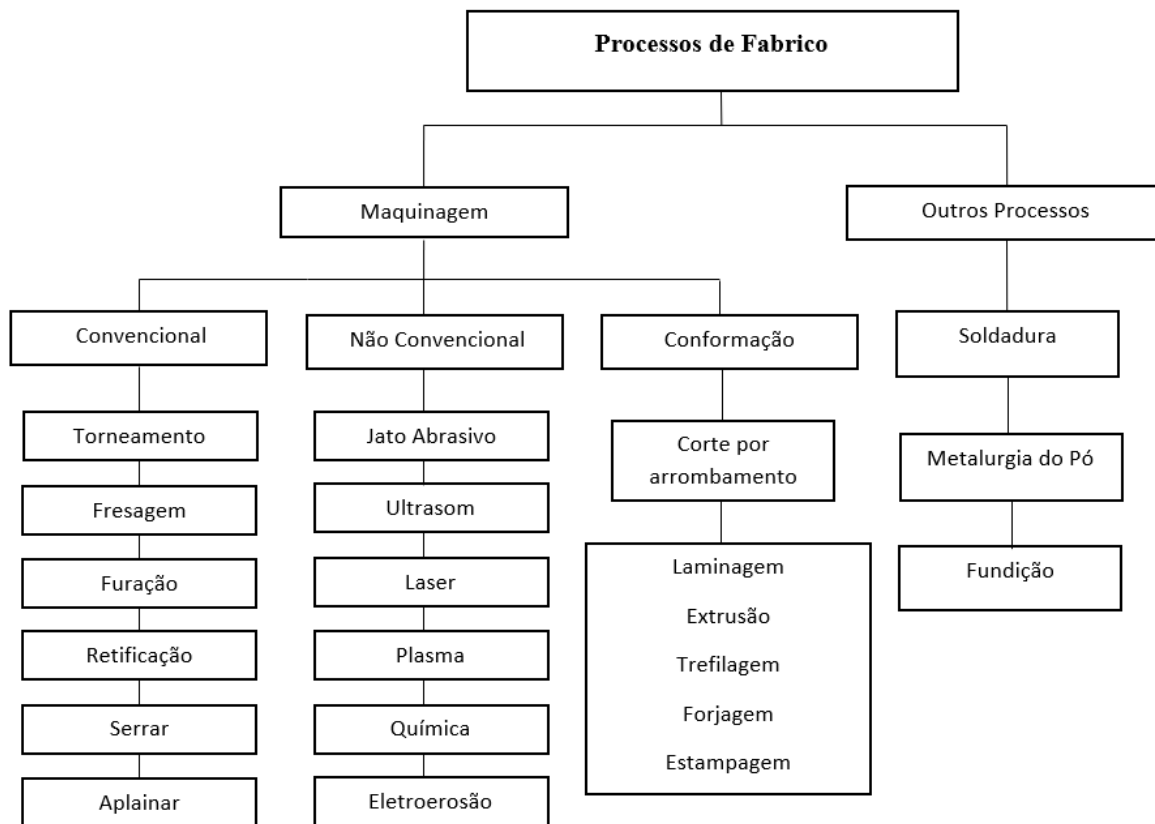


Figura 1: Classificação dos processos de fabrico

As peças em bruto, que vão ser maquinadas, geralmente podem ter origem num outro qualquer processo de fabrico primário, como por exemplo por laminagem, extrusão, fundição, forjagem; na pulverometalurgia.

A escolha apropriada do processo de maquinagem, bem como das ferramentas e dos parâmetros de corte, são fundamentais para obter a qualidade desejada no produto final. Todavia, os processos de arranque de apara mais comuns são:

- Torneamento;
- Furação;
- Fresagem.

Podem-se encontrar mais alguns processos de maquinagem como: o aplainamento, o afiamento ou a retificação, Daniel (2019). As principais características dos processos mais comuns referem-se ao componente que roda e ao que avança e, ainda, ao tipo de ferramenta que utiliza.

A seguir faz-se uma apresentação simplificada com alguns conceitos básicos dos processos mais comuns.

O torneamento fundamenta-se no corte com ferramenta monocortante (com apenas um gume a atuar) que se move para proporcionar o avanço e o penetramento na peça. A peça, que por sua vez, está em rotação fixa à árvore, figura 2.

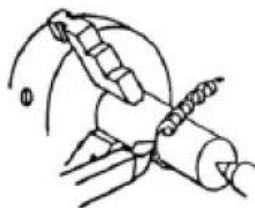


Figura 2: Torneamento (Fonte: Daniel, (2019), pp. 6)

A furação é um processo que tem como objetivo obter furos circulares na peça. Utiliza uma ferramenta bicortante (denominada broca) em rotação e avanço simultâneo, figura 3. Esta operação também pode ser efetuada no torno, segundo a direção do eixo da peça em rotação, mas com a rotação proporcionada pela peça.

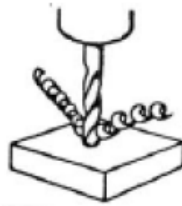


Figura 3: Furação (Fonte: Daniel, (2019), pp. 6)

A fresagem utiliza uma ferramenta multicortante em rotação, sendo o movimento de avanço efetuado pela peça que está fixa na mesa. Pode-se dispor de duas variantes: fresagem de topo ou vertical e fresagem cilíndrica ou horizontal, figura 4.

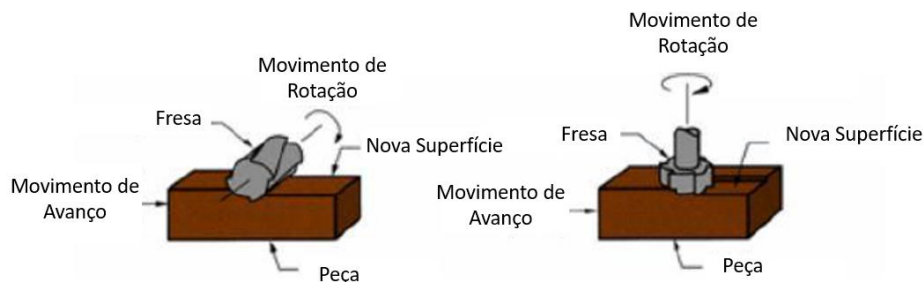


Figura 4: Fresagem (Adaptada de: Ferreira, (2018), pp. 27)

A serragem é um processo que tem como base uma ferramenta multicortante, que tem como função única cortar peças. Esta ferramenta pode ter forma de um disco em rotação e avanço relativo à peça (como na figura 5), de lâmina com movimento de vaivém ou de fita com movimento contínuo.

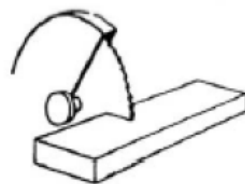


Figura 5: Serragem (Fonte: Daniel, (2019), pp. 5)

A utilização de abrasivos, em que a retificação é a operação mais comum para fazer acabamento fino ou corrigir irregularidades nas peças. Desta forma, melhora o acabamento e a precisão dimensional da peça. Este processo utiliza, como ferramenta, uma mó (ou rebole) ou um disco com partículas abrasivas aglomeradas, figura 6.

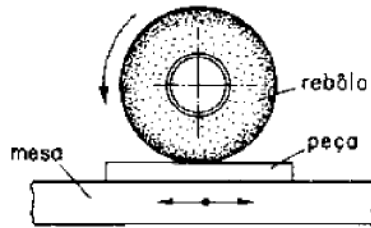


Figura 6: Retificação tangencial plana (Fonte: Ferraresi, (1970) pp. XXXIX)

2.2. Principais Operações do Torneamento

As operações de torneamento são exequíveis com a peça a adquirir forma, definida através do movimento de rotação (eixo de rotação da peça), por intermédio de uma ferramenta monocortante especial que se desloca e com uma certa penetração na remoção do material. Os movimentos que sustentam cada operação de torneamento, que originam a formação da apara e que resultam da interação entre a ferramenta e a peça são:

- Movimento de corte, cujo parâmetro é a velocidade de corte v_c . Este movimento tem direção tangente à circunferência que passa a meio do gume ativo da ferramenta, contribuindo para o arranque da apara, Diniz, et al. (2014).

- Movimento de avanço, cujo parâmetro é o avanço (f) ou a velocidade de avanço v_f correspondente. O movimento tem direção e sentido de progresso da ferramenta e o seu valor é a distância percorrida pela ferramenta por cada rotação.

- Movimento de penetração, que é feito inicialmente e que é o parâmetro que se denomina de penetramento (p). Dum modo geral, este movimento não existe durante o corte.

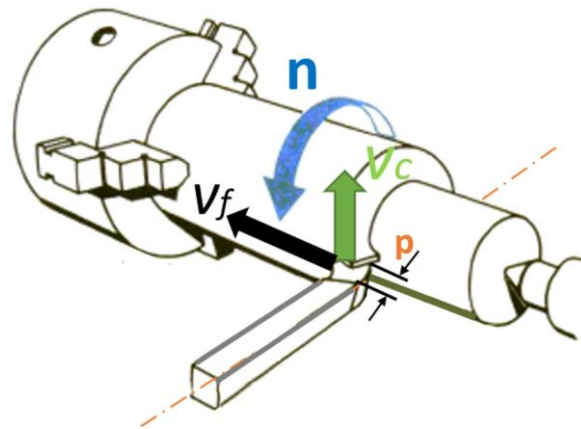


Figura 7: Representação dos movimentos relativos entre a ferramenta e a peça (adaptada de Peres et al., (2017), pp.7)

Ao ter em consideração a funcionalidade da peça e as suas características finais, a trajetória da ferramenta durante o torneamento pode ser de carácter retilíneo ou curvilíneo, que define a operação de:

- Torneamento cilíndrico;
- Torneamento radial, ou facejamento;
- Torneamento curvilíneo.

As designações que se seguem descrevem em síntese as trajetórias utilizadas para obter as peças, segundo Ferraresi (1970):

- Torneamento Cilíndrico

A característica principal deste processo, é que o avanço da ferramenta se faz na direção paralela ao eixo principal. Esta operação pode ser externa ou interna, figuras 7 e 8.



Figura 8: Torneamento cilíndrico externo e interno (Fonte: Peres et al., (2017), pp.8)

- Torneamento de Facejamento

Esta operação também é caracterizada pelo movimento retilíneo da ferramenta, mas na direção perpendicular ao eixo de rotação da peça. Pode ser feita externa ou internamente, como na figura 9.

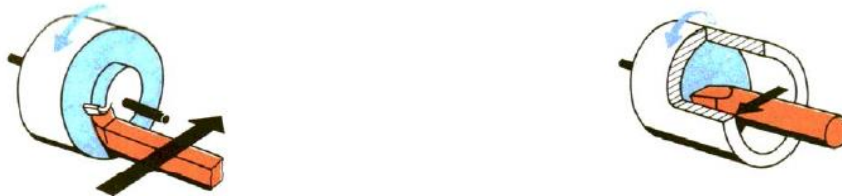


Figura 9: Faceamento externo e interno (Fonte: Souza, (2011), pp. 14)

- Sangramento

Embora com movimento equivalente ao faceamento, esta operação não é feita na extremidade da peça e tem como objetivo principal fazer o corte final, figura 10.

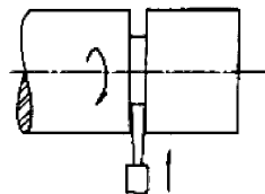


Figura 10: Sangramento (Fonte: Ferraresi, (1970) pp. XXVII)

- Torneamento curvilíneo

Esta operação de torneamento, permite criar outras formas, mais ou menos complexas, de revolução, com a ferramenta a deslocar-se numa trajetória definida pelos dois movimentos, paralelo e perpendicular ao eixo, a atuar em simultâneo, figura 11, e que define a geratriz do corpo de revolução da peça. Este tipo de movimento é característico e fácil de executar em tornos CNC.

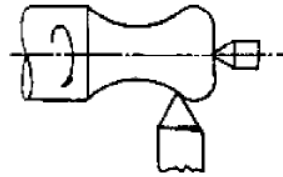


Figura 11: Torneamento curvilíneo (Fonte: Ferraresi, (1970) pp. XXVIII)

2.3. Parâmetros de Corte

A chave do sucesso para obter peças com acabamento excelente, é atribuída aos parâmetros de corte e daí obter boa produtividade. No torneamento, tal como noutros processos, é essencial conhecer e usar bem esses parâmetros, mediante as exigências das peças, a fim de ter eficácia no que se pretende face às condições de maquinagem. Como já referido, os parâmetros de corte: velocidade de corte (v_c), avanço (f) e penetramento (p), os quais já foram ilustrados na figura 7. As relações fundamentais destes parâmetros são apresentadas nos parágrafos seguintes.

A velocidade de corte é caracterizada por ser um vetor tangencial originado pelo movimento relativo entre a ferramenta e a rotação da peça. É enunciada pela resultante entre o diâmetro médio de corte (d) da peça e a velocidade de rotação, segundo a equação (1).

$$v_c = \pi \times d \times n \quad (1)$$

É necessário, sempre, a consulta das tabelas relativamente à velocidade de corte a ser escolhida para o processo de torneamento, Rocha (2016). Ou melhor, consultar os respetivos catálogos das ferramentas.

O avanço permite a continuidade do processo de corte e, juntamente com o raio da ponta da pastilha, afeta a formação da apara. A velocidade de avanço relaciona-se com a velocidade de rotação e o avanço, equação (2).

$$v_f = n \times f \quad (2)$$

A profundidade de corte diz respeito à penetração da ferramenta perpendicularmente à superfície da peça em que está a atuar, no plano de trabalho. A sua unidade vem, geralmente, expressa em milímetros.

2.4. Fluidos de Corte

O fluido de corte tem uma função muito importante nos processos corte. A sua utilização só teve início no ano de 1890, sendo introduzido por F.W Taylor, Diniz et al., (2013). No princípio, Taylor utilizou água como fluido de corte (FC) para resfriar as ferramentas, depois utilizou uma solução à base de água e sabão para evitar a oxidação da peça assim como da ferramenta e, também utilizou uma solução à base de água e soda. Todavia, a qualidade das peças foi melhorando devido ao desenvolvimento de melhores fluidos de corte. Além da sua característica como lubrificante, que reduz a formação da apara aderente na ferramenta, apresenta boas propriedades anti-fricção e afasta a apara da área de corte. As características, como refrigerante, são fundamentais para reduzirem a dilatação térmica da peça, protegendo-a e à ferramenta, contra a corrosão, aumentando a vida útil da ferramenta, Neto & Silva, (2017). Os FC são classificados em, tipo aquosos (emulsões), ar, óleos (óleo minerais; óleo graxos; óleo compostos; óleo de extrema pressão), Diniz et al., (2013).

Os principais fatores que estão na base da seleção do FC são, Diniz et al., (2013):

- Condições de maquinagem. Para este fator usa-se a emulsão quando a operação de maquinagem está a ser feita com velocidades de corte elevadas pois, neste caso, o principal objetivo é a refrigeração dos elementos associados. O óleo é utilizado em operações de elevado desbaste (grandes parâmetros de avanço e penetramento), mas com velocidade de corte baixa, e com elevados valores de forças de corte. Todavia, além de saber as condições requeridas para a maquinagem de uma peça e do seu formato, é necessário ter em consideração os parâmetros de maquinagem adequados aos objetivos finais.

- Material da peça. É fundamental ter em consideração qual o material da peça que é maquinada. Para um resultado eficaz é necessário conhecer bem o tipo de FC que melhor se adequa à peça. É que, dependendo dos parâmetros, a peça pode sofrer alterações químicas e físicas no contacto ferramenta-peça, contraindo, deste modo, tensões residuais devido à elevada temperatura

resultante da fricção. Além disso, é necessário ter em consideração o tipo de ferramenta que é utilizada para esse fim.

- Material da ferramenta, é um dos fatores importantes a ter em consideração. A maioria dos materiais que compõe as ferramentas não apresentam problemas com a corrosão, pois, normalmente são ferramentas de aços rápidos ou metal duro. As emulsões utilizadas não lhes provocam danos, visto que têm constituintes aditivos antioxidantes.

2.5. Qualidade Superficial das Peças

A qualidade superficial é um indicador da exatidão da maquinagem e a qualidade dimensional relaciona-se com o acabamento superficial de uma peça. Está interligada com a integridade superficial, rugosidade superficial e os parâmetros de rugosidade.

2.5.1. Integridade superficial

Ao produzir uma peça, é desejável que a mesma tenha a geometria e as dimensões descritas no projeto de fabrico. Contudo, a integridade superficial descreve a sua qualidade superficial, face ao acabamento e face as alterações subsuperficiais. No termino da maquinagem, a condição da peça transcreve o resultado de um processo que pode originar ruturas, deformações plásticas, tensões residuais, vibrações, geração de calor entre outros, Machado (2009). Quanto mais próximo estiver a integridade superficial de uma peça maquinada com a descrita no projeto, mais aproximado está o produto final do objetivo. O que não é nada mais do que se encontra perante a sua situação ideal.

As alterações que podem ocorrer em superfícies maquinados, são classificadas na figura 12.



Figura 12: Classificação da integridade superficial (Fonte: Machado, (2009), pp. 276)

2.5.2. Rugosidade superficial






Nas operações de acabamento, a rugosidade é um indicador à escala micrométrica que permite medir os resultados obtidos durante os processos de maquinagem. Todavia, pode-se afirmar que a rugosidade é um fator de extrema importância na caracterização do acabamento superficial, isto é devido à demonstração da precisão e à afinação que sustentam os processos de maquinagem para obter melhor desempenho.

Na maquinagem de uma peça, seja qual for o processo de corte por arranque de aparas, por mais cautelosos e controlados forem os métodos e meios associados aos processos de maquinagem, deixam sempre superfícies com um determinado grau de rugosidade. Isto impossibilita a obtenção de uma superfície absolutamente perfeita, que é devido às características típicas do processo de maquinagem. Estes tipos de irregularidades, que surgem na superfície, são devido, Cunha (2020):

- Às imperfeições associadas ao desgaste das ferramentas de corte;
- À geometria das ferramentas de corte;
- Ao modo de fixação da peça a maquinar;
- Aos parâmetros utilizados;
- Ao tipo de material da peça a maquinar.

A tabela 1 ilustra os tipos de defeitos que podem surgir durante o processo de maquinagem.

Tabela 1: Tipos de defeitos geométricos (Fonte: Davim (1995), pp. 195)

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	

A rugosidade é definida como um erro micro-geométrico na superfície de uma peça, caracterizada por ter pequenas saliências e reentrâncias, com espaçamentos que podem ser regulares ou irregulares entre si e que tendem a originar um padrão ou textura na superfície da peça, respetivamente. Contudo, essa rugosidade na superfície da peça não é verificável pelos instrumentos convencionais, mas pode ser mensurável pelos instrumentos eletrónicos como o rugosímetro, Colaco, et al., (2014).

No estudo do acabamento superficial, podem-se categorizar as superfícies como, Agostinho et al., (1977):

- Superfície real: caracterizada por ser uma superfície que limita a geometria do corpo e separa do meio ambiente;
- Superfície geométrica: caracterizada por ser aquela superfície ideal estabelecida num projeto, como se os erros de forma, micro ou macro-geométrico, não existam;
- Superfície efetiva: esta é obtida pelos instrumentos de leitura de rugosidade;
- Perfil real: relaciona-se com a interseção da superfície real e um plano perpendicular à superfície geométrica;
- Perfil geométrico: é o contorno da interseção da superfície geométrica por um plano definido em relação a esta superfície.

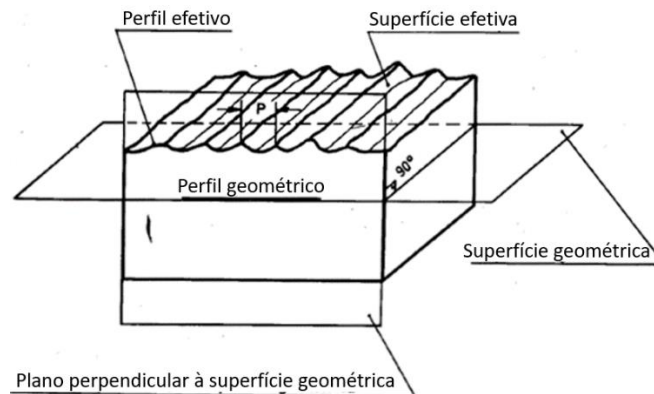


Figura 13: Grandezas de rugosidades (Fonte: Agostinho et al., (1977), pp. 196)

A peça maquinada atenta para dois tipos de análises, entre os quais está a análise dos desvios da superfície real e da superfície geométrica, segundo Agostinho, et al., (1977).

- Análise dos desvios da superfície real: isola os erros macro-geométricos, que se encontram numa escala maior e podem ser medidos com instrumentos convencionais;

- Análise dos desvios da superfície geométrica: regista os desvios de rugosidade ou micro-geométricos e tem como instrumento de medida o rugosímetro, figura 14. Genericamente, um rugosímetro é constituído por: a – um apalpador; b – uma unidade de acionamento; c – um amplificador; d – um registrador.

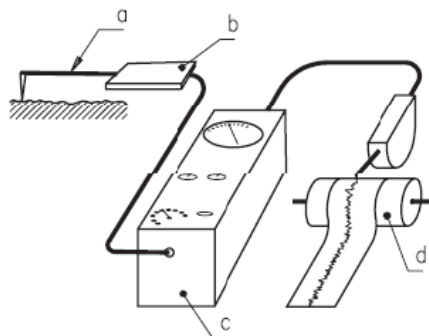


Figura 14: Esquema de um rugosímetro (Fonte: Tedesco (2007), pp. 31)

A ponta de diamante situada na extremidade do apalpador (a), acoplada à unidade de acionamento (b), ilustradas no rugosímetro da figura 14, percorre linearmente um comprimento definido a uma velocidade constante, recolhendo variações que definem o seu perfil superficial, Silva (2017). As saliências e reentrâncias existentes na peça, conduzem o apalpador a movimentos

verticais, figura 15 que são convertidos em sinal elétrico. Este sinal é amplificado, filtrado e armazenado num conjunto de pontos que, graficamente, constituem o perfil da rugosidade da superfície, que é bidimensional.

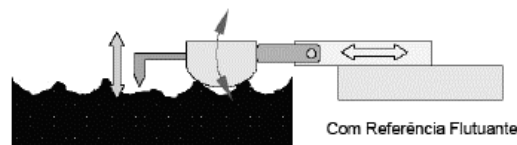


Figura 15: Apalpador mecânico (Fonte: Nicola (2008), pp. 36)

O perfil de uma superfície torna-se efetivo num comprimento l_m (figura 16), que é o comprimento total de avaliação, os comprimentos l_c são as subdivisões da amostra em secções (*cut-off*). A distância l_t faz referência ao comprimento que o apalpador percorre durante a leitura da rugosidade, mas deste só é considerado o comprimento l_m . A norma ISO 4287 define os termos e condições para a medição da rugosidade. A figura 16 ilustra a definição dos referidos termos num perfil irregular. Para o levantamento das leituras da rugosidade, a referida norma recomenda que devem ser feitas cinco medições da amostra e indicar o valor médio das leituras.

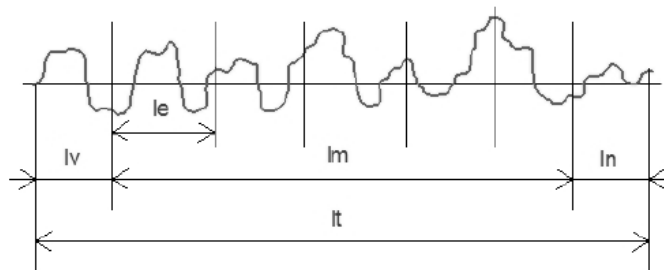


Figura 16: Definição dos comprimentos de avaliação da rugosidade e do Cut-off (Fonte: Nicola (2008))

A rugosidade de uma peça é afetada pela geometria da ferramenta e pelos parâmetros de corte. Além destas causas, as irregularidades da rugosidade podem ser devido:

- Às imperfeições impostas pela máquina-ferramenta;
- Ao modo de fabrico;
- Ao desgaste da ferramenta;
- Às vibrações causadas durante o processo;
- Uso, ou não, de fluido de corte: c/FC, s/FC, respetivamente.

De facto, a rugosidade superficial (doravante, designado apenas por “rugosidade”) depende também de outros fatores, como a máquina-ferramenta, as propriedades do material da peça, do material da ferramenta, entre outros já mencionados. Todavia, as peças podem, em boa parte das vezes, ser afetadas pela da rugosidade, que pode influenciar:

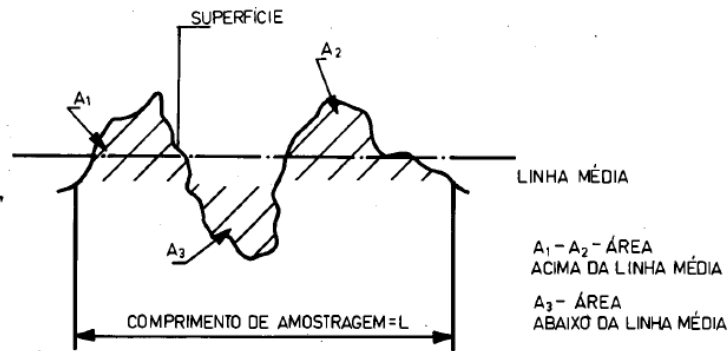
- Na resistência à fadiga;
- No desgaste;
- Na corrosão;
- No atrito entre superfícies.

2.5.3. Parâmetros de rugosidade

Os parâmetros de rugosidade são essencialmente utilizados para quantificar o estado do acabamento superficial das peças. Existem dois sistemas básicos de medição da rugosidade utilizados, Agostinho et al., (1977), que são:

- Sistema da envolvente E;
- Sistema da linha média M.

Em alguns países são utilizados os dois sistemas, mas a maioria dá mais importância ao sistema da linha média, ou sistema M. Nestes, entre os quais Portugal, todas as grandezas de medição da rugosidade são definidas pelo conceito da linha média M como ilustra a figura 17, Agostinho et al., (1977).



$$A_3 = A_1 + A_2$$

Figura 17: Linha média (Fonte: Agostinho et al., (1977), pp. 202)

Para avaliar o nível de acabamento da superfície, podem-se adotar os seguintes parâmetros, (Agostinho et al., 1977):

- Rugosidade média aritmética (R_a) – medida aritmética dos valores dos desvios absolutos do perfil efetivo relativamente à linha média do comprimento l_m , equação (3). Este valor, geralmente, pode ser expresso sem unidades, mas é realmente em μm , figura18.

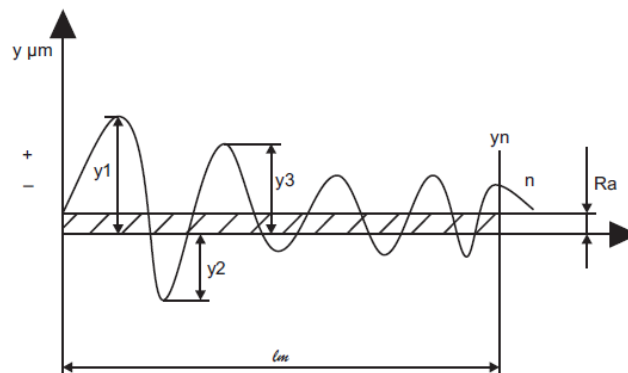


Figura 18: Rugosidade média aritmética R_a (Fonte: Neto (2012), pp. 91)

$$R_a = \frac{y_1 + y_2 + \dots + y_n}{n} \quad (3)$$

No conceito teórico de torneamento, a ferramenta deixa na superfície da peça um sulco derivado do ângulo da posição das arestas de corte, do valor de avanço e do raio r da ponta da ferramenta. A amplitude deste sulco configura-se na rugosidade média aritmética teórica (R_{ta}), que

pode ser estimada pela expressão (4) obtida por via geométrica. Atente-se que esta expressão não é muito fiável devido ao acabamento superficial que realmente depende de outros parâmetros, cuja influência faz parte dos objetivos desta dissertação.

$$R_{ta} = 0.032 \times \frac{f^2}{r} \quad (4)$$

- Rugosidade média quadrática (R_q) – define-se como a raiz quadrada das ordenadas segundo o perfil efetivo, relativamente à linha média do comprimento de uma amostra.

- Rugosidade das irregularidades das 10 saliências (R_z) – esta medida faz uma comparação da diferença entre o valor médio de 5 saliências e o valor médio de 5 pontos mais profundos, medidos a partir de uma linha paralela à linha média, figura 19.

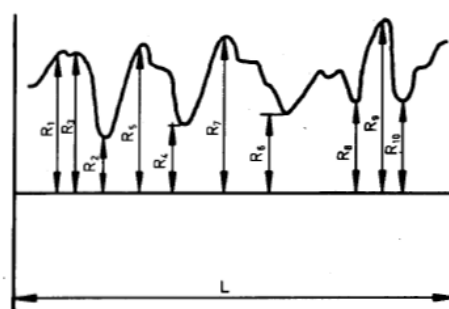


Figura 19: Rugosidade das irregularidades das 10 saliências R_z (Fonte: Agostinho et al., (1977), pp. 205)

- Rugosidade máxima (R_{max}) – caracterizada como sendo a distância máxima entre duas linhas paralelas à linha média e que são tangentes à saliência mais alta e à mais profunda, pois, esse valor é definido como o maior valor da rugosidade parcial e é expressa em μm , figura 20.

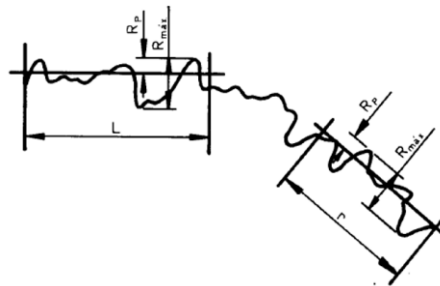


Figura 20: Altura máxima das irregularidades R_{max} (Fonte: Imagem adaptada de Agostinho et al., (1977), pp. 206)

- Rugosidade de profundidade média (R_p) – é definida pela altura entre a saliência mais elevada relativamente à linha média num dado comprimento da amostra, figura 21.

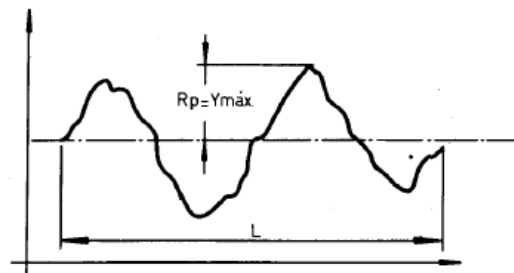


Figura 21: Rugosidade de profundidade média R_p (Fonte: Agostinho et al., (1977), pp. 206)

Rugosidade de altura total do perfil (R_t) – este parâmetro é caracterizado pelo valor médio resultante dos maiores picos e das maiores profundidades dos vales ao longo do comprimento da avaliação, figura 22.

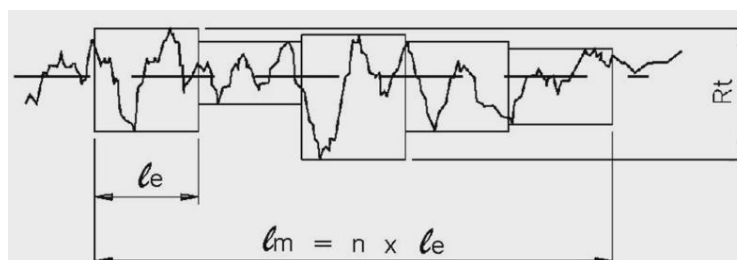


Figura 22: Parâmetro da rugosidade R_t (Fonte: Slideshare, (2012))

Dois acabamentos distintos podem ter a mesma rugosidade. Para a sua avaliação, foi introduzida a medição longitudinal das saliências, que ajuda na diferenciação das leituras por ser uma rugosidade que é usado para avaliar o tamanho horizontal das saliências em vez da medição das amplitudes das mesmas.

Rugosidade da largura média (RSm) – este é o parâmetro mais utilizado e representa a média dos elementos de perfil, para o comprimento de amostragem, figura 23.

