



Universidade de Aveiro
2022

**Hélder Manuel
Domingues
Baptista Morais**

**Definição de Parâmetros de Corte e Estratégias de
Maquinagem de Vidro Cristal**



Universidade de Aveiro
2022

**Hélder Manuel
Domingues
Baptista Morais**

Definição de Parâmetros de Corte e Estratégias de Maquinagem de Vidro Cristal

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Produto e Tecnologia Digital, realizada sob a orientação científica do Doutor Ricardo Nuno de Oliveira Bastos Torcato da Escola Superior de Design, Gestão e Tecnologias da Produção de Aveiro-Norte da Universidade de Aveiro

Apoio financeiro do Portugal 2020 Programa Operacional Competitividade e Internacionalização no âmbito do projeto CRISTAL ECO PREMIUM (POCI-01-0247-FEDER-047101), liderado pela empresa Vista Alegre Atlantis, S.A.

o júri

presidente

Prof. Doutor Daniel Gil Afonso

Professor Adjunto da Escola Superior de Design, Gestão e Tecnologias da Produção de Aveiro-Norte da Universidade de Aveiro

Vogais

Prof. Doutor Victor Fernando Santos Neto

Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Ricardo Nuno Oliveira Bastos Torcato

Professor Adjunto da Escola Superior de Design, Gestão e Tecnologias da Produção de Aveiro-Norte da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Agradeço ao Professor Ricardo Torcato pela orientação, disponibilidade e confiança transmitida.

Ao meu amigo Filipe Martins pelo apoio, paciência, dedicação e ajuda.

À Escola superior Aveiro Norte, pelo acolhimento e disponibilidade que possibilitou concluir mais esta etapa na minha vida.

À Ana Martins pelo apoio e paciência especialmente nos momentos mais difíceis.

À minha família pelo apoio, compreensão, e também por me ajudarem a ser, a cada dia, uma pessoa melhor.

A todos os meus amigos, principalmente aos que estiveram sempre presentes, mostrando a sua verdadeira amizade.

palavras-chave

Vidro Cristal, Maquinagem, Parâmetros de corte, Forças de corte, Rugosidade

resumo

Na Vista Alegre Atlantis o processo de acabamento de peças em vidro cristal é, na maioria das peças, realizado manualmente. Contudo, a empresa tem dificuldade em recrutar mão de obra especializada e o processo é demorado. Neste contexto, o recurso à maquinagem por Controlo Numérico Computorizado (CNC) pode ser uma boa alternativa, já que apresenta características de precisão e repetibilidade difíceis de alcançar por outros processos. Os estudos existentes na literatura demonstram que a maquinagem CNC de vidro cristal se encontra numa fase embrionária. Assim este trabalho pretende compreender qual a conjugação de parâmetros de corte que permitem uma melhor relação entre o acabamento superficial, as forças de corte e o tempo de maquinagem do vidro cristal, avaliar o desgaste das ferramentas e comparar a maquinagem convencional com a maquinagem com auxílio de ultrassons, procurando perceber qual permite melhor acabamento superficial. Para realizar o estudo da otimização das forças de corte e da rugosidade superficial é utilizado o método de Taguchi com uma matriz ortogonal padrão L9, permitindo reduzir o número de ensaios a realizar. Este processo é orientado pela análise de resposta sinal-ruído (S/N) e através da análise de variância, determinando quais os parâmetros estatisticamente significativos. A maioria das ferramentas testadas perdem rugosidade ao longo da utilização, com exceção das ferramentas Schott. A rugosidade superficial produzida pelo método com auxílio de ultrassons é tendencialmente mais reduzida do que a produzida com o método convencional. É possível maquinar uma escultura de geometria complexa com as ferramentas estudadas, contudo mais estudos devem ser desenvolvidos para perceber quais os parâmetros ótimos de modo a reduzir o tempo de maquinagem.

keywords

Crystal Glass, Machining, Cutting parameters, Cutting Force, Surface roughness

abstract

At Vista Alegre Atlantis, the finishing process of crystal glass pieces is, for the most part, done manually. However, the company has difficulties in recruiting skilled labour and the process is time consuming. In this context, the use of Computer Numerical Control (CNC) machining can be a good alternative, since it presents characteristics of precision and repeatability difficult to achieve by other processes. The existing studies in the literature show that the CNC machining of crystal glass is in an embryonic phase. Thus, this work intends to understand which combination of cutting parameters allows a better relation between surface finishing, cutting forces and machining time of crystal glass, to evaluate tool wear and to compare conventional machining with machining with ultrasonic aid, trying to understand which allows better surface finishing. To perform the optimization study of the cutting forces and surface roughness, the Taguchi method is used with a standard orthogonal matrix L9, allowing reducing the number of tests to be performed. This process is guided by the signal-to-noise (S/N) response analysis and through the analysis of variance, determining which parameters are statistically significant. Most of the tools tested lose roughness throughout use with the exception of the Schott tools. The surface roughness produced by the ultrasonic-assisted method tends to be lower than that produced with the conventional method. It is possible to machine a sculpture of complex geometry with the tools studied, however further studies should be developed to understand which parameters are optimal in order to reduce machining time.

Índice

1	Introdução	1
1.1	Contextualização	1
1.2	Questão de investigação	1
1.3	Estrutura do documento	2
2	Revisão de literatura	3
2.1	CAD/CAM e maquinagem	3
2.2	Maquinagem com auxílio de ultrassons	8
2.3	Vidro Cristal	10
2.4	Ferramentas	12
2.5	Lubrificação	13
2.6	Medição de forças de corte	14
2.7	Medição do acabamento superficial.....	16
2.8	Método de Taguchi.....	19
3	Materiais e métodos	21
3.1	Vidro cristal superior.....	21
3.2	Estudo dos parâmetros de corte	21
3.2.1	Ferramentas	21
3.2.2	Parâmetros de corte	25
3.2.3	Procedimento de maquinagem	28
3.2.4	Avaliação das forças de corte	29
3.2.5	Avaliação da superfície maquinada	29
3.2.6	Avaliação do desgaste da ferramenta.....	30
3.3	Estratégias de maquinagem da escultura.....	31
3.3.1	Modelo da peça em 3D	31
3.3.2	Aperto do bloco em vidro cristal	32
3.3.3	Programação CAM.....	32
3.3.4	Ferramentas	32
3.3.5	Controlo dimensional.....	33
4	Parâmetros de corte.....	34
4.1	Maquinagem convencional.....	34
4.1.1	Resultados experimentais convencional	34
4.1.2	Otimização da força de corte	40
4.1.3	Otimização da rugosidade superficial	42
4.2	Maquinagem com auxílio de ultrassons.....	43
4.2.1	Resultados experimentais com auxílio de ultrassons	43

4.2.2	Otimização das forças com auxílio de ultrassons	49
4.2.3	Otimização da rugosidade superficial com auxílio de ultrassons.....	51
4.3	Avaliação do desgaste da ferramenta.....	52
4.4	Comparação método convencional com auxílio de ultrassons	61
4.5	Comparação entre ferramentas	65
5	Maquinagem da escultura.....	71
5.1	Aperto, centragem e maquinagem	71
5.2	Programas CAM	71
5.3	Peça maquinada.....	83
5.4	Controlo dimensional.....	85
6	Conclusões e trabalhos futuros	87
6.1	Conclusões.....	87
6.2	Sugestão de trabalho futuro	88
	Bibliografia.....	89
	Anexos.....	96

Índice de figuras

Figura 1 Esquema do processo para a programação CAM [5].....	4
Figura 2 Representação ae e ap [8].....	5
Figura 3 Estratégia de desbaste	6
Figura 4 Acabamento Contorno Z.....	7
Figura 5 Acabamento Cópia.....	7
Figura 6 Acabamento 3D Offset.....	7
Figura 7 Estratégia de acabamento inclinado e raso	8
Figura 8 Estratégia <i>Multi Pencil Corner</i> [14]	8
Figura 9 Esquema de funcionamento RUM [21].....	9
Figura 10 Brocas, escareadores e fresas para a maquinagem do vidro [39]	12
Figura 11 Esquema de sensor piezoelétrico para medição de força [1].....	15
Figura 12 Dinamómetro Kistler 9139AA.....	16
Figura 13 Esquema de funcionamento do rugosímetro Time TR220 [71].....	18
Figura 14 Apalpador + Stylus (TS100 Pickup) [71].....	18
Figura 15 - Dimensões gerais e imagens das ferramentas Effgen20 (a), Effgen10 (b), Effgen6 e Effgen6D46 (c), Schott20 (d), Schott10 (e), Schott6 (f), SchottHM10 (g), SchottHM6 (h), Besdia10 (i), Besdia6 (j), Pferd10 (l), Pferd6 (m).	23
Figura 16 (a) Cone BDV40-HMC20S-85.....	23
Figura 17 Cone com auxílio de ultrassons (Acrow Ultrasonic)	24
Figura 18 Gerador de ultrassons.....	25
Figura 19 Estratégia " <i>Slot milling</i> "	25
Figura 20 Provette colocado sobre a superfície do dinamómetro	29
Figura 21 Rugosímetro TR220.....	30
Figura 22 Digitalização de uma ferramenta	30
Figura 23 Perfilómetro Sensofar S-neox 3D Optical profiler [85].	31
Figura 24 Modelo da escultura.....	31
Figura 25 Exemplo de bloco fixo com a base à prensa	32
Figura 26- Dimensões em mm e imagens da ferramenta Fis32 (a), Effgen20 (b), Schott10 (c), SchottHM6 (d), Fis4 (e), Fis2 (f), Fis1 (g), Effgen6 (esférica) (h), Fis4 (esférica) (i), Fis2 (esférica) (j)	33
Figura 27 Gráficos DynoWare para os diferentes ensaios fresa Effgen20.....	34
Figura 28 Gráfico curva de S/N de cada parâmetro para os ensaios de força resultante Effgen20.....	41
Figura 29 Gráfico Curva de S/N para cada parâmetro para rugosidade superficial Effgen20	42
Figura 30 Gráficos DynoWare para os diferentes ensaios fresa Effgen20U	44
Figura 31 Gráfico curva de S/N para cada parâmetro para os ensaios de força resultante Effgen20U	50
Figura 32 Gráfico Curva de S/N para cada parâmetro para rugosidade superficial Effgen20U.....	51
Figura 33 Ferramenta Effgen20 após os ensaios	53
Figura 34 Ferramenta Effgen10 após os ensaios	53
Figura 35 Ferramenta Effgen6 após os ensaios	54
Figura 36 Ferramenta Effgen6D46 após os ensaios	54
Figura 37 Ferramenta Schott20 após os ensaios	55
Figura 38 Ferramenta Schott10 após os ensaios	55
Figura 39 Ferramenta Schott6 após os ensaios	56
Figura 40 Ferramenta SchottHM10 após os ensaios.....	56
Figura 41 Ferramenta SchottHM6 após os ensaios.....	57
Figura 42 Esquema de medição das ferramentas	58
Figura 43 (a) Ferramenta Besdia10 após os ensaios convencional.....	58
Figura 44 (a) Ferramenta Besdia6 após os ensaios convencional.....	59
Figura 45 (a) Ferramenta Pferd10 após os ensaios convencionais	60

Figura 46 (a) Ferramenta Pferd6 após os ensaios convencionais	61
Figura 47 Forças máximas e mínimas para o método convencional e com auxílio de ultrassons..	66
Figura 48 Rugosidades máximas e mínimas para o método convencional e com auxílio de ultrassons	67
Figura 49 Rugosidades das ferramentas nas várias etapas.....	68
Figura 50 Custo de aquisição das ferramentas	68
Figura 51 Desbaste da ferramenta de Ø32 no plano A	71
Figura 52 Re-desbaste da ferramenta de Ø20 no plano A	72
Figura 53 Re-desbaste da ferramenta de Ø10 no plano A	72
Figura 54 Re-desbaste da ferramenta de Ø20 no plano B	73
Figura 55 Re-desbaste da ferramenta de Ø10 no plano B	74
Figura 56 Re-desbaste da ferramenta de Ø6 no plano B	74
Figura 57 Re-desbaste da ferramenta de Ø20 no plano C	74
Figura 58 Re-desbaste da ferramenta de Ø10 no plano C	75
Figura 59 Re-desbaste da ferramenta de Ø6 no plano C	75
Figura 60 Re-desbaste da ferramenta de Ø4 no plano B	75
Figura 61 Re-desbaste da ferramenta de Ø4 no plano C	75
Figura 62 Re-desbaste da ferramenta de Ø2 no plano B	76
Figura 63 Re-desbaste da ferramenta de Ø2 no plano C	76
Figura 64 Re-desbaste da ferramenta de Ø1 no plano B	77
Figura 65 Re-desbaste da ferramenta de Ø1 no plano C	77
Figura 66 Re-desbaste da ferramenta de Ø6 esférica no plano B	77
Figura 67 Re-desbaste da ferramenta de Ø6 esférica no plano C	78
Figura 68 Estratégia de pré-acabamento da ferramenta de Ø6 esférica no plano B	78
Figura 69 Estratégia de pré-acabamento da ferramenta de Ø6 esférica no plano C	78
Figura 70 Estratégia de acabamento da ferramenta de Ø6 esférica no plano B.....	79
Figura 71 Estratégia de acabamento da ferramenta de Ø6 esférica no plano C	79
Figura 72 Estratégia de acabamento da ferramenta de Ø4 esférica no plano B.....	80
Figura 73 Estratégia de acabamento da ferramenta de Ø4 esférica no plano C	80
Figura 74 Estratégia de acabamento da ferramenta de Ø4 esférica (0,15 mm) no plano B	80
Figura 75 Estratégia de acabamento da ferramenta de Ø4 esférica (0,15 mm) no plano C	81
Figura 76 Estratégia de acabamento da ferramenta de Ø2 esférica no plano B.....	81
Figura 77 Estratégia de acabamento da ferramenta de Ø2 esférica no plano C	81
Figura 78 Estratégia de acabamento inclinado e raso da ferramenta de Ø2 esférica no plano B ..	82
Figura 79 Estratégia de acabamento inclinado e raso da ferramenta de Ø2 esférica no plano C ..	82
Figura 80 Sequência de maquinagem da escultura	83
Figura 81 Peça final após maquinagem.....	84
Figura 82 Escultura após banho químico.....	85
Figura 83 Resultado da digitalização da escultura lado A	85
Figura 84 Resultado da digitalização da escultura lado B	86

Índice de Tabelas

Tabela 1 Comparação das propriedades do vidro com aço (GRANTA EduPack 2021)	11
Tabela 2 Parâmetros de ferramentas para maquinagem de vidro [40], [46], [47]	13
Tabela 3 Propriedade do lubrificante Shell Dromus [41]	14
Tabela 4 Resumo dos métodos de medição de rugosidade [61].....	16
Tabela 5 Matriz de Taguchi L9 de três fatores.....	19
Tabela 6 Matriz de Taguchi L9 de dois fatores	19
Tabela 7 Composição do vidro cristal superior (%)	21
Tabela 8 Valores do índice de refração, densidade e dureza do cristal superior	21
Tabela 9 Lista de ferramentas ensaiadas	22
Tabela 10 Correspondência da ferramenta com o cone.....	24
Tabela 11 Parâmetros indicativos fornecidos pelos fabricantes Effgen e Schott	26
Tabela 12 Parâmetros e níveis utilizados para os ensaios convencionais.....	26
Tabela 13 Matriz de Taguchi L9 utilizada para os ensaios convencionais	26
Tabela 14 Matriz de Taguchi L9.....	26
Tabela 15 Parâmetros e níveis usados para os ensaios com ferramentas de 6mm para o método convencional.....	27
Tabela 16 Diferentes parâmetros das ferramentas de 6mm para o método convencional	27
Tabela 17 Parâmetros e níveis para ensaios com ultrassons	27
Tabela 18 Matriz de Taguchi usada para os ensaios com auxílio ultrassons	27
Tabela 19 mostra a matriz L9 com os diferentes parâmetros com auxílio de Ultrassons	27
Tabela 20 Parâmetros e níveis para ensaios Ultrassons ferramenta 6mm.....	28
Tabela 21 Matriz de Taguchi L9 utilizada nos ensaios com auxílio de ultrassons	28
Tabela 22 Tempo de maquinagem dos ensaios	28
Tabela 23 Componentes mínimas de forças resultantes de corte Effgen20	35
Tabela 24 Componentes máximas de forças resultantes de corte Effgen20	35
Tabela 25 Valores de Ra para cada um dos provetes Effgen20	35
Tabela 26 Valores de Rz para cada um dos provetes Effgen20	35
Tabela 27 Tabela resumo das forças resultantes para as componentes negativas, positivas e de rugosidade Ra e Rz para a ferramenta Effgen10	36
Tabela 28 Tabela resumo das forças resultantes para as componentes negativas, positivas, e de rugosidade Ra e Rz para a ferramenta Effgen6	36
Tabela 29 Tabela resumo das forças resultantes para as componentes negativas, positivas, e de rugosidade Ra e Rz para a ferramenta Effgen6D46.....	36
Tabela 30 resume as forças resultantes para as componentes negativas, positivas, e de rugosidade Ra e Rz para a ferramenta Schott20	37
Tabela 31 Tabela resumo das forças resultantes para as componentes negativas, positivas, e de rugosidade Ra e Rz para a ferramenta Schott10.....	37
Tabela 32 Tabela resumo das forças resultantes para as componentes negativas, positivas, e de rugosidade Ra e Rz para a ferramenta Schott6.....	38
Tabela 33 Tabela resumo das forças resultantes para as componentes negativas, positivas, e de rugosidade Ra e Rz para a ferramenta SchottHM10	38
Tabela 34 Tabela resumo das forças resultantes para as componentes negativas, positivas, e de rugosidade Ra e Rz para a ferramenta SchottHM6	38
Tabela 35 Tabela resumo das forças resultantes para as componentes negativas, positivas, e de rugosidade Ra e Rz para a ferramenta Besdia10.....	39
Tabela 36 Tabela resumo das forças resultantes para as componentes negativas, positivas, e de rugosidade Ra e Rz para a ferramenta Besdia6.....	39
Tabela 37 Tabela resumo das forças resultantes para as componentes negativas, positivas, e de rugosidade Ra e Rz para a ferramenta Pferd10	40
Tabela 38 Tabela resumo das forças resultantes para as componentes negativas, positivas, e de rugosidade Ra e Rz para a ferramenta Pferd6	40