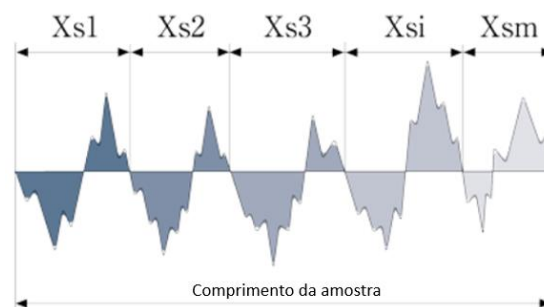


Figura 23: Parâmetro da rugosidade RSm (Fonte: Imagem adaptada de Evident (2019))

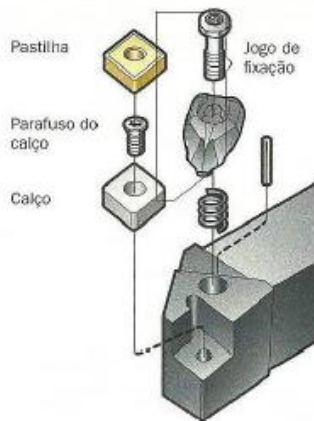
2.6. Principais Componentes Necessários ao Torneamento

No processo de fabrico por torneamento, as ferramentas de corte possuem um papel fundamental durante o procedimento de corte e na qualidade final das peças. Em geral, estas ferramentas são compostas por um suporte de aço onde é fixa uma pastilha, que pode facilmente ser substituída. O gume e as superfícies adjacentes da pastilha é que são responsáveis pelo corte e formação da aparta. A figura 24 exemplifica alguns sistemas de fixação da pastilha no suporte. A fixação por grampos na extremidade de suporte que, por sua vez, é fixo no porta-ferramentas do torno (também designado de torre).

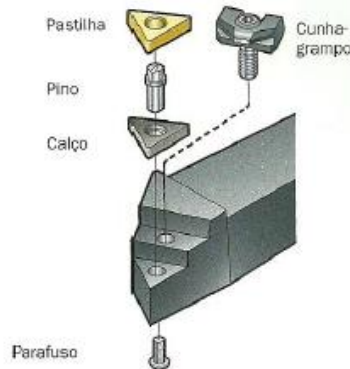
É fundamental referir que, para cada efeito desejado na peça, é necessário atender às características geométricas mais adequadas a cada operação de torneamento. Todavia, a seleção do tipo de geometria da pastilha, para além de ser apropriada ao tipo de operação de maquinagem, tem de assegurar a boa qualidade do acabamento da peça. Embora que, a qualidade de acabamento da peça passe por requerer uma ferramenta adequada, é de igual modo importante que a estabilidade da mesma, no porta-ferramenta, seja adequada ao fim exigido. Sendo assim, pode-se afirmar que a

seleção de uma pastilha está inteiramente ligada à relação entre a seleção do suporte e de sua fixação no porta-ferramentas relativo à direção do avanço, à geometria final da peça e às dimensões envolvidas nos cortes.

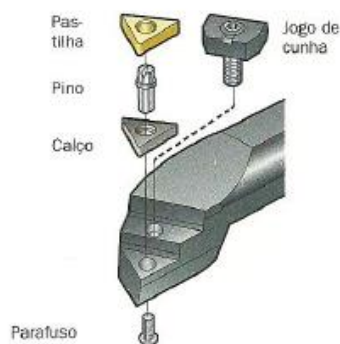
Desenho de fixação rígida (RC)



Desenho da cunha-grampo



Desenho de fixação por cunha



Desenho de fixação por alavanca

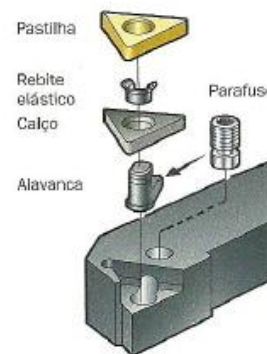
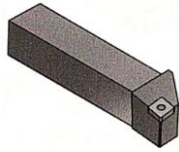
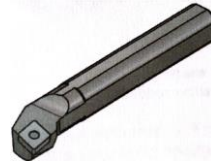


Figura 24: Exemplos de sistemas de fixação (Fonte: Batista, (2010), pp. 71)

No desbaste exterior, as ferramentas que apresentam um baixo ângulo de ataque suportam esforços maiores. Normalmente estas ferramentas são utilizadas para facejamento e torneamento cilíndrico, já que são as operações mais usuais, figura 25. Relativo ao desbaste interior, os suportes das ferramentas têm secção mais adaptada ao furo inicial sendo geralmente menos robustas. Estas ferramentas são utilizadas para o torneamento cilíndrico e facejamento internos, figura 26.



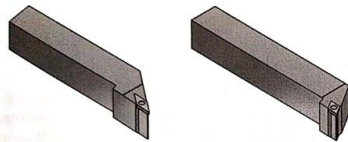
*Figura 25: Ferramenta de desbaste exterior,
(Fonte: Imagem adaptada de Rocha (2016),
pp. 34)*



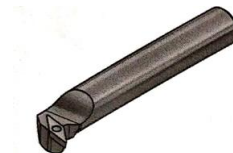
*Figura 26: Ferramenta de desbaste interior,
(Fonte: Imagem adaptada de Rocha (2016),
pp. 35)*

No caso do acabamento exterior, onde se requer alguma acessibilidade, as ferramentas possuem raio e ângulo de ponta menores do que as ferramentas de desbaste, figura 27, o que possibilita a maquinagem em zonas de maior pormenor e onde existem patamares de redução de diâmetro. Normalmente são utilizadas nas variedades do torneamento cilíndrico, para facejar e em filetes diversos.

Para o acabamento interior, figura 28, as características genéricas são as mesmas das ferramentas do desbaste, também interior, embora com uma versatilidade maior no acesso das zonas onde existem patamares de variação do diâmetro.



*Figura 27: Ferramentas de acabamento exterior
(Fonte: Imagem adaptada de Rocha (2016), pp. 35)*



*Figura 28: Ferramenta de acabamento interior
(Fonte: Imagem adaptada de Rocha (2016), pp. 35)*

As ferramentas com pastilhas ao centro, figura 29, são utilizadas para grande desbaste com maior produtividade, uma vez que suportam maiores esforços e permitem avanços nos dois sentidos. Podem também ser aplicadas em canais com faces laterais inclinadas, ranhuras ou em polias, por exemplo.

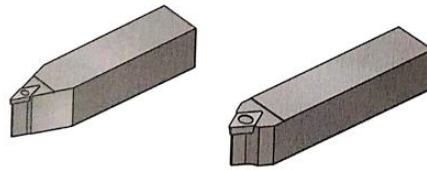


Figura 29: Ferramentas com pastilhas ao centro (Fonte: Imagem adaptada de Rocha (2016), pp. 36)

A ferramenta que têm como desígnio fazer o corte final na peça maquinada geralmente tem um formato estreito e comprido, figura 30. Esta operação é denominada de sangramento. O principal objetivo é cortar as peças, com a redução do diâmetro. Esta ferramenta tem esse formato com propósito de obter cortes estreitos e, como tal, é feita para suportar as forças envolvidas no corte e a redução no desperdício do material.

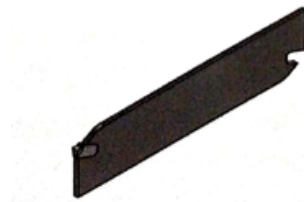


Figura 30: Lamina de sangrar (Fonte: Imagem adaptada de Rocha (2016), pp. 37)

2.7. Características Físicas dos Materiais das Pastilhas

As pastilhas (ou insertos) são as componentes de corte das ferramentas utilizadas em quase todas as operações de torneamento que envolve desbaste ou acabamento de um determinado material. Elas são fabricadas em diversos materiais, sem ou com revestimentos. Porém, as mais utilizadas são de metal duro, devido às suas capacidades físico-mecânicas (dureza e tenacidade à fratura). Com a sua otimização, conseguem garantir eficácia nos serviços de alta e elevada velocidade, segundo Fonseca et al., (2016). As geometrias são padronizadas, em diversas classes conforme os materiais a se destinam cortar e em condições diferentes de maquinagem, além de que, o custo de reposição é relativamente baixo.

No âmbito da procura da melhor opção de escolha da pastilha que se adequa a uma determinada operação, é necessário ter em conta o material que vai ser maquinado. A constituição

do material da peça a ser maquinada é muito importante na sua escolha, visto que, a ideia principal parte da necessidade de obter um bom acabamento superficial assim como elevada produtividade e maior vida da ferramenta. Como tal, a norma ISO 513:2012 classifica os metais duros em seis grupos de acordo com os diversos materiais a serem maquinados. Estes grupos são baseados numa letra: P, M, K, N, S, H (ou respetivas cores: azul, amarelo, verde, vermelho), que refere o material a que se destina a ferramenta, e por um número de 1 a 50 que se refere à ordem de dureza e tenacidade. Um resumo, retirado de um catálogo de uma marca de ferramentas é apresentado na figura 31.

Principais classes			Classes de aplicação			
Letra de identificação	Cor de identificação	Materiais a serem usinados	Metais duros		a	b
P	Azul	Aços: Todos os tipos de aços e aços fundidos, exceto aços inoxidáveis com estrutura austenítica	P01 P10 P20 P30 P40 P50	P05 P15 P25 P35 P45	↑	↓
M	Amarelo	Aço inoxidável: aço inoxidável austenítico e aço duplex (austenítico/ferrítico) e aço fundido	M01 M10 M20 M30 M40	M05 M15 M25 M35	↑	↓
K	Vermelho	Ferro fundido: Ferro fundido cinzento, ferro fundido com grafita esferoidal, ferro fundido maleável	K01 K10 K20 K30 K40	K05 K15 K25 K35	↑	↓
N	Verde	Metais não ferrosos: Alumínio e outros metais não ferrosos, materiais não metálicos	N01 N10 N20 N30	N05 N15 N25	↑	↓
S	Marrom	Superligas e titânio: Ligas especiais resistentes ao calor à base de ferro, níquel e cobalto, titânio e ligas de titânio	S01 S10 S20 S30	S05 S15 S25	↑	↓
H	Cinza	Materiais duros: Aços endurecidos, ferros fundidos endurecidos, ferros fundidos resfriados	H01 H10 H20 H30	H05 H15 H25	↑	↓

a – Aumento da velocidade de corte, aumento da resistência ao desgaste do material da ferramenta.
b – Aumento do avanço, aumento da tenacidade do material da ferramenta.

Figura 31: Extrato retirado dum catálogo / identificando as suas ferramentas de metal duro perante a norma ISO 513 (Fonte: Verginelli, (2015), pp. 24)

Pode-se reforçar a classificação das pastilhas de torneamento em função dos seguintes tópicos, SANDVIK (2018):

- Tipo de método a adotar (desbaste, maquinagem média, acabamento,);
- Condições de maquinagem (difícil, média, boa);
- Material da peça.

A geometria da pastilha pode ser considerada um dos parâmetros fundamentais a ter em conta na sua seleção. Dependendo da operação, a forma da pastilha vai ter influência na qualidade de desbaste ou de acabamento da peça, assim como a produtividade do processo, figura 32. Particularmente as suas características são:

- Comprimento do gume (L);
- Raio da ponta (r);
- Ângulo da ponta.

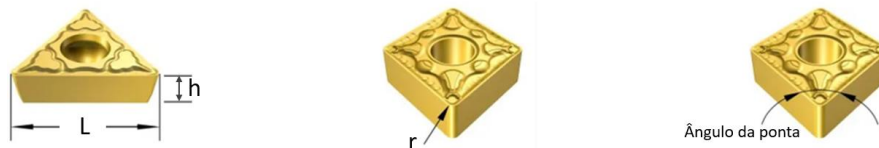


Figura 32: Principais características geométricos de uma pastilha (Fonte: Imagem adaptada de Sandvik (2018))

Note-se que, quanto menor for o ângulo da ponta da pastilha menor será o nível de vibrações e quando maior for o ângulo maior é a sua resistência ao de corte. A figura 33 exemplifica a relação entre o ângulo da ponta da pastilha e as características associadas.

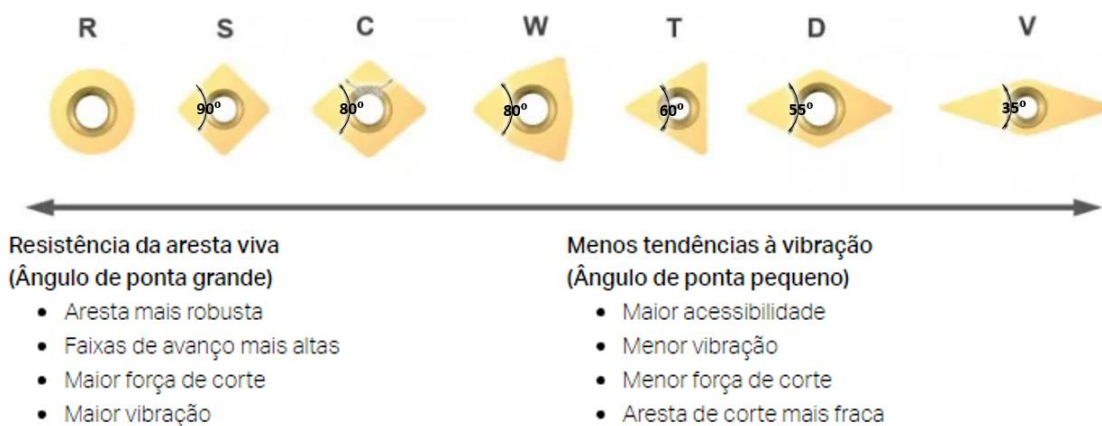


Figura 33: Ângulo da pastilha vs características (Fonte: Sandvik (2018))

As superfícies de ataque das pastilhas vêm adaptadas com quebra-aperas adequadas à operação e as orientações que pode adotar no corte.

A designação da pastilha é obtida pela norma ISO 1832 (por exemplo) com um conjunto de letras e números. Uma determinada pastilha, por exemplo *CNMG 120408* tem o seguinte significado para cada um dos caracteres: A letra “C” refere-se à forma da pastilha (com o ângulo a 80°) e ela depende da operação a executar, a letra “N” valor do ângulo de folga (0°), a letra “M” é a classe de tolerância (0.05 – 0.13 mm), a letra “G” é o modo de fixação e/ou superfície de saída; o número “12” é o comprimento do gume da pastilha (12 mm), o número “04” diz respeito a espessura da pastilha (4 mm) e o número “08” é o raio da ponta (0.8 mm). Para outros pormenores, basta consultar a norma ou quadro resumo, habitualmente disponíveis nos catálogos. A designação do suporte deve ser consultada na norma ISO 5608 (1980), para garantir uma boa adaptação e fixação da pastilha.

2.8. Torneamento CNC

O torno mecânico CNC é uma máquina-ferramenta que resultou da evolução do torno convencional, com a adição do controlo numérico por computador, CNC, e de componentes controlados para garantir precisão e repetibilidade no fabrico das peças. As operações de movimento de corte por arranque da apara são automáticas, descodificadas logicamente a partir dum código CNC, denominados os códigos G. Este tipo de sistema oferece alta precisão e fiabilidade do processo, conseguindo intercalar várias coordenadas de maneira a efetuar maquinagem de peças desde simples até complexas, além de rentabilizar o tempo e os recursos associados. A principal vantagem é a flexibilidade nas operações.

Um programa CNC é composto por diversas linhas de comando que contêm as instruções, denominadas de blocos, constituindo a sequência lógica das operações, Rocha (2016). Todas as instruções normalizadas, funções preparatórias e funções complementares são constituídas pelos códigos:

- G – inclui todas as funções preparatórias, que dão as características principais das operações, como exemplos trajetórias, ciclos automáticos, entre outros;

- M – é o conjunto das funções complementares, como por exemplos a definição sentido de rotação, do uso de fluido de corte, de fim de programa, entre outras funcionalidades.

2.9. O SSV

Um problema do torneamento é originado pela flexão rotativa da peça em rotação, que pode ser tanto maior importante quanto maior for a relação entre o seu comprimento (L) e o diâmetro (d). Este efeito atenua-se com um segundo apoio, o uso do ponto, ou em casos mais críticos com o recurso à luneta. Mas, estas soluções apresentam algumas dificuldades na sua utilização ou afetam o tempo de execução das peças.

O SSV (*Spindle Speed Variation*), traduzido por “variação da velocidade da árvore”, é um novo comando, que tem vindo a ser introduzido na maquinagem, especialmente no torneamento CNC. Este novo conceito vem contribuir para o melhoramento do acabamento superficial das peças, ao reduzindo as vibrações existentes durante o processo de torneamento. Consiste em acelerar e abrandar sistematicamente a velocidade de rotação da árvore, de modo a reduzir a amplitude das vibrações devido à flexão rotativa. Deste modo, esta nova tecnologia é refletido como uma revolução a forma de funcionamento do torneamento, conseguindo aproximar-se às características ideais do corte, com atenuação das possíveis oscilações causadas pelas vibrações e até evitar a possibilidade de chegar ao estado crítico de ressonância. Nesta última hipótese, pode dar origem a resultados catastróficos na superfície da peça ou provocar danos consideráveis na ferramenta.

Apesar de o SSV ser referido que tem a capacidade de eliminar as vibrações existentes no processo, é importante estudar até onde ou a partir de que ponto é eficaz o seu efeito. Durante o processo de torneamento, existem inúmeros fatores que podem causar esse fenómeno. O primeiro é a relação L/d, mas também as propriedades do material da peça, a estratégia de torneamento, ou outros. Na fase inicial do torneamento sem este conceito, o nível de oscilação pode ser baixo, mas com o tempo, figura 34, as oscilações da frequência vão aumentando de amplitude, o que pode alterar as condições de corte e pode refletir em consequências graves.

As figuras 34 e 35 resultam de experiências realizadas e fornecidas na website da HAAS com propósito de demonstrar a importância do SSV durante o torneamento, sendo o torneamento realizado

com uma velocidade de rotação constante de 1000 rpm sem SSV, figura 34. Contudo, após algum tempo de operação, a oscilação provocada durante o torneamento foi intensificando de valor. Em certos casos resulta num acabamento superficial desastroso. Porém, quando o SSV é acionado, figura 35, a oscilação reduz de amplitude. Isto, devido ao SSV que faz a compensação da velocidade de rotação, de forma a evitar esses efeitos indesejados durante o torneamento.

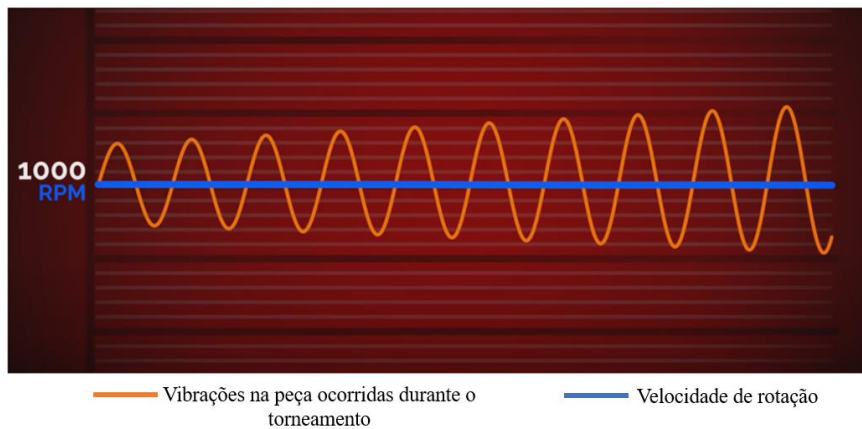


Figura 34: Nível das vibrações na peça sem SSV (Fonte: HAAS (2015))

Ao acionar o SSV, a velocidade de rotação aumenta e diminui num tempo curto, que pode ser predefinido no controlador da máquina. Desta forma, interfere com a frequência natural e é deste modo que diminui a hipótese de risco de ressonância. O limite de velocidade de rotação situa-se entre duas margens de cor verde, a figura 35 ilustra a interação da frequência pela aplicação do SSV.

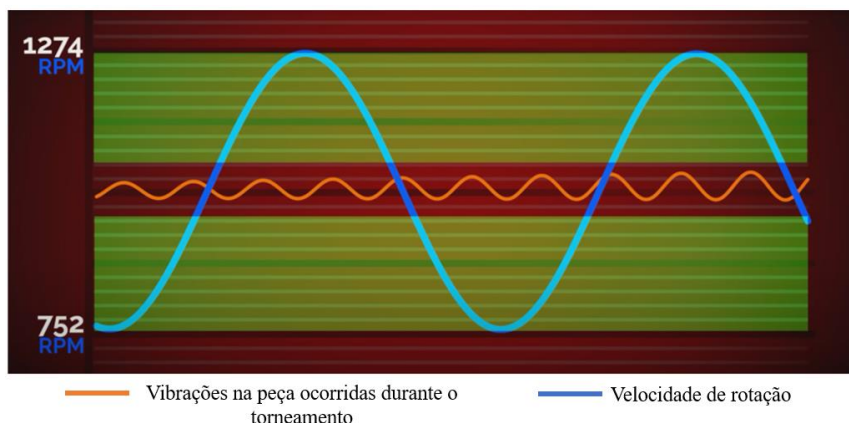


Figura 35: Nível das vibrações na peça com SSV (Fonte: HAAS (2015))

No exemplo da figura 36 comparam-se duas peças torneadas com uma dada relação L/d e com os mesmos parâmetros e condições de torneamento. A única diferença foi o uso, ou não, do SSV. O resultado dessa experiência é bem visível na qualidade de acabamento das peças.

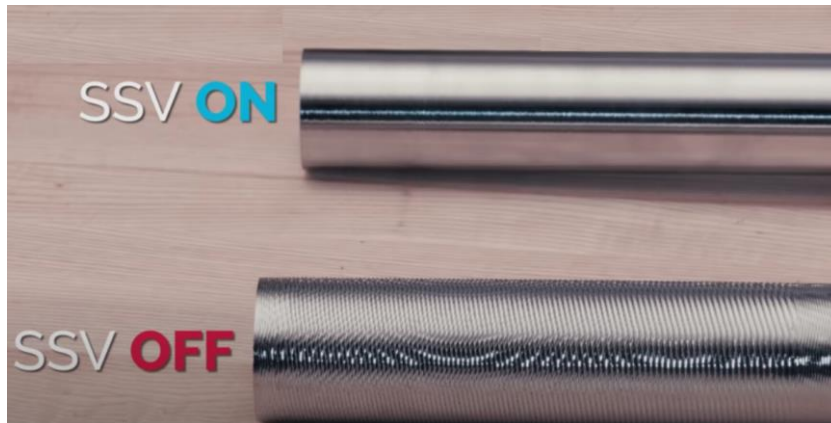


Figura 36: SSV on vs SSV off (Fonte: HAAS (2015))

2.10. Simulação no CAD/CAM

A expressão CAD vem da designação de projeto assistido por computador (*Computer-aided design*) e o CAM da produção assistida por computador (*Computer-aided manufacturing*). O objetivo primordial deve-se à utilização destes conceitos na máquina CNC, de forma a conseguir maximizar a produtividade com flexibilidade das operações. Contudo as aplicações desses conceitos passam por:

- Desenho, com otimização geométrica das peças;
- Uso de parâmetros e medidas das ferramentas;
- Simulação das operações com as estratégias adotadas;
- Após otimização e avaliação como ideal, pode-se criar automaticamente o programa CNC (e isto sem interferir com a máquina).

Com a flexibilidade, através da simulação no CAM, consegue-se estudar estratégias de maquinagem e analisar o melhor método de fabrico, permitindo fazer possíveis correções. Nesta

análise, pode-se avaliar a geometria final e o tempo de execução, entre outra informação que pode ser relevante. Após isso, pode-se disponibilizar do programa CNC.

2.11. Métodos Estatísticos

O capítulo que se segue, pretende resumir o essencial dos métodos estatísticos utilizados para a avaliação dos resultados obtidos dos respetivos ensaios. Para esses estudos é utilizada a análise da variância (ANOVA) e o teste de Tukey.

2.11.1. Análise da Variância (ANOVA)

A ANOVA é um acrónimo de “*analysis of variance*” que tem como intuito testar a distribuição de dois ou mais grupos de amostras independentes. No entanto, a primeira publicação de análise de variância foi efetuada em 1921, alguns anos após o estatístico britânico Ronald Aylmer Fisher ter apresentado pela primeira vez o termo variância, Labone (2021). O propósito do uso da ANOVA deu-se por causa da insuficiência do teste estatístico, na obtenção dos resultados propostos por esta dissertação. Assim, o motivo do recurso a este conceito, deve-se à existência de mais do que uma variável afetar simultaneamente os resultados.

O desígnio da ANOVA passa por realizar testes estatísticos para verificar se existem diferenças entre as médias dos grupos amostrais e determinar a variação desses dados que podem conter, na sua base, várias origens. A ANOVA, no fundo, permite comparar essas bases minimizando a probabilidade de erro amostral e, no final, referencia quais das bases são maiores, menores ou equivalentes. No seu estudo é fundamental apresentar a existência de valores que apresentam diferenças significativas ou, se existe, simplesmente uma variação das médias amostrais. Para tal, é necessário realizar testes de hipóteses, EJE (2019):

- H_0 (hipótese nula): as médias das amostras apresentam valores aproximados;
- H_1 (Hipótese alternativa): refere-se a pelo menos uma das médias das amostras ser diferente das demais.

Para a avaliação, o estudo deve partir da análise da variância, que pode ser verificada através do valor de *F-Value* (razão entre o modelo e o seu erro) ou pelo valor do *P-Value* (probabilidade que avalia a evidência contra a hipótese nula). Há vários softwares onde esta análise é feita através da seleção *One-way ANOVA* (ANOVA de um fator) com o intervalo de confiança de 95% ou $\alpha = 0,05$. A análise da variância é averiguada através do *P-Value*, com o valor de $\alpha = 0,05$ e, deste modo, conclui-se com a seguinte análise, Minitab (2018):

- Se $P\text{-Value} \leq \alpha$ as diferenças entre as médias são estatisticamente significativas, o que leva à rejeição do H_0 (hipótese nula). Isto é devido à existência de pelo menos uma média amostral diferente.
- Se $P\text{-Value} > \alpha$ as diferenças entre as médias não são estatisticamente significativas. Isto é devido à não existência de provas suficientes para rejeitar o H_0 , pois as médias amostrais são próximas entre si.

O relatório de um estudo ANOVA resume-se num quadro do tipo da figura 37, que exemplifica bem como é estruturada a análise dos dados amostrais.

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Caso de estudo	2	2162222	1081111	74,85	0,000
Error	6	86667	14444		
Total	8	2248889			

Figura 37: Exemplo de um relatório da análise de variância (Fonte: Minitab)

Onde:

- DF – Graus de liberdade (são dois DF porque tem três casos de estudo “ $DF = n-1$ ”);
- Adj SS – Soma dos quadrados;
- Adj MS – Soma da média dos quadrados.

No exemplo descrito, o valor de *P-Value* é inferior ao intervalo de confiança, então com os dados amostrais “*caso de estudo*” são estatisticamente significativas para o estudo.

2.11.2. Teste de Tukey

Para comparar as médias dos grupos é necessário utilizar outra ferramenta de análise que averigüe qual dos grupos difere mais dos demais. Os testes: de Scheffé, de Duncan, de Tukey, estão entre os mais conhecidos.

O teste de Tukey é um teste estatístico de diferenças de médias desenvolvido por John Wilder Tukey. Este matemático, em 1949 apresentou um artigo intitulado “*Comparing Individual Means in the Analysis of Variance*” cujo significado é a comparação das médias individuais na análise de variância, onde constava o seu próprio teste, Oper (2019). Este teste estatístico, apesar de ser de fácil aplicação na comparação de médias, é também um teste bastante rigoroso. Por sua vez, este teste reconcilia-se bem com as análises aos valores de P-Value e F-Value da ANOVA.

No teste de Tukey é utilizado um intervalo de confiança (IC) de 95% (ou seja, $\alpha = 0,05$), para as análises comparativas em simultâneo. E pode ser analisada com base no valor da “diferença mínima significativa” e no de P-Value. Contudo, na análise comparativa dos dados, perante o IC estabelecido, a diferença entre as médias amostrais, que não incluem o zero na sua variação comparativa, indica que essa comparação é estatisticamente significativa para o estudo em causa. Caso uma diferença, entre médias amostrais, tiver variação nula, significa que esse estudo não é estatisticamente significativo. O relatório do teste de Tukey resume o essencial num quadro que agrupa os dados amostrais em pares de comparações, de forma a identificar quais das médias amostrais pertencem a grupos semelhantes. E caracteristicamente, o teste de Tukey utiliza letras para qualificar e identificar os casos. A figura 38 exemplifica a natureza das análises feitas no teste de Tukey.

Tukey Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Caso de estudo	N	Mean	Grouping
2	3	2000,0	A
1	3	1433,3	B
3	3	800,0	C

Means that do not share a letter are significantly different.

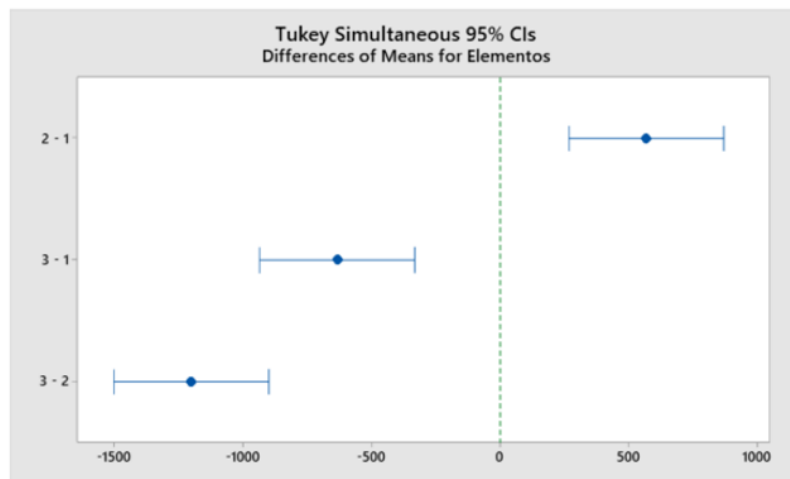


Figura 38: Exemplo do resultado de um teste de Tukey feito no Minitab, pares de comparações

O relatório apresentado divide-se em duas partes: um quadro de resultados e um gráfico. O quadro apresenta as médias das amostras dos casos 1, 2 e 3 e, ambos os casos não contêm zero nos intervalos, logo não partilham da mesma letra e são estatisticamente significativos para o estudo. Todavia, através deste gráfico, conclui-se que, como nenhum dos pares de comparação interceta no zero, a comparação significativamente maior está compreendido entre os casos 3 e 2 com 1200 unidades.

3. Trabalho Experimental e de Simulação

A realização do trabalho experimental e das medições das rugosidades tiveram lugar nas instalações do DEMGI da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu, com a produção das amostras, para diferentes acabamentos, maquinadas no torno CNC.

No trabalho experimental realizado por torneamento, foram utilizados dois materiais distintos para produzir as amostras usadas na avaliação da rugosidade superficial. As amostras eram constituídas a partir de dois materiais comumente trabalhados por corte por arranque de apra, um aço e um alumínio. Foram estabelecidas as premissas do estudo em função da influência que têm no acabamento. Para esses estudos, foram utilizadas duas pastilhas com características diferentes e os respetivos parâmetros de corte. Os principais objetivos são de qualificar e quantificar quais são os parâmetros que influenciam o acabamento superficial das peças, com máxima eficácia, em função das características da peça e da geometria do produto final. O principal objetivo da realização dos ensaios experimentais era avaliar a importância que têm, de forma a obter melhores resultados da rugosidade. E, também, verificar se a presença do FC e o SSV são significativos para o acabamento das peças.

O trabalho de simulação por CAD/CAM tinha, à priori, dois objetivos: experimentar o software *MasterCAM* e estudar as estratégias de torneamento disponíveis. Para este objetivo de estudo, compararam-se os tempos de maquinagem, numa mesma geometria da peça, para concluir qual das estratégias usadas permite obter melhor maquinagem.

3.1. Material e Equipamentos

Cada peça (ou amostra) era constituída por 4 ou 5 troços (provetes) maquinadas em condições diferentes. Os troços foram desenhados com comprimentos iguais a 10 mm e o mesmo diâmetro, por torneamento CNC a partir de varão do aço *EN 11SMn28* (ou *AISI 1213*) com \varnothing 30 mm. Para um penetramento constante de 0.5 mm, o diâmetro final das peças era de 29 mm. O comprimento amostral de referência foi de 61 mm, mas também foram usadas 90, 120 e 200 mm. O outro material

de comparação, foi a liga de alumínio *EN AW 6082* com iguais dimensões. As tabelas 2 e 3, apresentam as composições químicas de cada um dos materiais de estudo.

Tabela 2: Composição química do aço *EN 11SMn28* (Fonte: Favorit, (n.d.))

Composição Química %	
C	Máx. 0,14
Si	Máx. 0,05
Mn	0,90 - 1,30
P	Máx. 0,11
S	0,27 - 0,33
Fe	Restante

Tabela 3: Composição química do alumínio *EN AW 6082* (Fonte: Lanema (2019))

Composição Química %	
Si	0,7 - 1,3
Fe	Máx. 0,5
Cu	Máx. 0,1
Mn	0,4 - 1
Mg	0,6 - 1,2
Cr	Máx. 0,25
Zn	Máx. 0,2
Ti	Máx. 0,1
Al	Restante

O aço *EN 11SMn28*, tendo como características mecânicas o valor do módulo de elasticidade de 210 GPa, as tensões de cedência e última de 214 MPa e 378 MPa respetivamente, o coeficiente de poisson de 0.33. Todavia, é um aço ao carbono com a presença de alto teor de enxofre que proporciona uma boa maquinabilidade para processos de torneamento CNC. Este aço tem como principais aplicações:

- Produção em série de peças fabricadas por torneamento;
- Componentes para automóveis e elementos de ligação;
- Parafusos e porcas.

O alumínio *EN AW 6082* é uma liga de média resistência mecânica, mas de alta resistência à corrosão, com o módulo de elasticidade de 69 GPa, o coeficiente de poisson de 0.33, a tensão de cedência de 270 MPa e a tensão última de 330 MPa. Esta liga é de boa maquinabilidade assim como do polimento, e tem como principais aplicações:

- Indústria de construção naval;
- Elementos de máquinas;
- Indústria elétrica;
- Peças de alta precisão.

Na refrigeração e lubrificação, durante o processo de torneamento, utilizou-se como FC uma emulsão de corte, constituído por 95% de água e 5% de óleo Hysol SL 36XBB. O óleo Castrol Hysol SL 36XBB é um fluído semi-sintético dedicado para maquinagem de alto desempenho, por conter na sua constituição, com aditivos que ajudam a melhorar o desempenho durante a maquinagem e o acabamento superficial, sem conter cloro na sua composição.

Como ferramentas, foram utilizadas duas pastilhas, P1 e P2, constituídas de materiais diferentes, mas de forma quase idêntica figura 39. As designações e referencias normalizadas são:

- P1 - DNMG150608 HU7305, sem revestimento da marca Garant (comercializado pela Hoffmann);
- P2 - DNMG156008 UGYG801, com revestimento da marca YG.

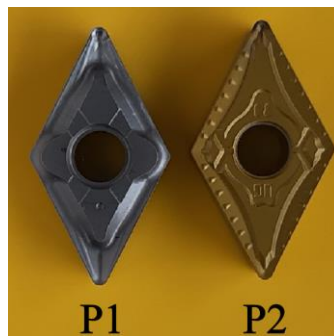


Figura 39: Pastilhas P1 e P2

As maquinagens das amostras de aço AISI 1213 foram iniciadas com P1. Era a pastilha que a HAAS forneceu nas demonstrações de torneamento dos aços. Quando foi verificada a sua referência normalizada e no catálogo, constatou-se que era otimizada para maquinar alumínio e outros metais não ferrosos, embora aparentasse boas capacidades de corte em aço macio. Esta observação, conduziu à necessidade da aquisição da ferramenta P2, por ser a mais adequada para a maquinagem do aço usado. Em suma, a P1 é apropriada para o torneamento de alumínio e outros metais não ferrosos, enquanto a P2 que é uma pastilha “P20” revestida, é indicada para os aços ao carbono com baixa velocidade de corte.

Os valores de referência fornecidos pelos fabricantes de ambas as pastilhas encontram-se descritas nas tabelas 4 e 5.

Tabela 4: Valores de referência do fabricante para P1 (Fonte: Hoffmann (n.d.))

Valores de referência do fabricante	
Velocidade de corte (v_c)	400 - 600 (m/min)
Penetração (p)	0,5 - 5 (mm)
Avanço (f)	0,1 - 0,6 (mm/rot)

Tabela 5: Valores de referência do fabricante para P2 (Fonte: YG-1 (2018))

Valores de referência do fabricante	
Velocidade de corte (v_c)	70 - 180 (m/min)
Penetração (p)	0,5 - 5 (mm)
Avanço (f)	0,05 - 0,2 (mm/rot)

Na produção das amostras foi utilizado um torno CNC, *HAAS TL1*, mostrada na figura 40. Este tipo de máquina-ferramenta é caracterizado pela grande capacidade de remoção de material e por possuírem elevada precisão e repetibilidade nas operações de corte.



Figura 40: Torno CNC HAAS Automation

O torno CNC é constituído pelos seguintes componentes, figura 41 e 42, cuja legenda:

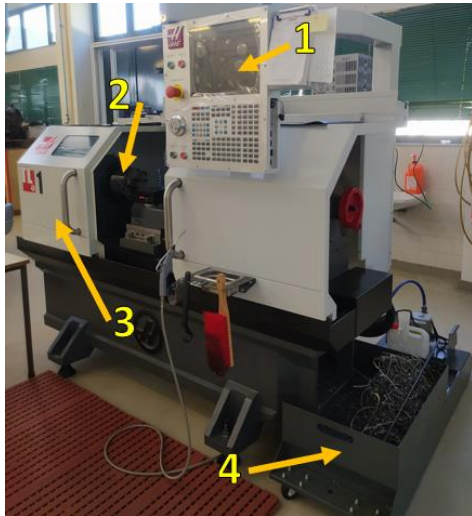


Figura 41: Torno CNC da HAAS, vista externa

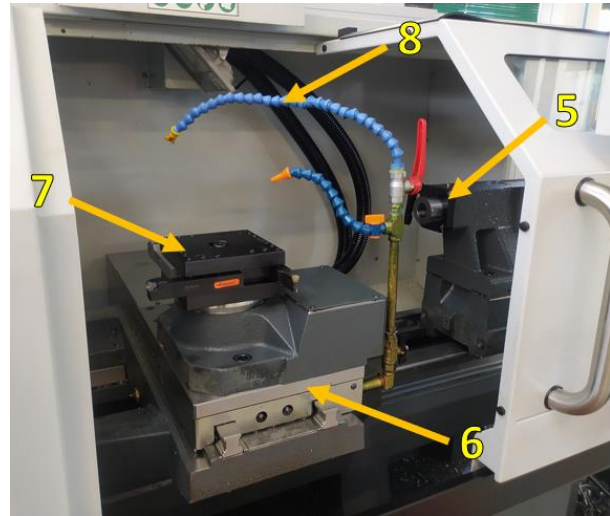


Figura 42: Torno CNC da HAAS, vista interna

é a seguinte:

- | | |
|-------------------------------------|--|
| 1 – Controlador; | 5 – Cabeçote móvel com Contra-ponto; |
| 2 – Bucha de três grampos; | 6 – Carro principal e carro transversal; |
| 3 – Porta de segurança com viseira; | 7 – Porta-ferramentas; |
| 4 – Contentor das aparas; | 8 – Mangueira do fluido de corte. |

Após ter concluído as etapas de torneamento nas peças, as mesmas são seccionadas ao comprimento efetivo de torneamento no torno CNC com a operação de sangramento.

Para finalizar, a etapa seguinte foi medir a rugosidade e, para tal, foi utilizado o rugosímetro da marca HOMMEL Tester T1000 com as seguintes legendas, A- Apalpador; B- Unidade de acionamento; C- Amplificador; D- Impressora; E- Torre, figura 44.

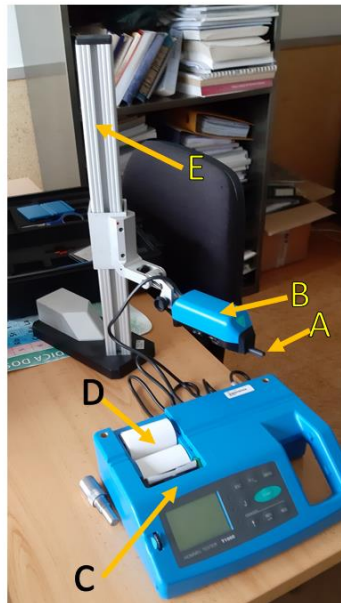


Figura 43: Rugosímetro Hommel Tester T1000

3.2. Métodos Experimentais

O principal objetivo desta investigação é a análise da influência dos parâmetros de corte no acabamento obtido. Assim, as gamas de parâmetros de corte adotados no torneamento do aço AISI 1213, foram baseados na informação disponibilizada no catálogo de ferramentas. A aplicação das equações (1) e (2), gerou os restantes parâmetros que são apresentados na tabela 6:

Tabela 6: Parâmetros de Corte

v_c (m/min)	n (rpm)	f (mm/rot)	f_v (mm/rev)	p (mm)
93	1000	0,1	100	0,5
130	1400	0,2	280	0,5
167	1800	0,4	720	0,5

De modo, a avaliar o comportamento da peça, como sendo encastrada (na bucha) sujeita a flexão rotativa e das possíveis vibrações, foram usadas várias relações d/L , em que L é a distância da ponta ao encastramento, figura 44. Inicialmente foram estabelecidas as dimensões das peças de aço e alumínio com comprimento $L = 61$ mm. Outras dimensões usadas para o comprimento (L) foram 90, 120 e 200 mm. Nos estudos com o aço, foram usados todos os valores, enquanto que no alumínio só foi usado o valor mínimo de (L) igual a 61 mm. O comprimento total das peças (L) engloba o comprimento efetivo de maquinagem (L_1) mas o comprimento de encastramento (L_2) até

à bucha, equação 4. Os valores dos diâmetros originais das peças (peças em bruto), foram de 30 mm, figura 44 e 45.

$$L = L_1 + L_2 \quad (5)$$

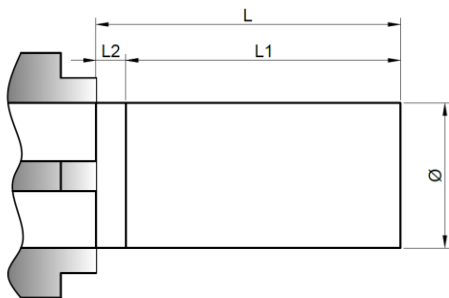


Figura 44: Esquema ilustrativo do comprimento efetivo e de segurança de uma peça

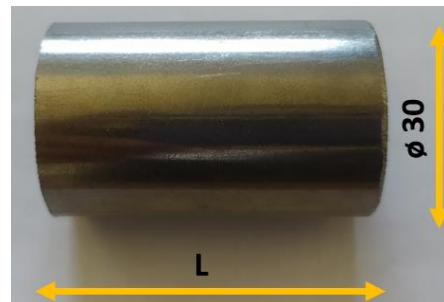


Figura 45: Provete inicial, cilíndrico de aço seccionado

O primeiro programa CNC para torneamento destas amostras, foi criado no *shape creator* do controlador *HAAS*, cuja listagem se encontra no apêndice I.

Com as ferramentas colocadas na porta-ferramenta e definidas no controlador, após fixação da peça na bucha do torno, seguia-se a definição do “zero” do sistema de coordenadas da peça e inicia-se a maquinagem com o código CNC. O primeiro estudo consistiu em avaliar a influência da velocidade de rotação no acabamento do material que foi maquinado, tendo-se fixado os valores de velocidade de rotação de 1000, 1400 e 1800 rpm. Após isso passou-se ao estudo da sua influência no acabamento superficial. Para que fosse efetuado o segundo estudo, o da variação da influência do avanço no acabamento, foi elaborado um novo programa CNC (encontra-se em apêndice II) para torner as amostras, com troços para cada valor de avanço, figura 46. Cada troço de 10 mm de comprimento foi maquinado com valores de avanço diferente, figura 47. É de realçar que o valor do comprimento efetivo de maquinagem (L_1) é constituído pelo somatório de cada troço de 10 mm mais intervalos de 2 mm.

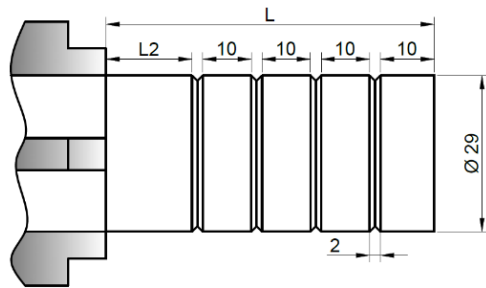


Figura 46: Desenho do provete com os troços de estudo.

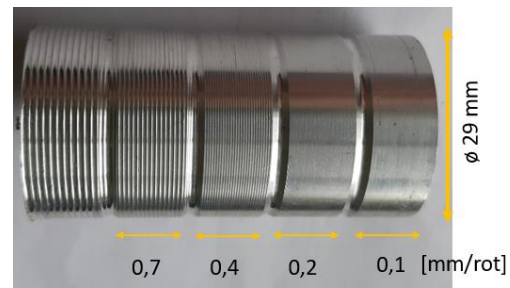


Figura 47: Influência dos valores dos avanços nos troços de uma amostra

Os valores de avanço utilizados nos ensaios variam entre 0.1 e 0.7 mm/rot respetivamente, ilustrados na sequência dos troços da peça da figura 47. No entanto, o último troço, relativo ao maior valor de rugosidade, foi eliminado em estudos subsequentes, já que o valor da rugosidade não era mensurado. Tinham sido feitas diversas tentativas para a sua medição, mas não foi possível devido ao elevado valor da rugosidade ser demasiada na escala do rugosímetro.

Outro estudo foi o da influência do FC no acabamento das amostras maquinadas com P1, mesmo sabendo que esta não era a mais indicada para maquinar aços. O estudo continuou com P2, que era indicada como adequada para o aço que estava a ser maquinado. Deste modo, a P2 passou a ser utilizada nos restantes ensaios.

Numa outra análise, a da influência da função de controlo SSV, que se trata da inovação da redução de vibrações descrita na figura 34. Com este controlo da velocidade de rotação, que foi configurado através da variação da velocidade $\Delta n = 100$ rpm a cada $\Delta t = 0.2$ s, cujo objetivo é reduzir as amplitudes das vibrações e, com isso, obter um melhor acabamento superficial das peças. O estudo compreende em aplicar a função de controlo quando as peças apresentam uma relação elevada entre o seu comprimento e o diâmetro (L/d). Efetivamente, é mais um fator a ter em conta no acabamento final da peça. E, como tal, requer uma atenção especial, para que após o torneamento possa ter o acabamento desejado. Assim, há melhor produtividade do processo devido à possibilidade de toronar muitos casos de peças onde seria necessário usar um ponto de apoio.

É esperado que o efeito do SSV é tanto mais eficaz quanto maior for o valor do comprimento das amostras, já que o diâmetro é sempre igual. A figura 48, apresenta as amostras obtidas para os comprimentos maiores de 120 e 200 mm face ao comando do SSV e do FC. O comprimento de

segurança L_2 existe em todos para que, pelo menos, permitir que o sangramento seja efetuado após o último troço maquinado, em segurança.

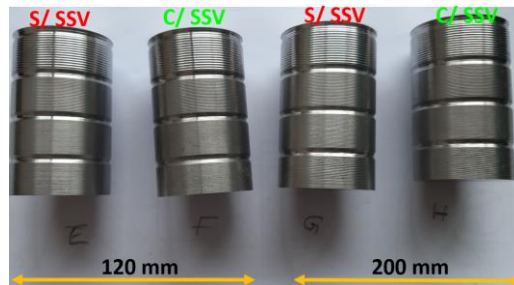


Figura 48: Amostras de aço AISI 1213 resultado dos casos de $L = L_1$, com e sem SSV

Após o procedimento da execução de cada amostra, foram efetuadas as medições das rugosidades. Estas medições das rugosidades foram efetuadas com o rugosímetro HOMMEL Tester T1000 em três segmentos, afastadas de 120° , com localizações angulares de 0° , 120° e 210° aproximadamente, como representa a figura 49. O mesmo procedimento foi efetuado para todos os troços de todos os provetes. Assim os resultados das rugosidades provêm de três leituras para cada troço apesar de que, perante a norma ISO, seriam requeridos cinco por troço. Como os resultados das medições das rugosidades em cada troço tinham um baixo desvio padrão, decidiu-se fazer apenas 3 medições, utilizando-se a média, sem perda significativa de precisão. Além disto, as medições da rugosidade baseiam-se na norma DIN 4768.

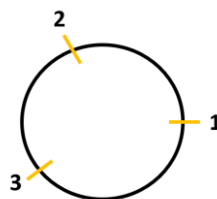


Figura 49: Três posições de medição da rugosidade em cada troço das amostras

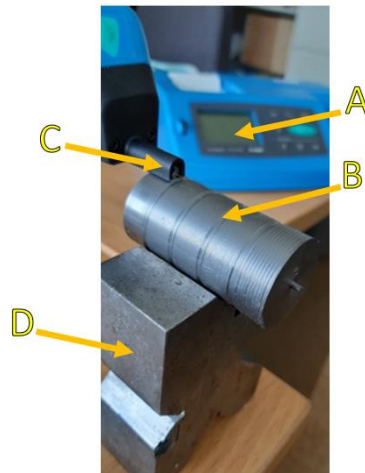


Figura 50: Medição das rugosidades com o HOMMEL Tester T1000

Com a respetiva legenda: A – mostrador do rugosímetro; B – espécime; C – haste com palpador; D – uso dum cavedal como suporte.

Devido ao número elevado de resultados dos estudos efetuados, são os resultados resumidos nos quadros que se encontram no capítulo 4 e nos apêndices A a F.

3.3. Simulação de uma Peça por CAD/CAM

As simulações das estratégias de torneamento têm como propósito fazer um estudo da produtividade com a utilização de um software de CAD/CAM. O Mastercam 2021 foi o software adotado para fazer esse estudo e obter conclusões. Após dispor do desenho da peça, a primeira etapa consistia em fixar a peça em bruto na bucha virtual, considerando a origem das coordenadas e as suas dimensões. As estratégias de desbaste utilizadas no software foram: - torneamento por desbaste frontal; - torneamento por desbaste longitudinal; - torneamento por contorno. Cada estratégia de desbaste esteve associada a duas operações adicionais, o facejamento e o acabamento, figura 51.

Visto que o propósito do estudo era simular o fabrico de uma peça e comparar qual seria o método que ia eficazmente de encontro aos objetivos estabelecidos. Para tal, na situação real de fabrico, a peça passaria inicialmente pelo facejamento com uma única passagem, seguida da operação de desbaste para obter o formato geométrico aproximado da peça final e, para concluir, fazer a operação de acabamento. Na operação de acabamento a ferramenta percorre a superfície da peça numa única vez e, assim, ela toma o formato da peça de revolução com as dimensões exatas do produto final.

Ao finalizar a simulação do torneamento da peça em cada estratégia, era analisada pormenorizadamente da existência de alguma falha e era feita uma avaliação em termos de produtividade, comparando os tempos de execução.



Figura 51: Ordem das operações de torneamento

4. Análise e Discussão dos Resultados Obtidos

O presente capítulo visa apresentar os resultados experimentais obtidos pelo tratamento estatístico e obter informações relevantes aos objetivos propostos que permitem tirar conclusões.

O estudo da qualidade do acabamento está dividido nos seguintes tópicos:

- $Ra_{Aço} = f(n; FC)$, utilizando a P1;
- $Ra_{Aço} = f(f; FC)$ utilizando a P1;
- $Ra_{Aço} = f(f; FC)$ utilizando a P2 e c/SSV ;
- $Ra_{Aço} = f(f; SSV; L)$ utilizando a P1;
- $Ra_{Aço} = f(f; SSV; L)$ utilizando a P2;
- $Ra_{Aço} = f(f; P1 \text{ e } P2)$;
- $Ra_{Al} = f(f; P1 \text{ e } P2)$.

Os resultados por serem muitos, optou-se pela apresentação dos que são mais significativas para o estudo e os restantes foram colocados em apêndices. Assim, o estudo incide nos resultados de Ra , sendo apresentados também alguns de RSm , apesar de haver valores de rugosidade de Rt e Rz .

Numa primeira análise de resultados usou-se o Excel como software tradicional para organizar resultados e obter gráficos. Da sua análise, permitiu dar uma ideia como cada variável, isoladamente, influencia o acabamento superficial. Por exemplo, o avanço, desempenha uma função importante no acabamento superficial, teoricamente seria o parâmetro que mais influência teria na rugosidade, como seria esperado da equação (4). No entanto, a velocidade de corte (aqui usada a velocidade de rotação “n” devido ao “d” ser igual em todos os casos) também desempenharia um papel importante no acabamento superficial das peças. Contudo, como era espectável, nenhum parâmetro de corte consegue atuar isoladamente. Os resultados das leituras da rugosidade são analisados pela ANOVA e verificados com o teste de Tukey, através do software estatístico Minitab. O intuito do estudo era de confrontar estatisticamente os resultados, com o propósito de obter melhores conclusões relativas às influências no acabamento das peças.

4.1. Influência dos Parâmetros de Corte e do Fluido de Corte no Acabamento Superficial do Aço

No subcapítulo que se segue, apresentam-se os resultados obtidos e analisam-se os efeitos dos parâmetros, primeiro isoladamente, quer para a velocidade de corte quer para o avanço e suas influências na rugosidade. O intuito deste estudo é verificar se, efetivamente, algum parâmetro pode ser considerado a atuar predominantemente para obter bom acabamento e, caso não seja, identificar como atuam conjuntamente.

4.1.1. Estudo de como cada parâmetro atua isoladamente na rugosidade

Um acabamento superficial de qualidade de uma peça maquinada está intrinsecamente ligado aos parâmetros de corte, com o objetivo desejado de obter baixa rugosidade. Para tal, foram estabelecidos os valores da velocidade de corte e avanço, mantendo o penetramento. A rugosidade aritmética (R_a) é o valor de eleição para verificar o nível de acabamento de cada peça, tendo por referência os parâmetros pré-estabelecidos que foram apresentados na tabela 6.

O primeiro parâmetro de torneamento a ser analisado, foi a velocidade de corte (v_c), através dos valores de velocidade de rotação (n) que são equivalentes, como já foi referido. O estudo da influência da velocidade de corte na rugosidade tem como propósito verificar qual permite obter a menor rugosidade. Na tabela 7 encontram-se os valores das leituras das rugosidades com e sem FC.

Tabela 7: Resultados da rugosidade em função da velocidade de rotação, com o avanço de 0.1 mm/rot para $L = 61$ mm

Pastilha P1				R_a (μm)				R_{Sm} (mm)			
Ensaio	n (rpm)	f (mm/rot)	FC	E1	E2	E3	R_a Médio	E1	E2	E3	R_{Sm} Médio
1	1000	0,1	s/ FC	1,789	1,712	1,864	1,788	0,079	0,075	0,1	0,085
2	1400	0,1		2,084	1,997	2,213	2,098	0,094	0,101	0,102	0,099
3	1800	0,1		1,44	1,552	1,558	1,517	0,099	0,106	0,108	0,104
4	1000	0,1	c/ FC	2,053	2,172	2,388	2,204	0,083	0,101	0,093	0,092
5	1400	0,1		1,285	1,309	1,375	1,323	0,073	0,074	0,071	0,073
6	1800	0,1		1,733	1,818	1,648	1,733	0,128	0,103	0,115	0,115

Estes resultados de rugosidade média resultantes do torneamento com a variação da velocidade de rotação e s/FC, estão dispostos no gráfico da figura 52. Verifica-se que há uma rugosidade significativamente menor na velocidade de rotação de 1800 rpm, com a utilização da P1.

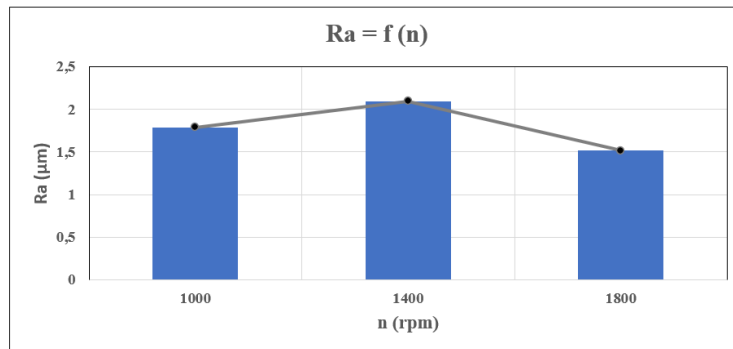


Figura 52: Rugosidade aritmética em função da velocidade de rotação

Uma vez que só há formação da aparta com a atuação simultânea dos três parâmetros de corte, é espectável que a rugosidade da peça dependa deles. Então é necessário analisar os resultados dos valores da rugosidade provenientes da influência desses parâmetros. Deste modo o avanço desempenha um papel fundamental na obtenção de um bom acabamento juntamente com a velocidade de rotação.

Ao variar apenas os valores de avanço, os novos valores da rugosidade obtidos são apresentados na tabela 8:

Tabela 8: Resultados da rugosidade em função dos valores de avanço para $L = 61 \text{ mm}$

Pastilha P1				Ra (µm)				RSm (mm)			
Ensaio	f (mm/rot)	n (rpm)	FC	E1	E2	E3	Ra Médio	E1	E2	E3	RSm Médio
7	0,1	1400	s/FC	1,456	1,619	1,512	1,529	0,065	0,072	0,068	0,068
8	0,2	1400		1,775	1,811	1,76	1,782	0,143	0,155	0,121	0,140
9	0,4	1400		5,22	5,145	5,334	5,233	0,389	0,378	0,388	0,385
10	0,1	1400	c/FC	1,285	1,309	1,375	1,323	0,073	0,074	0,071	0,073
11	0,2	1400		1,708	1,743	1,762	1,738	0,128	0,126	0,121	0,125
12	0,4	1400		4,828	4,969	4,91	4,902	0,353	0,389	0,389	0,377

Com a diminuição dos valores do avanço s/FC e utilizando P1, obtém-se um decréscimo da rugosidade figura 53.

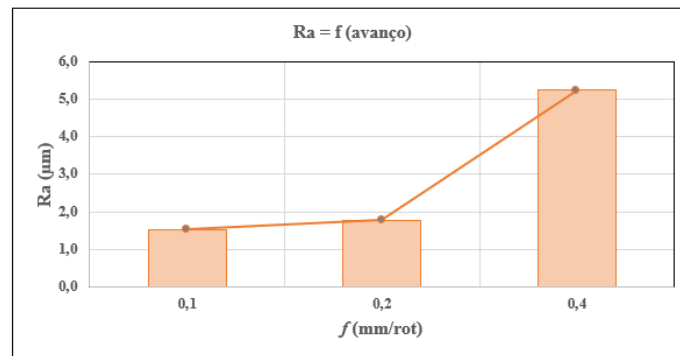


Figura 53: Rugosidade aritmética em função do avanço

Para obter os resultados da rugosidade com valores diferentes da velocidade de rotação da tabela 7 considerou-se o avanço constante de 0,1 mm/rot e, para os valores da tabela 8, considerou-se a n constante de 1400 rpm e diferentes valores de avanço. Em todos os casos o penetramento foi de 0,5 mm. Embora os estudos de cada parâmetro isolado apresentem tendências, mas não são de todo conclusivas, e os parâmetros de corte não atuam isoladamente. Logo, o estudo de uma simples operação de torneamento de uma peça não pode basear-se apenas num parâmetro de corte. Um bom acabamento é uma consequência da conjugação de vários parâmetros e fatores, bem como das matérias e ferramentas.

4.1.2. Influência da velocidade de corte no acabamento

Neste estudo, confrontou-se a variação do parâmetro velocidade de rotação, para o avanço igual a 0,1 mm/rot, mas com o fator do uso ou não de FC.

Tendo por base os valores de rugosidade obtidos, presentes na tabela 7, é feita uma análise da variância (ANOVA) com o *Minitab*. O intuito foi identificar se a velocidade de corte (v_c) se adequa para os próximos ensaios. O relatório típico deste tipo de análise aos resultados, é apresentado na figura 54. Na sua interpretação constata-se que o valor P-Value é inferior ao $\alpha = 0,05$, o que permite concluir que o parâmetro “n” é estatisticamente significativo para o estudo devido à influência que apresenta no processo de corte com bom acabamento. Logo, a velocidade de corte (v_c) é um parâmetro significativo com influência direta na rugosidade e, consequentemente, no acabamento superficial.

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
n (rpm)	2	0,50764	0,253822	34,60	0,001
Error	6	0,04401	0,007335		
Total	8	0,55165			

Figura 54: Relatório Minitab da ANOVA para rugosidade Ra de n sem FC

O gráfico da figura 55 indica que a velocidade de rotação afeta a rugosidade ao tomar diferentes valores. O valor de $n = 1800$ rpm apresenta-se como a velocidade que tem como consequência a rugosidade mais baixa, com média de $1,517 \mu\text{m}$, compreendida entre o valor mínimo de $1,396 \mu\text{m}$ e o valor máximo de $1,638 \mu\text{m}$ e, isto para o torneamento s/FC, figura 56.

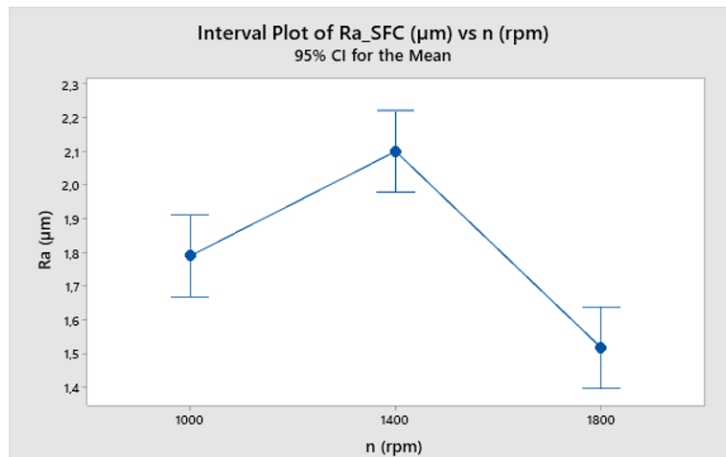


Figura 55: Gráfico Minitab da rugosidade sem FC em função da velocidade de rotação

Means

n (rpm)	N	Mean	StDev	95% CI
1000	3	1,7883	0,0760	(1,6673; 1,9093)
1400	3	2,0980	0,1087	(1,9770; 2,2190)
1800	3	1,5167	0,0665	(1,3957; 1,6377)

Pooled StDev = 0,0856440

Figura 56: Relatório Minitab da rugosidade em função da velocidade de rotação a $f = 0,1$ mm/rot e sem FC

Por outro lado, ao aplicar a mesma metodologia de análise ao torneamento c/FC os resultados obtidos da ANOVA apresentam-se na figura 57. Na análise destes resultados, é notório que o valor de P-Value indica que a velocidade de rotação tem um papel fundamental na obtenção de um bom

acabamento no torneamento c/FC das peças. Perante o gráfico da figura 58, e o relatório (figura 59) do torneamento c/FC, o valor de $n = 1400$ rpm destaca-se com o valor de rugosidade mais baixa, com uma média de $1,323 \mu\text{m}$, com valores significativos compreendido entre $1,163 \mu\text{m}$ de mínimo e $1,482 \mu\text{m}$ de máximo.

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
n (rpm)	2	1,16700	0,58350	45,78	0,000
Error	6	0,07647	0,01275		
Total	8	1,24348			

Figura 57: Relatório Minitab da ANOVA para rugosidade Ra com FC

Na comparação entre os dois estudos, verificou-se que o valor médio da rugosidade encontrado c/FC é inferior ao s/FC, o que implica que o valor da velocidade de rotação de 1400 rpm seja o valor indicado para os ensaios que se seguem, devido à redução significativa no valor da rugosidade, figura 58.