Tabela 39 Relação entre os ensaios de força e as razões sinal-ruído Effgen20	40
Tabela 40 Análise de variância da força Effgen20.....	41
Tabela 41 Parâmetros ótimos, grau de significância e força estimada método convencional	41
Tabela 42 Relação entre a rugosidade superficial e as razões sinal-ruído Effgen20.....	42
Tabela 43 Análise de variância para rugosidade superficial Effgen20	43
Tabela 44 Parâmetros ótimos, grau de significância e rugosidade estimada método convencional	43
Tabela 45 Análise comparativa das componentes mínimas de forças resultantes de corte Effgen20U	44
Tabela 46 Análise comparativa das componentes máximas de forças resultantes de corte Effgen20U	44
Tabela 47 Valores de Ra para cada um dos provetes Effgen20U.....	45
Tabela 48 Valores de Rz para cada um dos provetes Effgen20U.....	45
Tabela 49 Tabela resumo das forças resultantes para as componentes negativas, positivas, e de rugosidade Ra e Rz para a ferramenta Effgen10U.....	45
Tabela 50 Tabela resumo das forças resultantes para as componentes negativas, positivas, e de rugosidade Ra e Rz para a ferramenta Effgen6U.....	45
Tabela 51 Tabela resumo das forças resultantes para as componentes negativas, positivas, e de rugosidade Ra e Rz para a ferramenta Effgen6D46U	46
Tabela 52 Tabela resumo das forças resultantes para as componentes negativas, positivas, e de rugosidade Ra e Rz para a ferramenta Scott20U.....	46
Tabela 53 Tabela resumo das forças resultantes para as componentes negativas, positivas, e de rugosidade Ra e Rz para	47
Tabela 54 Tabela resumo das forças resultantes para as componentes negativas, positivas, e de rugosidade Ra e Rz para a ferramenta Scott6U.....	47
Tabela 55 Tabela resumo das forças e de rugosidade ScottHM10U	47
Tabela 56 Tabela resumo das forças resultantes para as componentes negativas, positivas, e de rugosidade Ra e Rz para a ferramenta Scott6U.....	48
Tabela 57 Tabela resumo das forças resultantes para as componentes negativas, positivas, e de rugosidade Ra e Rz para a ferramenta Besdia10U	48
Tabela 58 Tabela resumo das forças resultantes para as componentes negativas, positivas, e de rugosidade Ra e Rz para a ferramenta Besdia6U	48
Tabela 59 Tabela resumo das forças resultantes para as componentes negativas, positivas, e de rugosidade Ra e Rz para a ferramenta Pferd10U.....	49
Tabela 60 Tabela resumo das forças resultantes para as componentes negativas, positivas, e de rugosidade Ra e Rz para a ferramenta Pferd6U.....	49
Tabela 61 Relação entre os ensaios de força e as razões sinal-ruído Effgen20U.....	49
Tabela 62 Análise de variância força Effgen20U	50
Tabela 63 Parâmetros ótimos, grau de significância e força estimada método com auxílio de ultrassons.	51
Tabela 64 Relação entre a rugosidade superficial e as razões sinal-ruído Effgen20U.....	51
Tabela 65 Análise de variância para rugosidade superficial Effgen20U	52
Tabela 66 Parâmetros ótimos, grau de significância e rugosidade estimada para método com auxílio de ultrassons	52
Tabela 67 Rugosidade da ferramenta Effgen20	52
Tabela 68 Rugosidade de ferramenta Effgen10	53
Tabela 69 Rugosidade de ferramenta Effgen6	54
Tabela 70 Rugosidade de ferramenta Effgen6D46.....	54
Tabela 71 Rugosidade de ferramenta Schott20	54
Tabela 72 Rugosidade de ferramenta Schott10	55
Tabela 73 Rugosidade de ferramenta Schott6	56
Tabela 74 Rugosidade da ferramenta SchottHM10.....	56
Tabela 75 Rugosidade da ferramenta SchottHM6.....	57
Tabela 76 Rugosidade de ferramenta Besdia10.....	57

Tabela 77 Desgaste da ferramenta Besdia10 no ensaio convencional e com auxílio de ultrassons	58
Tabela 78 Rugosidade de ferramenta Besdia6.....	58
Tabela 79 Desgaste da ferramenta Besdia6 no ensaio convencional e com auxílio de ultrassons	59
Tabela 80 Rugosidade de ferramenta Pferd10 finais	59
Tabela 81 Desgaste da ferramenta Pferd10 no ensaio convencional e com auxílio de ultrassons	59
Tabela 82 Rugosidade de ferramenta Pferd6 finais.....	60
Tabela 83 Desgaste da ferramenta Pferd6 no ensaio convencional e com auxílio de ultrassons ..	60
Tabela 84 Otimização dos resultados para convencional e com auxílio ultrassons Effgen20	61
Tabela 85 Otimização dos resultados para convencional e com auxílio ultrassons Effgen10	62
Tabela 86 Otimização dos resultados para convencional e com auxílio ultrassons Effgen6	62
Tabela 87 Otimização dos resultados para convencional e com auxílio ultrassons Effgen6D46 ...	62
Tabela 88 Otimização dos resultados para convencional e com auxílio ultrassons Schott20	62
Tabela 89 Otimização dos resultados para convencional e com auxílio ultrassons Schott10	63
Tabela 90 Otimização dos resultados para convencional e com auxílio ultrassons Schott6	63
Tabela 91 Otimização dos resultados para convencional e com auxílio ultrassons SchottHM10...	63
Tabela 92 Otimização dos resultados para convencional e com auxílio ultrassons SchottHM6.....	64
Tabela 93 Otimização dos resultados para convencional e com auxílio ultrassons Besdia10	64
Tabela 94 Otimização dos resultados para convencional e com auxílio ultrassons Besdia6.....	64
Tabela 95 Otimização dos resultados para convencional e com auxílio ultrassons Pferd10.....	64
Tabela 96 Otimização dos resultados para convencional e com auxílio ultrassons Pferd6.....	65
Tabela 97 Melhores parâmetros do método convencional	70
Tabela 98 Melhores parâmetros do método com auxílio de ultrassons	70
Tabela 99 Principais parâmetros de desbaste da ferramenta de Ø32 no plano A	72
Tabela 100 Principais parâmetros de re-desbaste da ferramenta de Ø20 no plano A.....	72
Tabela 101 Principais parâmetros de desbaste da ferramenta de Ø10 no plano A	73
Tabela 102 Principais parâmetros de desbaste da ferramenta de Ø20 no plano B e C	73
Tabela 103 Principais parâmetros de desbaste da ferramenta de Ø10 no plano B e C	74
Tabela 104 Principais parâmetros de desbaste da ferramenta de Ø6 no plano B e C	74
Tabela 105 Principais parâmetros de desbaste da ferramenta de Ø4 no plano B e C	76
Tabela 106 Principais parâmetros de desbaste da ferramenta de Ø2 no plano B e C	76
Tabela 107 Principais parâmetros de desbaste da ferramenta de Ø1 mm no plano B e C	77
Tabela 108 Principais parâmetros de desbaste da ferramenta de Ø6 esférica no plano B e C.....	78
Tabela 109 Principais parâmetros de pré-acabamento da ferramenta de Ø6 esférica no plano B e C	79
Tabela 110 Principais parâmetros de acabamento da ferramenta de Ø6 esférica no plano B e C	79
Tabela 111 Principais parâmetros de acabamento multipencil corner da ferramenta de Ø4 esférica no plano B e C.....	80
Tabela 112 Principais parâmetros de acabamento multipencil corner da ferramenta de Ø4 esférica no plano B e C.....	81
Tabela 113 Principais parâmetros de acabamento multipencil corner da ferramenta de Ø2 esférica no plano B e C.....	82
Tabela 114 Principais parâmetros de acabamento inclinado e raso da ferramenta de Ø2 esférica no plano B e C.....	82

1 Introdução

1.1 Contextualização

Com o mundo cada vez mais competitivo torna-se imperativo produzir com altos índices de qualidade e eficiência. Os equipamentos de Controlo Numérico Computorizado (CNC) são uma boa resposta a esta problemática dada a sua flexibilidade, capacidade de produção de peças complexas, precisão e rapidez [1]. Apesar do conhecimento científico no âmbito da maquinação de materiais duros e frágeis estar a crescer, ainda é muito limitado no caso do vidro cristal. As principais propriedades do vidro, tais como a elevada dureza e baixa tenacidade, tornam o processo de maquinação desafiante [2].

As peças em vidro cristal são geralmente obtidas por processo de sopro/injeção. Através deste processo é difícil obter um acabamento superficial adequado, sendo necessário recorrer a operações de acabamento. Atualmente para as operações de acabamento subtrativo são utilizadas essencialmente ferramentas de corte e retificação manuais. Devido à complexidade das peças, torna-se indispensável recorrer a mão-de obra especializada o que implica tempos e custos produtivos elevados. A automatização do processo de acabamento pode permitir uma redução de tempos e custos de produção. Neste sentido pretende-se investigar a tecnologia de maquinação CNC, nomeadamente a retificação, de vidro cristal com o objetivo de definir as melhores estratégias e ferramentas a utilizar [3].

Esta proposta de dissertação tem como objetivo otimizar os parâmetros de maquinação do vidro cristal com e sem o auxílio de ultrassons. A dissertação está inserida no projeto Cristal Eco Premium (ref. POCI-01-0247-FEDER-047101) tendo como entidade líder a Vista Alegre Atlantis, S.A. e entidades parceiras a Universidade de Aveiro e Universidade do Porto.

1.2 Questão de investigação

As questões relevantes que se procuram responder com esta dissertação são as seguintes:

“Quais as conjugações dos parâmetros de corte que permitem uma melhor relação entre o acabamento superficial e o tempo de maquinação do vidro cristal?”

“Comparando a maquinação convencional com a maquinação com o auxílio de ultrassons, qual apresenta melhor acabamento superficial?”

“Qual a relação do custo da ferramenta com o seu desgaste?”

“Será viável realizar a maquinação de geometrias complexas em vidro cristal?”

1.3 Estrutura do documento

A presente dissertação de mestrado está organizada em seis capítulos, seguindo-se a bibliografia e anexos. O primeiro capítulo apresenta a introdução que inclui o enquadramento e as questões de investigação. No capítulo dois é apresentada a revisão de literatura, que enquadra o estado da arte e as melhores técnicas para aplicar ao estudo. O capítulo três apresenta os materiais e os métodos utilizados no estudo dos parâmetros de corte e no desenvolvimento das estratégias de maquinagem. O capítulo quatro apresenta os resultados dos estudos relativos aos parâmetros de corte onde se procura a otimização das forças e da rugosidade superficial das peças maquinadas. Neste mesmo capítulo é feita uma comparação da maquinagem convencional com a maquinagem com auxílio de ultrassons. Também é apresentada uma avaliação do desgaste das ferramentas. O capítulo cinco é dedicado à maquinagem de uma escultura onde são apresentados os percursos, parâmetros de corte e o controlo dimensional. O capítulo seis apresenta as conclusões e sugestões de trabalhos futuros.

2 Revisão de literatura

Este capítulo tem como objetivo a pesquisa de conceitos teóricos e de trabalhos já realizados sobre o processo de CAD/CAM e maquinagem, maquinagem com auxílio de ultrassons, as características do vidro cristal, as ferramentas para maquinagem de vidro, a lubrificação do processo, a medição das forças de corte e do acabamento superficial e o método de Taguchi.

2.1 CAD/CAM e maquinagem

Os processos de maquinagem convencionais caracterizam-se por alterar a geometria das peças por remoção de material, realizada pela ação de uma ferramenta, que em contacto com a peça provoca o arranque de aparas. A maquinagem tem como principais tecnologias: a fresagem, o torneamento, a furação e a retificação [4].

A definição de parâmetros e trajetórias de corte podem ser abordados de duas formas distintas: através de softwares *Computer Aided Design (CAD)/Computer-Aided Manufacturing (CAM)* ou através de programação manual. No caso de uma programação manual o programador geralmente recorre a código G para definir os parâmetros e trajetórias de corte através de um editor de texto. Este tipo de programação aplica-se essencialmente a peças de geometria simples (com superfícies horizontais e verticais) e é denominada de maquinagem 2D ou 2 eixos e meio.

A maquinagem de peças com geometria complexa (com superfícies 3D), denominada de maquinagem 3D, implica a utilização de softwares CAD/CAM para automatizar a criação de estratégias de maquinagem adequadas à geometria 3D. O modelo desenhado em CAD deve ter em conta as restrições da tecnologia de maquinagem. Após a produção do modelo em CAD é feita a importação do ficheiro para o programa de CAM onde são definidas as ferramentas, os parâmetros de corte e as trajetórias de maquinagem para obter a forma pretendida, geralmente denominadas de operações ou estratégias de maquinagem. Após as operações definidas o software CAM escreve o programa para ser executado na máquina CNC e obter a peça pretendida [5]. A Figura 1 mostra a sequência de ações para a programação CAM.

Atualmente os programas CAM procuram dar resposta a peças com geometrias complexas. Os vários softwares (por ex. Powermill, MasterCam e DepoCam) desenvolveram estratégias semelhantes apesar das designações poderem ser diferente.

O principal objetivo consiste em retirar o máximo material no menor tempo com acabamento superficial pretendido, sem colocar em perigo a integridade da ferramenta. As estratégias têm como base parâmetros de maquinagem. Uma das principais dificuldades da maquinagem é manter as forças de corte constantes de modo a prolongar o tempo de vida da ferramenta, daí ser relevante otimizar os parâmetros de corte. Um dos fatores que influencia o tempo de maquinagem é a profundidade de corte. Geralmente, quanto maior for a profundidade de corte menor será o tempo de maquinagem. No entanto uma maior profundidade implica uma maior flexão da ferramenta

possibilitando a ocorrência de vibração, traduzindo-se em pior acabamento superficial. A profundidade de corte é influenciada pela dureza do material e o comprimento da ferramenta.

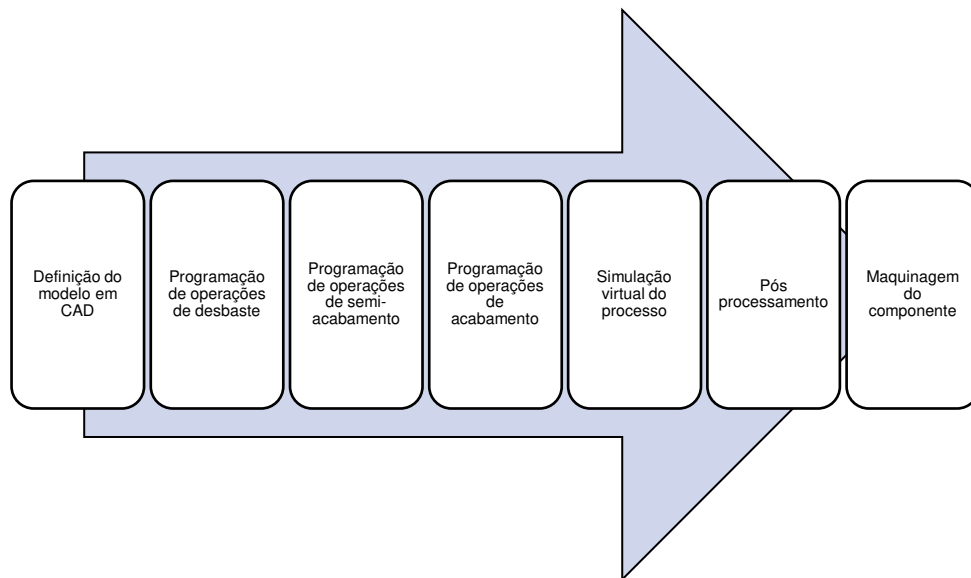


Figura 1 Esquema do processo para a programação CAM [5]

Adicionalmente as entradas e saídas da ferramenta na peça devem ser o mais suave possível, para evitar vibrações e choques, procurando prolongar a vida da ferramenta e obter uma boa qualidade superficial. A velocidade de avanço V_f (mm/min) consiste na velocidade linear instantânea do movimento da ferramenta em relação à peça tendo importante relevância no tempo de maquinagem. É um parâmetro que pode e deve ser definido à partida, podendo, no caso das ferramentas com arestas de corte (fresas) [6]–[8], ser calculado da seguinte forma:

$$V_f = f z * N * z(mm/min) \quad (1)$$

onde fz é o avanço por dente (mm), N é a rotação (rpm) e z o número de dentes da ferramenta. Este parâmetro tem influência direta na força de corte e na duração da ferramenta [5], [9].

A força de corte pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$F_c = ap * ae * \sigma_t * k \quad (2)$$

Em que k é o fator proporcional referente ao material e σ_t representa a resistência à tração do material a trabalhar [10]. No processo de fresagem os parâmetros mais comuns são: a velocidade de corte (V_c), a velocidade de rotação (N), a profundidade de corte axial (ap), a profundidade de corte radial (ae), a velocidade de avanço (V_f), o avanço por revolução (f), o avanço por dente e a quantidade de material removido. No caso da retificação os cálculos são semelhantes mas, uma vez que se utilizam mós com abrasivo (por exemplo diamante) em vez de fresas com arestas de corte bem definidas (dentes), não devem ser considerados cálculos em função dos dentes [11].

A velocidade de corte V_c (m/min) é a velocidade linear instantânea do ponto de referência da aresta de corte. Este parâmetro é um dos mais importantes, uma vez que a sua variação implica alterações quer nas características do corte, quer na vida útil da ferramenta. Trata-se de um parâmetro que tipicamente é indicado pelo fornecedor da ferramenta. Também pode ser controlado pelo operador através da seguinte fórmula [6]:

$$V_c = \frac{\pi * D * N}{1000} (m/min) \quad (3)$$

onde D é o diâmetro da ferramenta (mm) e N é o número de rotações por minuto (rpm).

A velocidade de rotação N (rpm) é medida pelo número de rotações por minuto realizadas pelo eixo da ferramenta, e pode ser dada por [7]:

$$N = \frac{V_c * 1000}{\pi * D} (r.min^{-1}) \quad (4)$$

onde V_c é a velocidade de corte (m/min) e D é o diâmetro da ferramenta (mm).

A profundidade de corte axial (a_p) (mm) consiste na distância a que a ferramenta é colocada abaixo da superfície a maquinar, medida na direção do eixo da ferramenta (Figura 2).

A profundidade de corte radial (a_e) (mm) consiste na distância que a ferramenta cobre da superfície da peça a maquinar, sendo medida na perpendicular ao eixo de rotação da ferramenta [7] (Figura 2).

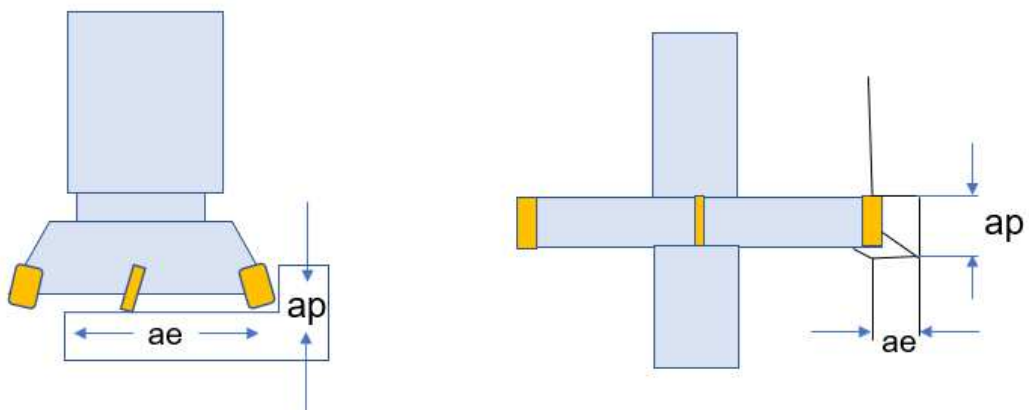


Figura 2 Representação a_e e a_p [8]

O avanço por revolução f (mm/rot) é um parâmetro que pode ser controlado, e que auxilia na determinação da qualidade de acabamento. Este avanço é dado por [6]–[8]:

$$f = V_f \div N (mm/rot) \quad (5)$$

O avanço por dente é medido pelo deslocamento da ferramenta em relação à peça no intervalo entre um dente e o outro. Este valor é relevante porque mostra o limite da ferramenta, e pode ser calculado pela seguinte fórmula [12]:

$$f_z = \frac{V_f}{z * N} \quad (6)$$

Nos softwares CAM, as estratégias de maquinagem 3D subdividem-se tipicamente em dois grupos: desbaste e acabamento. O principal objetivo da etapa de desbaste (Figura 3) consiste em remover o material de uma forma célere.

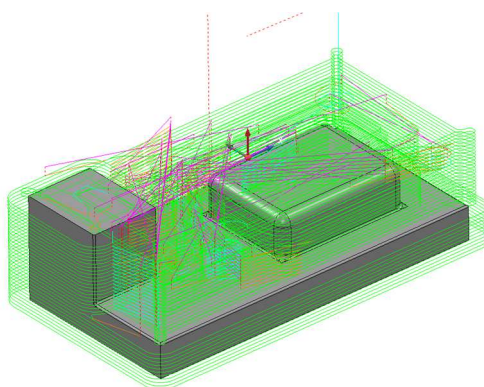


Figura 3 Estratégia de desbaste

Nesta etapa é fundamental deixar uma sobre-espessura para maquinagem nas posteriores fases de acabamento. Tipicamente, na maquinagem de geometrias complexas, a etapa de desbaste consiste numa sequência de estratégias de re-desbaste, onde se vai reduzindo o diâmetro da ferramenta até se atingir uma sobre-espessura constante.

Na etapa de acabamento são utilizadas estratégias adaptadas à geometria da peça de forma a se obter as dimensões e acabamento superficial pretendidos. Estas estratégias usualmente utilizam um avanço e ap mais baixos e por consequência uma força de corte mais reduzida [9]. As principais estratégias de acabamento 3D são o acabamento Z constante, acabamento de cópia (raster), acabamento inclinado e raso, *Multi Pencil Corner* e acabamento 3D offset.