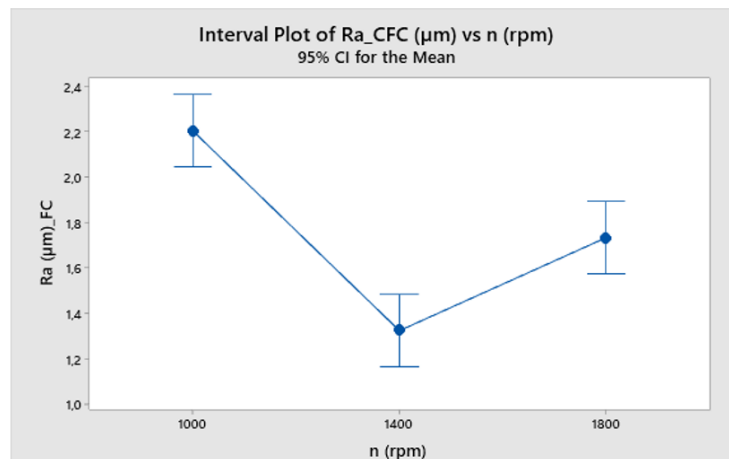


Figura 58: Gráfico Minitab da rugosidade Ra com FC em função da velocidade de rotação

Means

n (rpm)	N	Mean	StDev	95% CI
1000	3	2,2043	0,1698	(2,0448; 2,3638)
1400	3	1,3230	0,0466	(1,1635; 1,4825)
1800	3	1,7330	0,0850	(1,5735; 1,8925)

Pooled StDev = 0,112897

Figura 59: Relatório Minitab da rugosidade em função da velocidade de rotação com FC

Ao incluir no estudo o efeito interativo dos valores de velocidades com a influência do FC e, ao analisar todas essas variáveis em função do objetivo proposto segundo ANOVA multivariável, obtém-se o seguinte relatório, figura 60:

Analysis of Variance for Ra (μm)

Source	DF	SS	MS	F	P
Ra_S/FC e C/FC	1	0,01018	0,01018	1,01	0,334
n (rpm)	2	0,45410	0,22705	22,61	0,000
Ra_S/FC e C/FC*n (rpm)	2	1,22054	0,61027	60,78	0,000
Error	12	0,12048	0,01004		
Total	17	1,80531			

Figura 60: Relatório Minitab da ANOVA para rugosidade com interação entre os valores da velocidade de rotação “n” com e sem FC

Na análise do relatório dos valores da rugosidade da figura 60, conclui-se que a causa principal não provém do componente FC, pois, o valor do P-Value = 0,334. Então, a presença do FC isoladamente não é relevante para a obter um bom acabamento, pois, seu valor é superior a $\alpha = 0,05$, e como é óbvio, o FC não tem utilidade sem a atuação dos parâmetros de corte em simultâneo. Porém, estatisticamente, a velocidade de rotação e a interação entre a velocidade de rotação e o FC, conseguem alcançar rugosidades mais baixas, isto devido aos P-Value serem inferiores a α , relatório da figura 60.

O gráfico dos efeitos principais (*Main Effects*) da figura 61 coloca, par a par, os dois elementos de estudo. É notório que os valores mais baixos da rugosidade Ra resultam de $n = 1400$ a 1800 rpm. De fato, com a variação da velocidade de rotação, a rugosidade é altamente afetada. Porém, no mesmo gráfico, à direita apresenta-se a influência do FC durante os ensaios e, é visível que, perante a linha de referência o valor mais baixo de Ra está no torneamento c/FC, pois o gráfico mostra decréscimo de valores da rugosidade quando este tende para a utilização do FC. Então, a interação entre a velocidade de rotação com a componente FC, resulta na redução da rugosidade quando ambos estiverem a ser utilizados.

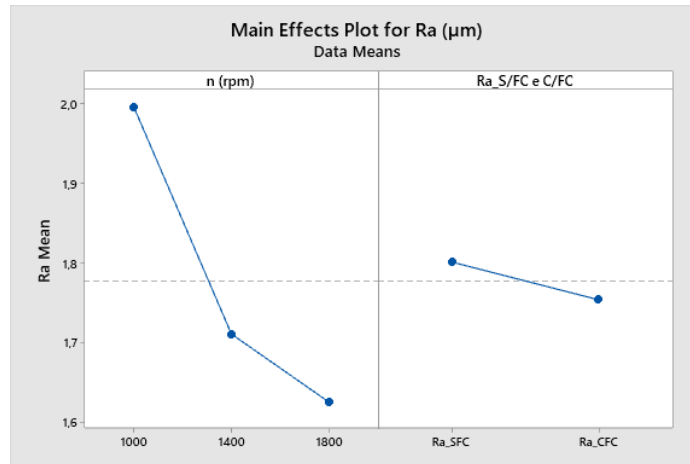


Figura 61: Gráfico Minitab dos efeitos principais para análise do “n” e da presença do FC, segundo a rugosidade Ra

Ao comparar as curvas resultante dos ensaios s/FC e c/FC (figuras 55 e 58) num único gráfico, onde é evidente que a situação mais adequada acontece no torneamento c/FC, figura 62. Como referido anteriormente, na análise ao gráfico das interações, e torneamento s/FC com $n = 1800$ rpm, apresenta a rugosidade mais baixa. Porém, essa redução é mais acentuada no caso c/FC a $n = 1400$ rpm, o que o caracteriza como a situação ideal. Este gráfico evidencia o comportamento $Ra = f(v_c; FC)$.

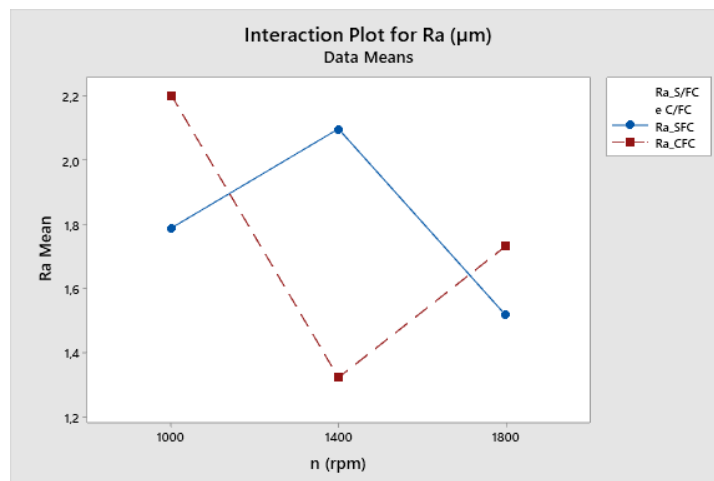


Figura 62: Gráfico Minitab da interação da velocidade de rotação e do FC, segundo a rugosidade

Para comparar os resultados obtidos no programa Minitab com a análise da ANOVA no Excel, os dados médios da rugosidade em função da velocidade de rotação e do FC, retirados da tabela 7, mas com uma disposição mais adequada e utilizados para esse estudo, tabela 9.

Tabela 9: Resultado das rugosidades a partir de “n” e de FC

n (rpm)	S/FC e C/FC	Ra (μm)
1000	s/FC	1,788
	c/FC	2,204
1400	s/FC	2,098
	c/FC	1,323
1800	s/FC	1,517
	c/FC	1,733

Ao executar o estudo da ANOVA no Excel, com fator duplo, obtêm-se as seguintes considerações, tabela 10, em que, o quadro analisa estatisticamente os valores da rugosidade face a variação da velocidade de corte e o FC.

Tabela 10: Sumário Excel relativo ao tratamento de dados com fator duplo com repetição

SUMÁRIO	n (rpm)	Ra (μm)	Total
<i>s/FC</i>			
Contagem	3	3	6
Soma	3400	6,09	3406,09
Média	1133,33333	2,03	567,681667
Variância	53333,3333	0,04673	405287,522
<i>c/FC</i>			
Contagem	3	3	6
Soma	5000	4,573	5004,573
Média	1666,66667	1,52433	834,0955
Variância	53333,3333	0,04207	853143,047
<i>Total</i>			
Contagem	6	6	
Soma	8400	10,663	
Média	1400	1,77717	
Variância	128000	0,11223	

A análise estatística dos resultados da tabela 11, indica que as “amostras” são as linhas correspondentes à rugosidade com e sem FC e a designação “colunas” referencia as colunas onde constam a velocidade de rotação e a rugosidade. Para a designação “interações”, refere-se à interação entre os valores da coluna e da amostra. Na mesma tabela, todos os valores de “F” são superiores ao “F crítico”, logo ambos valores apresentam diferenças significativas. Deste modo, pode-se dizer que as amostras do presente estudo apresentam efetivamente diferenças significativas

entre si. Além disso, o “valor P” para os valores da amostra, da coluna e das interações são todos inferiores ao $\alpha = 0,05$. Como tal, todas as considerações obtidas no software Minitab são comprovadas na análise ANOVA do Excel.

Tabela 11: Relatório Excel da ANOVA da interação dos valores de “n”, sem e com FC na rugosidade

ANOVA						
Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F	valor P	F crítico
Amostra	212928,9918	1	212928,9918	7,984830544	0,0222958	5,317655
Colunas	5865081,275	1	5865081,275	219,9403647	4,20846E-07	5,317655
Interações	213738,0584	1	213738,0584	8,015170519	0,02211248	5,317655
Dentro	213333,5109	8	26666,68887			
Total	6505081,836	11				

O teste de Tukey foi usado nos dados da tabela 7, para os valores s/FC, todos os pares de comparação pertencem a grupos diferentes. Da sua análise, figura 63, nenhuma dessas comparações contém zero, logo todos são significativamente diferentes entre si. Embora para o estudo da rugosidade, o par de comparação mais significativo se encontre entre $n = 1800$ e 1000 rpm, o valor de 1800 rpm tem a média de R_a mais baixa, igual a $1,5167 \mu\text{m}$.

Um comportamento idêntico ao anterior verifica-se para os valores c/FC. Ambos são estatisticamente significativos para o estudo, embora o par de comparação que tem a menor diferença entre as médias encontra-se entre $n = 1800$ e 1400 rpm, com a média de R_a mais baixa para $n = 1400$ rpm, na figura 64.

A conjugação da ANOVA como o teste de Tukey constata que, à priori, a situação adequada, para obter um bom acabamento de amostras de aço, com $L = 61$ mm e utilização da P1, surgem ao utilizar a velocidade de $n = 1400$ rpm c/FC.

Tukey Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

n (rpm)	N	Mean	Grouping
1400	3	2,0980	A
1000	3	1,7883	B
1800	3	1,5167	C

Means that do not share a letter are significantly different.

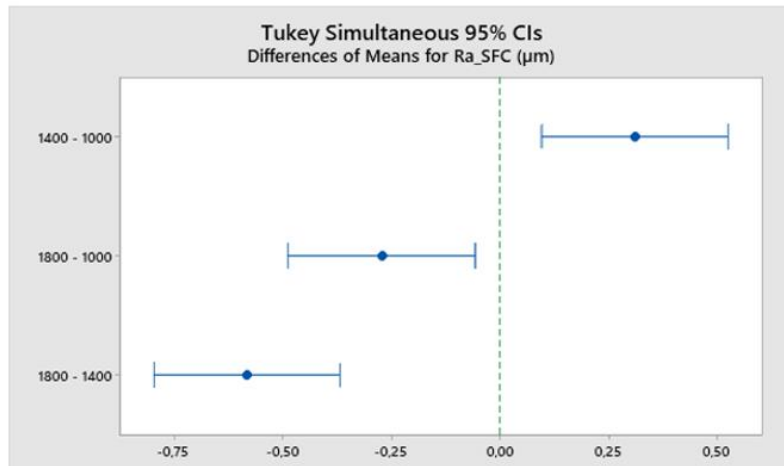


Figura 63: Teste de Tukey no Minitab, comparação de pares para valores de “n” sem FC

Tukey Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

n (rpm)	N	Mean	Grouping
1000	3	2,2043	A
1800	3	1,7330	B
1400	3	1,3230	C

Means that do not share a letter are significantly different.

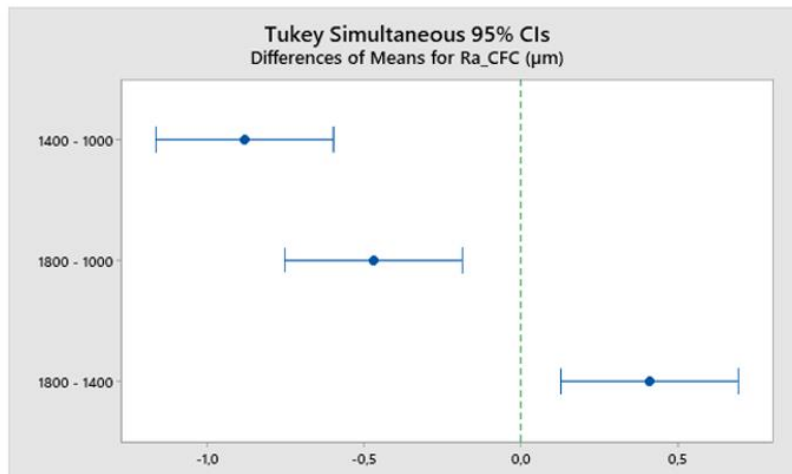


Figura 64: Teste de Tukey no Minitab, comparação de pares para valores de “n” com FC

4.1.3. Influência do avanço no acabamento

Após conhecer a velocidade de rotação que permite obter o melhor acabamento das peças, o estudo seguinte passa pela análise da influência do avanço no torneamento cilíndrico. O procedimento de análise é equivalente ao anterior e, para simplificar esta apresentação e torná-lo de mais fácil leitura, algumas figuras e tabelas são colocadas em Apêndice, mantendo aqui o que é mais significativo para obter conclusões.

A - Análise de $Ra = f(f; FC)$

Os ensaios da análise de $Ra = f(f, FC)$ do torneamento das amostras de aço com $L = 61$ mm e $n = 1400$ rpm, em que os valores de avanço foram de 0,1; 0,2 e 0,4 mm/rot. A partir dos dados da tabela 8, apresentada em (4.1.1), efetua-se o estudo da ANOVA com os valores de Ra resultantes de s/FC , cujo relatório é apresentado na figura A1 (*apêndice A*), onde P-Value é inferior a $\alpha = 0,05$. Então, os valores de avanço são significativos para o estudo em causa.

No gráfico das interações da figura 65, identifica-se o valor mais baixo de $Ra = f(f)$ para o torneamento s/FC , que é de 0,1 mm/rot, sendo as respetivas médias ilustradas na figura A2, (*apêndice A*). Usando FC no torneamento, os resultados de Ra obtidos indicam que, na análise ANOVA, o P-Value é inferior a 0,05, logo são significativos para o estudo. No gráfico das interações da figura 65 nota-se que, c/FC , os valores de Ra para todos os valores de avanço, comparativamente com os valores amostrais das peças torneadas s/FC são ligeiramente mais baixos. Porém, o avanço de 0,1 mm/rot causa o valor mais baixo de Ra , com média de 1,323 μm , figura A3.

Ao efetuar a análise interativa da ANOVA multivariável para a rugosidade em função do avanço e do FC, obtêm-se as seguintes considerações:

- A figura A4 indica que a presença do FC e a variação do avanço são relevantes para o estudo no intuito de obter uma rugosidade cada vez menor, bem como a interação entre o FC e o avanço.

- Os resultados das amostras enfatizam que a influência positiva do FC no processo de torneamento é significativa. A análise do gráfico dos efeitos principais, figura 66, referencia que, para obter resultados de rugosidade mais baixos, é necessário usar FC. A conclusão é correspondente à refletida no gráfico das interações figura 65 com uso de FC, apesar das diferenças serem mínimas, mas os resultados de Ra são significativamente melhores c/FC .

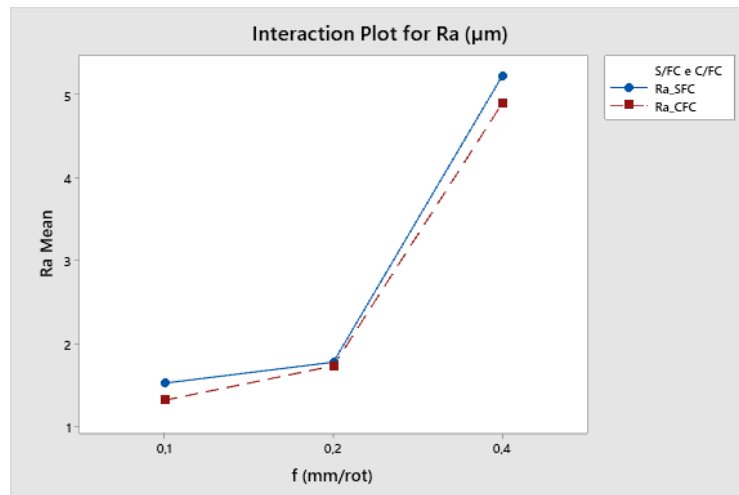


Figura 65: Gráfico Minitab de interação dos valores de avanço e do FC, segundo a rugosidade

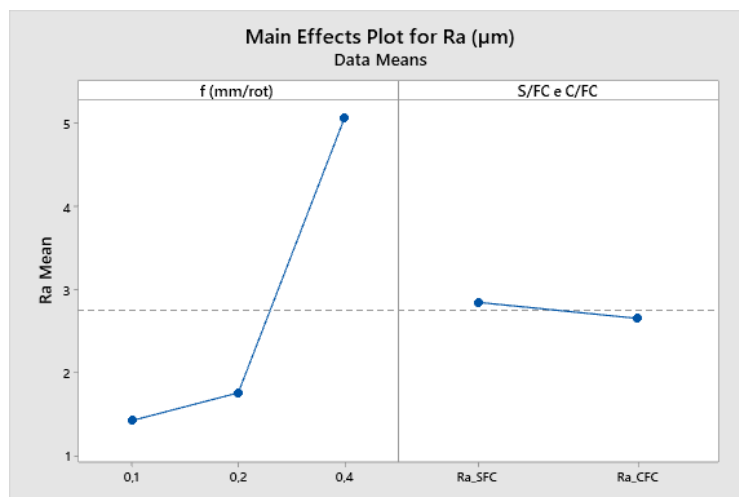


Figura 66: Gráfico Minitab dos efeitos principais para análise dos valores de f e c/FC, na rugosidade

A análise do teste de Tukey para os valores da rugosidade s/FC (figura A5), indica que nenhum dos pares em análise tem zeros nos intervalos. O intervalo de 0,2 - 0,1 mm/rot tem a menor variação da rugosidade e o avanço de 0,1 mm/rot contém a média mais baixa.

Na comparação de valores de rugosidade c/FC (figura A6), os pares de comparação pertencem a grupos diferentes e, não constam zeros nos seus intervalos. O par de comparação 0,2 - 0,1 mm/rot, com o avanço de 0,1 mm/rot, apresentam a média mais baixa da rugosidade. Os valores das rugosidades, para cada valor de avanço c/FC são menores relativos as leituras da rugosidade s/FC.

Deste modo, com a ANOVA, assim como no teste de Tukey, é notório que os valores de avanço que proporcionam um bom acabamento superficial estão compreendidos entre 0,1 - 0,2 mm/rot.

B - Análise de Ra = f (f, P1 e P2)

O estudo da influência do avanço, com a utilização das ferramentas P1 e P2, disponibilizou os resultados de Ra que são resumidos na tabela B1 (*apêndice B*). O intuito do estudo é verificar diferenças no acabamento das peças com a utilização da P2, indicada para torneamento de aços, visto que a P1 não era aconselhada para aços. As provas foram efetuadas por torneamento s/FC.

No estudo do acabamento, com P1 s/FC, analisado previamente neste capítulo e nos dados da tabela B1, a análise ANOVA da variação do avanço é significativo com valor baixo de rugosidade para $f = 0,1$ mm/rot, com média de Ra igual a $1,529 \mu\text{m}$.

Contudo, ao estudar os resultados de Ra, originados com P2, com os mesmos parâmetros e condições dos ensaios efetuados com P1, a análise ANOVA, figura B1 (*apêndice B*), indica que o avanço do estudo é estatisticamente significativo devido ao P-Value ser inferior a 0,05. Os resultados de Ra das amostras (figura B2), apresentam médias mais elevadas para os valores de avanço de 0,1 a 0,2 mm/rot do que os realizadas com P1 (figura A2). Com o auxílio do gráfico das interações da figura 67, na comparação dos resultados obtidos com as duas ferramentas, conclui-se que a P1 (apesar de não ser a mais indicada), apresenta bons indicadores particularmente no intervalo de 0,1 - 0,3 mm/rot.

O gráfico da figura 68 indica que o avanço tem um papel fundamental na obtenção de bom acabamento. No mesmo gráfico, vê-se que a pastilha que permite obter menor valor de Ra é a P1, pois o estudo aponta que existem diferenças significativas na rugosidade, devido aos extremos da reta estarem afastados da linha de referência e, no caso da P1, ela situa-se abaixo da linha de referência, caracterizando-a como uma possível escolha na obtenção do acabamento desejado.

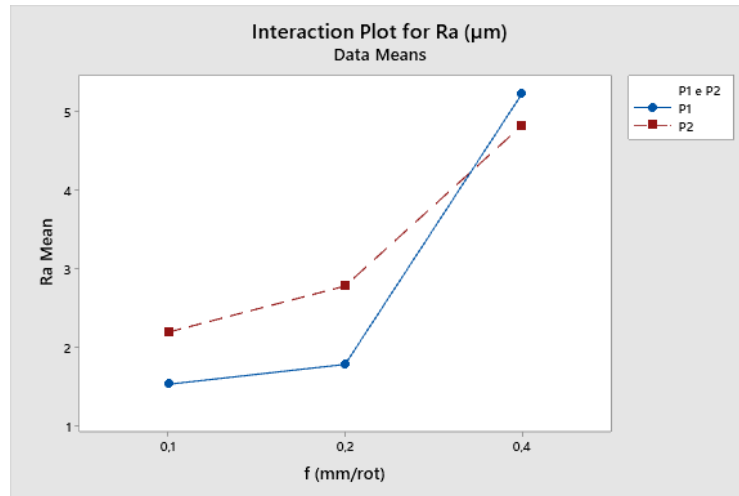


Figura 67: Gráfico de interação dos valores de avanço e de P1 e P2, na rugosidade

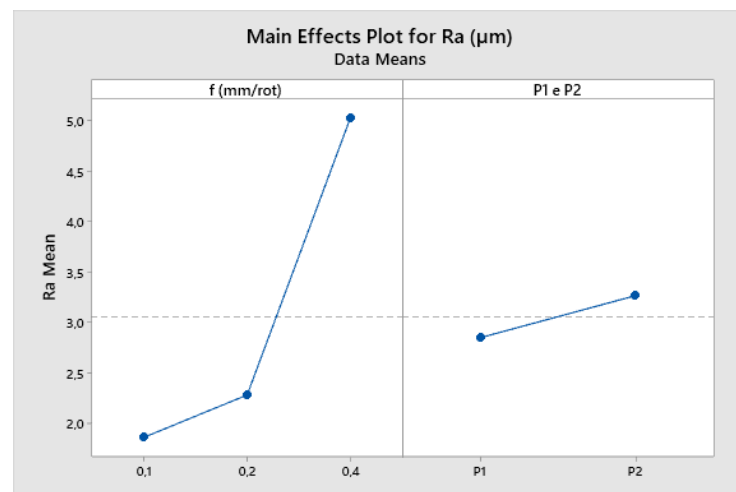


Figura 68: Gráfico dos efeitos principais para análise dos valores de avanço e de P1 e P2, segundo a rugosidade

Relativamente ao teste de Tukey, como as comparações de pares da P1 e P2 não contêm zero nos seus intervalos, figura B3 e B4, significa que são estatisticamente diferentes entre si. Contudo, tendo em conta os valores da rugosidade com a P1, o par de comparação compreendido entre 0,2 - 0,1 mm/rot apresenta a menor diferença e que a média mais baixa deve-se ao avanço de 0,1 mm/rot figura B3. O mesmo se verifica com P2, o par de comparação com diferença é de 0,2 - 0,1 mm/rot, com a média mais baixa da rugosidade no avanço de 0,1 mm/rot, figura B4 (apêndice B).

Ao comparar as duas pastilhas, as amostras relativas a P1 apresentaram menores valores de Ra, melhor acabamento superficial, então esta é a mais indicada para maquinar o aço.

4.2. O Comando SSV e a Qualidade Superficial das Peças

O presente estudo aborda os efeitos do SSV na rugosidade de diferentes amostras em peças de aço cujos comprimentos eram de $L = 61, 90, 120$ e 200 mm correspondendo-lhe relações de L/d de: 2:1 a 0,66:1; 3:1 a 1,67:1; 4:1 a 2,66:1; 6,67:1 a 5,33:1 respetivamente. O procedimento seguiu uma rotina análoga aos estudos anteriores, comparando-se as amostras maquinadas sem e com o comando SSV, com a P1 e P2, sem e com FC.

C - Estudo do comando SSV nas amostras de aço de $L = 61$ e 90 mm, da fermenta e s/FC

Os resultados de rugosidade das amostras de 61 mm maquinadas sem e com SSV, utilizando a P1 são apresentados na tabela C1 (*apêndice C*). No caso dos valores da rugosidade, obtidos s/SSV e s/FC, foi abordada na secção 4.1.3, em que a única variável em estudo era o avanço. As análises dos resultados obtidos na secção 4.1.3 são úteis neste estudo, visto que os parâmetros utilizados são os mesmos. E o menor valor encontrado no estudo da secção é o avanço de 0,1 mm/rot, com a média de R_a igual a 1,529 μm . Todavia, ao estudar os resultados da rugosidade com SSV e s/FC, para diferentes valores de avanço, pela ANOVA (figura C1, *apêndice C*), verifica-se que o P-Value $< 0,05$, o que significa que esses dados são consideráveis para o estudo em causa.

O gráfico dos efeitos principais da figura 69, mostra que esta amostra (com $L = 61$ mm), o comando SSV não apresenta diferenças significativas, pois os pontos extremos situam-se praticamente com o mesmo valor no gráfico da direita. Todavia, já se esperava esta conclusão, visto que a amostra apresentava baixa relação L/d . Porém, a variação de valores de R_a é significativa e, em que para o valor mais baixo do avanço (0,1 mm/rot) resulta menor valor de rugosidade, assim o avanço é muito importante para o acabamento.

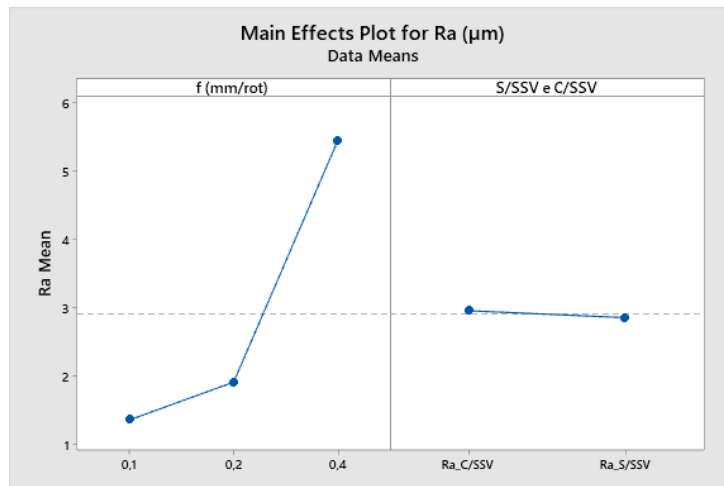


Figura 69: Gráfico dos efeitos principais para análise dos valores de avanço com e sem SSV, sem FC, para P1 na rugosidade da amostra de $L = 61$ mm

O teste de Tukey para os efeitos do SSV nas amostras de aço com 61 mm mostra que, em comparação, ambos os pares pertencem a grupos diferentes, logo os estudos são significativamente diferentes entre si. A figura A5 (apêndice A) apresenta o gráfico de comparações de pares de valores s/SSV e o par 0,2 - 0,1 mm/rot apresenta a menor diferença do conjunto, com 0,1 mm/rot a pertencer-lhe a menor média, com o valor de 1,529 μm . Para os resultados das amostras c/SSV, o gráfico da figura C4 (apêndice C) permite a comparação de pares para valores de rugosidade maquinadas de Ra igual a 1,184 μm . O intervalo de 0,2 - 0,1 (mm/rot) apresenta a menor diferença entre as demais com a menor média a pertencer ao avanço 0,1 mm/rot. Todavia, ao aplicar o teste de Tukey para as amostras de $L = 61$ mm, a menor rugosidade encontra-se nos resultados das amostras maquinadas c/SSV para o avanço de 0,1 mm/rot.

Os resultados das rugosidades das amostras com $L = 90$ mm, s/SSV e c/SSV, encontram-se na tabela C2 (apêndice C). A análise ANOVA dos resultados das amostras maquinadas s/SSV, expressam que são estatisticamente significativas, pois o P-Value $< 0,05$ (figura C5, apêndice C).

Ao analisar o gráfico dos efeitos principais da figura 70, para $L = 90$ mm, verifica-se que a influência do SSV não é muito significativa para obter um bom acabamento da peça, visto que a diferença entre os valores de sem e com SSV não é significativa, já que os pontos correspondentes se encontram praticamente sobre a linha de referência. Contudo, já se verifica uma ligeira vantagem na utilização do SSV.

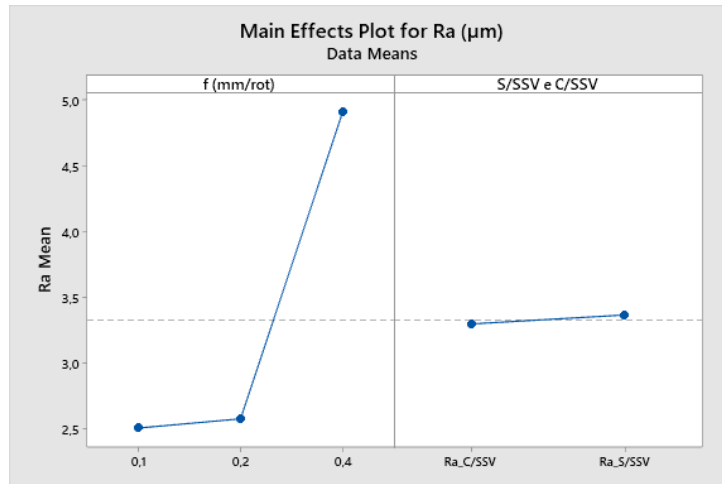


Figura 70: Gráfico dos efeitos principais para análise dos valores de avanço com e sem SSV segundo a rugosidade, s/FC para P1 na amostra de 90 mm

O gráfico das interações da figura 71 mostra a curva dos resultados de rugosidade com SSV para $L = 61$ mm, e respetivas médias, na figura C2. No caso sem SSV, a figura A2 (apêndice A) contém as respetivas médias. Ao analisar o gráfico da figura 71, constata-se que é possível maquinar a amostra $L = 61$ mm com SSV no intervalo de 0,1 - 0,16 mm/rot com bom acabamento. Apesar da diferença dos valores de Ra serem mínimas perante a utilização do SSV, devido a reta situar-se praticamente sobre a linha de referência, figura 69, ainda assim, existem pequenas diferenças na sua utilização e na figura 71 isso é notável. Contudo, para obter um bom acabamento é aconselhável maquinar as amostras com avanço de 0,1 mm/rot e com SSV.

Nas amostras de $L = 90$, a figura 71 descreve graficamente a “curva” da rugosidade para os valores s/SSV, com as respetivas médias na figura C6. Para os valores da rugosidade c/SSV, perante a análise ANOVA, os resultados obtidos são estatisticamente significativos para o estudo, pois o P-Value $< 0,05$, figura C7. A figura 71, descreve graficamente a “curva” da rugosidade para os valores c/SSV, e respetivas médias na figura C8.

A comparação das distribuições de Ra das amostras de $L = 90$ mm no gráfico das interações da figura 71, expressa que a melhor opção para maquinar as amostras é sem SSV com o valor de avanço de 0,2 mm/rot. Todavia, a curva para os valores da rugosidade s/SSV alcança valores de menor da rugosidade no intervalo de 0,2 - 0,4 mm/rot. Porém, caso fosse necessário utilizar maior avanço, 0,4 mm/rot, seria aconselhável maquinar as peças c/SSV.

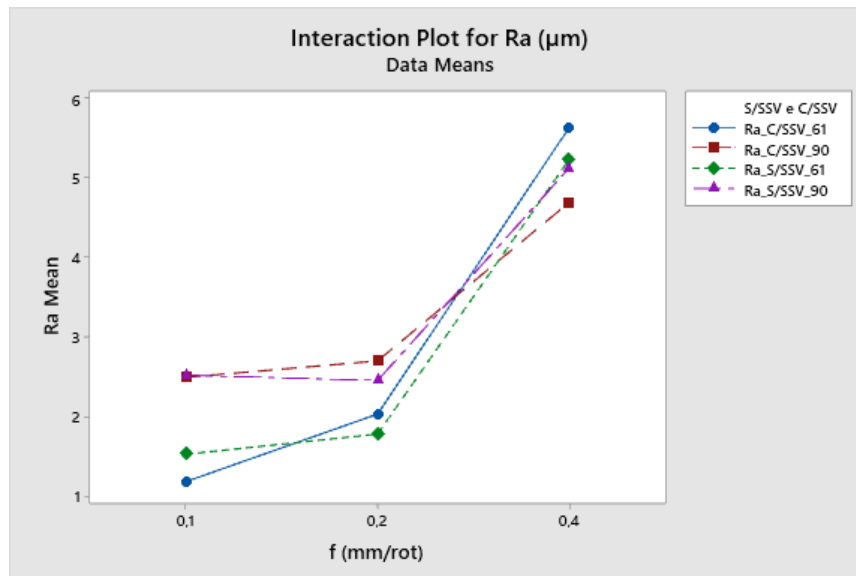


Figura 71: Gráfico comparativo dos resultados da rugosidade sem e com SSV nas amostras de 61 e 90 mm, s/FC para P1

Na análise ao teste de Tukey para a rugosidade das amostras de 90 mm é notável que na comparação de valores da rugosidade sem e com SSV, existem pares que contêm zeros nos intervalos. Isto significa que os valores das rugosidades das amostras para os avanços de 0,2 a 0,1 (mm/rot) contêm características semelhantes entre si e que os resultados apresentados na escolha de um desses valores de avanço são aproximados. Todavia, para ambas as situações, sem e com SSV, o par de comparação com a menor diferença encontra-se entre 0,2 a 0,1 (mm/rot). Neste intervalo, o valor mais baixo da rugosidade encontra-se em 0,2 mm/rot, figura C9, para os valores de rugosidade s/SSV e 0,1 mm/rot quando c/SSV, figura C10. Porém, na comparação dos resultados das rugosidades s/SSV e c/SSV das amostras de L = 90 mm, a rugosidade é efetivamente mais baixa no avanço de 0,2 mm/rot, para o torneamento s/SSV.

Conclusivamente, os menores valores de avanço, 0,1 e 0,2 mm/rot, são os melhores para obter menor rugosidade em L = 61 mm L = 90 mm. Contudo, nota-se que no torneamento com a velocidade de rotação de 1400 rpm e com a utilização da P1, o avanço de 0,1 mm/rot e c/SSV obtém-se o menor valor de rugosidade das amostras de L = 61 mm, enquanto para as amostras de L = 90 mm, a menor rugosidade só é obtida no avanço de 0,2 mm/rot e s/SSV, figura 71.

D - Estudo da influência da ferramenta, do FC e do SSV na rugosidade superficial

Com a introdução da P2 no torneamento das amostras de aço, o estudo que se segue passa por analisar a sua influência na rugosidade. Os resultados das rugosidades obtidas no torneamento das amostras de 61 mm encontra-se na tabela D1 (*apêndice D*). O estudo baseia-se em examinar o acabamento superficial das amostras de aço com a utilização da nova pastilha, do avanço, do SSV e do FC, para o torneamento com velocidade de rotação de 1400 rpm.

Para os resultados da rugosidade s/FC em função dos valores de avanço, a ANOVA descreve que o P-Value < 0,05, figura D1 (*apêndice D*), logo os resultados são significativos para o estudo. O gráfico da figura 72 apresenta valores médios de Ra em função dos valores de avanço, s/FC. É notório que o valor da rugosidade aumenta com o de avanço e que o valor mínimo Ra se encontra para o avanço de 0,1 mm/rot.

Com a utilização do FC no torneamento, a ANOVA apresenta P-Value < 0,05, indicando que os valores da rugosidade com a variação do avanço são significativos para o estudo, figura D3. Na análise do gráfico da figura 72, devido ao FC, assim como s/FC, o menor valor da rugosidade deve-se ao avanço de 0,1 mm/rot.

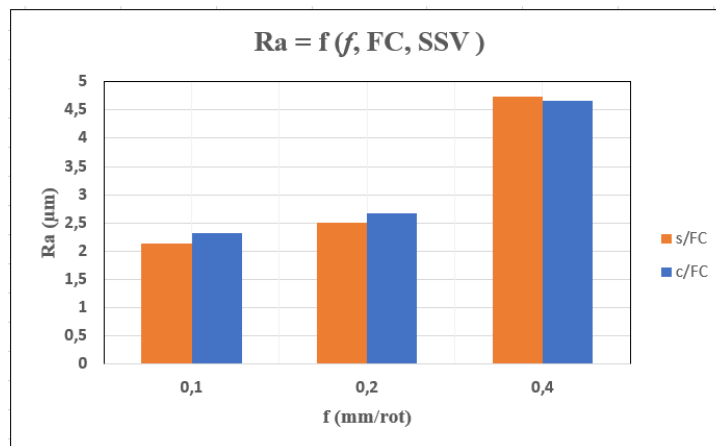


Figura 72: Relação entre os valores da rugosidade de avanço com e sem FC e c/SSV, na amostra de L = 61 mm para P2

No caso em estudo, gráfico da figura 72, vê-se que o processo permite obter bom acabamento, (menor Ra) devido aos menores valores de avanço e s/FC. Contudo, no caso do avanço de 0,4 mm/rot, é requerida a utilização do fluído de corte, apesar do comando SSV estar acionado.

Ao examinar os resultados do uso de FC, assim como a interação entre o FC com os valores de avanço, pela ANOVA multivariável na figura D5, os P-Value $> 0,05$, logo, estas variáveis não são estatisticamente significativos para o estudo. A variável FC, usada isoladamente ou com a interação entre o FC e o avanço, não se justifica para reduzir os valores de Ra. Porém, somente a variação do avanço apresenta de P-Value $< 0,05$, o que significa importância no acabamento superficial das peças.

No gráfico dos efeitos principais, figura 73, retrata-se que o avanço tem um papel importante na rugosidade, visto que há grande variação e, para o mais baixo valor, consequentemente terá o melhor acabamento. O gráfico da direita, descreve que o comportamento sem e com FC, não é estatisticamente interessante, devido aos extremos estarem muito próximos da linha de referência, sendo ligeiramente favorável ao torneamento s/FC.

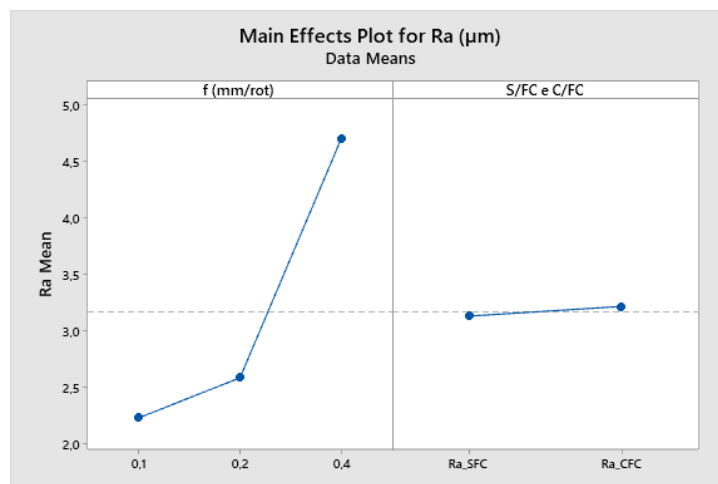


Figura 73: Gráfico dos efeitos principais de rugosidade devido os valores de avanço, com e sem FC e ao SSV, na amostra de 61 mm com P2

Ao efetuar o teste de Tukey para os resultados de Ra sem FC, o par de comparação 0,2 - 0,1 (mm/rot) contém zero no seu intervalo, logo os valores da rugosidade, relativos a cada um dos avanços apresentam em partes características similares, figura D6. Efetuando-se também o teste de Tukey para os resultados de Ra com FC, figura D7, todas as comparações não contêm zero nos intervalos, deste modo são significativamente diferentes entre si. Em ambos os testes, o par de comparação 0,2 e 0,1 (mm/rot) apresenta menor diferença e com a média mais baixa do valor de avanço de 0,1 mm/rot. Contudo, apesar da diferença ser mínima no estudo dos testes de Tukey, o

valor de avanço de 0,1 mm/rot sem fluido de corte tem a menor média da rugosidade, deste modo, estes são os parâmetros de corte que podem proporcionar um bom acabamento durante a utilização da P2.

E - Estudo da influência do SSV e da P2 na rugosidade nas amostras de aço com $L = 61, 120$ e 200 mm

O presente estudo, tem como objetivo analisar a influência do comando SSV em função do aumento do comprimento “L” das amostras na rugosidade superficial. As amostras foram todas maquinadas com P2 e sem fluido de corte.

O torneamento das amostras com $L = 61, 120$ e 200 mm, que corresponde aos valores médios de L/d igual a 1,33:1; 3,33:1 e 6:1, fornecem resultados de R_a que se encontram-se nas tabelas E1, E2 e E3 (*apêndice E*), respetivamente. As análises ANOVA referenciam que todos os P-Value < 0,05, logo são todas estatisticamente significativas, (figura B1, *apêndice B*), e (figura E1 e E2, *apêndice E*). Com SSV, com a ANOVA das R_a também se concluiu o mesmo, ou seja, que são estatisticamente significativas para o estudo (figura E8, E9 e E10, *apêndice E*).

Ao analisar os gráficos dos efeitos principais das figuras 74, 75 e 76 relativos às amostras de $L = 61, 120$ e 200 mm, verifica-se que a variação do avanço é um parâmetro importante para a rugosidade superficial. Porém, nas amostras de 120 e 200 mm o avanço de 0.2 mm/rot apresenta o menor valor de R_a , enquanto para a amostra de 61 mm foi com o avanço de 0.1 mm/rot. Ao estudar os efeitos do SSV, com o aumento do comprimento das amostras, vê-se que se acentua a inclinação do segmento que une os pontos relativos ao SSV. Assim, com o aumento da relação L/d cresce a necessidade do uso do SSV. Isto comprova o seu uso no torneamento para prevenir a flexão rotativa do aumento da amplitude das vibrações.

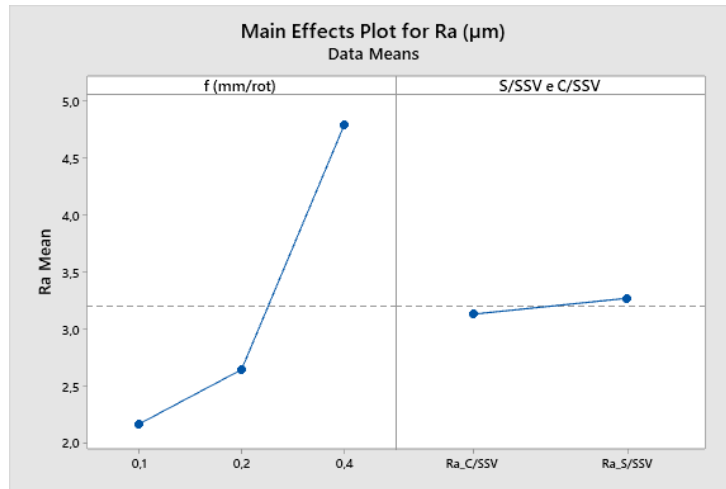


Figura 74: Gráfico dos efeitos principais para $Ra = F(f, SSV, P2)$, em $L = 61 \text{ mm}$ e s/FC

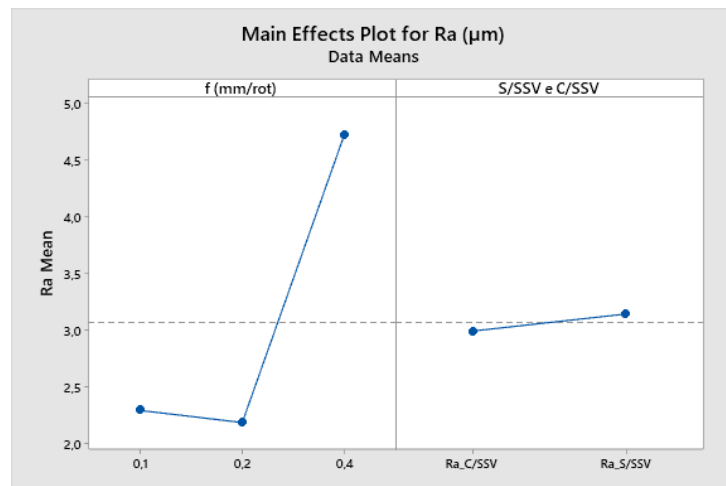


Figura 75: Gráfico dos efeitos principais $Ra = F(f, SSV, P2)$, em $L = 120 \text{ mm}$ e s/FC

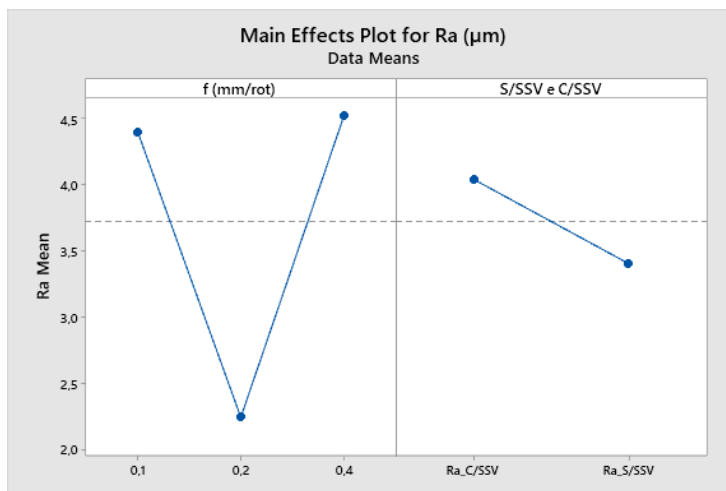


Figura 76: Gráfico dos efeitos principais $Ra = F(f, SSV, P2)$, em $L = 200 \text{ m}$ e s/FC

Resumindo, ao analisar o gráfico das interações da figura 77, é notório que c/SSV para todos os comprimentos, a rugosidade é expressivamente menor, o que reforça o constatado nos gráficos dos efeitos principais. Para a amostra de 61 mm, a rugosidade é menor no avanço de 0,1 mm/rot com SSV, embora, para todos os valores de avanço sejam aconselháveis a utilização do SSV. Nas amostras de 120 e 200 mm, a rugosidade é menor no avanço de 0,2 mm/rot. Contudo, na amostra de 120 mm o comando SSV só se justifica para os avanços de 0,1 - 0,3 mm/rot e, na amostra de 200 mm, o comando SSV é eficaz nos avanços de 0,2 - 0,4 mm/rot.

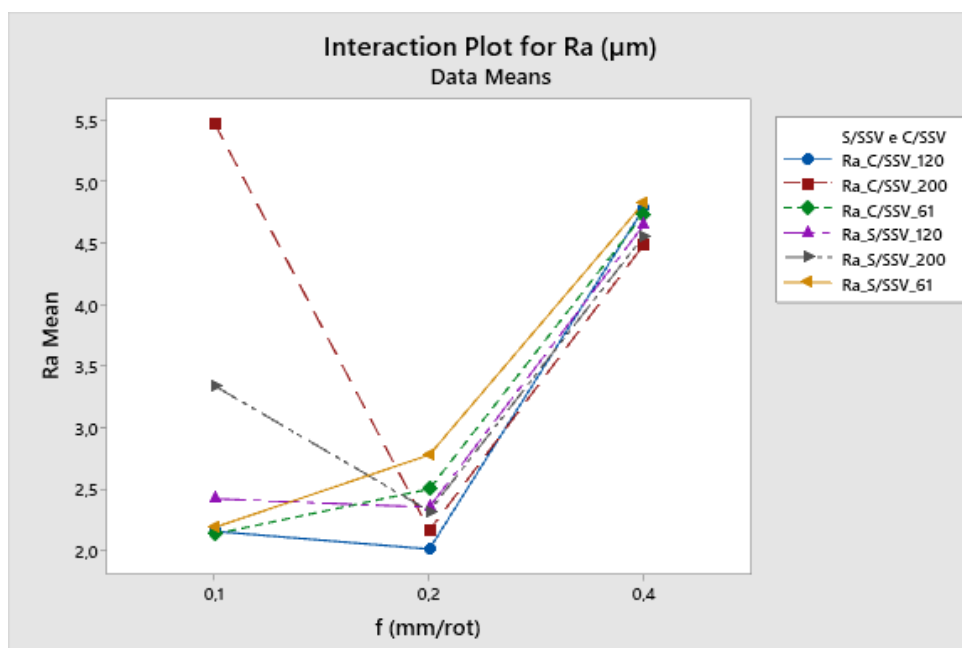


Figura 77: Gráfico comparativo das interações dos valores de avanço com e sem SSV nas amostras de 61, 120 e 200 mm com P2 e s/FC

Ao efetuar o teste de Tukey para as amostras de $L = 61, 120$ e 200 mm, chegou-se as seguintes considerações:

- Na amostra de $L = 61$ mm, a diferença mínima de comparação encontra-se no par $[0,2 - 0,1]$ (mm/rot), em que o avanço de 0,1 mm/rot apresenta a média mais baixa de Ra, sem e com SSV (figs. E11 e E12). Com SSV, as características são semelhantes, por conterem zero no intervalo $[0,2 - 0,1]$, figura E12.

- Na amostra de $L = 120$ mm, a diferença mínima de comparação encontra-se no par $[0,2 - 0,1]$ (mm/rot), com o avanço de 0,2 mm/rot a pertencer a média mais baixa de Ra sem e com SSV

(figs. E13 e E14). Em ambos, (sem e com SSV) existe o zero no intervalo do par de comparação [0,2 - 0,1] (mm/rot), o que comprova a existência de características semelhantes no intervalo.

- Na amostra de $L = 200$ mm, a diferença mínima de comparação encontra-se também no par [0,2 - 0,1] (mm/rot), com o avanço de 0,2 mm/rot a pertencer à média mais baixa de Ra sem SSV figura E15 e com SSV a diferença mínima de comparação desloca-se para o par [0,4 - 0,1] (mm/rot). Sendo o valor de Ra mais baixo em 0,2 mm/rot com SSV, figura E16. Tanto no torneamento sem e com SSV, não existem zeros nos intervalos dos pares das comparações, logo, ambos pertencem a grupos diferentes e de características distintas.

4.3. Influência dos Parâmetros de Corte no Acabamento Superficial do Alumínio

Este estudo tem como objetivo analisar o acabamento superficial das amostras de alumínio de comprimento $L = 61$ mm, sem FC nem SSV. Pretende-se averiguar a influência das duas pastilhas na rugosidade e, posteriormente, comparar a sua influência nos resultados obtidos nas amostras de aço, já apresentadas no subcapítulo 4.1.3.

F - Análise da rugosidade nas amostras de alumínio em função do avanço e de P1 e P2

Na análise do tipo ANOVA para os valores da rugosidade, utilizando a ferramenta P1, cujos resultados são apresentados na tabela F1 (*apêndice F*), revela que o P-Value $< 0,05$ (figura F1, *apêndice F*), logo os resultados são significativos para o estudo.

Sem dúvida que o valor do avanço é muito importante no acabamento superficial das amostras de Al, tal como constatado também para as amostras de aço. Faz todo o sentido afirmar que para as amostras de alumínio o melhor acabamento é com P1. Na figura 78, o avanço desempenha um papel fundamental e, em conjugação com a P1 consegue-se obter efetivamente o objetivo proposto.

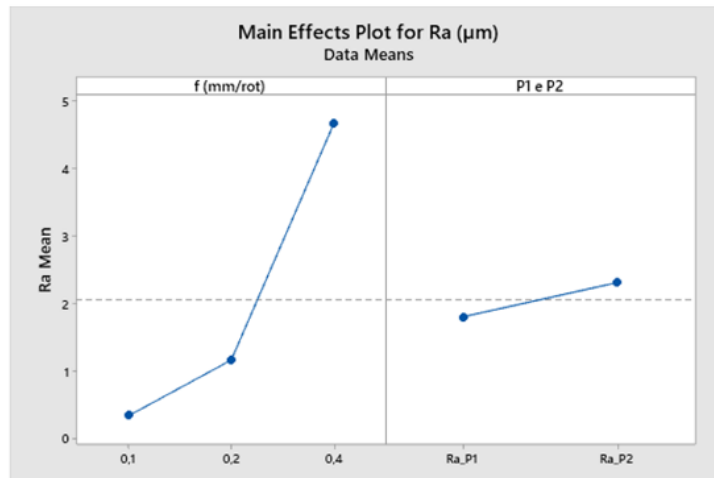


Figura 78: Gráfico dos efeitos principais para análise dos valores de avanço e da P1 e P2, na amostra de alumínio com 61 mm

Na análise ao gráfico comparativo da figura 79, onde se comparam os valores de Ra com a utilização da P1, sendo os valores médios para cada avanço e os valores mínimos e os máximos estão ilustrados na figura F2. Do mesmo modo, os resultados de Ra referentes ao torneamento com P2, a ANOVA (figura F3) mostra que o valor de P-Value < 0,05, pois as leituras são significativas para o estudo e influenciam o processo para obtenção de um bom acabamento, com o gráfico da figura 79, comparam-se resultados Ra de P1 com os de P2. Os segmentos que unem os pontos médios das mesmas, salientam as diferenças dos mínimos até os máximos (ver também figura F4).

Para as amostras de alumínio, a P1 é a pastilha que consegue obter menores valores da rugosidade como constatado anteriormente, embora, com o avanço de 0,1 mm/rot a P2 consegue um efeito próximo, figura 79.

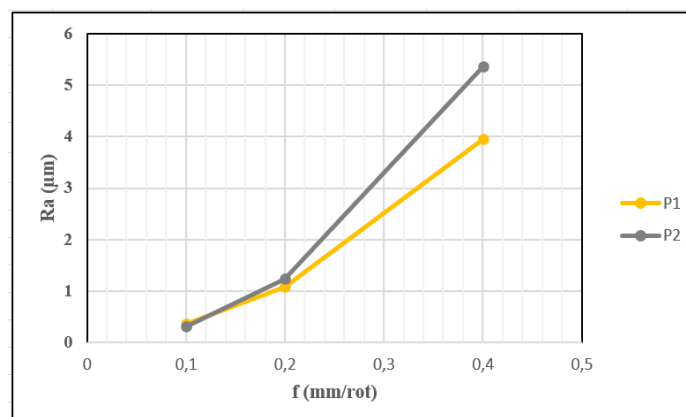


Figura 79: Gráfico comparativo entre os valores de avanço e da P1 e P2, na amostra de alumínio com 61 mm

No teste de Tukey, os resultados de Ra obtidos através do torneamento com P1, figura F5 (*apêndice F*), o par de comparação 0,2 e 0,1 (mm/rot) apresenta a menor diferença, mas a menor média da rugosidade obtém-se com o avanço 0,1 mm/rot. Também com P2, figura F6 (*apêndice F*), o par com menor diferença comparativa de Ra encontra-se no intervalo 0,2 - 0,1 (mm/rot), sendo o avanço de 0,1 mm/rot que apresenta a menor média.

G - Estudo comparativo do torneamento com as ferramentas P1 e P2 nas amostras de aço e alumínio

Os efeitos das pastilhas P1 e P2 no torneamento das amostras de aço e de alumínio na rugosidade Ra são apresentados no gráfico das interações da figura 80. Ao usar as duas pastilhas nas amostras de aço e de alumínio, observou-se um comportamento peculiar no aço. Segundo o estudo realizado no subcapítulo 4.1.3, com as amostras de aço consegue-se obter bom acabamento superficial com P1, já com P2 só é eficiente para avanços superiores a 0,3 mm/rot. Deste modo, justifica-se a utilização da P1 para maquinar o aço quando com baixo avanço.

Com o objetivo de obter bom acabamento superficial do alumínio, P1 justifica a sua utilização com o avanço de 0,1 mm/rot, onde o menor valor de Ra foi obtido com P2 (subcapítulo 4.3), embora a diferença seja mínima entre as duas pastilhas, para esse valor de avanço. Contudo, nas amostras de alumínio, a P1 alcança valores inferiores de Ra na maioria dos avanços estabelecidos.

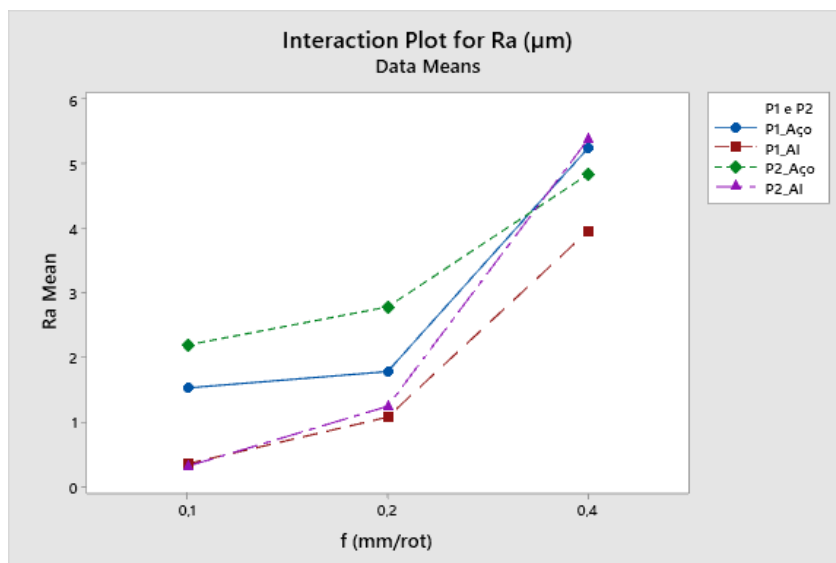


Figura 80: Gráfico comparativo das interações dos valores de avanço segundo a rugosidade, nas amostras do aço e do alumínio com 61 mm

Conclui-se deste modo e na generalidade, P1 é a pastilha indicada para obter valores baixos da rugosidade, tanto nas amostras de aço como nas de alumínio, especialmente para valores baixos de avanços de 0,1 - 0,2 (mm/rot).

4.4. Estudo Comparativo entre as Rugosidades Experimental (Ra) e Analítica (Rta)

Este estudo tem como objetivo testar a equação 4, que é divulgada na bibliografia como a via analítica para estimar o valor de Ra. Este pequeno estudo apenas envolveu a verificação da rugosidade aritmética dos dados relativos aos ensaios da tabela 9 (subcapítulo 4.1.1) e da equação da rugosidade aritmética teórica (Rta). Para tal, a equação 4 foi utilizada com os valores de avanço de 0,1 - 0,4 (mm/rot), sendo o raio da ponta da pastilha P1 igual a 0,8 mm. A tabela 12 apresenta esses resultados s/FC, para a velocidade de rotação de 1400 rpm.

Tabela 12: Tabela comparativa de Ra e Rta

<i>f</i> (mm/rot)	Ra médio (μm)	Rta (μm)
0,1	1,529	15,63
0,2	1,782	62,50
0,4	5,233	250,00

O gráfico da figura 81 demonstra a diferença dos valores da rugosidade experimental com a teórica.

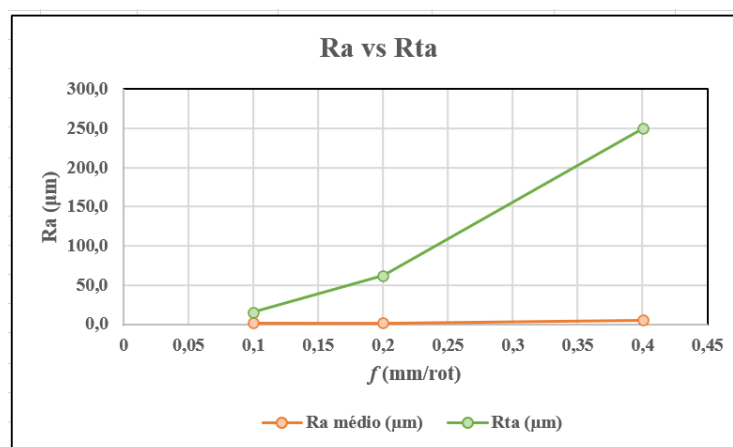


Figura 81: Gráfico comparativo entre a rugosidade Ra e Rta

É notória a grande discordância entre os valores da rugosidade experimental e os valores cálculos. Esta diferença de resultados deve-se a que a rugosidade não é um resultado puramente geométrico, devido ao avanço e ao raio da ponta da ferramenta, mas é um efeito de diversos fatores, como tem sido demonstrado nos subcapítulos anteriores.

4.5. Influência dos Parâmetros de Corte na Rugosidade RSm

A rugosidade RSm (média das larguras da rugosidade) é representada pela média dos espaçamentos da rugosidade. Embora Ra meça relativamente a amplitude da rugosidade, enquanto RSm mede relativamente aos seus espaçamentos. Os resultados de RSm têm sido apresentadas em todas as tabelas de resultados da rugosidade.

Da tabela 7 (subcapítulo 4.1.1) saíram os resultados do gráfico da figura 82, onde é notório que a velocidade de rotação de 1400 rpm apresenta o menor valor da rugosidade RSm do torneamento com FC. É um comportamento semelhante ao estudo realizado no subcapítulo 4.1.2. Em iguais circunstâncias, quando usado FC, o menor de Ra era verificado a 1400 rpm, figura 62, que partilha algumas semelhanças gráficas com a figura 82. Deste modo, é evidente que o torneamento com P1, à velocidade de rotação de 1400 rpm e c/FC, é a melhor opção para obter a menor rugosidade e conseqüentemente um bom acabamento superficial.

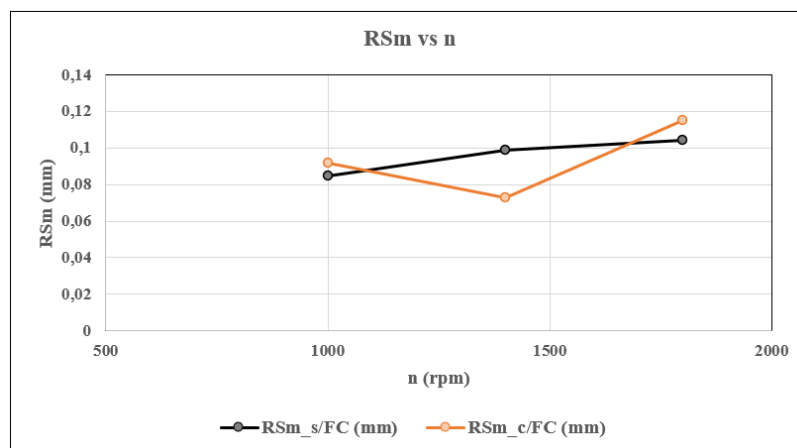


Figura 82: Rugosidade RSm em função da velocidade de rotação, com e sem FC, com a P1

A influência do avanço no gráfico da figura 83, com os dados da tabela 8 (subcapítulo 4.1.1), do torneamento s/FC com P1, é o menor valor (0,1 mm/rot) que apresenta a menor rugosidade RSm.

Apesar de algumas semelhanças gráficas da figura 83 e a figura 65, os resultados de RSm são menos influenciados por “n” do que os de Ra. No entanto, se o avanço fosse o único fator que influenciasse a rugosidade, os valores de RSm seriam iguais. Tal como referido no subcapítulo anterior, há outros fatores que influenciam o acabamento superficial.

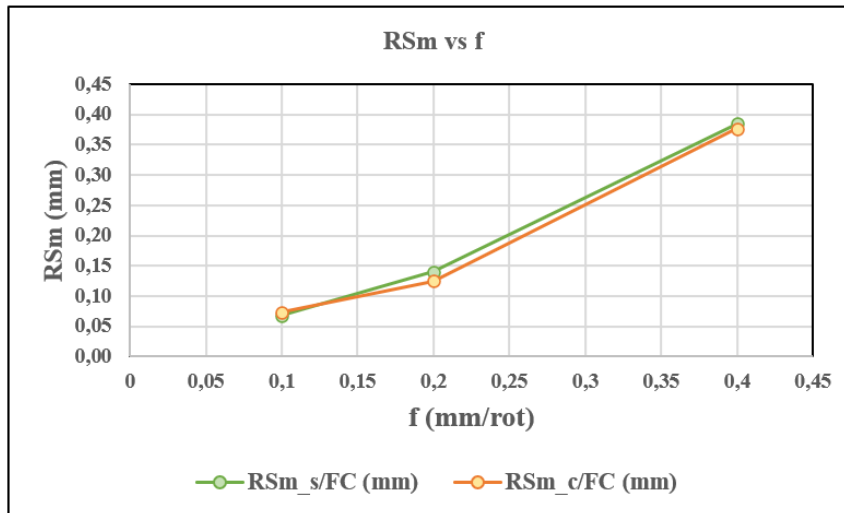


Figura 83: Rugosidade RSm em função do avanço, com e sem FC, com a P1

5. Torneamento CNC por CAD/CAM

A simulação das estratégias de torneamento estão disponíveis em *softwares* de CAD/CAM como o Mastercam. Para uma peça de geometria simples, tem o propósito de verificar qual dessas estratégias é mais favorável a execução das operações de fabrico num tempo mais curto. Enquanto o capítulo anterior tratou do estudo dos parâmetros de corte na qualidade da peça, este analisa um parâmetro de produtividade, que é o tempo de maquinagem.