O acabamento Z constante implica a divisão do modelo em altura, relativamente ao eixo Z, com valores constantes. Conseguem-se melhores resultados quando as paredes dos modelos têm elevada inclinação ou são verticais [13]. A Figura 4 mostra exemplo da estratégia de acabamento Z constante.

O acabamento de Cópia consiste em fazer um varrimento na área a maquinar de acordo com um ângulo de inclinação relativo ao eixo X com um incremento lateral constante. A Figura 5 exemplifica a trajetória do acabamento Cópia [13].

O acabamento 3D Offset (Figura 6) utiliza uma fronteira projetando-se sobre a superfície do modelo dando um offset a 3 dimensões através da superfície, através de um passo estabelecido. Atendendo

ao facto de o passo ser constante, possibilita uma maquinação constante ao longo das superfícies contornadas e reduz as variações da altura da crista [13].

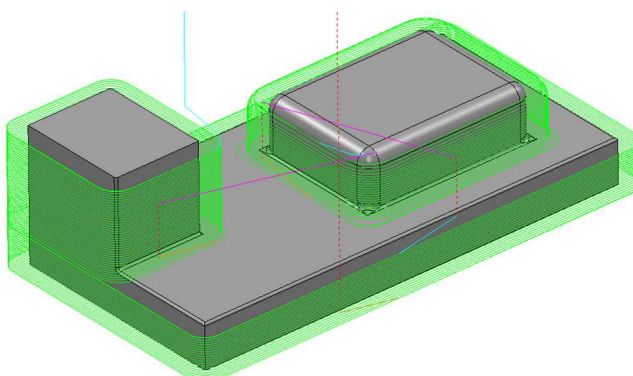


Figura 4 Acabamento Contorno Z

O acabamento inclinado e raso possibilita a criação de percursos 3D *offset* ou *raster* nas regiões planas e o acabamento Z constante nas regiões inclinadas.

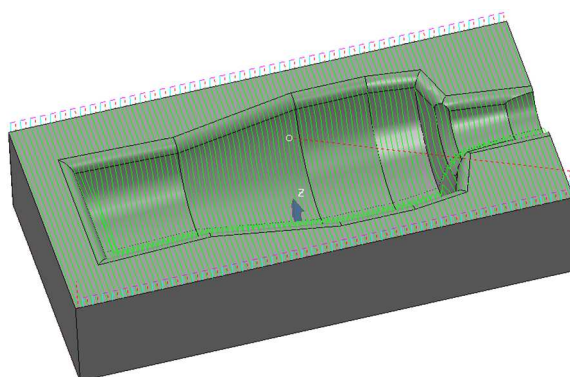


Figura 5 Acabamento Cópia

Na Figura 7 está sinalizado com o número 1 o percurso Z constante nas áreas inclinadas e com o número 2 o percurso 3D Offset nas áreas planas.

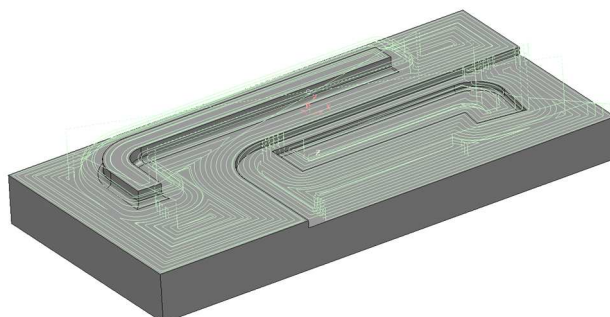


Figura 6 Acabamento 3D Offset

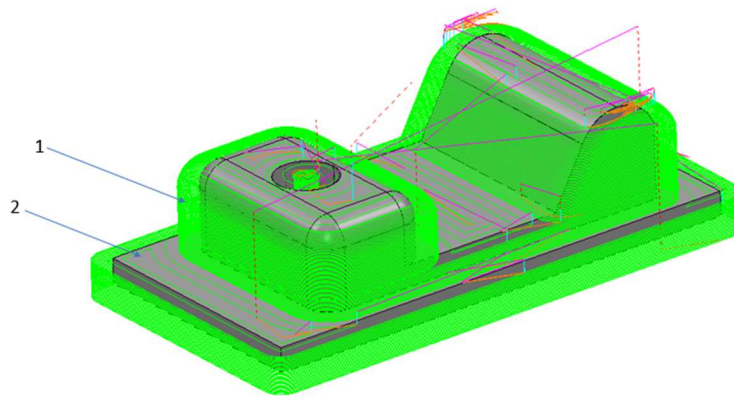


Figura 7 Estratégia de acabamento inclinado e raso

A estratégia *Multi Pencil Corner* (Powermill) [14] tem como principal objetivo limpar cantos que acontecem entre superfícies não tangenciais com recurso a várias passagens (Figura 8).

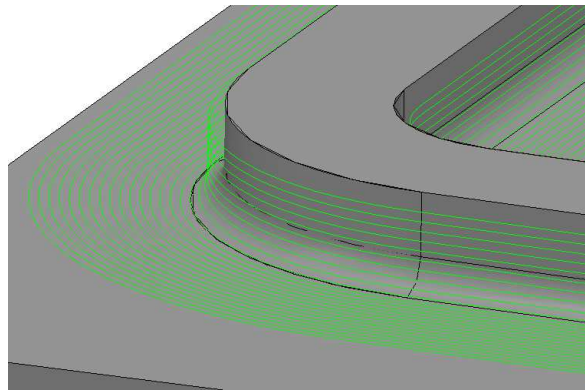


Figura 8 Estratégia *Multi Pencil Corner* [14]

2.2 Maquinagem com auxílio de ultrassons

A maquinagem com auxílio de ultrassons apresenta-se como uma tecnologia alternativa para o corte de peças não metálicas, frágeis e com baixa condutividade elétrica. É adequada para maquinagem de materiais com uma dureza superior a 40HRC, tais como, vidros inorgânicos, nitretos de silício e ligas de titânio. Comparando com outros processos não tradicionais, como o feixe de laser, os ultrassons não afetam termicamente a peça. Um elevado aumento da temperatura pode levar à formação de tensões residuais, o que numa peça frágil pode levar à sua rutura. O sistema de ultrassons trabalha com frequências superiores a 2kHz. Atualmente esta tecnologia tem uma ampla aplicabilidade em telecomunicações, fundição, soldadura de metais, e testes não destrutivos. A maquinagem com auxílio de ultrassons permite maquinar peças complexas com elevada exatidão e precisão [15].

O processo de maquinagem ultrassónica rotativa ou *Rotary Ultrasonic Machining* (RUM) tem como objetivo auxiliar a maquinagem de materiais duros e quebradiços [16], [17]. O RUM foi desenvolvido

na década de 60, sendo considerado um processo não convencional. Esta tecnologia apresenta como principais características: a redução da força de corte, acabamento superficial mais preciso, maior precisão geométrica em furos e redução dos esforços na ferramenta [18]–[20]. A remoção do material é feita utilizando a rotação de uma ferramenta (que pode ter revestimento de diamante) em combinação com a utilização de ultrassons. A vibração da ferramenta de corte é produzida axialmente. Conforme o avanço da ferramenta seja paralelo ou perpendicular ao seu eixo de rotação, este processo pode ser utilizado para furação ou fresagem. É utilizado para furação se a direção da ferramenta for paralela ao eixo da rotação, como mostra a Figura 9 [21].

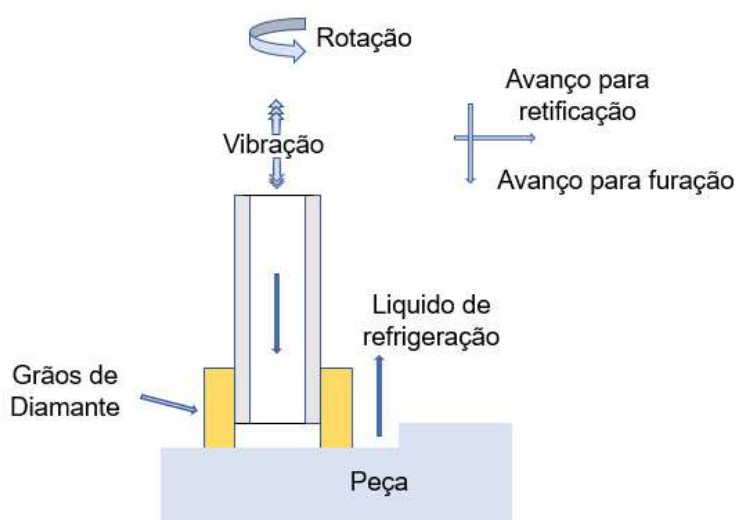


Figura 9 Esquema de funcionamento RUM [21]

A maquinagem com auxílio de ultrassons e em especial o RUM tem os parâmetros da maquinagem convencional, acrescidos dos parâmetros dos ultrassons. A frequência utilizada é geralmente 20kHz. Uma das formas de verificar a amplitude ultrassônica, e que também permite fazer uma estimativa da frequência de vibração ultrassônica registrada durante o RUM, é utilizar uma imagem de microscopia [22].

O corte por vibração de ultrassons aplicado à maquinagem de materiais duros e frágeis apresenta elevada eficiência. O corte por vibração de ultrassons é regido essencialmente por 3 parâmetros que influenciam diretamente a força de corte: velocidade de corte, frequência e amplitude da vibração da ferramenta. O corte por vibração ultrassônica comparativamente com a maquinagem convencional é mais eficaz: possibilita a redução da força de corte, redução do desgaste da ferramenta, melhoria de acabamento superficial, maior estabilidade da ferramenta aplicada a materiais difíceis de maquinar tais como ligas à base de Ni e Ti, cerâmica, vidros e carboneto de tungstênio [23]–[30]. Zhang et al.[21] levaram a cabo um estudo experimental para estudar a influência da maquinagem RUM na rugosidade da superfície no vidro ótico. Os resultados do estudo revelaram que a rugosidade superficial aumentou com o aumento da potência dos ultrassons e da velocidade de avanço, e com a diminuição da velocidade de rotação do fuso. Mitrofanov et al. [31]

estudaram as forças de corte do processo de maquinagem com e sem auxílio de ultrassons. Os autores recorreram a simulação numérica de elementos finitos, para complementar ensaios experimentais, concluindo que a maquinagem de ultrassons do Inconel 718 diminui as forças de corte. Os resultados obtidos são corroborados pelo estudo de Nath et al. [24] que usa o aço DF2. Os autores utilizaram velocidades de corte entre os 10 e os 100m/min e uma velocidade de avanço 0,1 e 0,2 mm/min. Para todas as combinações estudadas verificou-se que o auxílio de ultrassons permitiu uma redução das forças de corte e diminuição do desgaste da ferramenta. Thoe, Aspinwall, & Wise [32] demonstraram ser possível a produção de furos com 76 μm de diâmetro. No entanto, não foi possível obter um furo com uma razão entre profundidade e diâmetro superior a 3:1 [32].

2.3 Vidro Cristal

De uma forma geral o vidro apresenta-se à temperatura ambiente no estado sólido, de forma transparente ou translúcido. Este material resulta da mistura de vários silicatos obtidos através da fusão sendo os mais utilizados os silicatos alcalinos e os de cálcio. Para a produção deste material utiliza-se atualmente o processo de fusão/arrefecimento. Sucintamente, as matérias-primas são misturadas, levadas a altas temperaturas provocando a sua fusão, sendo posteriormente dada a forma desejada, seguindo-se o seu arrefecimento. Relativamente às propriedades do vidro a sua propriedade mais importante é a sua transparência, mas também apresenta elevada rigidez, dureza, fragilidade, resistência química, resistência à abrasão e bom comportamento ao fogo. Os tipos de vidros podem ser ilimitados pois dependem das suas composições, que também influenciam as suas propriedades. No entanto, existem alguns grupos que normalmente são mais utilizados, como por exemplo: o vidro sódico-cálcico, o vidro de sílica fundida ou quartzo, o vidro borossilicato, o vidro de chumbo e o vidro de silicato de alumínio. O vidro sódico-cálcico é um dos vidros mais comercial e comum, é comparativamente barato e fácil de reciclar. Este tipo de vidro é produzido em grande escala e normalmente utilizado em janelas, garrafas e copos. O vidro de sílica fundida ou quartzo tem como característica as altas temperaturas de fusão e de trabalho, apresentando baixo coeficiente de expansão térmica e alta resistência química. Devido ao seu alto ponto de fusão torna-se caro e difícil de produzir. Este tipo de vidro é aplicado em laboratórios de alta tecnologia. O vidro de borossilicato tem como principais características a alta resistência química, baixo coeficiente de expansão térmica e boa resistência ao fogo. Este tipo de vidro tem um grande leque de aplicações, nomeadamente utensílios de cozinha e laboratórios. O vidro de chumbo (vidro cristal) é um vidro que apresenta uma baixa temperatura de fusão, dispondo de uma alta densidade e um alto índice de refração. Este tipo de vidro é utilizado como protetor de radiação, em garrafas e copos de gama superior, em candeeiros, peças de decoração, entre outros. O vidro de silicato de alumínio apresenta baixa expansão térmica, alta temperatura de transição vítrea e pode suportar altas temperaturas podendo ser utilizado em termómetros, utensílios de cozinha, tubos de combustão e fornos [33]–[35].

A Tabela 1 mostra as propriedades do aço inox 314, do vidro com alto teor de chumbo e o vidro borossilicato, obtidas no GRANTA EduPack 2021. Comparando propriedades como a dureza, o alongamento e a resistência à fratura, verifica-se que os vidros são bastante mais frágeis.

Tabela 1 Comparação das propriedades do vidro com aço (GRANTA EduPack 2021)

Propriedades	Aço inox 314	Vidro borossilicato-2405	Vidro de chumbo de soda Potássio-0120
Densidade (Kg/m ³)	7800-8000	2450-2500	3001-3008
Modulo de Young (GPa)	196-204	66,3-69,7	57,5-60,4
Coefficiente de Poisson	0.265-0.273	0,2-0,21	0,21-0,22
Resistência a tração (MPa)	515-620	31,9-35,1	125-137
Resistência a compressão (MPa)	205-310	319-351	1250-1370
Resistência a flexão (MPa)	205-310	41,5-45,6	162-179
Dureza Vickers (HV)	170-190	387-427	374-413
Resistência a fratura (MPa.m ^{0.5})	121-228	0,63-0,64	1-1,2
Condutividade térmica (W/m.°C)	16-18	1,1-1,2	0,82-0,86
Alongamento (%)	30-50	0,05	0,21-0,24

Materiais frágeis tem uma elevada gama de aplicação devido às suas propriedades óticas, mecânicas, químicas e físicas. Neste tipo de materiais, a obtenção de uma superfície livre de imperfeições, através de métodos convencionais, como a retificação e o polimento, apresenta custos elevados e um processo demorado. Dependendo da ap, mesmo na maquinagem de materiais frágeis é possível passar do corte em modo frágil para o corte em modo dúctil. Ao cortar abaixo da espessura critica, a energia necessária para que ocorra a propagação de fissuras é superior à energia necessária para que ocorra a deformação plástica. Desta forma a maquinagem dúctil apresenta-se como uma alternativa viável para a obtenção de superfícies com melhor qualidade superficial e sem fissuração [36].

Geralmente todos os tipos de vidro em modo dúctil podem ser retificados pois não apresentam microfissuras sob a superfície. A rugosidade superficial não depende da profundidade de corte, mas do tamanho do grão da ferramenta e do avanço por revolução [36].

A retificação do vidro ótico com parâmetros de maquinagem elevados (velocidade de corte e incrementos elevados) provoca facilmente danos abaixo da superfície devido às características do material. O *Serious Subsurface Samage* (SSD) caracteriza-se por uma camada abaixo da superfície que apresenta micro-fissuração de 10 a 100µm [37].

Procurando verificar a viabilidade do corte do vidro de forma semelhante ao corte dos metais dúcteis, Giovanola & Finnie [38] testaram três tipos de vidro: sílica fundida, cal sodada e sílex polido. Devido à sua natureza frágil, não foi possível cortar a sílica fundida sem que esta fissurasse. O vidro de cal sodada apresentou resultados semelhantes aos metais dúcteis embora os resultados tenham apresentado grande variabilidade. O vidro que apresentou melhores resultados foi o vidro de sílex dopado com chumbo. A limalha produzida durante a maquinagem era bastante enrolada e concavo serrilhado. É possível maquinar alguns vidros de forma equivalente aos metais dúcteis se o ap e ae do corte for reduzido [38].

2.4 Ferramentas

Existem no mercado ferramentas específicas para maquinagem de materiais rígidos e quebradiços tais como brocas, fresas e escareadores. Geralmente este tipo de ferramentas têm na zona do corte um revestimento de nitreto de boro cúbico ou de diamante. Na Figura 10 são mostradas 3 brocas e um escareador na imagem da esquerda. Na imagem da direita são mostradas as fresas. No centro das ferramentas é possível visualizar o furo para a refrigeração.



Figura 10 Brocas, escareadores e fresas para a maquinagem do vidro [39]

A Tabela 2 mostra alguns exemplos de ferramentas e respetivos parâmetros de corte. Geralmente verifica-se um aumento da rotação com a diminuição do diâmetro da ferramenta. A velocidade de avanço depende do tipo de vidro a maquinar e da sua espessura [40].

As ferramentas de nitreto de boro cúbico (CBN), são normalmente utilizadas para redução da força de corte, temperatura de corte e aumento da resistência a abrasão [41]. Na comparação do revestimento de CBN e diamantado, geralmente o CBN funciona melhor em metais duros tais como aços com uma dureza superior a 45-50 HRC, já o revestimento com diamante tem um bom comportamento em materiais não ferrosos, compósitos, vidro, cerâmica e quartzo. Por outro lado, o CBN para além de não reagir com ferro, tem uma elevada condutividade térmica e possui uma temperatura de degradação mais elevada comparativamente com o revestimento de diamante [42],[43]. O diamante oxida a partir dos 600°C, transformando-se em dióxido de carbono. Ao atingir temperaturas superiores a 700°C o diamante tem tendência a reagir com o cobalto, ferro e níquel e as suas respetivas ligas. No caso dos carbonetos (carbonetos de titânio, carboneto de tungsténio e carboneto de zircónica) acima dos 700°C o diamante converte-se em carbono amorfo [44].

M. Sayuti et al. utilizaram a estratégia *slot milling* em vidro sódico-cálcico com uma ferramenta CBN, com o objetivo de entender a influência na superfície maquinada. Verificaram que os parâmetros que mais influenciam a rugosidade superficial da peça são o a_p , o V_f , a pressão de lubrificação e a velocidade de corte. Apesar da lubrificação ser fundamental para o processo, a direção da lubrificação não tem grande influência. Após a otimização dos parâmetros foram realizados testes com as condições ótimas e foi verificado que houve uma melhoria 49,09% na rugosidade e 26,28% na medição das forças [41].

Li et al.[45] estudaram o desgaste de um disco de diamante no processo de retificação do vidro ótico. Com base neste estudo foi desenvolvido um modelo que tem como objetivo simular as

variações de topografia e o desgaste da ferramenta. As diferenças microscópicas observadas nos grãos da ferramenta causadas pelo seu desgaste são a principal causa para as diferentes morfologias observadas no disco. O desgaste pode ser causado por micro e macro fraturas, arrancamentos, ou pelas forças de atrito envolvidas [4].