A peça de estudo foi desenhada previamente em CAD 2D, figura 84, com as dimensões dispostos no desenho. Posteriormente foi passada ao CAD 3D do Solidworks (figura 85), onde foi definido o material correspondente constituindo a primeira fase, a do CAD.

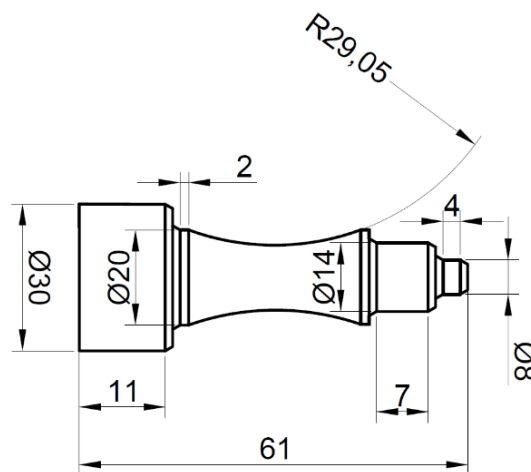


Figura 84: Dimensões da peça de Xadrez

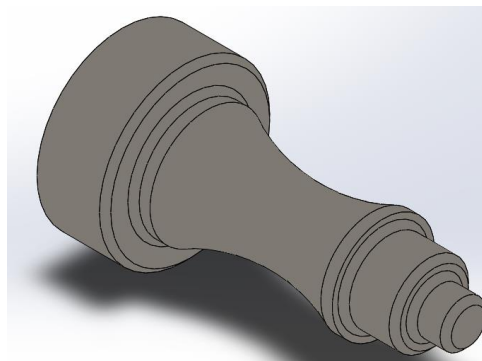


Figura 85: Peça de Xadrez

A operação seguinte, foi a passagem para o CAM e a adaptação da geometria com a da peça inicial (peça em bruto) fixa na bucha de trabalho, com o intuito de adaptar às dimensões da peça final, figura 86.

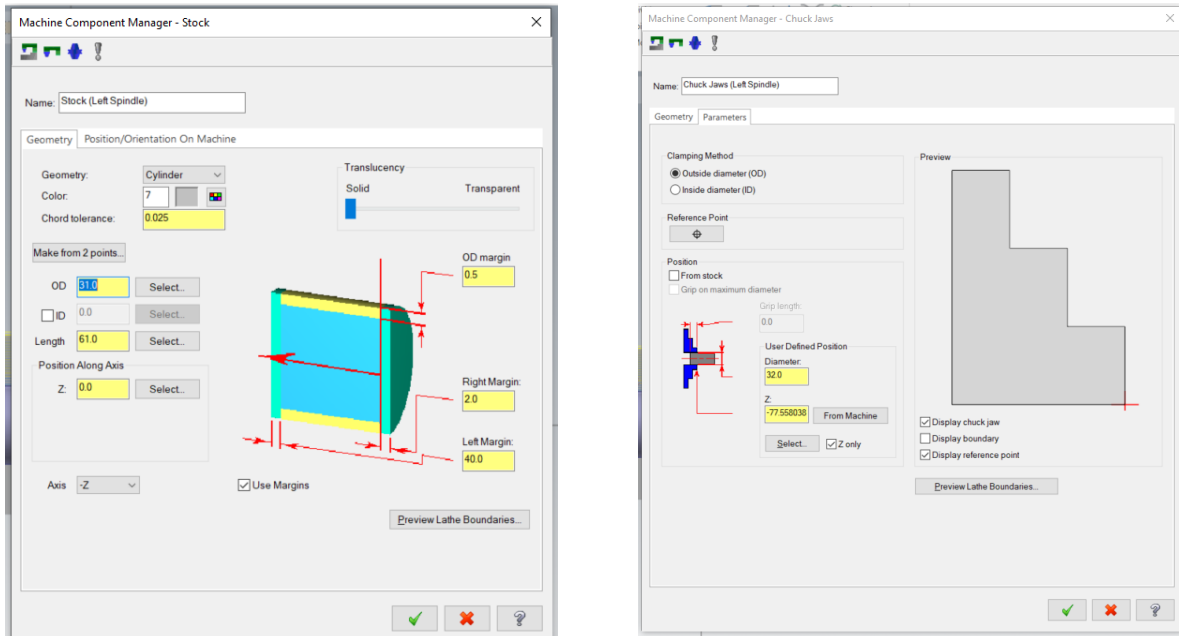


Figura 86: Ajuste da peça em bruto relativo às dimensões da peça e definição da bucha

A fase seguinte inclui a definição das estratégias, cujo objetivo principal passava pela sua simulação em CAM, disponível no software Mastercam. As estratégias utilizadas foram as de torneamento com:

- Desbaste longitudinal, com os movimentos de avanço paralelos ao eixo da peça.
- Desbaste perpendicular, com os respetivos movimentos perpendiculares ao eixo de rotação.
- Desbaste de contorno, com os movimentos relativos da ferramenta paralelas à linha geratriz que define a peça.

5.1. Estratégias de Torneamento Utilizadas

5.1.1. Debaste longitudinal (Torneamento cilíndrico)

Antes de iniciar a estratégia de torneamento da peça, a primeira etapa era de fazer o facejamento frontal, através do movimento transversal da ferramenta. Esta operação foi iniciada

com a seleção da ferramenta no quadro do software ilustrado na figura 87. A pastilha *CNMG 120408* selecionada corresponde à usada nos estudos anteriores, com velocidade de rotação da árvore de 1400 rpm e o valor de avanço foi de 0,1 mm/rot, como se pode ver no preenchimento do quadro do software, figura 88.

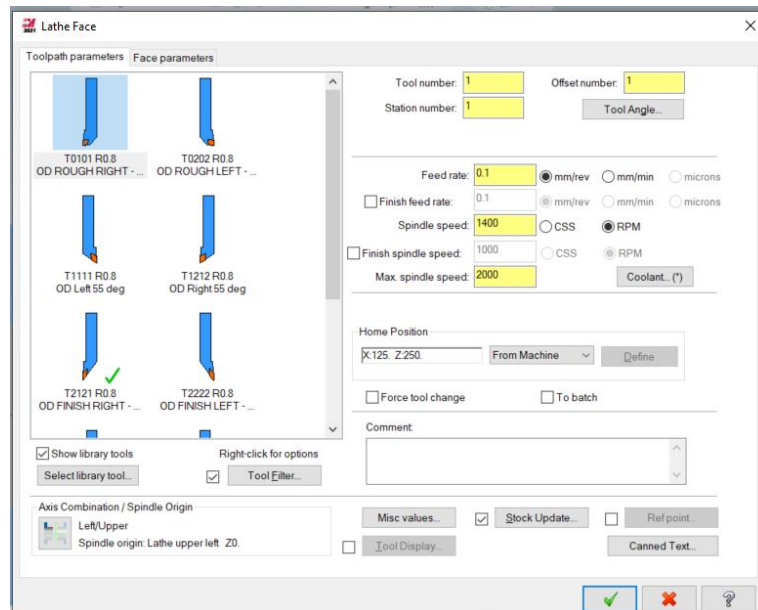


Figura 87: Seleção dos parâmetros de corte para a operação de facejamento, assim como a ferramenta

Concluído o processo de facejamento, o passo seguinte passou por pôr em prática a primeira estratégia, com desbaste longitudinal. Os parâmetros de corte mantiveram-se correspondentes aos estudos anteriores: - velocidade de rotação de 1400 rpm; - avanço de 0,1 mm/rot; - penetramento de 0,5 mm/rot.

A ferramenta de corte foi selecionada nos quadros de configuração do software, mostrados na figura 89 e as condições de movimento e de acabamento na figura 90.

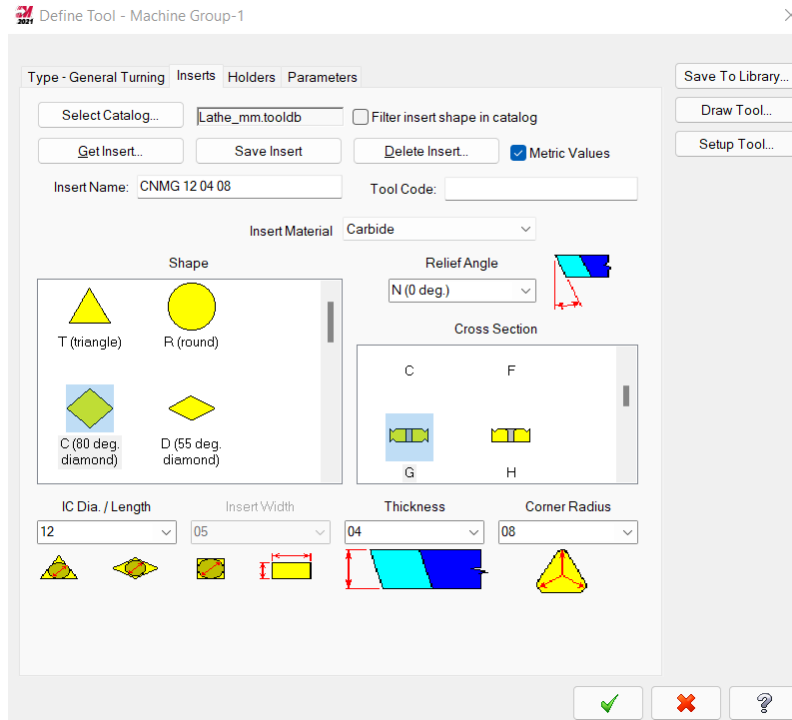


Figura 88: Seleção da pastilha para a operação facejamento

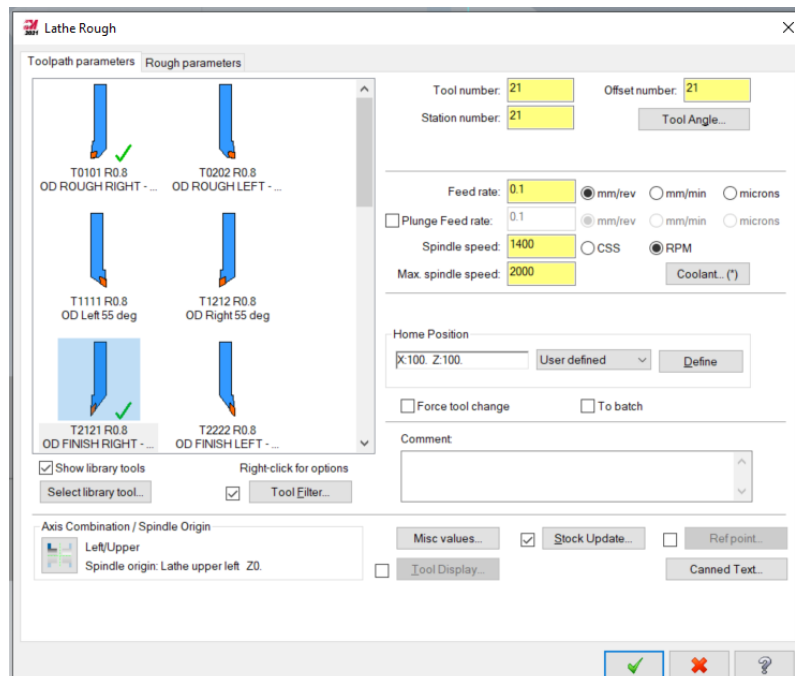


Figura 89: Seleção dos parâmetros de corte e da ferramenta para o acabamento da estratégia de desbaste longitudinal

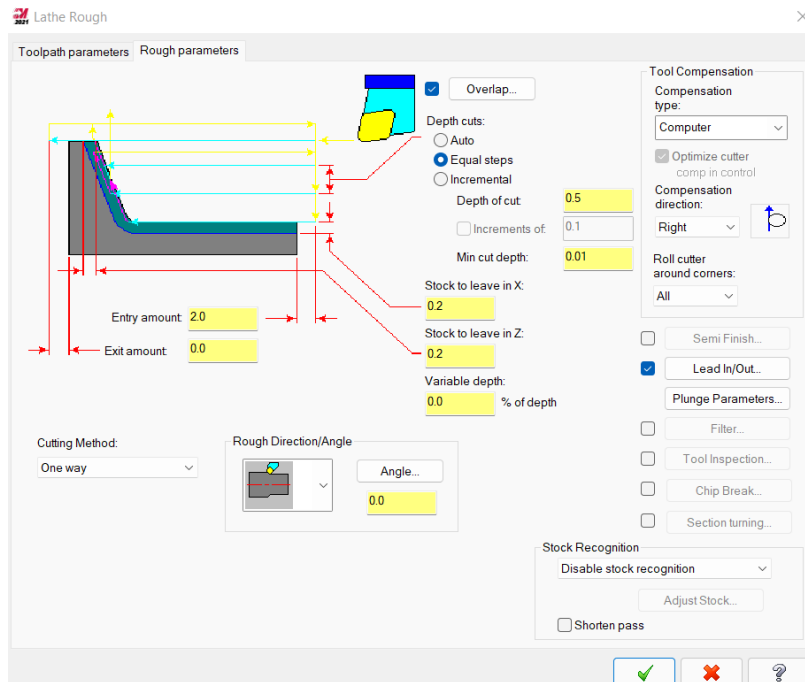


Figura 90: Definição de movimentos e de acabamento para a estratégia do desbaste longitudinal

No acabamento, foi utilizada a opção “*finish*” para definir a geometria final da peça. As figuras 91 e 92 ilustram as trajetórias de simulação da ferramenta durante a operação de desbaste longitudinal.

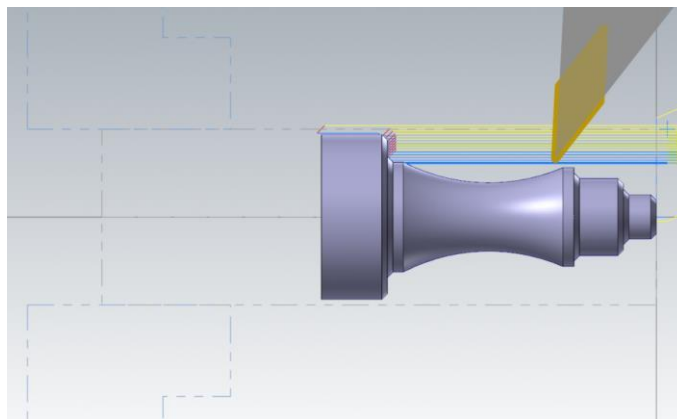


Figura 91: 1ª fase de operação de desbaste longitudinal

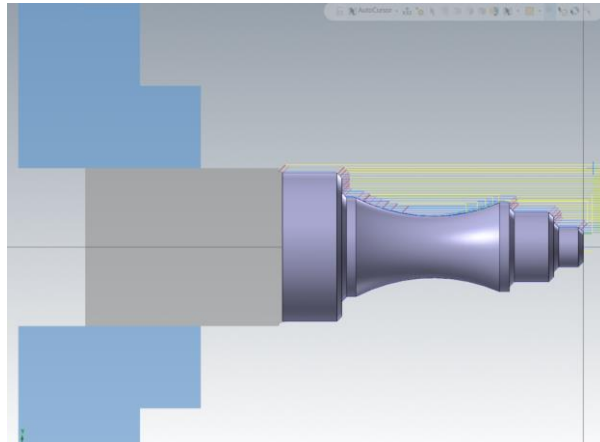


Figura 92: 2ª fase da estratégia de desbaste longitudinal

Após a conclusão do processo de facejamento e da estratégia de desbaste longitudinal e do acabamento, o software indicou o tempo de maquinagem de 8 min e 9 s, que é o tempo total para concluir a peça.

5.1.2. Desbaste perpendicular

A estratégia de desbaste perpendicular ao eixo da peça inicia-se do mesmo modo que no caso anterior (5.1.1), (figuras 86 e 88). Finalizado o facejamento, a estratégia de desbaste perpendicular emprega os mesmos parâmetros de corte utilizados na estratégia de desbaste longitudinal, também com a velocidade de rotação de 1400 rpm e do avanço de 0,1 mm/rot, figuras 93 e 94. As diferenças para esta estratégia comparativamente com a anterior encontram-se no percurso da ferramenta e no tipo de ferramenta, figura 93.

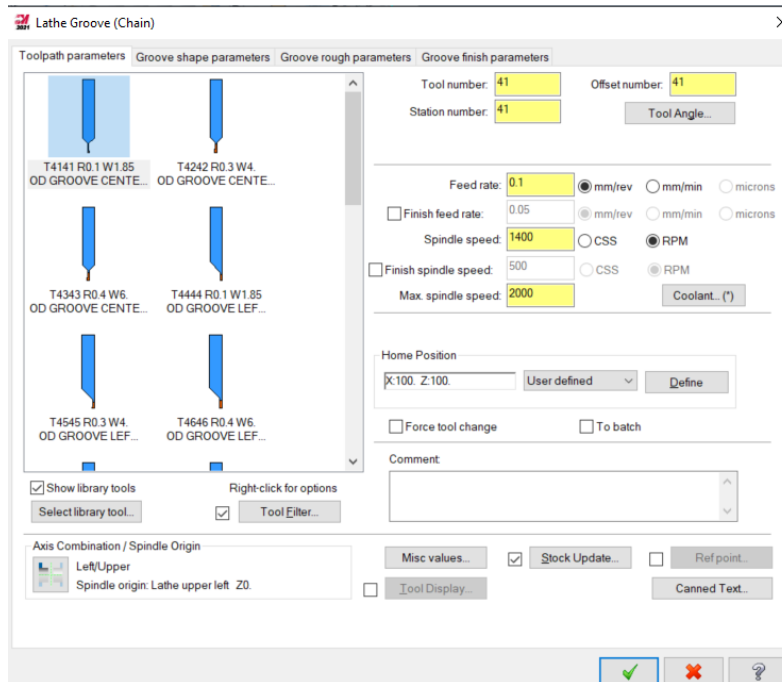


Figura 93: Seleção dos parâmetros de corte e da ferramenta utilizada na estratégia de desbaste frontal

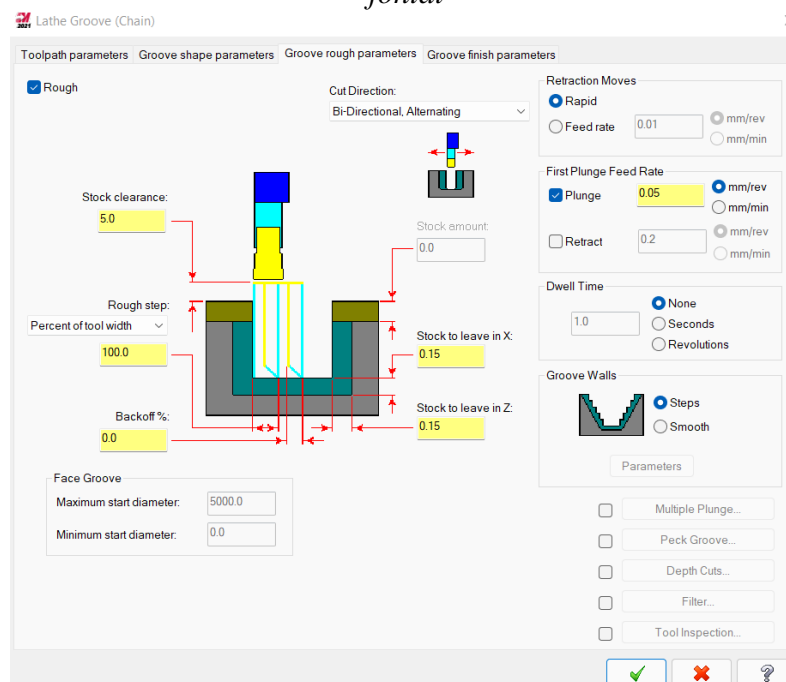


Figura 94: Seleção dos parâmetros de corte da rugosidade para a estratégia do desbaste perpendicular

Para finalizar o acabamento da peça, utilizou a opção “*Lathe Finish*”, figura 95. Foram selecionados os parâmetros de corte similares aos parâmetros utilizados durante a estratégia de

desbaste longitudinal, mas com a pastilha *VNMG 160408*. As figuras 96 e 97 ilustram a trajetória da ferramenta durante a operação de desbaste perpendicular.

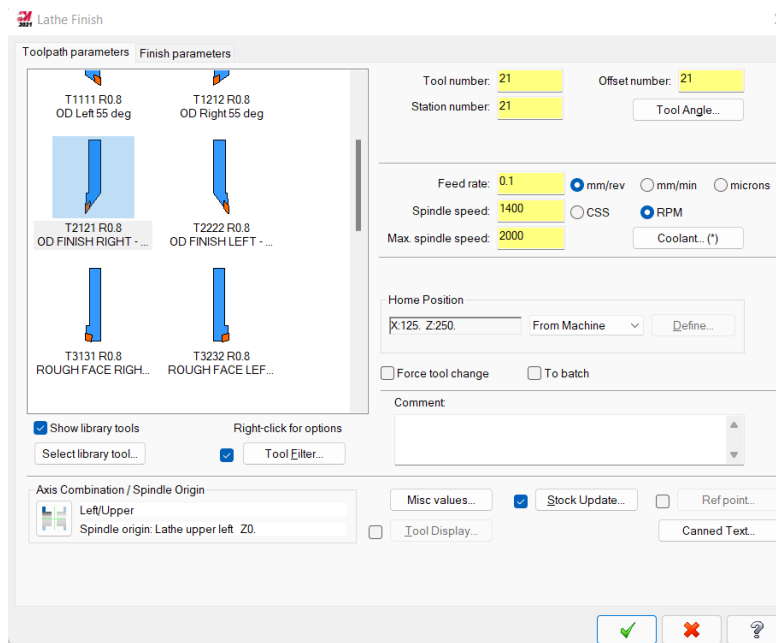


Figura 95: Seleção dos parâmetros de corte e da ferramenta para o acabamento da estratégia de desbaste perpendicular

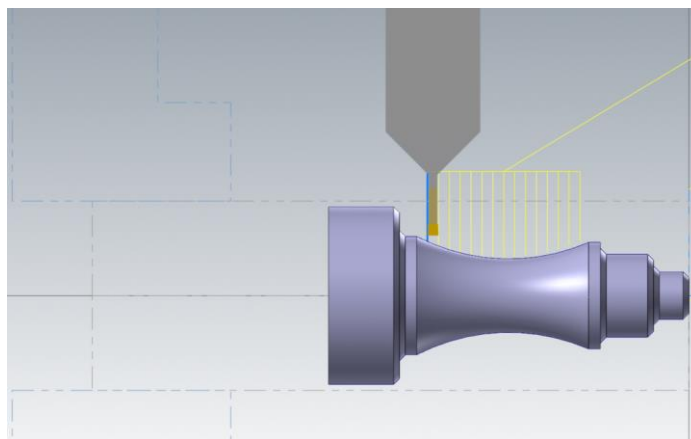


Figura 96: Operação de desbaste perpendicular

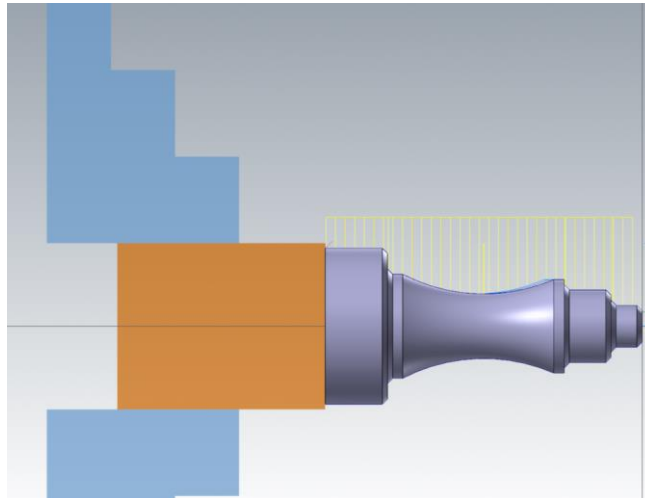


Figura 97: Percurso da ferramenta na estratégia de desbaste perpendicular

Após a conclusão do processo de facejamento e da estratégia de desbaste perpendicular assim como o acabamento, a peça necessitou aproximadamente de 4 min e 19 s para a sua conclusão.

5.1.3. Desbaste por contorno

A estratégia de desbaste por contorno consiste no torneamento da peça com trajetórias paralelas à geratriz da própria peça. A ferramenta no processo de estratégia de desbaste por contorno, opera o desbaste da peça ao longo do seu comprimento pelo número de passagem, até atingir a geometria pretendida. Antes de iniciar a sua execução, a definição da peça em bruto e o facejamento foram efetuados do mesmo modo com as configurações ilustradas nas figuras 86, 87 e 88, mas. Para a estratégia de desbaste por contorno foi utilizado a pastilha *CNMG 120408*, figura 98.

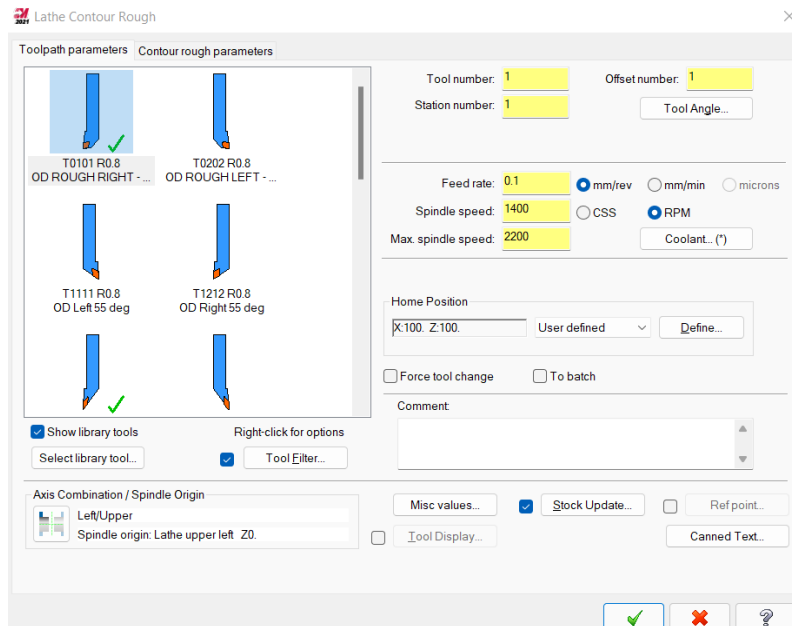


Figura 98: Seleção dos parâmetros de corte e da ferramenta para a estratégia de desbaste por contorno

As figuras 99 e 100 ilustram as trajetórias da ferramenta durante a operação de desbaste por contorno.

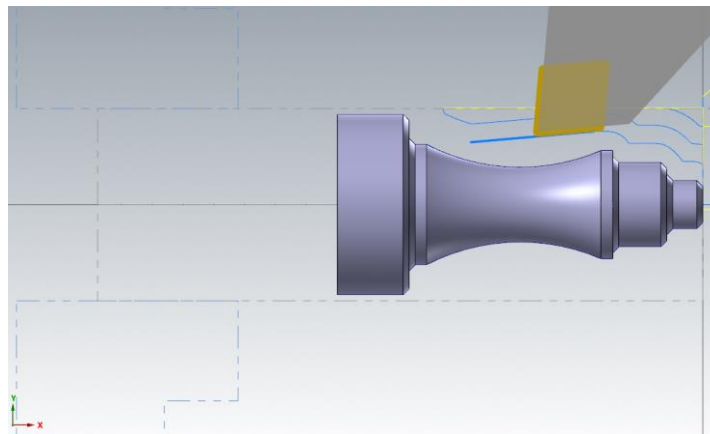


Figura 99: Operação de desbaste por contorno

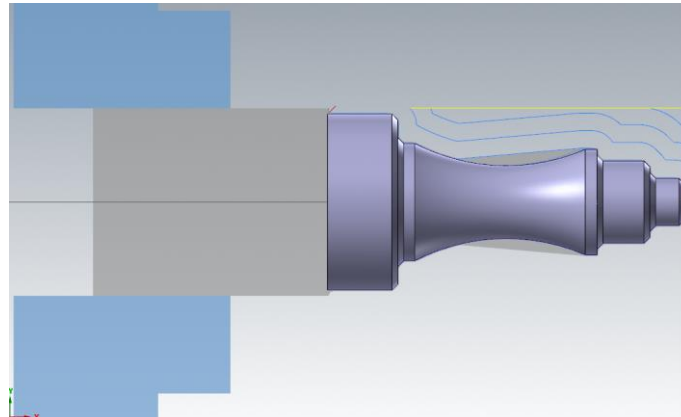


Figura 100: Percurso da ferramenta na estratégia de desbaste por contorno e acabamento

Após a conclusão do processo de facejamento e da estratégia de desbaste por contorno assim como o acabamento da peça, foram necessários aproximadamente de 1 min e 35 s para a sua conclusão.

No final das etapas, é apresentada a árvore das operações efetuadas cuja configuração é ilustrada na figura 101. O mesmo se aplica para as estratégias anteriores, a única diferença encontra-se na segunda etapa, correspondente as estratégias de desbaste.

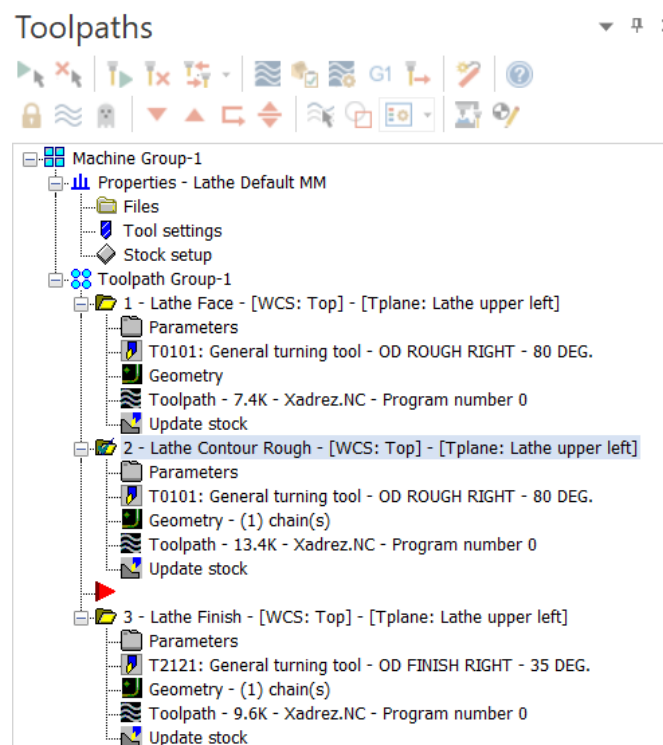


Figura 101: Árvore das operações em Mastercam

5.2. Comparação entre as Estratégias

A comparação entre os tempos de maquinagem da peça efetua-se para as três estratégias de desbaste. As estratégias, foram concluídas com os mesmos parâmetros de corte, nomeadamente a velocidade de rotação, o valor de avanço e o penetramento, quer no desbaste quer no acabamento. Naturalmente que, para obter uma boa produtividade e consequentemente uma vantagem competitiva, o tempo e a qualidade são indicadores chaves de avaliação. Na tabela 13 encontram-se os tempos de maquinagem das três estratégias de desbaste por arranque de apar.