Tabela 2 Parâmetros de ferramentas para maquinagem de vidro [40], [46], [47]

Tipo	Diâmetro (mm)	Tipo de vidro	Espessura do vidro (mm)	Revestimento	Velocidade de avanço (mm/min)	Rotação (min ⁻¹)	Profundidade axial (mm)	Líquido de refrigeração	Ref.
Fresa	4,5			Cubic Boron Nitride	0,5 / 1 / 1,5 / 2	1000 / 5000 / 15000 / 20000	0,25 / 0,5 / 0,75 / 1	Água + óleo	[41]
Broca	5,89 - 7,86	Flutuante	5	Diamante	6	5000	5	Água	[46]
Broca	5 - 70	Flutuante	3 - 8	Diamante	120	818 – 11459		Água	[40]
					150		Água + óleo		
			78		Água				
			102		Água + óleo				
		Laminado	≤ 30		60		Água		
					75		Água + óleo		
Escareador	Flutuante	3 - 8 10 - 19	≤ 30	30			Água		
					Laminado	≤ 30			
Broca / Escareador	2 - 150	Flutuante/ quartzo		Diamante		280 - 19100			[47]
						130 - 9550			

2.5 Lubrificação

No processo de maquinagem o arrefecimento e a lubrificação desempenham um papel importante no tempo de vida útil da ferramenta e no material a maquinar. O caso da maquinagem de materiais duros e frágeis também não é exceção, sendo mesmo aconselhada a utilização de refrigeração interna na ferramenta. Nos materiais cerâmicos a lubrificação permite reduzir tensões mecânicas, reduzir a temperatura e minimizar alterações químicas, fenómenos que ocorrem quando a ferramenta está em contato com a peça. A refrigeração e lubrificação contribuem para reduzir o atrito entre a ferramenta e a peça, reduzindo o aquecimento. Por outro lado, o líquido de refrigeração e lubrificação ao passar na peça e na ferramenta dissipa o calor gerado e faz a limpeza da limalha na zona de trabalho [48]. Os fluidos de corte podem estar nos três estados: sólido (grafite, de molibdênio), gasoso (Ar, CO₂ e N₂) e líquido, sendo este último o mais utilizado. Os fluidos podem ser divididos em fluidos de corte integrais, fluidos de emulsionáveis ou solúveis e fluidos de corte semissintéticos. Os óleos de corte integrais podem ter origem mineral, graxos (animal ou de plantas), óleos sulfurados (enxofre) e clorados (cloro). Estes aditivos reagem quimicamente com a superfície metálica criando uma película que reduz o atrito. Os fluidos de corte de emulsão ou solúveis consistem numa mistura de óleo com água com uma proporção que pode ir de 1:10 a

1:1000. Os fluidos de corte semissintéticos são compostos à base de óleos minerais (mais de 40%) óleos graxos, emulsificados, agentes EP (enxofre, cloro, fósforo ou cálcio) e água [49], [50].

Mitrofanov, Ahmed, Babitsky, & Silberschmidt [51] apresentaram um modelo 3D que permitiu estudar a formação de limalha do Inconel 718. Este trabalho permitiu estudar o efeito da lubrificação na temperatura das ferramentas, forças de corte e tensões. A diminuição da força de atrito causada pela lubrificação das ferramentas possibilitou obter limalhas mais finas com raio de curvatura menor, uma força de corte mais reduzida e uma temperatura mais baixa.

Sayutti et al [41] verificaram que a direção de lubrificação não tem influência na qualidade das peças maquinadas. A temperatura de corte influencia a integridade da superfície da peça, a precisão de maquinagem e a duração da ferramenta. Emonds [52] refere que utilizando apenas água no processo de retificação, com uma ferramenta com revestimento de diamante, verificam-se os seguintes problemas: decréscimo acelerado da eficiência da ferramenta, alta taxa de desgaste do diamante, corrosão e aumento do pH da solução resultante. Para a escolha do líquido refrigerante é necessário satisfazer alguns requisitos. A título de exemplo os pequenos pedaços de vidro acabam por se dissolver parcialmente na água. O líquido refrigerante com aditivos possibilita prolongamento da vida da ferramenta mantendo os diamantes em boas condições. Uma maior concentração de líquido refrigerante diminui a quantidade de energia elétrica necessária ao processo e aumenta a performance da retificação. A escolha do líquido refrigerante também depende do objetivo da retificação: quanto maior quantidade vidro a retificar e velocidade requerida mais eficiente terá de ser o líquido refrigerante. É especialmente importante quando usado na retificação em lentes oftálmicas onde são usadas ferramentas de diamante muito finas [52].

Para aumentar a vida útil do fluido usado pode ser necessário recorrer a aditivos tais como os inibidores da corrosão e antifúngicos. Um possível exemplo de líquido refrigerante é descrito na Tabela 3.

Tabela 3 Propriedade do lubrificante Shell Dromus [41]

Marca	Shell
Nome	Dromus BL—8 000 021 138/R 0665/DOM 06 032 006
Especificação	Aparência emulsão: leite branco, opaco pH a 5%, 8.9 fator de refração—1 Densidade a 15°C kg/L: 0.889 kg/m ³

2.6 Medição de forças de corte

Os equipamentos mais utilizados para a medição de forças de corte nestes processos são os dinamômetros piezoelétricos [53]–[56]. Os transdutores piezoelétricos produzem sinais de carga proporcionais à sua deformação [57]. A aplicação mais comum dos dinamômetros é numa placa ou base estática colocada entre a peça e a mesa da máquina CNC. Contudo estes sensores podem limitar as dimensões da peça atendendo a que a sua resposta dinâmica sofre influência da geometria e peso da peça. Estes tipos de dispositivos apresentam melhor performance quando desenvolvidos

para aplicações como a micromaquinagem [56]. Em alternativa os anéis piezoelétricos podem ser aplicados no fuso ou podem ser utilizados dinamómetros rotativos que são fixados entre o fuso e a ferramenta [58]. No entanto a ressonância de baixa frequência ferramenta/fuso perturba os sinais da força de corte que esses sensores adquirem. Estes dispositivos recolhem a medição da força de uma forma global e não a força de cada dente/pastilha da ferramenta [59]. Os acelerómetros são dispositivos que tem como função medir a aceleração de movimento de uma estrutura ou vibração. O movimento de uma carga cria pressão sobre o material piezoelétrico produzindo um sinal elétrico proporcional a essa carga. Uma vez que a carga é proporcional à força e a massa não varia, então a carga será proporcional à aceleração. Estão disponíveis dois tipos de acelerómetros piezoelétricos. O acelerómetro com saída de alta impedância e o acelerómetro com saída de baixa impedância. Nos acelerómetros de alta impedância a carga elétrica está diretamente ligada aos instrumentos de medição. Este tipo de dispositivo pode ser utilizado em aplicações em que as temperaturas sejam superiores a 120°C, uma vez que não é possível utilizar os modelos de baixa impedância. Os acelerómetros de baixa impedância são constituídos por um acelerómetro de carga e um pequeno circuito eletrónico, onde incorpora um transistor FET que faz a conversão da carga numa tensão de baixa impedância possibilitando de uma forma mais simples a interação com instrumentação standard. Este tipo de acelerómetro é o mais utilizado na indústria, pode funcionar com tensões de 18 a 24 V e 2 mA e geralmente tem um sinal de saída tendo como base 0 até +/-5 V [60]. Os sensores piezoelétricos são utilizados em grande parte dos sistemas de medição de forças de corte presentes no mercado. Estes sensores permitem a medição de forças multi-eixo em processos como fresagem, torneamento, furação e retificação. Esta tecnologia permite obter uma elevada precisão, elevada rigidez, tamanho reduzido e grande amplitude de escala. Apresentam como desvantagens um elevado custo, necessidade de calibração ao alterar a peça e restrições de montagem.

Na Figura 11 encontra-se um esquema de funcionamento de um sistema de medição de forças de corte piezoelétrico, utiliza um cristal de quartzo para detetar alterações dinâmicas nas forças [1].

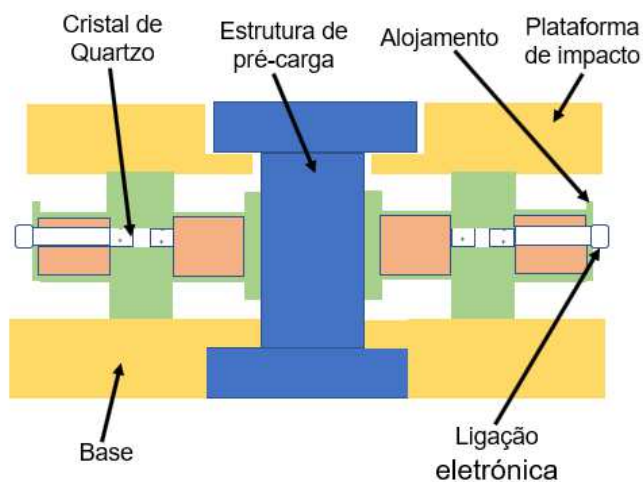


Figura 11 Esquema de sensor piezoelétrico para medição de força [1]

O dinamómetro utilizado nesta dissertação é da Kistler type 9139AA (Figura 12) utiliza sensores piezelétricos permitindo a medição das forças de corte nas direções xyz. Este dispositivo permite a leitura de forças que vão de -30 a 30kN.



Figura 12 Dinamómetro Kistler 9139AA

2.7 Medição do acabamento superficial

Após a maquinação do vidro é necessário avaliar o seu acabamento superficial de modo a aferir as irregularidades e imperfeições. Para tal a análise da rugosidade é um dos métodos mais utilizados. Na Tabela 4 encontra-se um resumo de várias técnicas para medição de rugosidade [61].

Tabela 4 Resumo dos métodos de medição de rugosidade [61]

Método	Informação quantitativa	Dados tridimensionais	Resolução (nm)		Limitações
			Espacial	Vertical	
Instrumento <i>Stylus</i>	Sim	Sim	15-100	0,1-1	O tipo de contacto pode danificar a superfície
Métodos óticos					
Corte cónico	Sim	Não	500	25	Destruição de amostras; Preparação demorada
Perfilometria	Sim	Sim			
Luz seccionada	Limitada	Sim	500	0,1-1	Qualitativa
Reflexão especular	Não	Não	10 ⁵ -10 ⁶	0,1-1	Semi-quantitativa
Reflexão difusa (dispersão)	Limitada	Sim	10 ⁵ -10 ⁶	0,1-1	Superfície lisa (<100nm)
Interferência ótica	Sim	Sim	500-1000	0,1-1	
Scanning tunnelling microscopy (STM)	Sim	Sim	0,2-1	0,02	Necessita de superfície com condutividade; Varredura de pequenas áreas
Força atómica microscópica (AFM)	Sim	Sim	0,2-1	0,02	Varredura de pequenas áreas
Fluido/elétrico	Não	Não			Semi-quantitativa
Microscópio eletrónico					
Reflexão/replicação	Não	Sim	5	10-20	
Integração de sinal retroespalhado	Sim	Sim	5	10-20	Instrumentação, processo demorado, limitação de dados, necessita de superfície condutora, varredura de pequenas áreas
Microscopia estéreo	Sim	Sim	5	50	

Para o caso do vidro é fundamental o uso de técnicas micro ou nano escala [62]. A técnica Força Atómica Microscópica (AFM) tem sido mencionada na literatura como tendo potencial para a medição da rugosidade do vidro [63]–[65]. O AFM é uma técnica que permite a obtenção de imagens

de superfície de vários tipos de materiais, tais como, polímeros, cerâmicos, compósitos e vidro. Em termos funcionais o AFM pode ser utilizado em dois modos, contacto e contacto intermitente e sem contacto. No modo contacto a ponteira do equipamento está em contacto permanente com a superfície. Em contrapartida no modo intermitente, o *cantilever* é vibrado sobre a superfície da amostra em que a ponteira está apenas em contacto intermitente com a superfície [66]. O modo intermitente é o mais utilizado sendo que as suas vantagens são as seguintes: força aplicada na amostra é baixa e prolongamento da vida útil da sonda. As suas desvantagens são: baixa resolução, sujidade na superfície pode interferir na oscilação e normalmente precisa de ultra alto vácuo (UHV) para a obtenção de melhores imagens [67]. No modo sem contacto o cantiléver oscila numa frequência próxima da frequência de ressonância com uma amplitude inferior a 1 nm do que o modo intermitente [68].

O rugosímetro permite medir a rugosidade da superfície das peças, facilitando o controlo da qualidade da superfície e possibilitando verificar se a peça está ou não em conformidade com os valores definidos nos desenhos. Para realizar as medições, o rugosímetro percorre a superfície da peça com uma ponta de contacto. Os movimentos da ponta de contacto são captados por sensores que ampliam e convertem os sinais, facilitando a determinação dos valores da rugosidade [69].

Existem principalmente dois tipos de rugosímetros: um que fornece apenas a leitura dos parâmetros de rugosidade (mais utilizado na produção) e outro que para além desta leitura, permite registar os dados de acordo com os parâmetros ou características seleccionadas. Existem ainda outros que para além destas funcionalidades, permitem também fazer a análise estatística de uma série de medições, e são usados em laboratórios de Metrologia.

O rugosímetro tem vários componentes, nomeadamente:

- Instrumento “stylus” – é uma ponteira geralmente em diamante que contacta com a superfície da peça.
- Apalpador – é o elemento que liga o *stylus* à unidade motora. Durante a medição, o apalpador desliza sobre a superfície a verificar e transmite os sinais captados para o amplificador. A seleção do apalpador deve ser feita de acordo com as características da superfície a ser medida ou do padrão de rugosidade a calibrar. Para baixos valores de rugosidade utilizam-se apalpadores de classe de sensibilidade I, com alcance de medição de $\pm 25\mu\text{m}$. Para valores mais elevados de rugosidade, ou no caso da superfície a avaliar não ser plana, devem ser usados apalpadores de classe de sensibilidade tipo II, com alcance de medição de aproximadamente $\pm 250\mu\text{m}$.
- Elementos de controlo – é o conjunto dos componentes mecânicos que estabelecem a ligação entre a peça a ser verificada e a ponta do apalpador, tais como: os meios de alinhamento, o dispositivo de fixação, o anel de medição, a unidade de avanço e o sensor.
- Unidade motora – Possibilita o deslocamento do apalpador sobre a superfície a verificar e transmite os sinais captados para o amplificador.
- Amplificador – amplifica os sinais recebidos, trata-os e envia-os para o visor.

- Mesa de duas coordenadas – Permite fixar e alinhar as peças de trabalho, possibilitando um ajuste segundo as coordenadas.

- Transdutor – Converte as coordenadas verticais do perfil traçado referido ao perfil de referência, no sinal utilizado pelo instrumento [69], [70].

A Figura 13 mostra o esquema de funcionamento do rugosímetro Time TR 220. A Figura 14 mostra o apalpador onde é visível o *Stylus* na ponta.



Figura 13 Esquema de funcionamento do rugosímetro Time TR220 [71]

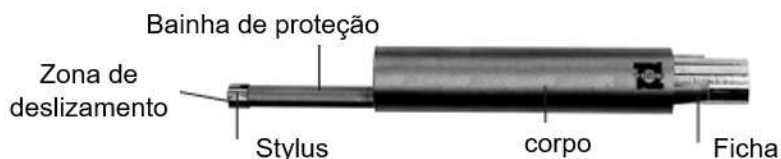


Figura 14 Apalpador + Stylus (TS100 Pickup) [71]

Outra técnica para medir a rugosidade é a perfilometria ótica. Esta é obtida a partir de perfilómetros digitais que permitem fornecer a topografia das superfícies. Para a criação de uma imagem tridimensional, o equipamento recorre a diversos perfis que posteriormente são unidos de forma a criar o relevo da superfície ou área selecionada. Os registos dos perfis são obtidos a partir da distribuição de alturas, ou seja, picos e vales. Estes dispositivos têm programas que possibilitam visualizar a topografia da superfície em 3 dimensões. Estes programas dispõem de parâmetros matemáticos que permitem a identificação das propriedades superficiais dos provetes tais como a rugosidade superficial e perfil de uma determinada área. Para se poder obter a rugosidade a partir de perfilometria ótica é necessária a combinação de três técnicas: modo com interferometria que produz a maior resolução vertical, modo de variação de foco que possibilita uma menor resolução e qualidade de imagem e o modo confocal adequado para superfícies com alta inclinação [72].

A digitalização 3D permite a medição das dimensões finais de peças e ferramentas. O digitalizador está geralmente equipado com um sensor 3D compacto que recorre a iluminação led azul estruturada. Esta tecnologia apresenta como vantagens medições 3D rápidas e precisas sendo um

equipamento compacto, leve e portátil. Para possibilitar e complementar a digitalização é utilizado um software que permite encontrar as melhores estratégias de fusão de imagens orientando-as. Este software permite uma fácil e rápida criação de rede triangular.

O scanner 3D é recomendado para controlo e inspeção da qualidade em fabricação rápida e impressão 3D, engenharia inversa e na fabricação de moldes e ferramentas. O scanner utilizado neste trabalho apresenta uma câmara de 5MP, possibilita a utilização de lentes com 45, 75, 100, 250, 500mm e mesa rotativa disponível para digitalização automática[73][74].

2.8 Método de Taguchi

Genichi Taguchi nasceu em 1924 em Tokomachi, Japão. Foi responsável pela criação do método de Taguchi na década de 1950. Com base na aplicação de métodos estatísticos, Taguchi desenvolveu uma metodologia que tinha como objetivo melhorar a qualidade dos produtos produzidos. Esta metodologia revelou-se de grande utilidade como método de desenho de experiências. Embora seja possível fazer todas as combinações possíveis de controlo e de análise, isso leva a custos e tempos de preparação elevados [74]. Sem a matriz de Taguchi o número de ensaios a realizar para 3 fatores e 3 níveis seriam 27 (3^3). A Tabela 5 mostra um exemplo de uma matriz L9 com 3 fatores e nove ensaios verificando-se assim uma redução de 27 para 9 ensaios.

Tabela 5 Matriz de Taguchi L9 de três fatores

Ensaio	Matriz L9		
E1	A1	B1	C1
E2	A1	B2	C2
E3	A1	B3	C3
E4	A2	B1	C2
E5	A2	B2	C3
E6	A2	B3	C1
E7	A3	B1	C3
E8	A3	B2	C1
E9	A3	B3	C2

Na Tabela 6 mostra um exemplo de uma matriz L9 (3^2) sendo constituída por 2 fatores e 9 ensaios.

Tabela 6 Matriz de Taguchi L9 de dois fatores

Ensaio	Matriz L9	
E1	A1	C1
E2	A1	C2
E3	A1	C3
E4	A2	C1
E5	A2	C2
E6	A2	C3
E7	A3	C1
E8	A3	C2
E9	A3	C3

A implementação do método de Taguchi deve incluir as seguintes etapas [76]:

1. Identificar as características de qualidade e selecionar os parâmetros do projeto a serem avaliados;
2. Definir o número de níveis para os parâmetros;
3. Selecionar o arranjo ortogonal apropriado e atribuir os parâmetros do projeto ao arranjo ortogonal;

4. Realizar as experiências tendo como base o arranjo ortogonal adotado;
5. Analisar os resultados experimentais tendo como base a relação sinal-ruído (S/N) e o modelo linear geral de análise de variância (ANOVA);
6. Selecionar os níveis ótimos dos parâmetros do projeto;
7. Verificar os parâmetros ótimos com experiências para a sua confirmação.

A definição da qualidade do produto e a relação de fatores incontroláveis é dada pela relação sinal-ruído (S/N). O termo “sinal” representa o valor desejável para a característica de saída enquanto o termo “ruído” representa o valor indesejável. A relação S/N tem como principal objetivo mensurar os desvios pretendidos nas características de qualidade: uma relação S/N elevada, reflete uma melhor qualidade [76], [77].

O cálculo do S/N pode ser dividido em três categorias principais dependendo das características de qualidade desejadas. Estas podem ser divididas em nominal é o melhor, maior é o melhor e menor é o melhor [41]. Equações para essas relações são as seguintes:

- Nominal é o melhor (S/N_t):

$$\frac{S}{N_t} = 10 * \log \left(\frac{\bar{y}^2}{s_y^2} \right) \quad (8)$$

- Maior é o melhor (máximo) (S/N_l):

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

- Menor é o melhor (mínimo) (S/N_s):

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

Sendo que:

\bar{y} = Média dos dados observados;

s_y^2 = Variância de y;

n = Número de observações;

y = Dados observados;

A equação 8 tem como objetivo a redução da variabilidade em torno de um alvo específico. A equação 9 tem como objetivo a otimização de obter uma resposta tão grande quanto possível. A equação 10 tem o objetivo da otimização da resposta tão pequena quanto possível [78], [79], [6].

3 Materiais e métodos

Este capítulo descreve os materiais, equipamentos e métodos utilizados no processo de maquinação.

Este trabalho é realizado recorrendo a um centro de maquinação de 5 eixos DMG Mori DMU 50 com rotação máxima de 10000rpm e um armazém de 16 ferramentas.

3.1 Vidro cristal superior

O material utilizado é produzido pela empresa Vista Alegre Atlantis sendo denominado por vidro cristal superior. Na Tabela 7 é apresentada a composição química do vidro cristal superior através de FRX (fluorescência de raios X).

Tabela 7 Composição do vidro cristal superior (%)

Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	NiO	BaO	MoO ₂	BrO ₂
1,432	0,048	0,141	50,753	0,057	0	12,386	0,141	0	0,042	0,048	0	1,397	0,002	0,003
TiO ₂	ZnO	Rb ₂ O	SrO	PbO	La ₂ O ₃	Nd ₂ O ₃	Sb ₂ O ₃	Ga ₂ O ₃	Bi ₂ O ₃	ZrO ₂	SeO ₂	CoO	CeO ₂	LOI
0,270	0,191	0,066	0,026	31,655	0,005	0,008	0,238	0,282	0,114	0,043	0,004	0,013	0,101	0,630

Na Tabela 8 são apresentados o índice de refração, densidade e dureza do vidro cristal superior.

Tabela 8 Valores do índice de refração, densidade e dureza do cristal superior

Densidade (kg/m ³)	Dureza Vickers (Hv)	Índice de refração
3,129 ± 0,01	456 ± 24	1,571 ± 0,002

Os provetes utilizados para os ensaios foram obtidos a partir do processo de vazamento e têm as dimensões aproximadas de 95 x 65 x 15mm. Para produzir a escultura são utilizados dois blocos com as dimensões aproximadas de 57x83x185mm e de 57x83x160mm.

3.2 Estudo dos parâmetros de corte

Realizaram-se ensaios de maquinação convencional e com auxílio de ultrassons a provetes paralelepipedais. Nesta secção são apresentadas as ferramentas utilizadas, os parâmetros de corte estudados, o procedimento para a avaliação das forças de corte, das superfícies maquinadas e desgaste das ferramentas.

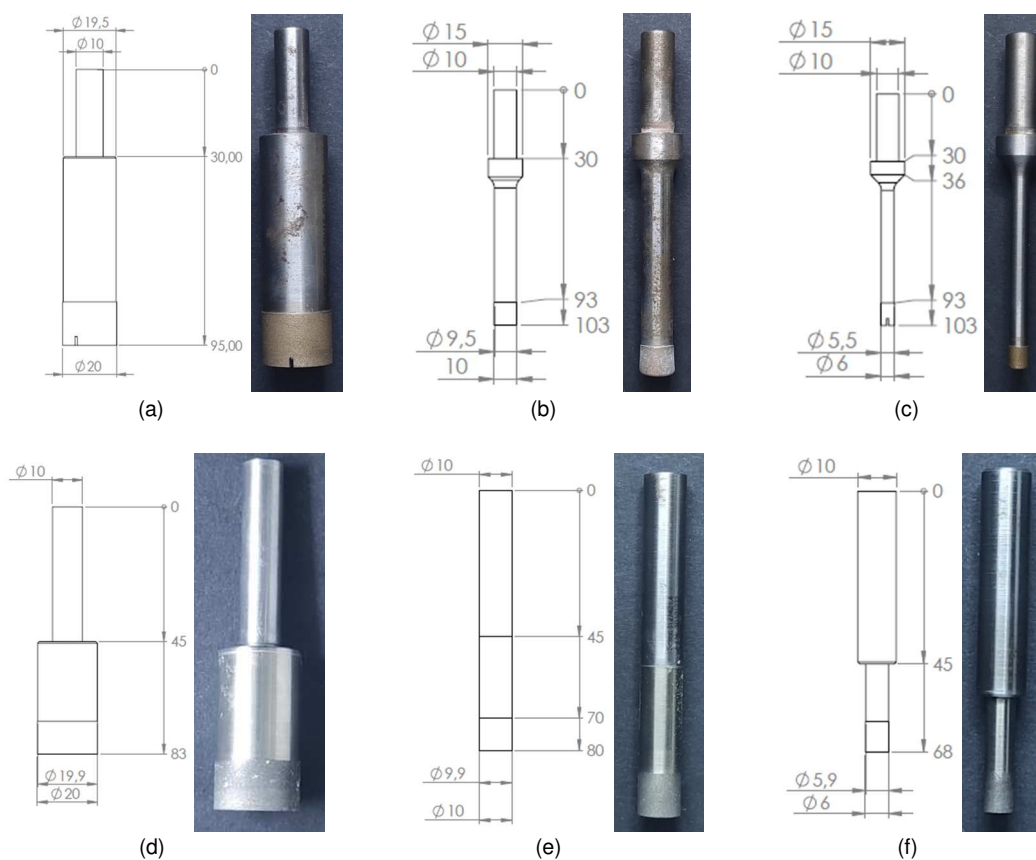
3.2.1 Ferramentas

Na Tabela 9 estão exibidas as ferramentas dos fabricantes Effgen GmbH, Schott GmbH, Besdia Co., Ltd., Pferd Inc. utilizadas para a realização dos ensaios de maquinação. Estas ferramentas na zona de corte são revestidas com diamante. Nos ensaios realizados no método convencional são utilizadas ferramentas novas. No método com auxílio de ultrassons as ferramentas Effgen e Schott já tinham sido utilizadas no método convencional.

Tabela 9 Lista de ferramentas ensaiadas

Ferramentas				Tipo de ensaio	
Fabricante/modelo	Designação	Material do corpo	Tamanho do grão	Convencional	Ultrassons
Effgen 20 SK-20/15-2.5-15-FT50-M702N-D126-C70	Effgen20	Liga de aço	D126	Nova	Reutilizada
Effgen 10 SK-10/6-2-10-FT50-M702N-D126-C70	Effgen10	Liga de aço	D126	Nova	Reutilizada
Effgen 6 SK-6/4-1-10-FT50-M702N-D126-C70	Effgen6	Liga de aço	D126	Nova	Reutilizada
Effgen 6 SK-6/4-1-10-FT50-M702N-D46-C70	Effgen6D46	Liga de aço	D46	Nova	Reutilizada
Schott 5127421.5 (F-Do.20-1-10-25 D126N 1/1)	Schott20	Liga de aço	D126	Nova	Reutilizada
Schott 5127421.4 (F-Do.10-1-10-25 D126N 1/1)	Schott10	Liga de aço	D126	Nova	Reutilizada
Schott5127421.3 (F-Do.6 -1-8-15 D126N 1/1)	Schott6	Liga de aço	D126	Nova	Reutilizada
Schott 5127421.6 (F-Do.10 -2.2-5-5 D126N 1/1)	SchottHM10	Metálico duro	D126	Nova	Reutilizada
Schott 5127421.6 (F-Do.6 -1.5-5-5 D126N 1/1)	SchottHM6	Metálico duro	D126	Nova	Reutilizada
Besdia ID6100/Besdia10 D151	Besdia10	Liga de aço	D151	Nova	Nova
Besdia ID6060/Besdia6 D151	Besdia6	Liga de aço	D151	Nova	Nova
Pferd DZY-N 10.0-8/6-54 D126	Pferd10	Liga de aço	D126	Nova	Nova
Pferd DZY-N 6.0-6/6-54 D126	Pferd6	Liga de aço	D126	Nova	Nova

Na Figura 15 são apresentadas as dimensões gerais e as imagens das ferramentas ensaiadas.



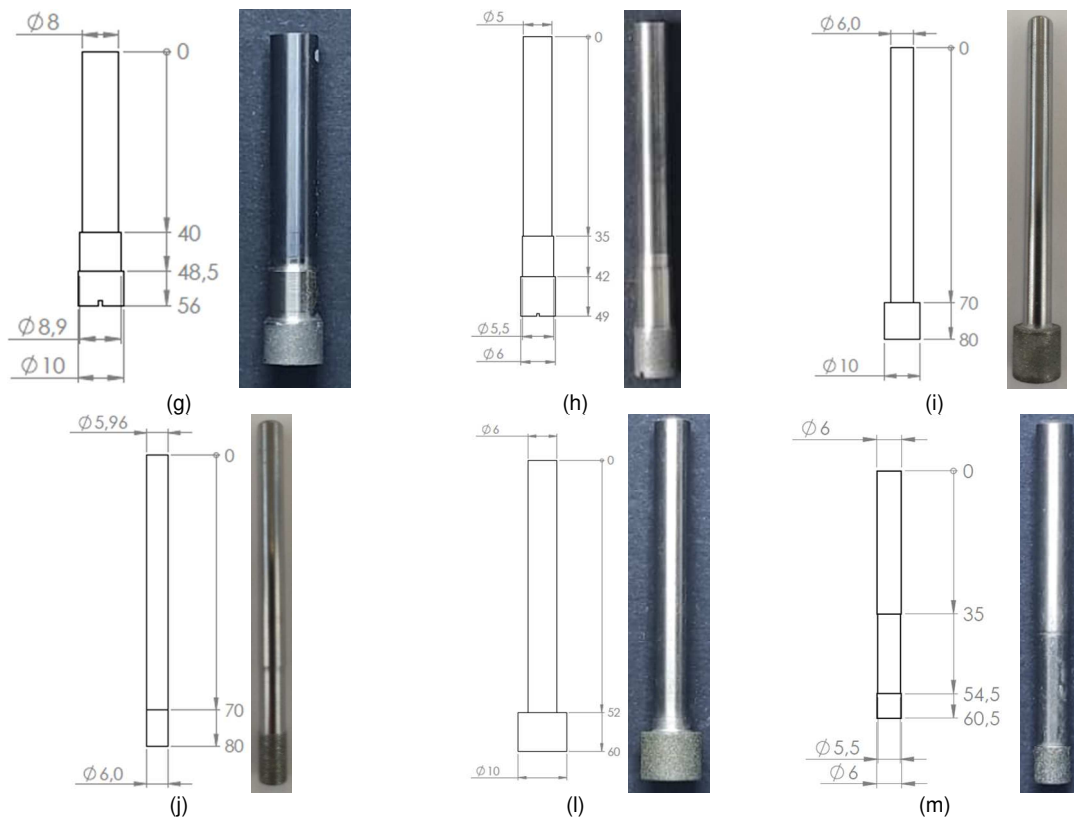


Figura 15 - Dimensões gerais e imagens das ferramentas Effgen20 (a), Effgen10 (b), Effgen6 e Effgen6D46 (c), Schott20 (d), Schott10 (e), Schott6 (f), SchottHM10 (g), SchottHM6 (h), Besdia10 (i), Besdia6 (j), Pferd10 (l), Pferd6 (m).

Todas as ferramentas apresentadas na Figura 15 são compostas no seu corpo por uma liga de aço à exceção das ferramentas HM que apresentam um corpo em metal duro. Relativamente ao tamanho de grão a maioria das ferramentas apresentam um grão D126 à exceção das ferramentas Besdia (D151) e a ferramenta Effgen6D46 (D46).

Os cones porta-piças utilizados no processo de maquinagem pelo método convencional estão apresentados na Figura 16.



Figura 16 (a) Cone BDV40-HMC20S-85



(b) Mega Micro Chuck

A Tabela 10 mostra a correspondência da ferramenta ao cone. A tabela também indica o comprimento da ferramenta apertado (lfc) no cone.

Tabela 10 Correspondência da ferramenta com o cone

Ferramenta	Tipo de Cone	lfc (mm)
Effgen20	BDV40-HMC20S-85	30
Effgen10	BDV40-HMC20S-85	30
Effgen6	BDV40-HMC20S-85	30
Effgen6D46	BDV40-HMC20S-85	30
Schott20	BDV40-HMC20S-85	30
Schott10	BDV40-HMC20S-85	30
Schott6	BDV40-HMC20S-85	25
SchottHM10	Mega Micro Chuck	25
SchottHM6	Mega Micro Chuck	25
Besdia10	BDV40-HMC20S-85	25
Besdia6	Mega Micro Chuck	25
Pferd10	BDV40-HMC20S-85	25
Pferd6	Mega Micro Chuck	25

Para a realização dos ensaios com auxílio de ultrassons é utilizado o cone Acrow Ultrasonic apresentado na Figura 17. O cone com auxílio de ultrassons é desenhado para a maquinagem de materiais tais como, metal duro, SiC, PEEK, zircônia, quartzo, nitreto de boro, entre outros. Este dispositivo trabalha numa frequência de 20 a 60kHz o que se pode traduzir num movimento oscilatório com uma frequência superior a 20000 vezes por segundo. A utilização de ultrassons, possibilita o prolongamento da vida útil da ferramenta assim como a melhoria dos acabamentos superficiais em materiais considerados difíceis de maquinar.



Figura 17 Cone com auxílio de ultrassons (Acrow Ultrasonic)

Este equipamento faz-se acompanhar por um gerador de frequências de ultrassons (Figura 18) que fica localizado na parte exterior da máquina (CNC). O gerador de ultrassons ajusta a frequência de forma automática quando ligado ao cone com a ferramenta montada. O peso do cone pode variar entre 2,4 a 3,4kg. A rotação máxima recomendada é de 6000rpm.

O fabricante indica que a utilização de uma frequência de 24kHz com uma amplitude de 2-10microns equivale a uma rotação de 240000rpm [80]. Este sistema é normalmente aplicado a cerâmicos utilizados na indústria de semicondutores, rolamentos cerâmicos, titânio, dentes cerâmicos e parafusos ósseos [80][81].



Figura 18 Gerador de ultrassons

3.2.2 Parâmetros de corte

Para o estudo dos parâmetros de corte do vidro cristal são utilizados nove provetes para cada ferramenta. Para tal recorreu-se ao método de Taguchi com o objetivo de encontrar os melhores parâmetros de maquinagem. Recorrendo à estratégia de maquinagem “*slot milling*” (Figura 19), as forças de corte são registadas recorrendo a um dinamómetro. A estratégia “*slot milling*” consiste na remoção de material no interior de uma peça que através da movimentação de uma ferramenta com determinada rotação, velocidade de avanço e A_p produz uma ranhura. Para a realização das combinações de Taguchi, avaliação dos parâmetros e análise ANOVA, recorreu-se ao software Minitab. O Minitab permite tomar decisões com base em dados obtidos através de análises estatísticas e análises preditivas [82], [83].

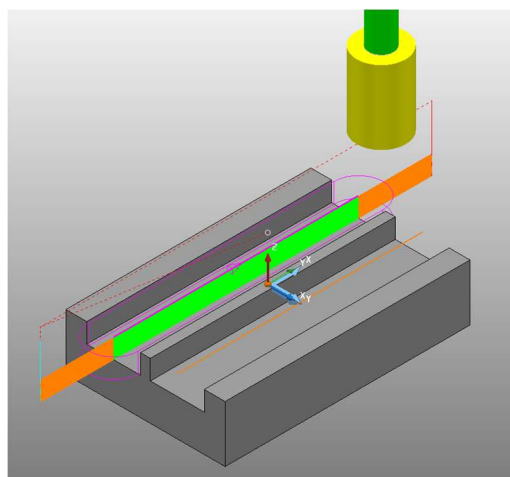


Figura 19 Estratégia “Slot milling”

A Tabela 11 mostra os parâmetros indicados por dois fabricantes: Günter Effgen GmbH e Schott GmbH. De ressaltar que estes fornecedores informaram que não tinham experiência de utilização destas ferramentas em vidro cristal, sendo os parâmetros meramente indicativos.

Tabela 11 Parâmetros indicativos fornecidos pelos fabricantes Effgen e Schott

Fabricante	Diâmetro (mm)	Vf (mm/min)	Rotação (rpm)	Ap (mm)
Effgen	20	100	4775-9549	1
	10	100	9549-19099	1
	6	100	15915-31831	1
Schott	20	700	8000	0,2
	10	700	8000	0,2
	6	700	8000	0,2

Na Tabela 12 são mostrados os parâmetros Vf, Rotação e Ap e os três níveis utilizados para os ensaios convencionais.

Tabela 12 Parâmetros e níveis utilizados para os ensaios convencionais

Parâmetros	1	2	3
Vf (mm/min) (A)	250	500	750
Rotação (rpm) (B)	6000	8000	10000
Ap (mm) (C)	0,05	0,125	0,2

A Tabela 13 mostra a matriz de Taguchi com as combinações entre os parâmetros para a sequência dos ensaios.

Tabela 13 Matriz de Taguchi L9 utilizada para os ensaios convencionais

Ensaio	Matriz L9		
E1	A1	B1	C1
E2	A1	B2	C2
E3	A1	B3	C3
E4	A2	B1	C2
E5	A2	B2	C3
E6	A2	B3	C1
E7	A3	B1	C3
E8	A3	B2	C1
E9	A3	B3	C2

A Tabela 14 mostra a matriz de Taguchi L9 com os diferentes parâmetros e níveis em estudo.

Tabela 14 Matriz de Taguchi L9

Ensaio	Vf (mm/min)	Rotação (rpm)	Ap (mm)
E1	250	6000	0,05
E2	250	8000	0,125
E3	250	10000	0,2
E4	500	6000	0,125
E5	500	8000	0,2
E6	500	10000	0,05
E7	750	6000	0,2
E8	750	8000	0,05
E9	750	10000	0,125

Para as ferramentas com um diâmetro de 6mm é utilizado um Ap mais baixo com o objetivo de reduzir a vibração durante os ensaios. A schottHM6 utiliza os parâmetros da Tabela 14 por possuir o corpo em metal duro. Em ensaios preliminares realizados anteriormente verificou-se que um Ap de 0,2mm provocou um desgaste acelerado da ferramenta. A Tabela 15 e Tabela 16 mostram os Ap utilizados.

Tabela 15 Parâmetros e níveis usados para os ensaios com ferramentas de 6mm para o método convencional

Parâmetro	1	2	3
Vf (mm/min) (A)	250	500	750
Rotação (rpm) (B)	6000	8000	10000
Ap (mm) (C)	0,05	0,0875	0,125

Tabela 16 Diferentes parâmetros das ferramentas de 6mm para o método convencional

Ensaio	Vf (mm/min)	Rotação (rpm)	Ap (mm)
Ec1	250	6000	0,05
E2	250	8000	0,0875
E3	250	10000	0,125
E4	500	6000	0,0875
E5	500	8000	0,125
E6	500	10000	0,05
E7	750	6000	0,125
E8	750	8000	0,05
E9	750	10000	0,0875

Nos ensaios com auxílio de ultrassons, verificou-se através da realização de ensaios preliminares que quanto maior a rotação da ferramenta, menores são as forças de corte e a rugosidade nas peças maquinadas. Por limitações do cone de ultrassons a rotação utilizada é de 6000rpm.

Na Tabela 17 são mostrados os parâmetros e níveis utilizados para os ensaios com auxílio de ultrassons.

Tabela 17 Parâmetros e níveis para ensaios com ultrassons

Parâmetro	1	2	3
Vf (mm/min) (A)	250	500	750
Ap (mm) (C)	0,05	0,125	0,2

Na Tabela 18 é apresentada a matriz ortogonal de Taguchi adaptada para o método com auxílio de ultrassons.

Tabela 18 Matriz de Taguchi usada para os ensaios com auxílio ultrassons

Ensaio	Matriz L9	
E1	A1	C1
E2	A1	C2
E3	A1	C3
E4	A2	C1
E5	A2	C2
E6	A2	C3
E7	A3	C1
E8	A3	C2
E9	A3	C3

A Tabela 19 apresenta a matriz L9 com os diferentes parâmetros para o processo com auxílio de ultrassons.

Tabela 19 mostra a matriz L9 com os diferentes parâmetros com auxílio de Ultrassons

Ensaio	Vf (mm/min)	Ap (mm)
E1	250	0,05
E2	250	0,125
E3	250	0,2
E4	500	0,05
E5	500	0,125
E6	500	0,2
E7	750	0,05
E8	750	0,125
E9	750	0,2

A Tabela 20 mostram os parâmetros e níveis usado para as ferramentas com 6mm de diâmetro.