Tabela 13: Tabela comparativa dos tempos das estratégias de desbaste

Estratégias	Estra. desbaste longitudinal	Estra. Desbaste frontal	Estra. Desbaste por contorno
Tempo	8 min 9 s	4 min 19 s	1 min 35 s

A análise da tabela 13 referencia que a estratégia de desbaste por contorno apresenta o menor tempo comparativamente às outras estratégias. Contudo ao examinar a figura 100, nota-se que existe uma zona acinzentada devido a haver excesso de material que deveria ser retirado. Porém, a falha foi retificada durante a etapa “*Lathe Finish*”, embora com aumento significativo de penetramento. Para obter a qualidade necessária é requerida mais do que uma passagem da etapa “*Lathe Finish*”.

Em termos conclusivos, a peça de xadrez iria ser feita pela estratégia de desbaste frontal por ter um bom compromisso entre o tempo de maquinagem e a eficácia do processo. Esta estratégia acaba por ser uma solução mais aproximada aos objetivos requeridos.

6. Conclusão

Este capítulo, visa apresentar as conclusões obtidas ao longo desta dissertação. A análise de variância (ANOVA), complementado com o teste de Tukey, foram os métodos estatísticos usados e que são adequados para este tipo de estudos e que permitem obter conclusões mais consistentes. A tabela 14 faz um resumo das conclusões obtidas durante os ensaios experimentais com enfoque na rugosidade aritmética (R_a).

Tabela 14: Tabela resumo dos ensaios experimentais de R_a

Capítulos	Material	L (mm)	Parâmetros constantes			Parâmetros que variam	FC	P1/P2	SSV	Conclusões
			p (mm)	n (rpm)	f (mm/rot)					
4.1.2	Aço	61	0.5	-	0.1	n = 1000 (rpm)	c/FC ; s/FC	P1	s/SSV	Para o aço de L = 61 mm, a menor rugosidade superficial é obtida pela n = 1400 rpm c/FC e, com a P1.
n = 1400 (rpm)										
n = 1800 (rpm)										
f = 0.1 (mm/rot)										
4.1.3 (A)				1400	-	f = 0.2 (mm/rot)				Para o aço de L = 61 mm, a menor rugosidade superficial é obtida pelo f = 0.1 mm/rot c/FC e, com a P1.
						f = 0.4 (mm/rot)				
4.2 (C)	Aço	61 ; 90	0.5	1400	-	f = 0.1 (mm/rot)	s/FC	P1	c/SSV ; s/SSV	- Para o aço de L = 61 mm, a menor rugosidade superficial é obtida c/SSV, para o f = 0.1 mm/rot, com a P1;
						f = 0.2 (mm/rot)				- Para o aço de L = 90 mm, a menor rugosidade superficial é obtida s/SSV, para o f = 0.2 mm/rot e com a P1.
4.2 (E)		61 ; 120 ; 200				f = 0.4 (mm/rot)				- Para o aço de L = 61 mm, a menor rugosidade superficial é obtida c/SSV, para o f = 0.1 mm/rot, com a P2;
							P2			- Para o aço de L = 120 mm, a menor rugosidade superficial é obtida c/SSV, para o f = 0.2 mm/rot, com a P2.
										- Para o aço de L = 200 mm, a menor rugosidade superficial é obtida c/SSV, para o f = 0.2 mm/rot, com a P2.
4.3 (F)	Al	61	0.5	1400	-	f = 0.1 (mm/rot)	s/FC	P1; P2	s/SSV	Para o alumínio de L = 61 mm, a menor rugosidade superficial é obtida com a P1, para o f = 0.1 mm/rot.
						f = 0.2 (mm/rot)				Para o aço de L = 61 mm, a menor rugosidade superficial é obtida pela P1, com o f = 0.1 mm/rot.
4.1.3 (B)	Aço					f = 0.4 (mm/rot)				
4.2 (D)	Aço	61	0.5	1400	-	f = 0.1 (mm/rot)	c/FC ; s/FC	P2	c/SSV	Para o aço de L = 61 mm, a menor rugosidade superficial com a P2 é obtida s/FC, para o f = 0.1 mm/rot.
						f = 0.2 (mm/rot)				
						f = 0.4 (mm/rot)				

Só é possível maquinar uma peça com os 3 parâmetros de corte a atuar em simultâneo para formar uma peça. No primeiro estudo, 4.1.2 e 4.1.3 (A), são avaliadas as influências da velocidade de corte e do avanço de torneamento no acabamento de uma peça curta, sem variar o penetramento. O

melhor acabamento (R_a mais baixo) correspondeu à v_c intermédia (1400 rpm), e ao avanço mínimo ($f = 0,1$ mm/rot), usando fluido de corte e maquinada com a ferramenta P1. Conclui-se que se pode baixar o valor de v_c e obter bom acabamento com o uso de FC. Uma conclusão equivalente resultou da utilização da ferramenta P2 (mais indicada para maquinar o aço). No entanto, é com P1 que se obtêm os melhores resultados de acabamento superficial.

No segundo estudo, 4.2 (C), avaliou-se a influência do uso do comando SSV durante o torneamento das peças curtas. No mesmo capítulo, fez-se um estudo comparativo para uma relação L/d desde ≈ 2 até ≈ 3 com a utilização da P1, em que, da relação $L/d \approx 2$ e os parâmetros $n = 1400$ rpm e $f = 0,1$ mm/rot, a rugosidade mais baixa obteve-se com SSV. No entanto, utilizando a mesma ferramenta (P1), para a relação $L/d \approx 3$, o melhor acabamento ocorreu também com SSV, mas com avanço de $0,2$ mm/rot.

No estudo das peças mais longas, 4.2 (E), fez-se a mesma comparação, utilizando o comando SSV durante o torneamento, embora, para este estudo utilizou-se a P2 e diferentes comprimentos, desde $L/d \approx 6,5$. Até $L/d \approx 2$ o uso de SSV não pareceu significativo, mas com o aumento do L/d a tendência é utilizar o comando SSV e, sendo o melhor acabamento com o avanço intermédio ($f = 0,2$ mm/rot).

Com a P2 e $n = 1400$ rpm, para L/d mais baixo e sem FC, concluiu-se, capítulo 4.2 (D), que variando o avanço, a rugosidade mais baixa obteve-se com o avanço mais baixo ($f = 0,1$ mm/rot). Em ambos os estudos (4.2 (D) e 4.1.3 (A)), o melhor acabamento superficial obteve-se com o avanço mais baixo ($f = 0,1$ mm/rot). Mas, para a P1 a rugosidade mais baixa é com FC enquanto com P2 é sem FC. Todavia, com P1, os valores da rugosidade superficial são os melhores.

No torneamento de peças curtas de alumínio, com P1 obtiveram-se os melhores acabamentos superficiais, com $f = 0,1$ mm/rot, o que já era esperado devido à pastilha ser a mais indicada para este material. Mas, para o aço (4.1.3 (F)), com P1 também se obtiveram os valores mais baixos de rugosidades com $f = 0,1$ mm/rot. Em síntese, a ferramenta P1, a $n = 1400$ rpm, o avanço compreendido entre $0,1 - 0,2$ [mm/rot], são parâmetros indicados para obter um bom acabamento em peças de aço ou de alumínio juntamente com FC e com SSV.

A tabela 15 resume o essencial dos resultados experimentais com enfoque sobre o acabamento, em termos da rugosidade da largura média (RS_m).

Tabela 15: Tabela resumo dos ensaios experimentais de RSm

Capítulos	Material	L (mm)	Parâmetros constantes			Parâmetros que variam	FC	P1/P2	SSV	Conclusões
			p (mm)	n (rpm)	f (mm/rot)					
4.5	Aço	61	0.5	-	0.1	n = 1000 (rpm)	c/FC ; s/FC	P1	s/SSV	Para o aço de L = 61 mm, a menor rugosidade superficial é obtida pela n = 1400 rpm c/FC e, com a P1.
						n = 1400 (rpm)				
						n = 1800 (rpm)				
				1400	-	f = 0.1 (mm/rot)				
		f = 0.2 (mm/rot)								
		f = 0.4 (mm/rot)								

No torneamento de peças curtas de aço com valores constantes de avanço e de penetramento, a rugosidade RSm mais baixa é obtida com $n = 1400$ rpm e com FC. Do mesmo modo, mas com velocidade de corte (1400 rpm), a rugosidade RSm mais baixa obteve-se com o menor avanço ($f = 0,1$ mm/rot) e com FC. Então, o melhor acabamento, em termos de RSm, obteve-se com velocidade de corte média ($n = 1400$ rpm) e o menor avanço ($f = 0,1$ mm/rot) e com FC.

No estudo da produtividade de fabrico de uma peça por CAD/CAM, entre as 3 estratégias de torneamento por desbaste: longitudinal, perpendicular e por contorno de peças iguais, simuladas no *Mastercam*, a melhor opção foi por desbaste perpendicular num compromisso entre a relação tempo de fabrico e a qualidade final da peça.

7. Bibliografia

- Agostinho, O. L., Rodrigues, A. C. dos S., & Lirani, J. (1977). *Tolerancias, Ajustes, Desvios e Análise de Dimensoes* (E. B. LTDA (ed.)). São Paulo, Brasil.
- André Duarte B. L. Ferreira. (2018). *Resumo de Processos de Fabrico*. [Consultado: 11-Junho-2021]]. https://estudomec.info/files/PF_Resumo.pdf
- Batista, R. (2010). *Tendências do Corte por Arranque de Apara - Maquinagem*. Univerisdade do Porto, Portugal.
- Colaco, Geraldo A. ; Medeiros, I. (2014, October). Análise Da Influência Dos Parâmetros De Usinagem Sobre a Rugosidade no Torneamento Cilíndrico Externo em Corte a Seco e com Abundância de Fluido de Corte. *A Agenda Brasil +10*, 20.
- Costa, F. F. da. (2014). Automação – CNC. *Centro Paula Souza, São Paulo*.
- Cunha, R. A. (2020). *Otimização de Parâmetros de Corte no Processo de Torneamento Esférico CNC*. Instituto Politécnico de Bragança, Portugal.
- Davim, J. P. (1995). *Princípios da Maquinagem* (Publindústria (ed.); 2nd ed.). Coimbra, Portugal.
- Diniz, Anselmo E; Marcondes, Francisco C; Coppini, N. L. (2014). *Tecnologia da Usinagem dos Materiais* (ArtLiber (ed.); 9th ed.). São Paulo, Brasil.
- Diniz, A. E., Marcondes, F. C., & Coppini, N. L. (2013). *Tecnologia da Usinagem dos Materiais* (Mm (ed.)). São Paulo, Brasil.
- EJE. (2019). *A Importância da ANOVA (Análise de Variância)*. [Consultado: 8-Setembro-2021]. <https://ejeconsultoria.com.br/2019/10/31/importancia-da-anova-analise-de-variancia/>
- Evident. (2019). *Medição da Rugosidade de Superfícies - Parâmetros*. [Consultado: 26-Abril-2022]. <https://www.olympus-ims.com/pt/metrology/surface-roughness-measurement-portal/parameters/>

- Favorit, A. E. (n.d.). *Aço DIN 9SMn28*. [Consultado: 18-Junho-2021].
<https://favorit.com.br/produtos/acos-ressulfurados/aco-din-9-s-mn-28-corfac>
- Ferraresi, D. (1970). *Fundamentos da Usinagem dos Metais* (Vol. 1). Edgard Blucher.
- Fonseca, M. H., Lucena Junior, U. P., & Lima, R. O. C. (2016). Benefícios para Vida do Inseto com a Utilização de Fluido de Corte no Processo de Torneamento. *22º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência Dos Materiais, Natal, RN, Brasil, 2*, 4885–4895.
- Haas. (2015). *Spindle Speed Variation - Stop Chatter on Your CNC Lathe*. [Consultado: 25-Maio-2021]. <https://www.haascnc.com/video/tips/dxr2wddffm4.html>
- Henrique, D. (2019). *Otimização de Parâmetros de Corte no Processo de Torneamento CNC*. Instituto Politécnico de Bragança.
- Hoffmann, G. (n.d.). *DNMG 150608 HB7010 GARANT*. [Consultado: 19-Junho-2021].
https://ecatalog.hoffmann-group.com/index.html?country=eng_WW_XXX/catalogs/&catalog=90000001#page_642
- Labone. (2021). *ANOVA: Conheça o Conceito e como Aplicar*. [Consultado: 19-Agosto-2021].
<https://www.laboneconsultoria.com.br/anova-o-que-e/>
- Lanema, P. (2019). *LIGA DE ALUMÍNIO AW 6082*. [Consultado: 18-Junho-2021].
<https://www.polylanema.pt/pt/aluminios-tecnicos/placas/aw-6082/>
- Machado, Á. et al. (2009). *Teoria da Usinagem de Materiais*. São Paulo.
- Minitab. (2018). *Interpretar os Principais Resultados para ANOVA para um Fator*. [Consultado: 8-Setembro-2021]. <https://support.minitab.com/pt-br/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/anova/how-to/one-way-anova/interpret-the-results/key-results/>
- Neto, G. C., & Silva, E. R. (2017). *Influência do Fluido de Corte no Torneamento de Aço e Materiais não Ferrosos*. <https://www.unirv.edu.br/conteudos/fckfiles/files/GERSON.pdf>
- Neto, J. C. S. (2012). *Metrologia e Controle Dimensional*. In *Elsevier Editora*.

- Nicola, G. L. (2008). *Análise de Superfícies Fresadas por Diferentes Estratégias em Aço AISI H13 Endurecido*. Caixas do Sul, Brasil.
- Oper. (2019). *Teste de Tukey para Comparações Múltiplas*. [Consultado: 8-Setembro-2021].
<https://operdata.com.br/blog/comparacoes-multiplas-teste-de-tukey/>
- Peres, F. B., Uemura, L. C., & Zanghettin, L. (2017). Energia Mecânica Com Ênfase Em Processos De Usinagem – Torneamento. *REGRAD, UNIVEM/Marília-SP*, 10(2017), 325–338.
- Rocha, J. (2016). *Progamação de CNC para Torno e Fresadora* (1ª edição). FCA - Editora de Informática, Lda.
- Sandvik. (2018). *Como Escolher a Pastilha de Torneamento Correta*. [Consultado: 18-Maio-2021]. <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/general-turning/pages/how-to-choose-correct-turning-insert.aspx>
- Silva, E. S. da. (2017). *Modelagem e Análise da Rugosidade Superficial do Aço ABNT 1045 Tratado Termicamente*. Universidade Federal da Paraíba, Brasil.
- Slideshare. (2012). *19. Parâmetros de Rugosidade*. [Consultado: 18-Maio-2022].
<https://pt.slideshare.net/ediviana/19parmetros-de-rugosidade>
- Souza, A. J. (2011). *Processos de Fabricação por Usinagem Parte 1*. Universidade do Rio Grande do Sul, Brasil.
- Tedesco, M. E. (2007). *Variação Dimemncional e Microestrutural do Aço AISI 4140 em Peças Usinadas por Torneamento*. Universidade de Caixas do Sul, Brasil.
- Verginelli, R. M. (2015). *Otimização de Processos de Desbaste em Usinagem de Cilindros de Trabalho para Laminação de Tiras de Ferro*. Universidade Estadual Paulista.
- YG-1. (2018). *Turning*. www.yg1.kr

APÊNDICE A: Complemento da análise de $Ra = f(f, FC)$

Os relatórios Minitab da análise $Ra = f(f, FC)$ são apresentados nas figuras seguintes.

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
f (mm/rot)	2	25,6930	12,8465	2321,24	0,000
Error	6	0,0332	0,0055		
Total	8	25,7262			

Figura A1: Relatório ANOVA de $Ra = f(f, s/FC)$, na amostra de aço de 61 mm com P1

Means

f (mm/rot)	N	Mean	StDev	95% CI
0,1	3	1,5290	0,0828	(1,4239; 1,6341)
0,2	3	1,7820	0,0262	(1,6769; 1,8871)
0,4	3	5,2330	0,0952	(5,1279; 5,3381)

Pooled StDev = 0,0743931

Figura A2: Valores médios, com os máximos e mínimos $Ra = f(f, s/FC)$, na amostra de aço de 61 mm com P1

Means

f (mm/rot)	N	Mean	StDev	95% CI
0,1	3	1,3230	0,0466	(1,2531; 1,3929)
0,2	3	1,74767	0,01266	(1,67776; 1,81758)
0,4	3	4,9023	0,0708	(4,8324; 4,9722)

Pooled StDev = 0,0494862

Figura A3: Valores médios, com os máximos e mínimos de $Ra = f(f, s/FC)$, na amostra de aço de 61 mm com P1

Analysis of Variance for $Ra (\mu m)$

Source	DF	SS	MS	F	P
S/FC e C/FC	1	0,1688	0,1688	41,27	0,000
f (mm/rot)	2	48,6299	24,3149	5945,05	0,000
S/FC e C/FC*f (mm/rot)	2	0,0618	0,0309	7,56	0,008
Error	12	0,0491	0,0041		
Total	17	48,9096			

Figura A4: Relatório ANOVA com interação entre os valores de $RA = F(F, s/FC)$, na amostra de aço de 61 mm com P1

Os testes de Tukey complementares são apresentados nas figuras A5 e A6

Tukey Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

f (mm/rot)	N	Mean	Grouping
0,4	3	5,2330	A
0,2	3	1,7820	B
0,1	3	1,5290	C

Means that do not share a letter are significantly different.

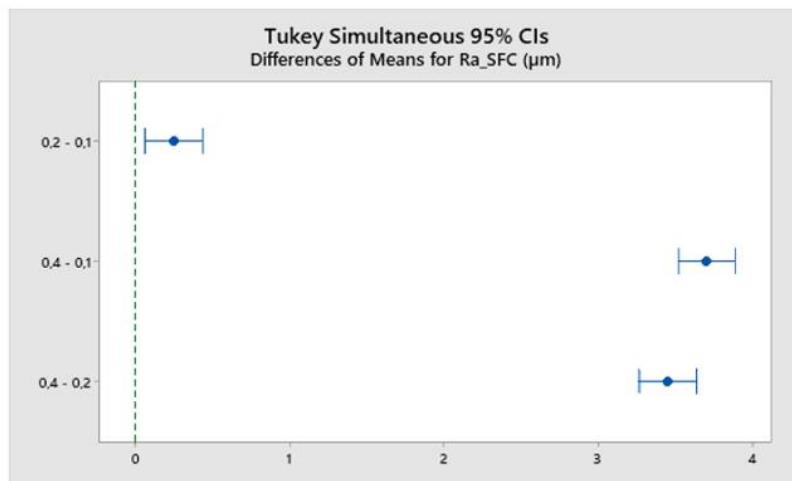


Figura A5: Teste de Tukey, comparação de pares para valores de avanço, sem FC

Tukey Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

f (mm/rot)	N	Mean	Grouping
0,4	3	4,9023	A
0,2	3	1,74767	B
0,1	3	1,3230	C

Means that do not share a letter are significantly different.

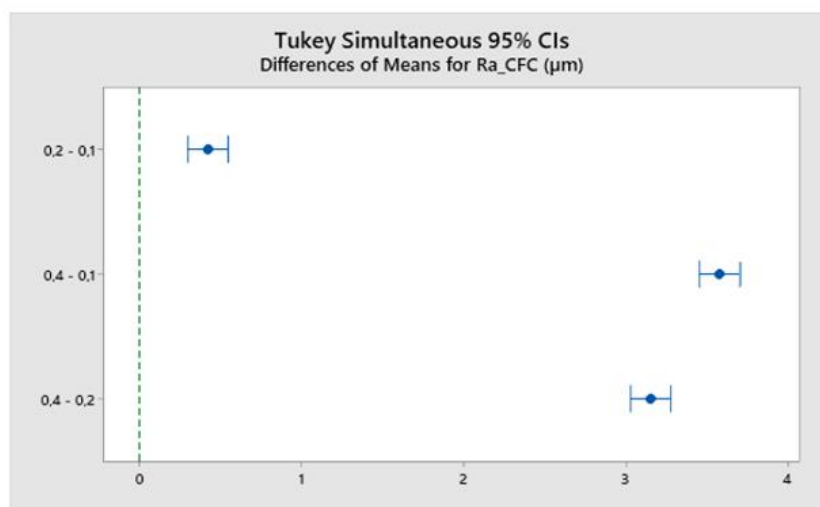


Figura A6: Teste de Tukey, comparação de pares para valores de avanço, com FC

APÊNDICE B: Complemento da análise de $Ra = f(f, P1 \text{ e } P2)$

Os resultados, relatórios Minitab e testes de Tukey são apresentados nas tabelas e figuras seguintes.

Tabela B1: Resultados dos ensaios da rugosidade em função do avanço com a utilização da P1 e P2, nas amostras de aço com 61mm de comprimento

Aço AISI 1213				Ra (μm)				RSm (mm)			
Ensaio	f (mm/rot)	n (rpm)	Pastilha	E1	E2	E3	Ra Médio	E1	E2	E3	RSm Médio
55	0,1	1400	P1	1,456	1,619	1,512	1,529	0,065	0,072	0,068	0,068
56	0,2	1400		1,775	1,811	1,76	1,782	0,143	0,155	0,121	0,140
57	0,4	1400		5,22	5,145	5,334	5,233	0,389	0,378	0,388	0,385
58	0,1	1400	P2	2,214	2,103	2,257	2,191	0,11	0,118	0,119	0,116
59	0,2	1400		2,881	2,704	2,755	2,780	0,178	0,17	0,176	0,175
60	0,4	1400		4,625	4,762	5,095	4,827	0,355	0,39	0,388	0,378

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
f (mm/rot)	2	11,4866	5,74330	235,89	0,000
Error	6	0,1461	0,02435		
Total	8	11,6327			

Figura B1: Relatório ANOVA para rugosidade sem FC, na amostra de aço de 61 mm com a P2

Means

f (mm/rot)	N	Mean	StDev	95% CI
0,1	3	2,1913	0,0795	(1,9709; 2,4118)
0,2	3	2,7800	0,0911	(2,5596; 3,0004)
0,4	3	4,827	0,242	(4,607; 5,048)

Pooled StDev = 0,156036

Figura B2: Valores médios com os máximos e mínimos de rugosidade $Ra = f(f, c/FC)$, na amostra de aço de 61 mm com P2

Tukey Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

f (mm/rot)	N	Mean	Grouping
0,4	3	5,2330	A
0,2	3	1,7820	B
0,1	3	1,5290	C

Means that do not share a letter are significantly different.

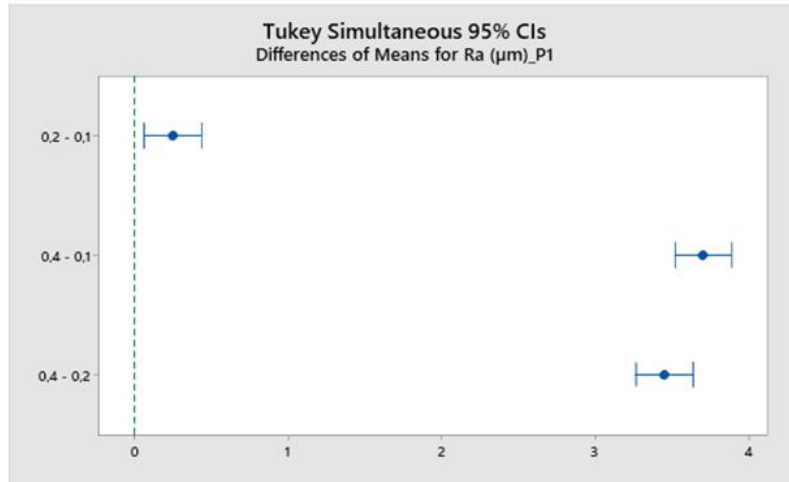


Figura B3: Teste de Tukey, comparação de pares para valores de avanço com P1, na amostra de aço de 61 mm

Tukey Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

f (mm/rot)	N	Mean	Grouping
0,4	3	4,827	A
0,2	3	2,7800	B
0,1	3	2,1913	C

Means that do not share a letter are significantly different.

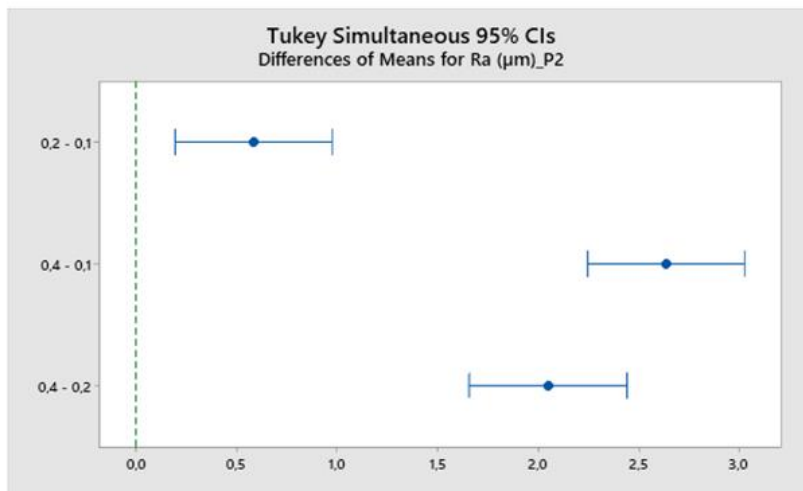


Figura B4: Teste de Tukey, comparação de pares para valores de avanço com P2, na amostra de aço de 61 mm

APÊNDICE C: Complemento da análise de $Ra = f(f, P1, SSV)$

Os resultados, relatórios Minitab e testes de Tukey são apresentados nas tabelas e figuras seguintes.

Tabela C1: Resultados da rugosidade em função dos valores de avanço e SSV para amostra de 61 mm com a P1

Pastilha P1				Ra (μm)				RSm (mm)			
Ensaio	f (mm/rot)	n (rpm)	SSV	E1	E2	E3	Ra Médio	E1	E2	E3	RSm Médio
13	0,1	1400	s/ SSV	1,456	1,619	1,512	1,529	0,065	0,072	0,068	0,068
14	0,2	1400		1,775	1,811	1,76	1,782	0,143	0,155	0,121	0,140
15	0,4	1400		5,22	5,145	5,334	5,233	0,389	0,378	0,388	0,385
16	0,1	1400	c/ SSV	1,142	1,165	1,245	1,184	0,072	0,07	0,062	0,068
17	0,2	1400		1,924	2,103	2,074	2,034	0,165	0,185	0,153	0,168
18	0,4	1400		5,374	5,722	5,799	5,632	0,215	0,327	0,295	0,279

Tabela C2: Resultados da rugosidade em função dos valores de avanço e SSV para amostra de 90 mm com a P1

Pastilha P1				Ra (μm)				RSm (mm)			
Ensaio	f (mm/rot)	n (rpm)	SSV	E1	E2	E3	Ra Médio	E1	E2	E3	RSm Médio
19	0,1	1400	s/ SSV	2,319	2,624	2,611	2,518	0,135	0,159	0,158	0,151
20	0,2	1400		2,603	2,441	2,31	2,451	0,161	0,162	0,193	0,172
21	0,4	1400		5,113	5,226	5,029	5,123	0,391	0,389	0,391	0,390
22	0,1	1400	c/ SSV	2,319	2,624	2,443	2,462	0,141	0,142	0,138	0,140
23	0,2	1400		3,168	2,439	2,495	2,701	0,167	0,161	0,156	0,161
24	0,4	1400		4,735	4,755	4,586	4,692	0,392	0,318	0,355	0,355

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
f (mm/rot)	2	33,4493	16,7246	791,02	0,000
Error	6	0,1269	0,0211		
Total	8	33,5761			

Figura C1: Relatório ANOVA para rugosidade com SSV, para P1 na amostra de aço de 61 mm

Means

f (mm/rot)	N	Mean	StDev	95% CI
0,1	3	1,1840	0,0541	(0,9786; 1,3894)
0,2	3	2,0337	0,0961	(1,8282; 2,2391)
0,4	3	5,632	0,226	(5,426; 5,837)

Pooled StDev = 0,145407

Figura C2: Valores médios com os máximos e mínimos de rugosidade com SSV, para a variação do avanço s/FC, com P1 na amostra de aço de 61 mm

Analysis of Variance for Ra (μm)

Source	DF	SS	MS	F	P
S/SSV e C/SSV	1	0,0466	0,0466	3,49	0,086
f (mm/rot)	2	58,6770	29,3385	2199,49	0,000
S/SSV e C/SSV*f (mm/rot)	2	0,4653	0,2327	17,44	0,000
Error	12	0,1601	0,0133		
Total	17	59,3490			

Figura C3: Relatório ANOVA para rugosidade Ra com interação entre os valores de com e sem SSV e do avanço, para P1 na amostra de aço de 61 mm

Tukey Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

f (mm/rot)	N	Mean	Grouping
0,4	3	5,632	A
0,2	3	2,0337	B
0,1	3	1,1840	C

Means that do not share a letter are significantly different.

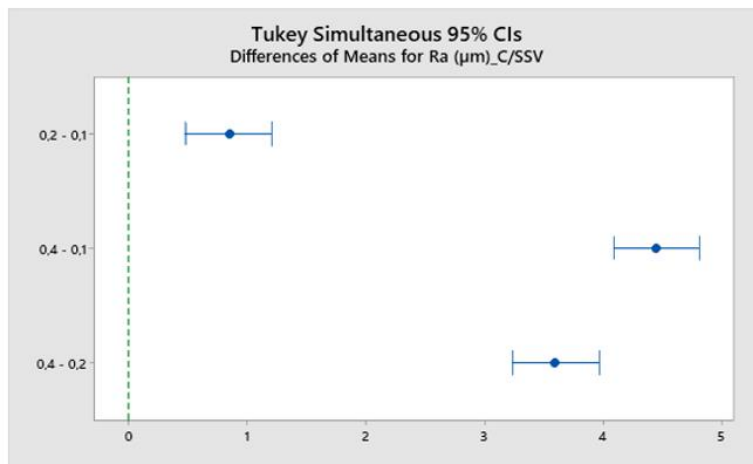


Figura C4: Teste de Tukey, comparação de pares para valores de avanço com SSV segundo a rugosidade, sem FC com P1 na amostra de 61 mm (Fonte: Minitab)

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
f (mm/rot)	2	13,9248	6,96238	342,09	0,000
Error	6	0,1221	0,02035		
Total	8	14,0469			

Figura C5: Relatório ANOVA para rugosidade sem SSV, na amostra de aço de 90 mm com P1 (Fonte: Minitab)

Means

f (mm/rot)	N	Mean	StDev	95% CI
0,1	3	2,5180	0,1725	(2,3165; 2,7195)
0,2	3	2,4513	0,1468	(2,2498; 2,6529)
0,4	3	5,1227	0,0989	(4,9211; 5,3242)

Pooled StDev = 0,142662

Figura C6: Valores médios com os máximos e mínimos de rugosidade sem SSV, para a variação do avanço s/FC com P1 na amostra de aço de 90 mm

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
f (mm/rot)	2	8,8393	4,41966	73,53	0,000
Error	6	0,3606	0,06011		
Total	8	9,2000			

Figura C7: Relatório ANOVA para rugosidade com SSV, na amostra de aço de 90 mm com P1

Means

f (mm/rot)	N	Mean	StDev	95% CI
0,1	3	2,4940	0,0849	(2,1476; 2,8404)
0,2	3	2,701	0,406	(2,354; 3,047)
0,4	3	4,6920	0,0923	(4,3456; 5,0384)

Pooled StDev = 0,245165

Figura C8: Valores médios com os máximos e mínimos de rugosidade com SSV, para a variação do avanço s/FC com P1 na amostra de aço de 90 mm

Tukey Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

f (mm/rot)	N	Mean	Grouping
0,4	3	5,1227	A
0,1	3	2,5180	B
0,2	3	2,4513	B

Means that do not share a letter are significantly different.

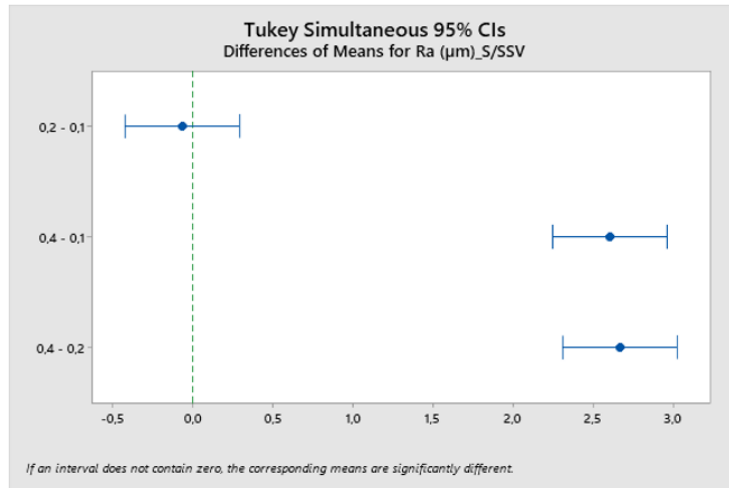


Figura C9: Teste de Tukey, comparação de pares para valores de avanço sem SSV segundo a rugosidade, sem FC para P1 na amostra de 90 mm

Tukey Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

f (mm/rot)	N	Mean	Grouping
0,4	3	4,6920	A
0,2	3	2,701	B
0,1	3	2,4940	B

Means that do not share a letter are significantly different.