Tabela 20 Parâmetros e níveis para ensaios Ultrassons ferramenta 6mm

Parâmetro	1	2	3
Vf (mm/min) (A)	250	500	750
Ap (mm) (C)	0,05	0,0875	0,125

A Tabela 21 apresenta a matriz L9 com os diferentes parâmetros e níveis para o processo com auxílio de ultrassons para as ferramentas de 6mm.

Tabela 21 Matriz de Taguchi L9 utilizada nos ensaios com auxílio de ultrassons

Ensaio	Vf (mm/min)	Ap (mm)
E1	250	0,05
E2	250	0,0875
E3	250	0,125
E4	500	0,05
E5	500	0,0875
E6	500	0,125
E7	750	0,05
E8	750	0,0875
E9	750	0,125

Para efeitos comparativos do processo convencional e com auxílio de ultrassons nas ferramentas Besdia e Pferd são utilizados os mesmos parâmetros incluindo a rotação (6000rpm). Para cada ensaio são realizadas pelo menos 5 passagens da ferramenta.

A Tabela 22 apresenta uma estimativa do tempo de maquinagem para uma profundidade de 5mm utilizando a estratégia “*slot milling*” para as várias combinações de parâmetros a estudar. Para facilitar a comparação entre o método convencional e com o auxílio de ultrassons é necessário reajustar os ensaios de forma a ter combinações de ensaios (Ec/Eu) com os mesmos parâmetros de Vf e Ap.

Tabela 22 Tempo de maquinagem dos ensaios

Ensaio	Ferramentas >6mm (min)	Ferramentas de 6mm (min)
E1/E1	77	77
E2/E2	31	43
E3/E3	20	30
E6/E4	41	41
E4/E5	17	24
E5/E6	11	16
E8/E7	30	30
E9/E8	12	17
E7/E9	7	12

Ec- Ensaios executados de forma convencional

Eu- Ensaios executados com auxílio de ultrassons

Devido à diminuição do Ap nos ensaios com as ferramentas de 6mm verifica-se um aumento do tempo dos ensaios para a maioria das combinações testadas.

3.2.3 Procedimento de maquinagem

Para iniciar os ensaios os blocos de vidro cristal fornecidos pela Vista Alegre Atlantis são colocados sobre o dinamómetro conforme mostra a Figura 20.

Por não possuírem um formato regular antes de se iniciar os testes é necessário uma operação de facejamento para nivelar a superfície a maquinar de forma a possibilitar uma correta medição das forças de corte. O processo é monitorizado através do *software* DynoWare.



Figura 20 Provete colocado sobre a superfície do dinamómetro

Após o acerto do bloco recorreu-se ao *software* Powermill utilizando a estratégia de *slot milling*. A programação desta estratégia permite obter uma maior precisão durante a maquinagem e a diminuição de erros, nas várias passagens da ferramenta no bloco.

3.2.4 Avaliação das forças de corte

Para realizar o estudo das forças de corte durante o processo de maquinagem do vidro cristal, utilizou-se o dinamómetro Kistler 9139 AA (Figura 12). Este dispositivo tem como base a utilização de sensores piezoelétricos permitindo a medição das forças de corte nas direções xyz de -30 a 30kN. Para a aquisição dos sinais é utilizado o equipamento *Kistler* LabAmp 5167 e em conjunto com o *software DynoWare* procedeu-se à aquisição dos dados. Para melhorar a visualização e compreensão dos resultados e para minimizar fatores alheios aos parâmetros de controlo, tais como o aperto do provete ao dinamómetro e as irregularidades na superfície, é utilizado um filtro passa alto na componente F_y (3 e 0,1Hz), sendo esta a mais afetada pelo ruído na aquisição feita através do *DynoWare*. Para a avaliação das forças são realizadas pelo menos 5 passagens com a estratégia *slot milling* para cada combinação de parâmetros. Para posterior tratamento dos dados é realizada uma análise separada da força resultante máxima (positiva) e da força resultante mínima (negativa) de cada passagem. Na fase seguinte é realizada a media das 5 passagens realizadas.

3.2.5 Avaliação da superfície maquinada

Após a maquinagem do vidro cristal é necessário avaliar o seu acabamento superficial de modo a aferir as irregularidades e imperfeições. Para esse efeito, pode recorrer-se a um rugosímetro. Para a medição da rugosidade é utilizado o rugosímetro Time TR220 (Figura 21). O equipamento de medição é nivelado, e a ponta do rugosímetro é colocada na superfície a medir.



Figura 21 Rugosímetro TR220

Para verificar a influência dos parâmetros de entrada (V_f , rotação e a_p) em relação aos parâmetros de saída (forças de corte; rugosidade superficial), empregou-se o modelo ANOVA. Para tal recorreu-se ao programa Minitab onde se realizou a ANOVA para cada parâmetro de resposta tendo como base a matriz de entrada composta pelos parâmetros de corte. A partir dos resultados gerados por este método é possível determinar a influência dos parâmetros no resultado final da maquinagem e também definir a combinação ótima destes parâmetros de forma a obter a menor força de corte e a menor rugosidade superficial. Relativamente ao procedimento na recolha da rugosidade superficial são pelo menos 5 medições em locais diferentes após a aplicação da estratégia *slot milling*.

3.2.6 Avaliação do desgaste da ferramenta

Para medir o desgaste das ferramentas é utilizado o digitalizador Carl Zeiss Comet L3 2 5M com a lente de 100mm. A Figura 22 mostra o exemplo da digitalização de uma ferramenta Effgen6.

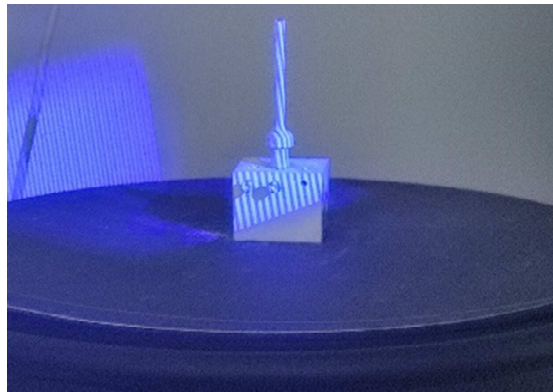


Figura 22 Digitalização de uma ferramenta

Após a realização da digitalização é utilizado o software Zeiss Calypso para obter os diâmetros e as alturas na zona de corte com o objetivo de avaliar o desgaste das ferramentas. As medições obtidas são comparadas com o modelo CAD das ferramentas [84].

Esta metodologia é aplicada às ferramentas Besdia10, Besdia6, Pferd10 e Pferd6 com o objetivo de comparar maquinagem convencional com a maquinagem com o auxílio de ultrassons.

Para a medição da rugosidade das ferramentas em estudo é utilizado o Sensofar S-neox 3D Optical profiler. Como referido anteriormente este sistema incorpora três tecnologias sendo que a técnica utilizada no perfilómetro ótico é a variação de foco.



Figura 23 Perfilómetro Sensofar S-neox 3D Optical profiler [85].

3.3 Estratégias de maquinagem da escultura

Como prova de conceito é realizada a maquinagem de uma escultura. Será apresentado o modelo CAD da peça, fixação do bloco, definição de estratégias e ferramentas e controlo dimensional.

3.3.1 Modelo da peça em 3D

A peça proposta pela Vista Alegre Atlantis foi desenvolvida pelo designer Bruno Escoval e está apresentada na Figura 24. De sublinhar a elevada complexidade da geometria, com concavidades de pequenas dimensões. A peça tem um plano de simetria.

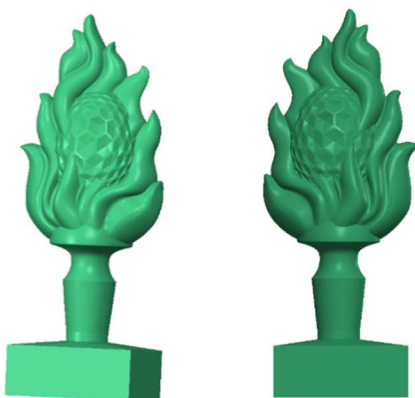


Figura 24 Modelo da escultura

A maquinagem desta peça tem como objetivo validar a utilização das ferramentas em estudo na maquinagem CNC de geometrias complexas de vidro cristal.

3.3.2 Aperto do bloco em vidro cristal

Em testes preliminares verificou-se que os blocos em vidro cristal não podem ser apertados diretamente à prensa. Devido à sua fragilidade partem facilmente na zona de aperto. A solução encontrada consiste em colar o bloco em vidro cristal a uma base de alumínio, sendo esta base apertada na prensa. A cola Ceys Araldite standard é a que tem melhor desempenho nesta função. A base tem como função a fixação do bloco à prensa sem partir (Figura 25).



Figura 25 Exemplo de bloco fixo com a base à prensa

3.3.3 Programação CAM

Para a realização da escultura recorreu-se ao programa Powermill 2021 a partir do qual se utilizou as seguintes estratégias:

- Desbaste modelo (offset ao modelo);
- Acabamento inclinado e raso;
- Acabamento *multi pencil corner*.

3.3.4 Ferramentas

A Figura 26 apresentam as dimensões gerais das ferramentas necessárias para a maquinagem da escultura. Para a maquinagem da escultura para além de utilizar as ferramentas da Effgen e da Schott também são utilizadas ferramentas da marca Finzler, Schrock & Kimmel GmbH [86]. Estas últimas estão identificadas com a designação Fis. Estas ferramentas têm um corpo em liga de aço, tendo na zona de corte um revestimento de diamante com tamanho de grão D126.

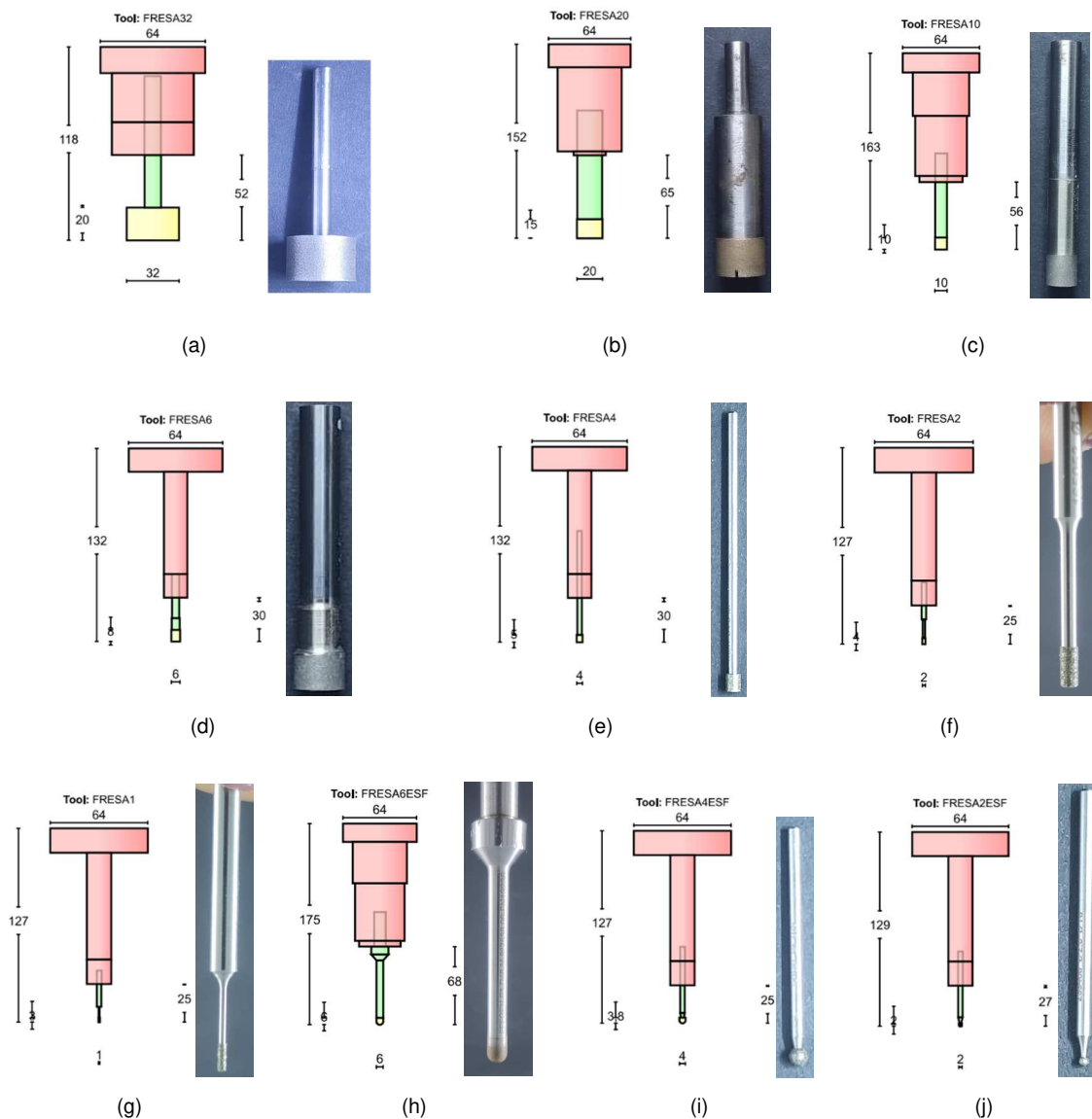


Figura 26- Dimensões em mm e imagens da ferramenta Fis32 (a), Effgen20 (b), Schott10 (c), SchottHM6 (d), Fis4 (e), Fis2 (f), Fis1 (g), Effgen6 (esférica) (h), Fis4 (esférica) (i), Fis2 (esférica) (j)

3.3.5 Controlo dimensional

Para realizar o controlo dimensional é utilizado o Scanner da Carl Zeiss Comet L3 2 5M. A lente da câmara utilizada é a de 500mm.

Em termos de procedimentos é necessário calibrar o equipamento de acordo com a lente utilizada, introduzir o CAD do modelo no Colin, definir as estratégias que no caso das ferramentas recorre-se ao prato rotativo, fazer limpeza das imperfeições resultantes do processo, gerar a malha e exportar o ficheiro. A comparação do modelo CAD com o modelo digitalizado é realizada no software Colin.

4 Parâmetros de corte

Neste capítulo são apresentados os trabalhos experimentais realizados e as medições das forças de corte e rugosidades superficiais para o processo de maquinagem convencional e com auxílio de ultrassons utilizando diversas ferramentas.

4.1 Maquinagem convencional

Nesta secção são tratados os dados experimentais da força de corte, otimização da força de corte e otimização da rugosidade superficial para o método convencional.

4.1.1 Resultados experimentais convencional

De seguida são apresentados os resultados das forças de corte exercidas pela ferramenta Effgen20. Para as restantes ferramentas são apresentados apenas os principais resultados sendo a restante informação disponibilizada em anexo.

A Figura 27 mostra a aquisição dos valores das forças de corte dos ensaios para a ferramenta Effgen20.

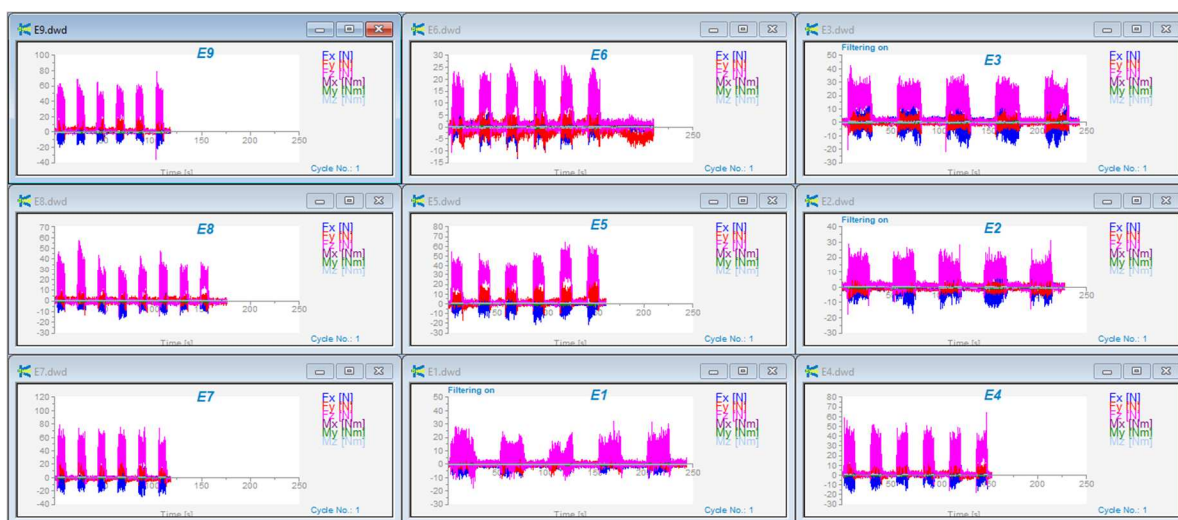


Figura 27 Gráficos DynoWare para os diferentes ensaios fresa Effgen20

A Tabela 23 e a Tabela 24 mostra os resultados dos vários ensaios para as forças resultantes máximas (positivas) e mínimas (negativas), que resultam das combinações de parâmetros já estabelecidos pela matriz ortogonal de Taguchi (Tabela 13), com as respetivas médias e desvios padrão.

Tabela 23 Componentes mínimas de forças resultantes de corte Effgen20

Comparação das forças resultantes para as componentes negativas (N)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
	27,02	26,25	32,75	32,79	31,75	19,36	35,61	35,91	33,56
	23,31	22,24	28,76	33,66	29,15	17,86	40,58	28,15	35,11
	24,15	28,60	32,88	26,51	30,05	18,18	35,82	32,01	32,53
	23,81	23,57	27,79	28,83	38,02	15,93	35,00	31,52	29,22
	25,42	26,01	29,67	28,64	28,82	18,33	38,49	35,90	34,53
Média	24,74	25,33	30,37	30,09	31,56	17,93	37,10	32,70	32,99
Desvio padrão	1,49	2,48	2,33	3,02	3,79	1,25	2,36	3,28	2,32

Tabela 24 Componentes máximas de forças resultantes de corte Effgen20

Comparação das forças resultantes para as componentes positivas (N)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
	45,59	38,83	49,54	82,28	68,87	32,57	98,37	68,18	77,14
	44,42	38,86	50,99	77,16	77,84	33,44	107,60	65,12	87,97
	42,35	38,67	53,23	72,13	74,10	32,34	108,28	57,37	81,67
	41,64	41,31	51,03	66,43	78,59	35,10	95,68	68,34	88,21
	42,96	37,71	50,64	69,51	72,57	33,43	96,88	62,04	81,00
Média	43,39	39,08	51,09	73,50	74,39	33,38	101,36	64,21	83,20
Desvio padrão	1,60	1,33	1,34	6,29	3,98	1,08	6,08	4,61	4,79

As duas tabelas anteriores mostram que o ensaio que apresenta a menor força de corte exercida é o E6 ($V_f = 500\text{mm/min}$, Rotação 10000rpm e $A_p 0,05\text{mm}$).

A Tabela 25 e a Tabela 26 mostra os resultados das medições, para R_a e R_z , e as correspondentes médias e os desvios padrão.

Tabela 25 Valores de R_a para cada um dos provetes Effgen20

Ra (μm)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
	2,107	1,917	1,377	2,359	2,812	2,412	2,790	1,316	1,405
	2,093	2,117	1,990	2,426	2,376	2,339	2,687	1,234	1,247
	1,880	2,052	1,762	2,425	2,383	2,877	3,070	1,476	1,019
	1,835	2,191	1,599	2,613	2,854	2,454	2,458	1,414	1,252
	2,161	2,238	1,815	2,783	2,344	2,415	2,636	1,283	1,192
Média	2,015	2,103	1,709	2,521	2,554	2,499	2,728	1,345	1,223
Desvio padrão	0,147	0,126	0,232	0,174	0,256	0,215	0,226	0,099	0,139

Tabela 26 Valores de R_z para cada um dos provetes Effgen20

Rz (μm)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
	13,32	12,40	9,15	13,15	15,50	14,64	15,49	8,53	9,39
	12,92	12,94	10,74	14,32	14,13	14,43	14,86	8,66	9,66
	12,81	13,71	10,57	14,29	13,87	15,98	15,28	10,50	8,20
	10,80	11,73	10,34	14,85	14,16	14,83	16,41	9,30	9,34
	12,91	13,02	11,72	14,87	14,13	14,63	15,58	8,66	9,32
Média	12,55	12,76	10,50	14,30	14,36	14,90	15,52	9,13	9,18
Desvio padrão	1,00	0,74	0,92	0,70	0,65	0,62	0,57	0,82	0,57

O ensaio E9 ($V_f = 750\text{mm/min}$, Rotação 10000rpm e $A_p 0,125\text{mm}$) e E8 ($V_f = 750\text{mm/min}$, Rotação 8000rpm e $A_p 0,05\text{mm}$) são os que apresentam menor rugosidade superficial.