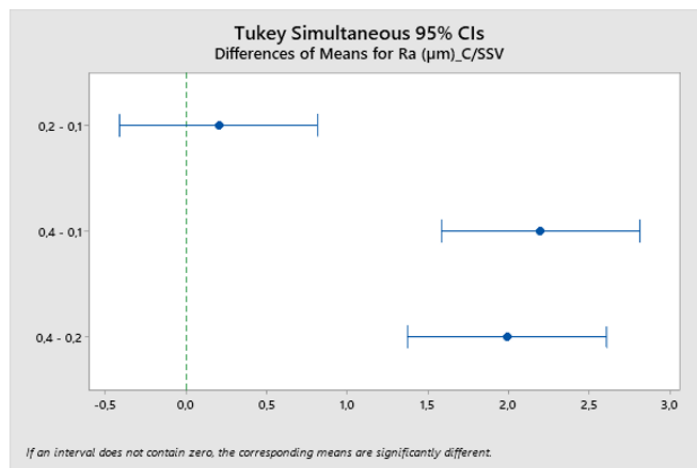


Figura C10: Teste de Tukey, comparação de pares para valores de avanço com SSV segundo a rugosidade, sem FC para P1 na amostra de 90 mm

APÊNDICE D: Complemento da análise de $Ra = f(f, P2, FC, SSV)$

Os resultados, relatórios Minitab e testes de Tukey são apresentados nas tabelas e figuras seguintes.

Tabela D1: Resultados da rugosidade em função dos valores de avanço, com SSV para as amostras de 61 mm comprimento com P2, sem e com FC

Pastilha P2			Ra (μm)				RSm (mm)				
Ensaio	f (mm/rot)	n (rpm)	FC	E1	E2	E3	Ra Médio	E1	E2	E3	RSm Médio
43	0,1	1400	s/FC	2,124	2,059	2,23	2,138	0,138	0,117	0,13	0,128
44	0,2	1400		2,456	2,683	2,369	2,503	0,187	0,195	0,177	0,186
45	0,4	1400		4	5,161	5,054	4,738	0,387	0,386	0,386	0,386
46	0,1	1400	c/FC	2,236	2,348	2,365	2,316	0,118	0,123	0,143	0,128
47	0,2	1400		2,695	2,783	2,506	2,661	0,206	0,154	0,167	0,176
48	0,4	1400		4,51	4,635	4,829	4,658	0,389	0,355	0,389	0,378

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
f (mm/rot)	2	11,8949	5,9474	40,05	0,000
Error	6	0,8909	0,1485		
Total	8	12,7858			

Figura D1: Relatório ANOVA para a $Ra = f(f, P2, s/FC)$ na amostra de aço de 61 mm e com SSV

Means

f (mm/rot)	N	Mean	StDev	95% CI
0,1	3	2,1377	0,0863	(1,5933; 2,6820)
0,2	3	2,5027	0,1621	(1,9583; 3,0470)
0,4	3	4,738	0,642	(4,194; 5,283)

Pooled StDev = 0,385334

Figura D2: Valores médios com os máximos e mínimos de rugosidade sem FC, para a variação do avanço com SSV, com a P2 na amostra de aço de 61 mm

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
f (mm/rot)	2	9,5891	4,79455	283,25	0,000
Error	6	0,1016	0,01693		
Total	8	9,6907			

Figura D3: Relatório ANOVA de $Ra = f(f, P2, c/FC)$ na amostra de aço de 61 mm, c/SSV

Means

f (mm/rot)	N	Mean	StDev	95% CI
0,1	3	2,3163	0,0701	(2,1325; 2,5001)
0,2	3	2,6613	0,1415	(2,4775; 2,8451)
0,4	3	4,6580	0,1607	(4,4742; 4,8418)

Pooled StDev = 0,130105

Figura D4: Valores médios com os máximos e mínimos de rugosidade com FC, para a variação do avanço com SSV, com a P2 na amostra de aço de 61 mm

Analysis of Variance for Ra (μm)

Source	DF	SS	MS	F	P
S/FC e C/FC	1	0,0330	0,0330	0,40	0,539
f (mm/rot)	2	21,4217	10,7109	129,51	0,000
S/FC e C/FC*f (mm/rot)	2	0,0623	0,0312	0,38	0,694
Error	12	0,9925	0,0827		
Total	17	22,5095			

Figura D5: Relatório ANOVA Ra = f (f, P2, s/FC, c/FC) na amostra de aço de 61 mm, com SSV

Tukey Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

f (mm/rot)	N	Mean	Grouping
0,4	3	4,738	A
0,2	3	2,5027	B
0,1	3	2,1377	B

Means that do not share a letter are significantly different.

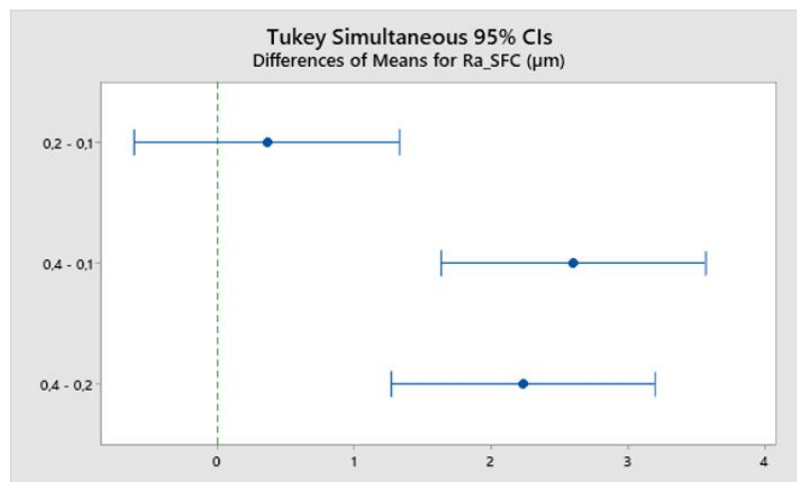


Figura D6: Teste de Tukey, comparação de pares para valores de avanço sem FC segundo a rugosidade, para P2 na amostra de 61 mm com SSV

Tukey Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

f (mm/rot)	N	Mean	Grouping
0,4	3	4,6580	A
0,2	3	2,6613	B
0,1	3	2,3163	C

Means that do not share a letter are significantly different.

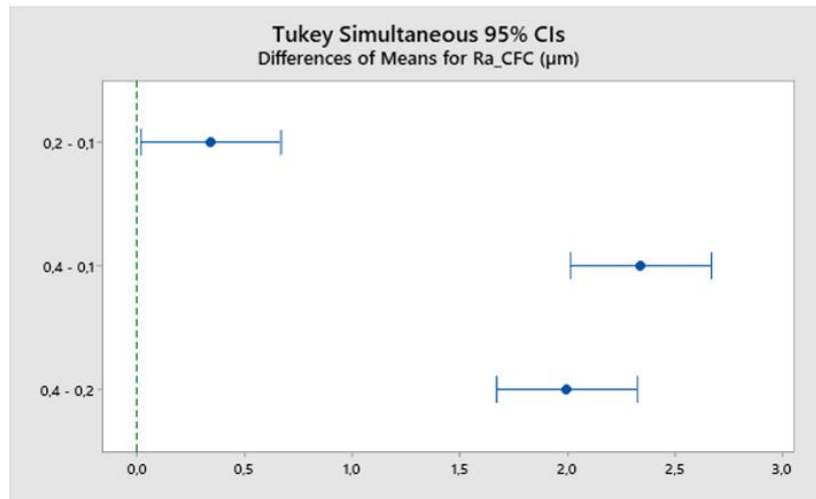


Figura D7: Teste de Tukey, comparação de pares para valores de avanço com FC segundo a rugosidade, para P2 na amostra de 61 mm com SSV

APÊNDICE E: Complemento da análise de $Ra = f(f, SSV, P2, L)$

Os resultados, relatórios Minitab e testes de Tukey são apresentados nas tabelas e figuras seguintes.

Tabela E1: Resultados da rugosidade em função dos valores de avanço sem e com SSV, nas amostras de 61 mm com P2 e sem FC

Pastilha P2				Ra (μm)				RSm (mm)			
Ensaio	f (mm/rot)	n (rpm)	SSV	E1	E2	E3	Ra Médio	E1	E2	E3	RSm Médio
25	0,1	1400	s/SSV	2,214	2,103	2,257	2,191	0,11	0,118	0,119	0,116
26	0,2	1400		2,881	2,704	2,755	2,78	0,178	0,17	0,176	0,175
27	0,4	1400		4,625	4,762	5,095	4,827	0,355	0,39	0,388	0,378
28	0,1	1400	c/SSV	2,124	2,059	2,23	2,138	0,138	0,117	0,13	0,128
29	0,2	1400		2,456	2,683	2,369	2,503	0,187	0,195	0,177	0,186
30	0,4	1400		4	5,161	5,054	4,738	0,387	0,386	0,386	0,386

Tabela E2: Resultados da rugosidade em função dos valores de avanço sem e com SSV, nas amostras de 120 mm com P2 e sem FC

Pastilha P2				Ra (μm)				RSm (mm)			
Ensaio	f (mm/rot)	n (rpm)	SSV	E1	E2	E3	Ra Médio	E1	E2	E3	RSm Médio
31	0,1	1400	s/ SSV	2,514	2,187	2,556	2,419	0,13	0,146	0,194	0,157
32	0,2	1400		2,556	2,07	2,425	2,350	0,194	0,16	0,159	0,171
33	0,4	1400		4,61	4,748	4,581	4,646	0,388	0,389	0,384	0,387
34	0,1	1400	c/ SSV	2,136	1,959	2,386	2,160	0,138	0,14	0,156	0,145
35	0,2	1400		2,131	2,019	1,898	2,016	0,159	0,173	0,169	0,167
36	0,4	1400		4,793	4,834	4,731	4,786	0,392	0,391	0,392	0,392

Tabela E3: Resultados da rugosidade em função dos valores de avanço sem e com SSV, nas amostras de 200 mm com P2 e sem FC

Pastilha P2				Ra (μm)				RSm (mm)			
Ensaio	f (mm/rot)	n (rpm)	SSV	E1	E2	E3	Ra Médio	E1	E2	E3	RSm Médio
37	0,1	1400	s/ SSV	3,331	3,644	3,034	3,336	0,225	0,247	0,189	0,220
38	0,2	1400		2,338	2,343	2,277	2,319	0,182	0,183	0,167	0,177
39	0,4	1400		4,718	4,681	4,268	4,556	0,391	0,386	0,324	0,367
40	0,1	1400	c/ SSV	5,856	5,833	4,717	5,469	0,455	0,446	0,398	0,433
41	0,2	1400		2,094	2,128	2,282	2,168	0,154	0,157	0,184	0,165
42	0,4	1400		4,599	4,552	4,32	4,490	0,386	0,351	0,386	0,374

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
f (mm/rot)	2	10,2373	5,11867	137,11	0,000
Error	6	0,2240	0,03733		
Total	8	10,4613			

Figura E1: Relatório ANOVA para rugosidade sem SSV, para a P2 na amostra de aço de 120 mm e s/FC

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
f (mm/rot)	2	7,5222	3,76112	71,96	0,000
Error	6	0,3136	0,05227		
Total	8	7,8359			

Figura E2: Relatório ANOVA para rugosidade sem SSV, para a P2 na amostra de aço de 200 mm e s/FC

Means

f (mm/rot)	N	Mean	StDev	95% CI
0,1	3	2,419	0,202	(2,146; 2,692)
0,2	3	2,350	0,251	(2,077; 2,623)
0,4	3	4,6463	0,0892	(4,3734; 4,9193)

Pooled StDev = 0,193220

Figura E3: Valores médios com os máximos e mínimos da rugosidade sem SSV, para a variação do avanço, com a P2 na amostra de aço de 120 mm, s/FC

Means

f (mm/rot)	N	Mean	StDev	95% CI
0,1	3	3,336	0,305	(3,013; 3,659)
0,2	3	2,3193	0,0367	(1,9964; 2,6423)
0,4	3	4,556	0,250	(4,233; 4,879)

Pooled StDev = 0,228621

Figura E4: Valores médios com os máximos e mínimos da rugosidade sem SSV, para a variação do avanço, com a P2 na amostra de aço de 200 mm, s/FC

Means

f (mm/rot)	N	Mean	StDev	95% CI
0,1	3	2,1377	0,0863	(1,5933; 2,6820)
0,2	3	2,5027	0,1621	(1,9583; 3,0470)
0,4	3	4,738	0,642	(4,194; 5,283)

Pooled StDev = 0,385334

Figura E5: Valores médios com os máximos e mínimos da rugosidade com SSV, para a variação do avanço, com a P2 na amostra de aço de 61 mm, s/FC

Means

f (mm/rot)	N	Mean	StDev	95% CI
0,1	3	2,160	0,215	(1,957; 2,364)
0,2	3	2,0160	0,1165	(1,8124; 2,2196)
0,4	3	4,7860	0,0519	(4,5824; 4,9896)

Pooled StDev = 0,144100

Figura E6: Valores médios com os máximos e mínimos da rugosidade com SSV, para a variação do avanço, com a P2 na amostra de aço de 120 mm, s/FC

Means

f (mm/rot)	N	Mean	StDev	95% CI
0,1	3	5,469	0,651	(4,918; 6,020)
0,2	3	2,1680	0,1002	(1,6171; 2,7189)
0,4	3	4,4903	0,1494	(3,9394; 5,0413)

Pooled StDev = 0,389971

Figura E7: Valores médios com os máximos e mínimos da rugosidade com SSV, para a variação do avanço, com a P2 na amostra de aço de 200 mm, s/FC

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
f (mm/rot)	2	11,8949	5,9474	40,05	0,000
Error	6	0,8909	0,1485		
Total	8	12,7858			

Figura E8: ANOVA para rugosidade com SSV, para a P2 na amostra de aço de 61 mm e s/FC

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
f (mm/rot)	2	14,5879	7,29393	351,26	0,000
Error	6	0,1246	0,02076		
Total	8	14,7124			

Figura E9: Relatório ANOVA para rugosidade com SSV, para a P2 na amostra de aço de 120 mm e s/FC

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
f (mm/rot)	2	17,2448	8,6224	56,70	0,000
Error	6	0,9125	0,1521		
Total	8	18,1572			

Figura E10: Relatório ANOVA para rugosidade com SSV, para a P2 na amostra de aço de 200 mm e s/FC

Tukey Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

f (mm/rot)	N	Mean	Grouping
0,4	3	4,827	A
0,2	3	2,7800	B
0,1	3	2,1913	C

Means that do not share a letter are significantly different.

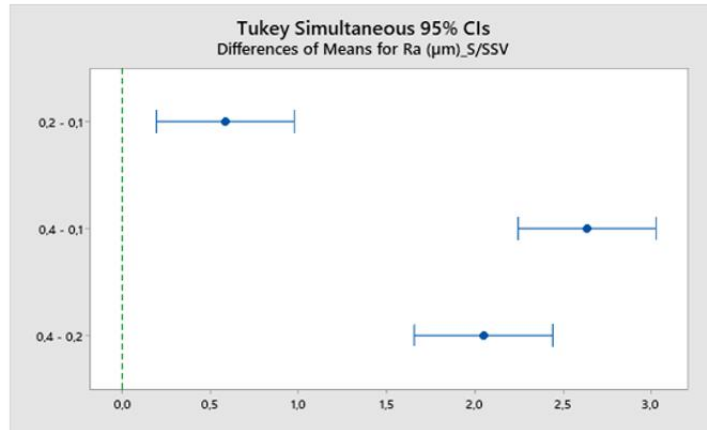


Figura E11: Teste de Tukey, comparação de pares para valores de avanço sem SSV segundo a rugosidade, na amostra de 61 mm com P2, s/FC

Tukey Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

f (mm/rot)	N	Mean	Grouping
0,4	3	4,738	A
0,2	3	2,5027	B
0,1	3	2,1377	B

Means that do not share a letter are significantly different.

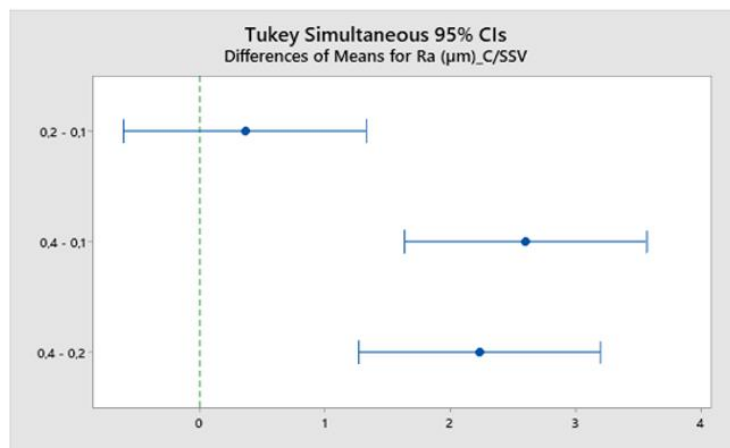


Figura E12: Teste de Tukey, comparação de pares para valores de avanço com SSV segundo a rugosidade, na amostra de 61 mm com P2, s/FC

Tukey Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

f (mm/rot)	N	Mean	Grouping
0,4	3	4,6463	A
0,1	3	2,419	B
0,2	3	2,350	B

Means that do not share a letter are significantly different.

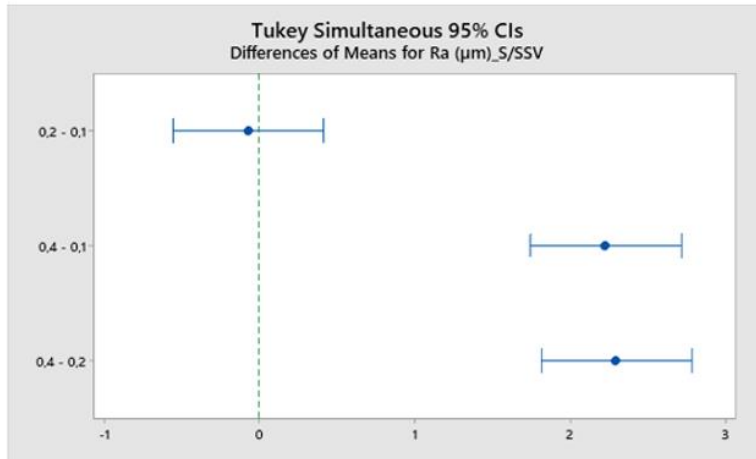


Figura E13: Teste de Tukey, comparação de pares para valores de avanço sem SSV segundo a rugosidade, na amostra de 120 mm com P2, s/FC

Tukey Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

f (mm/rot)	N	Mean	Grouping
0,4	3	4,7860	A
0,1	3	2,160	B
0,2	3	2,0160	B

Means that do not share a letter are significantly different.

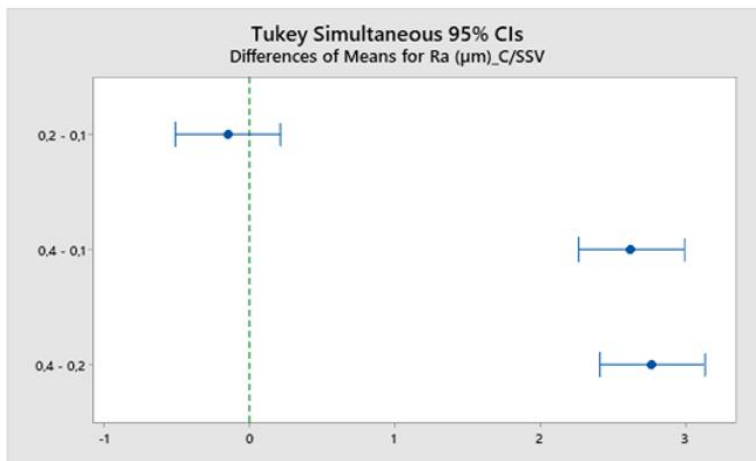


Figura E14: Teste de Tukey, comparação de pares para valores de avanço com SSV segundo a rugosidade, na amostra de 120 mm com P2, s/FC

Tukey Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

f (mm/rot)	N	Mean	Grouping
0,4	3	4,556	A
0,1	3	3,336	B
0,2	3	2,3193	C

Means that do not share a letter are significantly different.

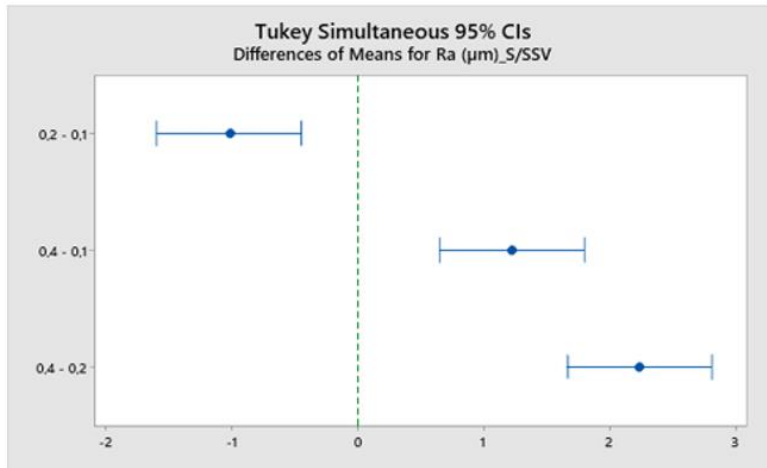


Figura E15: Teste de Tukey, comparação de pares para valores de avanço sem SSV segundo a rugosidade, na amostra de 200 mm com P2, s/FC

Tukey Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

f (mm/rot)	N	Mean	Grouping
0,1	3	5,469	A
0,4	3	4,4903	B
0,2	3	2,1680	C

Means that do not share a letter are significantly different.

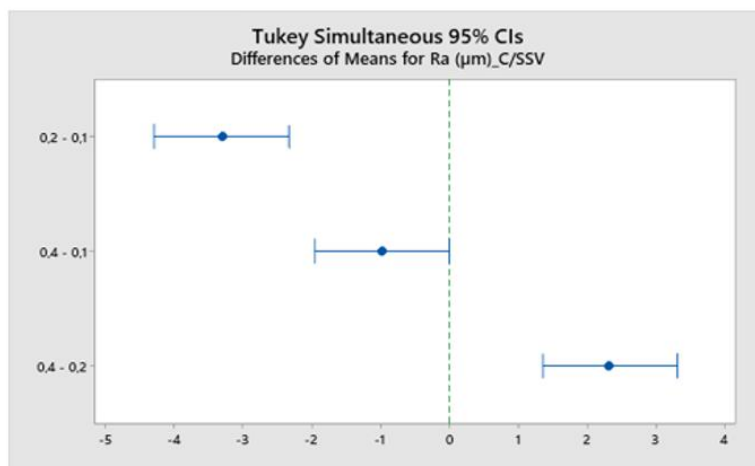


Figura E16: Teste de Tukey, comparação de pares para valores de avanço com SSV segundo a rugosidade, na amostra de 200 mm com P2, s/FC

APÊNDICE F: Complemento da análise de $R_a = f(f, P1 \text{ e } P2)$ no alumínio

Os resultados, relatórios Minitab e testes de Tukey são apresentados nas tabelas e figuras seguintes.

Tabela F1: Resultados dos ensaios $R_a = f(f, P1, P2)$, para amostra de alumínio com 61mm

Al 6082				Ra (μm)				RSm (mm)			
Ensaio	f (mm/rot)	n (rpm)	Pastilha	E1	E2	E3	Ra Médio	E1	E2	E3	RSm Médio
49	0,1	1400	P1	0,471	0,324	0,276	0,357	0,122	0,081	0,065	0,089
50	0,2	1400		1,056	1,086	1,094	1,079	0,174	0,175	0,166	0,172
51	0,4	1400		3,943	4,006	3,913	3,954	0,349	0,35	0,349	0,349
52	0,1	1400	P2	0,324	0,307	0,302	0,311	0,112	0,118	0,098	0,109
53	0,2	1400		1,25	1,253	1,21	1,238	0,195	0,195	0,196	0,195
54	0,4	1400		5,319	5,409	5,374	5,367	0,389	0,39	0,389	0,389

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
f (mm/rot)	2	21,7268	10,8634	2511,31	0,000
Error	6	0,0260	0,0043		
Total	8	21,7527			

Figura F1: Relatório ANOVA para rugosidade R_a , com a P1 na amostra de alumínio com 61 mm

Means

f (mm/rot)	N	Mean	StDev	95% CI
0,1	3	0,3570	0,1016	(0,2641; 0,4499)
0,2	3	1,0787	0,0200	(0,9858; 1,1716)
0,4	3	3,9540	0,0475	(3,8611; 4,0469)

Pooled StDev = 0,0657706

Figura F2: Valores médios com os máximos e mínimos de rugosidade, para a variação do avanço, com a P1 na amostra de alumínio de 61 mm

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
f (mm/rot)	2	43,4708	21,7354	24492,14	0,000
Error	6	0,0053	0,0009		
Total	8	43,4762			

Figura F3: Relatório ANOVA para rugosidade, com a P2 na amostra de alumínio com 61 mm

Means

f (mm/rot)	N	Mean	StDev	95% CI
0,1	3	0,31100	0,01153	(0,26891; 0,35309)
0,2	3	1,2390	0,0217	(1,1969; 1,2811)
0,4	3	5,3673	0,0454	(5,3252; 5,4094)

Pooled StDev = 0,0297900

Figura F4: Valores médios com os máximos e mínimos de rugosidade, para a variação do avanço, com a P2 na amostra de alumínio de 61 mm

Tukey Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

f (mm/rot)	N	Mean	Grouping
0,4	3	3,9540	A
0,2	3	1,0787	B
0,1	3	0,3570	C

Means that do not share a letter are significantly different.

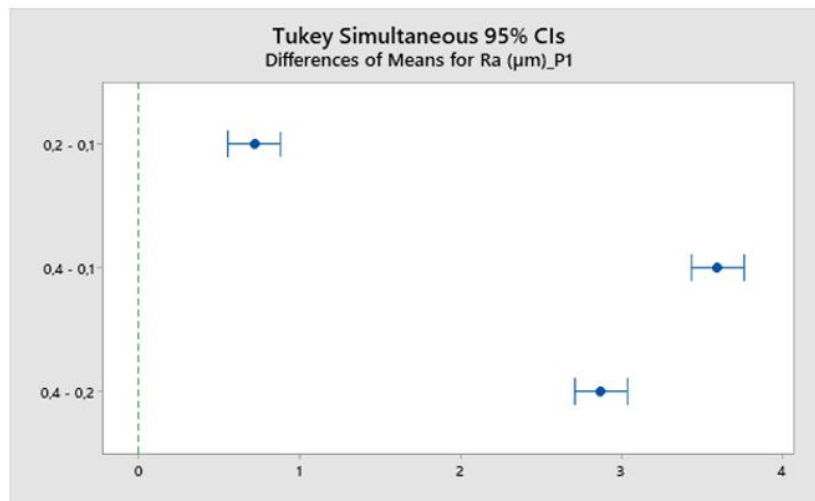


Figura F5: Teste de Tukey, comparação de pares para valores de avanço segundo a rugosidade, na amostra de alumínio com P1

Tukey Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

f (mm/rot)	N	Mean	Grouping
0,4	3	5,3673	A
0,2	3	1,2390	B
0,1	3	0,31100	C

Means that do not share a letter are significantly different.

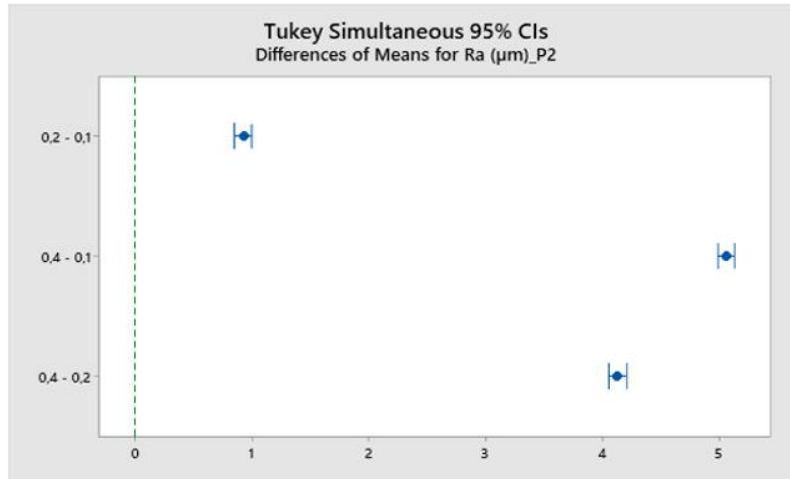


Figura F6: Teste de Tukey, comparação de pares para valores de avanço segundo a rugosidade, na amostra de alumínio com P2

Apêndice I – Código de CNC ensaio 1A

TESTE 30-6-2020 V3.nc

```
%
O00042 (xxxxx)
( SAFETY LINE BELOW )
G00 G54 G18 G40 G80 G97 G99
( TOOL = 1 / OFFSET = 1 )
( MAXIMUM SPINDLE RPM = 1800 )
( SURFACE SPEED SPEED = 500 )
( WORK OFFSET = 54 )
(OD FINISH TOOL PATH)
T101
G54
G50 S1800
G97 S1000 M03
G00 Z5.

G00 X35. Z5.
G40 X29. Z5. F0.1
G01 X29. Z0.

G01 X29. Z-10.
G01 X28. Z-11.
G01 X29. Z-12.

S1400

G01 X29. Z-22.
G01 X28. Z-23.
G01 X29. Z-24.

S1800.

G01 X29. Z-34.
G01 X28. Z-35.
G01 X29. Z-36.

G00 G53 X0.
W200.
M01

T101
G50 S1800
G97 S1800 M03

M08

G00 X29. Z-36.
G01 F0.1 X29. Z-46.
G01 X28. Z-47.
G01 X29. Z-48.

S1000

G01 X29. Z-58.
G01 X35. Z-58.
G01 G40 X35. Z-58.

G00 X35. Z5.
M09

G00 G53 X0.
G00 G53 Z0.
M05

T404; operação de sangrar
G50 S1500
G97 S600 M03
G00 X50.
G00 Z5.08
G00 X40.16
M08
G96 S50
G00 Z-61.
G75 I2. X0. F0.1
G00 X40.16
G00 Z5.08
G97 S600
M09
G00 X100.
G00 Z200.
M05
( END OF CYCLE )
M30

%
```

Apêndice II – Código de CNC ensaio 1B

TESTE30-6-2020.nc

```
%
O00040 (xxxxx)
( SAFETY LINE BELOW )
G00 G54 G18 G40 G80 G97 G99
( TOOL = 1 / OFFSET = 1 )
( MAXIMUM SPINDLE RPM = 1800 )
( SURFACE SPEED SPEED = 500 )
( WORK OFFSET = 54 )
(DIAMETRO 30 UTIL 51.)
(OD FINISH TOOL PATH)
T101
G54

M38

G50 S1800
G97 S1400 M03
G00 Z5.

G00 X35. Z5.
G40 X29. Z5. F0.1
G01 X29. Z0.

G01 X29. Z-10.
G01 X28. Z-11.
G01 X29. Z-12.

S1400

G01 X29. Z-22. F0.2
G01 X28. Z-23.
G01 X29. Z-24.

S1400

G01 X29. Z-34. F0.4
G01 X28. Z-35.
G01 X29. Z-36.

G00 X29. Z-36.
G01 X29. Z-46. F0.7
G01 X28. Z-47.
G01 X29. Z-48.

G00 X50. Z150.

M39
T404
G50 S1500
G97 S600 M03
G00 X50.
G00 Z5.08
G00 X40.16
M08
G96 S50
G00 Z-51.
G75 I2. X0. F0.1
G00 X40.16
G00 Z5.08
G97 S600
M09
G00 X100.
G00 Z200.
M05
( END OF CYCLE )
M30

%
```