A Tabela 27 apresenta as médias das forças resultantes (componente negativa e positiva) e da rugosidade final (R_a e R_z) com os respectivos desvios padrões para a ferramenta Effgen10.

Tabela 27 Tabela resumo das forças resultantes para as componentes negativas, positivas e de rugosidade Ra e Rz para a ferramenta Effgen10

Comparação das forças resultantes para as componentes negativas (N)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
Média	26,25± 3,09	49,04± 9,41	77,06± 9,37	89,76± 8,85	163,48± 9,40	26,6± 1,24	800,99± 66,15	51,49± 1,85	43,66± 3,86
Comparação das forças resultantes para as componentes positivas (N)									
Média	28,85± 2,69	60,17± 5,01	89,68± 4,31	132,8± 9,33	160,71±8,00	27,77± 3,14	783,23± 28,29	56,522± 4,95	50,362± 5,22
Ra (µm)									
Média	1,78± 0,11	1,2216± 0,07	1,1964± 0,11	1,9206± 0,12	1,9622± 0,18	1,7132± 0,22	3,3912± 0,35	2,1336± 0,08	1,7864± 0,18
Rz (µm)									
Média	13,17± 0,54	9,7744± 0,89	9,069± 0,84	12,61± 0,49	13,242± 0,74	12,022± 0,96	17,93± 0,92	12,752± 0,58	11,752± 0,88

O ensaio que apresenta menores forças de corte é o ensaio E6 ($V_f=500\text{mm/min}$, Rotação 10000rpm e $A_p 0,05\text{mm}$). O E3 é o ensaio que apresenta um valor de rugosidade mais baixo.

A Tabela 28 mostra a média dos resultados para a componente das forças resultantes (forças negativas e forças positivas) e a rugosidade final dos ensaios (Ra e Rz) para a ferramenta Effgen6.

Tabela 28 Tabela resumo das forças resultantes para as componentes negativas, positivas, e de rugosidade Ra e Rz para a ferramenta Effgen6

Comparação das forças resultantes para as componentes negativas (N)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
Média	91,10± 18,78	112,26± 14,76	144,74± 22,62	180,74± 22,74	240,34± 29,64	78,75± 17,62	313,10± 38,13	96,59± 12,20	125,78± 8,91
Comparação das forças resultantes para as componentes positivas (N)									
Média	76,27± 12	114,79± 9,51	188,14± 5,21	160,78± 13,56	209,43± 12,59	70,66± 3,14	318,34± 15,44	103,05± 14,44	141,23± 12,37
Ra (µm)									
Média	2,009± 0,107	2,218± 0,107	2,193± 0,099	2,582± 0,103	1,753± 0,073	1,139± 0,086	3,290± 0,086	2,901± 0,1	3,364± 0,159
Rz (µm)									
Média	11,9± 0,74	13,19± 0,992	12,5± 1,46	14,31± 1,712	12,32± 1,474	7,8± 0,599	18,96± 1,133	16,4± 1,1	18,9± 0,663

Observando as forças de corte da Tabela 28, constata-se que o ensaio com valores mais baixos de força é o ensaio E6 ($V_f=500\text{mm/min}$, Rotação 10000rpm e $A_p 0,05\text{mm}$). Na Tabela 28 ainda se pode verificar que o ensaio E6 ($V_f=500\text{mm/min}$, Rotação 10000rpm e $A_p 0,05\text{mm}$) é o ensaio que apresenta os valores mais baixos de rugosidade (Ra e Rz).

A Tabela 29 mostra a média dos resultados para a componente das forças (positivas e negativas) e de rugosidade finais para a ferramenta Effgen6D46. A ferramenta Effgen6 tem um grão de diamante D126 enquanto a ferramenta Effgen6D46 tem um grão D46.

Tabela 29 Tabela resumo das forças resultantes para as componentes negativas, positivas, e de rugosidade Ra e Rz para a ferramenta Effgen6D46

Comparação das forças resultantes para as componentes negativas (N)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
Média	66,08± 4,54	214,67± 43,51	287,73± 25,66	301,06± 42,20	379,51± 25,30	128,88± 16,73	681,56± 159,18	112,67± 14,45	262,51± 31,28
Comparação das forças resultantes para as componentes positivas (N)									
Média	67,64± 3,97	203,11± 26,83	268,44± 10,83	235,53± 12,35	362,58± 49,37	122,11±6,04	757,55± 202,42	112,28± 6,08	776,45± 197,99
Ra (µm)									
Média	1,410± 0,91	1,288± 0,57	1,275± 0,91	1,618± 0,065	1,635± 0,1,5	1,247± 0,087	2,535± 0,183	1,421± 0,117	1,516± 0,102
Rz (µm)									
Média	8,84± 0,62	8,760± 0,697	8,277± 0,976	10,76± 1,282	9,87± 0,344	7,78± 0,880	13,92± 1,218	9,331± 1,115	9,327± 0,925

Através da análise da Tabela 29 verifica-se que o ensaio E1 (Vf=250mm/min, Rotação 6000rpm e Ap 0,05mm) apresenta a menor força de corte. Relativamente às rugosidades apresentadas na mesma tabela o E6 (Vf=500mm/min, Rotação 10000rpm e Ap 0,05mm) apresenta menores valores de rugosidade.

A Tabela 30 mostra a média dos resultados para a componente das forças e das rugosidades finais dos ensaios de maquinação para ferramenta Schott20.

Tabela 30 resume as forças resultantes para as componentes negativas, positivas, e de rugosidade Ra e Rz para a ferramenta Schott20

Comparação das forças resultantes para as componentes negativas (N)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
Média	17,03± 1,90	22,67± 1,79	34,68± 1,86	39,90± 3,54	45,78± 4,40	22,79± 2,65	42,12± 6,28	21,05± 2,0	25,69± 2,19
Comparação das forças resultantes para as componentes positivas (N)									
Média	29,96± 1,33	49,87± 3,33	53,87± 2,69	95,58± 2,27	91,80± 2,85	44,78± 1,98	119,69± 4,92	51,29± 1,07	62,42± 6,12
Ra (µm)									
Média	2,0± 0,15	1,122± 0,106	1,287± 0,081	1,880± 0,137	1,776± 0,102	1,269± 0,094	2,606± 0,123	2,144± 0,153	2,027± 0,194
Rz (µm)									
Média	13,3± 1,58	7,9± 0,74	9,54± 0,78	12,5± 1,4	12,4± 1,2	9,2± 0,667	15,5± 0,845	14,68± 1,288	13,55± 2,258

Observando a Tabela 30 verifica-se que o ensaio que apresenta menores forças é o ensaio E1 (Vf=250mm/min, Rotação 6000rpm e Ap 0,05mm). A Tabela 30 mostra também as médias da rugosidade Ra e Rz sendo que o ensaio E2 apresenta os valores mais baixos de rugosidade.

A Tabela 31 mostra a média dos resultados para a componente das forças resultantes e da rugosidade final de cada ensaio para Ferramenta Schott10.

Tabela 31 Tabela resumo das forças resultantes para as componentes negativas, positivas, e de rugosidade Ra e Rz para a ferramenta Schott10

Comparação das forças resultantes para as componentes negativas (N)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
Média	41,84± 2,12	42,82± 1,35	43,80± 2,61	66,88± 7,27	37,00± 1,39	27,57± 1,44	65,75± 2,79	46,61± 3,16	85,27± 1,26
Comparação das forças resultantes para as componentes positivas (N)									
Média	40,32± 1,44	55,58± 1,64	51,11± 1,79	84,41± 4,22	73,90± 3,16	27,95± 1,69	153,50± 11,45	75,67± 4,08	83,79± 3,33
Ra (µm)									
Média	2,333± 0,119	1,786± 0,194	1,437± 0,062	3,107± 0,085	1,906± 0,107	2,065± 0,377	2,424± 0,279	3,456± 0,290	2,618± 0,400
Rz (µm)									
Média	14,1± 1,59	12,318±1,5 11	10,901±1,3 69	18,354±0,7 99	12,596±1,3 05	13,881±2,5 19	15,862±1,8 57	20,444±1,8 11	16,050±1,9 14

Na Tabela 31 podemos observar que o ensaio que apresenta menores forças exercidas é o ensaio E6 (Vf=500mm/min, Rotação 10000rpm e Ap 0,05mm. Em relação à rugosidade o ensaio E3 (Vf=250mm/min, Rotação 10000rpm e Ap 0,2mm) é o que apresenta menor rugosidade superficial.

A Tabela 32 fornece os resultados das médias das componentes das forças resultantes e das rugosidades finais Ferramenta Schott6.

Tabela 32 Tabela resumo das forças resultantes para as componentes negativas, positivas, e de rugosidade Ra e Rz para a ferramenta Schott6

Comparação das forças resultantes para as componentes negativas (N)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
Média	14,46± 1,39	18,22± 0,92	19,71± 0,29	28,97± 0,59	29,41± 1,64	23,28± 0,97	37,90± 4,28	25,27± 1,59	34,43± 1,86
Comparação das forças resultantes para as componentes positivas (N)									
Média	13,95± 0,76	20,31± 1,30	21,53± 0,40	30,60± 1,40	27,88± 0,90	24,19± 2,60	40,24± 2,15	25,29± 1,47	33,96± 3,41
Ra (µm)									
Média	1,388 ±0,098	1,090± 0,060	1,177± 0,058	1,269± 0,053	1,234± 0,097	1,519± 0,069	1,876± 0,096	1,290± 0,074	1,149± 0,074
Rz (µm)									
Média	10,999± 1,429	8,650± 0,589	8,941± 0,874	10,390± 1,115	9,588± 1,317	11,132± 1,280	13,250± 1,726	9,631± 1,023	9,950± 1,072

Observando a tabela anterior o ensaio que apresenta menores forças exercidas é o ensaio E1 (Vf=250mm/min, Rotação 6000rpm e Ap 0,05mm). O ensaio E2 (Vf=250mm/min, Rotação 8000rpm e Ap 0,0875mm) apresenta os valores de rugosidade mais baixos.

A Tabela 33 exibe as médias dos resultados para as forças resultantes e das rugosidades superficiais utilizando a ferramenta SchottHM10.

Tabela 33 Tabela resumo das forças resultantes para as componentes negativas, positivas, e de rugosidade Ra e Rz para a ferramenta SchottHM10

Comparação das forças resultantes para as componentes negativas (N)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
Média	28,23± 0,72	38,63± 3,00	39,25± 2,13	56,11± 3,84	60,18± 3,98	32,01± 2,73	76,71± 17,10	32,59± 1,62	43,19± 2,17
Comparação das forças resultantes para as componentes positivas (N)									
Média	41,96± 2,21	53,05± 1,96	47,37± 3,32	66,80± 2,57	67,52± 5,85	42,29± 1,94	104,12± 2,67	39,60± 5,35	53,91± 4,78
Ra (µm)									
Média	1,624± 0,061	1,363± 0,050	1,389± 0,050	1,510± 0,095	1,621± 0,096	1,670± 0,090	1,878± 0,047	1,474± 0,092	1,470± 0,059
Rz (µm)									
Média	11,978± 1,102	10,238± 1,547	10,161± 1,351	10,271± 1,337	11,616± 0,456	11,202± 0,679	13,058± 1,341	10,626± 1,655	10,537± 0,928

Observando a tabela anterior e tendo em conta as forças positivas o ensaio E8 (Vf=750mm/min, Rotação 8000rpm e Ap 0,05mm) é que apresenta menores forças de corte. Olhando para os ensaios da rugosidade Ra o ensaio E2 (Vf=250mm/min, Rotação 8000rpm e Ap 0,125mm) é o ensaio que apresenta menor rugosidade.

A Tabela 34 exibe as médias das forças resultantes (componente negativa e positiva) e a rugosidade superficial usando a ferramenta SchottHM6.

Tabela 34 Tabela resumo das forças resultantes para as componentes negativas, positivas, e de rugosidade Ra e Rz para a ferramenta SchottHM6

Comparação das forças resultantes para as componentes negativas (N)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
Média	27,54± 1,53	29,52± 2,24	25,64± 0,97	53,94± 3,23	49,82± 6,17	31,34± 2,16	69,99± 7,89	60,57± 4,69	54,99± 7,53
Comparação das forças resultantes para as componentes positivas (N)									
Média	37,37± 3,04	38,01± 2,46	31,15± 1,07	61,83± 1,95	57,81± 2,26	39,90± 2,47	84,09± 5,77	72,16± 7,69	67,61± 13,39
Ra (µm)									
Média	1,325± 0,072	0,913± 0,082	0,845± 0,088	1,506± 0,071	1,627± 0,074	1,733± 0,081	1,854± 0,082	1,465± 0,083	1,583± 0,077
Rz (µm)									
Média	9,908± 1,563	8,098± 1,028	7,451± 1,008	11,138± 0,701	11,403± 1,163	11,948± 0,719	13,952± 0,565	10,350± 0,555	8,384± 0,499

Observando a Tabela 34 verifica-se que o ensaio E3 ($V_f=250\text{mm/min}$, Rotação 10000rpm e $A_p 0,2\text{mm}$) é o ensaio que apresenta menor rugosidade e menores forças de corte.

A Tabela 35 mostra a média dos resultados para a componente das forças e da rugosidade da ferramenta Besdia10.

Tabela 35 Tabela resumo das forças resultantes para as componentes negativas, positivas, e de rugosidade Ra e Rz para a ferramenta Besdia10

Comparação das forças resultantes para as componentes negativas (N)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
Média	43,86± 1,39	91,99± 4,57	159,62± 9,87	67,57± 1,44	89,65± 4,13	113,86± 2,80	68,13± 3,02	106,61± 4,99	144,51± 5,24
Comparação das forças resultantes para as componentes positivas (N)									
Média	44,93± 1,16	96,83± 6,56	172,73± 10,71	75,01± 0,66	101,39± 5,03	136,02± 1,03	69,34± 3,78	119,98± 4,16	162,26± 4,18
Ra (μm)									
Média	1,566± 0,047	1,847± 0,099	2,202± 0,091	1,803± 0,105	2,070± 0,164	2,360± 0,111	2,195± 0,119	2,787± 0,177	2,991± 0,094
Rz (μm)									
Média	11,13± 0,76	11,73± 1,38	14,03± 0,74	12,30± 0,73	12,52± 0,80	14,49± 0,86	13,52± 0,98	16,49± 1,38	18,36± 0,79

Explorando a tabela anterior de forma a encontrar o ensaio com menor força e rugosidade pode-se verificar que o ensaio E1 ($V_f=250\text{mm/min}$, Rotação 6000rpm e $A_p 0,05\text{mm}$) é o que apresenta a menor força e rugosidade.

A Tabela 36 mostra a média dos resultados para a componente das forças e da rugosidade para Ferramenta Besdia6.

Tabela 36 Tabela resumo das forças resultantes para as componentes negativas, positivas, e de rugosidade Ra e Rz para a ferramenta Besdia6

Comparação das forças resultantes para as componentes negativas (N)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
Média	33,95± 0,53	47,59± 2,39	75,50± 2,73	53,24± 1,19	73,94± 1,98	120,21± 3,13	76,63± 3,69	88,25± 2,07	112,94± 2,55
Comparação das forças resultantes para as componentes positivas (N)									
Média	33,94± 0,11	51,35± 2,55	81,92± 2,93	52,53± 1,37	82,65± 0,68	131,96± 4,05	72,28± 4,29	92,04± 2,21	129,69± 3,37
Ra (μm)									
Média	1,472± 0,040	1,469± 0,099	1,759± 0,103	2,099± 0,087	2,316± 0,062	2,545± 0,158	2,324± 0,096	2,535± 0,203	2,798± 0,058
Rz (μm)									
Média	9,72± 0,51	9,58± 0,78	12,05± 0,98	13,09± 0,66	15,34± 1,55	18,05± 1,01	14,92± 1,10	16,98± 2,20	16,12± 0,54

Analisando a tabela anterior os ensaios que apresentam valores mais baixos da força é o ensaio E1 ($V_f=250\text{mm/min}$, Rotação=6000rpm; $A_p=0,05\text{mm}$) e para a rugosidade é o ensaio E2 ($V_f=250\text{mm/min}$, Rotação=6000rpm; $A_p=0,0875\text{mm}$).

A Tabela 37 mostra a média dos resultados para a componente das forças e da rugosidade para a ferramenta Pferd10. Analisando esta tabela verifica-se que o ensaio E7 apresenta valores de força de corte e o E1 de rugosidade mais baixos.

A Tabela 38 mostra a média dos resultados para a componente das forças e da rugosidade para a ferramenta Pferd6.

Tabela 37 Tabela resumo das forças resultantes para as componentes negativas, positivas, e de rugosidade Ra e Rz para a ferramenta Pferd10

Comparação das forças resultantes para as componentes negativas (N)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
Média	34,52± 1,44	73,82± 1,32	721,65± 26,66	90,38± 4,31	175,64± 27,50	812,88± 19,26	36,97± 0,45	228,86± 8,11	526,41± 49,83
Comparação das forças resultantes para as componentes positivas (N)									
Média	46,98± 1,98	69,85± 1,83	779,06± 22,42	125,49± 6,23	242,81± 37,97	674,14± 15,93	41,93± 0,78	262,06± 11,53	561,26± 62,97
Ra (µm)									
Média	1,457± 0,093	1,553± 0,077	2,445± 0,148	1,988± 0,063	2,574± 0,308	3,584± 0,162	2,391± 0,157	2,630± 0,406	3,264± 0,228
Rz (µm)									
Média	10,09± 0,93	10,91± 0,94	15,22± 1,29	13,24± 0,65	15,10± 2,13	19,71± 1,49	13,85± 0,92	16,53± 1,80	19,57± 1,75

Observando a Tabela 38 mostra que o ensaio E1 apresenta valores de força de corte e rugosidade superficial mínimos.

Tabela 38 Tabela resumo das forças resultantes para as componentes negativas, positivas, e de rugosidade Ra e Rz para a ferramenta Pferd6

Comparação das forças resultantes para as componentes negativas (N)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
Média	34,35± 0,97	60,63± 1,07	69,19± 0,90	48,60± 1,41	62,55± 3,36	95,04± 3,50	54,01± 4,21	69,03± 1,09	98,64± 2,00
Comparação das forças resultantes para as componentes positivas (N)									
Média	34,87± 1,61	66,10± 2,34	72,57± 1,84	52,28± 1,59	68,27± 3,38	109,24± 5,21	55,46± 1,66	76,20± 0,52	110,64± 3,83
Ra (µm)									
Média	1,094± 0,082	1,119± 0,069	1,439± 0,126	1,775± 0,079	1,969± 0,232	2,558± 0,147	2,391± 0,161	2,390± 0,106	2,645± 0,162
Rz (µm)									
Média	8,66± 1,01	8,93± 0,80	11,03± 1,39	12,09± 1,22	13,94± 1,48	16,00± 1,70	14,10± 0,93	14,58± 1,10	15,78± 2,15

4.1.2 Otimização da força de corte

Nesta subsecção utiliza-se o método de Taguchi e ANOVA para a otimização da força de corte.

A Tabela 39 mostra os resultados da razão sinal-ruído e as forças de corte de cada ensaio realizado da ferramenta Effgen20. O ensaio E6 é o que apresenta a melhor razão sinal-ruído.

Tabela 39 Relação entre os ensaios de força e as razões sinal-ruído Effgen20

Ensaio	Vf (mm/min)	Rotação (rpm)	Ap (mm)	Força (N)	S/N
E1	250	6000	0,05	43,390	-32,7478
E2	250	8000	0,125	39,080	-31,8391
E3	250	10000	0,2	51,086	-34,1660
E4	500	6000	0,125	73,502	-37,3260
E5	500	8000	0,2	74,394	-37,4308
E6	500	10000	0,05	33,376	-30,4687
E7	750	6000	0,2	101,362	-40,1175
E8	750	8000	0,05	64,210	-36,1521
E9	750	10000	0,125	83,198	-38,4023

A Figura 28 mostra a curva de S/N de cada parâmetro para os ensaios da força resultante. O gráfico para a razão sinal-ruído mostra os parâmetros ótimos para obtenção das menores forças de corte. Os parâmetros ótimos são Vf=250mm/min, Rotação=10000rpm e Ap=0,05mm. A força de corte estimada é de 22,15N. O intervalo de confiança (IC) a 95% é de (-7,65;67,2)N.

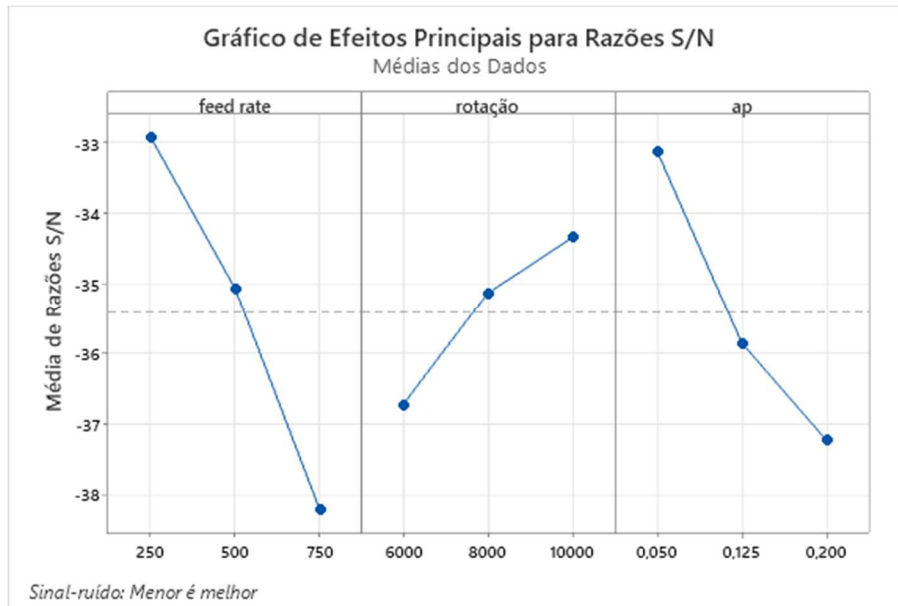


Figura 28 Gráfico curva de S/N de cada parâmetro para os ensaios de força resultante Effgen20

O programa *Minitab* permite saber qual o grau de influência de cada um dos parâmetros nas forças de corte, como mostra Tabela 40.

Tabela 40 Análise de variância da força Effgen20

Fonte	GL	Soma dos quadrados	Quadrados médios	Valor F	Valor-P	Contribuição
Vf	2	2234,1	1117,06	18,10	0,052	54,54%
Rotação	2	478,5	239,23	3,88	0,205	11,68%
Ap	2	1260,1	630,07	10,21	0,089	30,76%
Erro	2	123,4	61,71			3,01%
Total	8	4096,1				100,00%

Como se pode verificar na tabela anterior, os parâmetros que mais influenciam a resposta são o Vf com 54,54%, a profundidade de corte com 30,76% e por fim a rotação com 11,68%. Combinando as respostas razão sinal-ruído com a contribuição dos fatores para a resposta, pode-se concluir que para a otimização dos resultados a tendência passa pelo aumento da rotação, diminuição do Vf e diminuição da profundidade de corte.

A Tabela 41 apresenta os parâmetros ótimos (Vfo, Ro, APo), grau de significância (Ct) dos parâmetros e força estimada (Fe).

Tabela 41 Parâmetros ótimos, grau de significância e força estimada método convencional

Ferramenta	Vf		Rotação		Ap		Erro Ct (%)	Fe (N)	IC a 95%
	Vfo (mm/min)	Ct (%)	Ro (rpm)	Ct (%)	Apo (mm)	Ct (%)			
Effgen20	250	54,54	10000	11,68	0,05	30,76	3,01	22,2	-7,7;67,2
Effgen10	250	20,48	10000	25,57	0,05	35,87	18,08		-931,0;619,0
Effgen6	250	11,96	10000	9,45	0,05	76,49	2,11	35,0	-50,1;121,7
Effgen6D46	250	41,18	8000	7,72	0,05	39,78	11,21		-821,0;543,0
Schott20	250	32,06	10000	17,68	0,05	48,02	2,24	7,1	-26,0;40,2
Schott10	250	47,3	10000	21,42	0,05	28,8	2,48	7,7	-35,8;51,1
Schott6	250	66,07	8000	4,36	0,05	26,49	3,08	11,4	0,9;21,8
SchottHM10	250	15,77	10000	26,54	0,05	45,93	11,76	21,8	-31,0;74,6
SchottHM6	250	83,76	10000	12,48	0,05	3,7	0,06	22,7	19,1;26,3
Besdia10	250	2,19			0,05	89,68	8,14	58,5	22,6;94,4
Besdia6	250	32,8			0,05	64,29	2,91	27,7	10,9;44,5
Pferd10	250	0,91			0,05	92,29	6,8	48,4	-170,0;266,8
Pferd6	250	17,92			0,05	75,26	6,82	33,7	14,6;52,7

Após a otimização das forças os melhores parâmetros consistem numa velocidade de avanço baixa, rotação alta e A_p baixo. Analisando o grau de significância, os parâmetros que mais contribuem para a obtenção dos parâmetros ótimos é o A_p e o V_f . Devido à incerteza associada ao intervalo de confiança obtido, as ferramentas Effgen10 e Effgen6D46 originaram uma força estimada negativa não podendo este resultado ser considerado como relevante.

4.1.3 Otimização da rugosidade superficial

A Tabela 42 apresenta os resultados da rugosidade e do sinal-ruído da ferramenta Effgen20, medidos no final de cada ensaio das forças de corte.

Tabela 42 Relação entre a rugosidade superficial e as razões sinal-ruído Effgen20

Ensaio	V_f (mm/min)	Rotação (rpm)	A_p (mm)	R_a (μm)	S/N
E1	250	6000	0,05	2,015	-6,08550
E2	250	8000	0,125	2,103	-6,45679
E3	250	10000	0,2	1,709	-4,65484
E4	500	6000	0,125	2,521	-8,03146
E5	500	8000	0,2	2,554	-8,14442
E6	500	10000	0,05	2,499	-7,95533
E7	750	6000	0,2	2,728	-8,71689
E8	750	8000	0,05	1,345	-2,57445
E9	750	10000	0,125	1,223	-1,74853

Tal como acontece para a força de corte, o menor valor é o melhor resultado. Assim o ensaio E9 é o que apresenta melhor resultado. No que diz respeito à força de corte, é outro ensaio o que apresenta o melhor resultado (E6). A Figura 29 mostra que um V_f de 750mm/min, rotação de 10000rpm e uma profundidade de corte de 0,125mm é a combinação que apresenta melhor resultado.

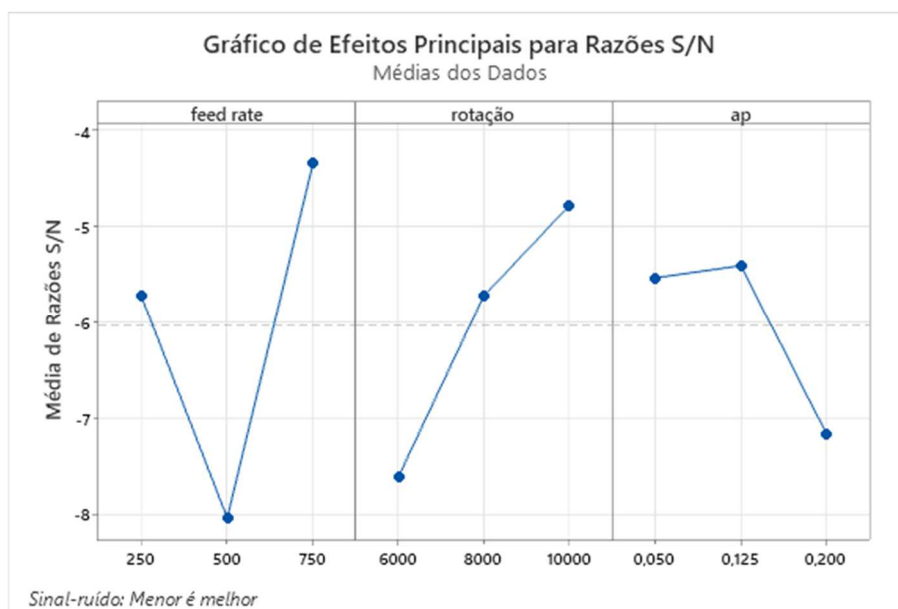


Figura 29 Gráfico Curva de S/N para cada parâmetro para rugosidade superficial Effgen20

A Tabela 43 mostra a contribuição de cada um dos fatores na resposta do sistema (análise de variância para rugosidade superficial).

Tabela 43 Análise de variância para rugosidade superficial Effgen20

Fonte	GL	Soma dos quadrados	Quadrados médios	Valor F	Valor-P	Contribuição
Vf	2	0,9470	0,8104	1,55	0,392	38,95%
Rotação	2	0,5865	0,5156	0,96	0,510	24,12%
Ap	2	0,2878	0,2201	0,47	0,680	11,84%
Erro	2	0,6103	0,1038			25,10%
Total	8	2,4316				100,00%

Combinando as respostas para a razão sinal-ruído e a contribuição dos fatores para a resposta, o Vf é o fator que mais influencia a resposta final da rugosidade superficial. Esta também apresenta um erro de 25% que não deve ser desprezado atendendo que este é superior aos valores de rotação e de Ap. A rugosidade estimada é de 1,371 μ m. O intervalo de confiança (IC) a 95% é de (-0,7;3,5).

A Tabela 44 apresenta os parâmetros ótimos, grau de significância e rugosidade estimada (Re) para o método convencional.

Tabela 44 Parâmetros ótimos, grau de significância e rugosidade estimada método convencional

Ferramenta	Vf		Rotação		Ap		Erro Ct (%)	Re (μ m)	IC a 95%
	Vfo (mm/min)	Ct (%)	Ro (rpm)	Ct (%)	Apo(mm)	Ct (%)			
Effgen20	750	39,95	10000	24,12	0,125	11,84	25	1,370	-0,728;3,467
Effgen10	250	49,12	10000	31,25	0,125	13,34	6,29	0,806	-0,417;2,655
Effgen6	500	71,73	10000	6,43	0,05	17,67	4,17	1,306	-0,178;2,435
Effgen6D46	250	30,7	10000	34,56	0,05	26,85	7,89	0,931	-0,086;1,775
Schott20	500	9,5	10000	50,98	0,125	21,39	18,12	0,823	-0,987;2,632
Schott10	250	43,68	10000	15,51	0,2	25,27	15,54	1,47	-0,804;3,041
Schott6	250	15,68	8000	32,75	0,0875	26,04	25,54	0,927	0,002;1,852
SchottHM10	250	20,35	8000	29,28	0,125	26,48	23,89	1,282	0,686;1,878
SchottHM6	250	75	8000	8,82	0,125	4,78	11,4	0,841	-0,047;1,729
Besdia10	250	58,7			0,05	39,16	2,14	1,524	1,3273;1,7212
Besdia6	250	85,61			0,05	13,43	0,96	1,385	1,2470;1,5237
Pferd10	250	42,43			0,05	53,39	4,18	1,332	0,909;1,755
Pferd6	250	84,79			0,05	12,44	2,76	1,04	0,744;1,335

Observando a tabela anterior verifica-se uma tendência para um Vf mais baixo e rotação mais elevada. O Ap apresenta bastante variabilidade. Relativamente ao grau de significância o Vf é o parâmetro mais significativo enquanto no parâmetro de Ap sucede o oposto.

4.2 Maquinagem com auxílio de ultrassons

Nesta secção são tratados os dados experimentais da força de corte, otimização da força de corte e otimização da rugosidade superficial para o método com auxílio de ultrassons.

4.2.1 Resultados experimentais com auxílio de ultrassons

A Figura 29 mostra os resultados dos ensaios para a ferramenta Effgen20 com auxílio de ultrassons (Effgen20U). Para melhorar a visualização e compreensão dos resultados e para minimizar fatores alheios aos parâmetros de controlo tais como aperto do provete ao dinamómetro, irregularidades na superfície, é utilizado um filtro passa alto na componente Fy (3 e 0,1Hz) sendo que esta é a mais

afetada pelo ruído na aquisição feita através do DynoWare. São escolhidos os resultados dos 5 ensaios obtidos mais próximos dos valores médios.

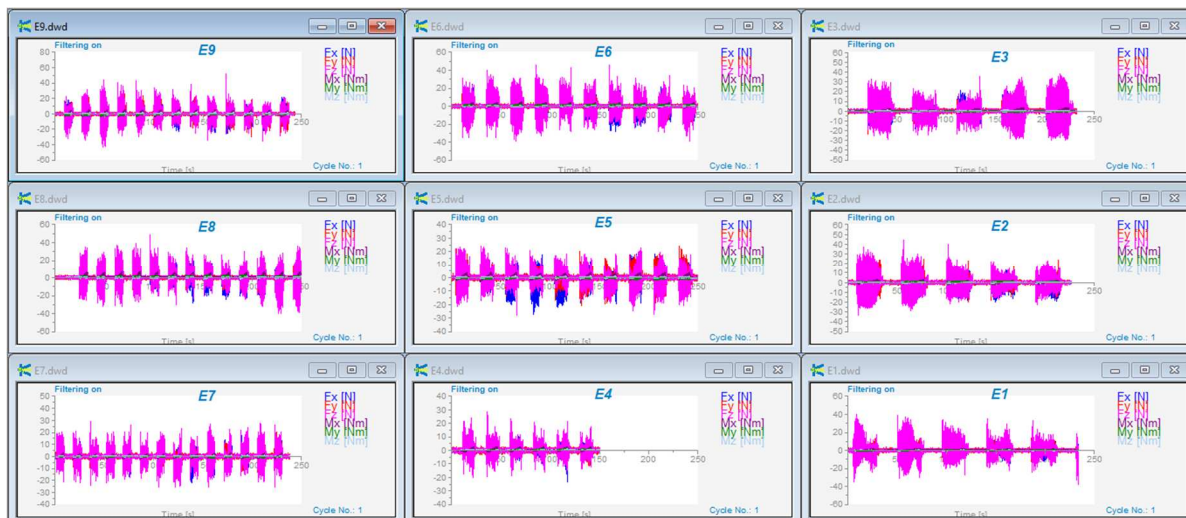


Figura 30 Gráficos DynoWare para os diferentes ensaios fresa Effgen20U

A Tabela 45 e Tabela 46 mostram os resultados dos vários ensaios com as forças resultantes positivas e negativas, que resultam das combinações de parâmetros já estabelecidos pela matriz ortogonal de Taguchi com as respectivas médias e desvios padrão.

Tabela 45 Análise comparativa das componentes mínimas de forças resultantes de corte Effgen20U

Comparação das forças resultantes para as componentes negativas (N)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
	49,40	52,49	53,18	34,10	48,55	67,26	45,44	64,75	63,14
	50,56	53,74	54,12	34,26	49,77	67,51	45,57	65,94	64,38
	50,67	53,96	55,34	34,64	49,83	67,93	45,69	66,03	65,42
	51,85	55,06	55,45	34,74	50,33	68,24	45,94	66,03	69,33
	52,10	55,30	56,17	35,23	50,52	69,46	46,63	67,60	69,98
Média	50,92	54,11	54,85	34,59	49,80	68,08	45,85	66,07	66,45
Desvio padrão	1,09	1,13	1,19	0,44	0,77	0,86	0,47	1,01	3,04

Tabela 46 Análise comparativa das componentes máximas de forças resultantes de corte Effgen20U

Comparação das forças resultantes para as componentes positivas (N)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
	56,07	65,37	59,36	38,60	50,61	66,81	50,82	65,09	67,39
	56,54	65,63	60,22	39,91	50,82	67,64	51,64	65,09	69,59
	57,66	67,24	60,73	40,05	51,42	68,90	51,76	65,19	70,22
	57,78	68,44	61,89	40,28	52,16	68,91	52,65	65,29	71,18
	57,98	68,58	62,50	41,18	52,17	69,29	52,80	66,38	73,56
Média	57,21	67,05	60,94	40,00	51,44	68,31	51,93	65,41	70,39
Desvio padrão	0,85	1,51	1,26	0,93	0,73	1,04	0,81	0,55	2,26

As duas tabelas anteriores mostram que os melhores resultados, para a menor força de corte exercida é o ensaio E4 ($V_f=500\text{mm/min}$, Rotação 6000rpm e $A_p 0,05\text{mm}$).

Após a realização dos vários ensaios de corte já mencionados anteriormente foram realizadas análises de rugosidade superficial para cada um dos provetes. A Tabela 47 e a Tabela 48 mostram os resultados das medições, para R_a e R_z e as correspondentes médias e desvios padrão.

Relativamente à rugosidade o ensaio E3 (Vf=250mm/min, Rotação 6000rpm e Ap 0,2mm) apresenta os melhores resultados.

Tabela 47 Valores de Ra para cada um dos provetes Effgen20U

		Ra (µm)								
		E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
		0,742	0,614	0,575	0,805	0,797	0,829	1,070	0,952	0,822
		0,770	0,625	0,663	0,863	0,846	0,793	1,031	0,863	0,872
		0,767	0,656	0,586	0,875	0,79	0,835	0,932	0,850	0,826
		0,751	0,717	0,573	0,856	0,847	0,908	1,046	0,866	0,827
		0,739	0,668	0,596	0,804	0,839	0,779	1,169	0,900	0,852
Média		0,754	0,656	0,599	0,841	0,824	0,829	1,050	0,886	0,840
Desvio padrão		0,014	0,041	0,037	0,034	0,028	0,050	0,085	0,041	0,022

Tabela 48 Valores de Rz para cada um dos provetes Effgen20U

		Rz (µm)								
		E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
		5,453	5,527	4,761	6,335	6,707	1,052	8,386	6,535	5,964
		5,550	4,277	5,582	6,433	6,621	5,562	6,649	6,339	8,015
		5,941	4,277	4,515	6,917	5,320	6,046	5,816	5,910	6,882
		6,195	7,253	3,820	6,968	6,464	6,195	7,203	6,087	6,484
		5,449	5,117	4,699	7,375	6,375	5,800	7,636	6,250	6,214
Média		5,718	5,290	4,675	6,806	6,297	4,931	7,138	6,224	6,712
Desvio padrão		0,335	1,224	0,630	0,425	0,562	2,182	0,974	0,239	0,804

A Tabela 49 mostra a média dos resultados para a componente resultante das forças e da rugosidade superficial utilizando a ferramenta Effgen10U. O ensaio E1 é o que apresenta valores mais baixos de força resultante e de rugosidade o que corresponde aos parâmetros Vf=250mm/min, rotação de 6000rpm e Ap=0,05mm.

Tabela 49 Tabela resumo das forças resultantes para as componentes negativas, positivas, e de rugosidade Ra e Rz para a ferramenta Effgen10U

Comparação das forças resultantes para as componentes negativas (N)										
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	
Média	43,95± 2,28	92,08± 2,99	810,36± 172,65	53,45± 1,32	256,11± 22,82	649,75± 17,19	61,16± 2,29	374,83± 47,30	411,18± 29,50	
Comparação das forças resultantes para as componentes positivas (N)										
Média	46,09± 2,69	85,05± 2,94	911,65± 166,95	59,16± 0,71	279,80± 27,44	662,46± 41,49	60,65± 1,80	345,52± 41,25	373,62± 53,82	
Ra (µm)										
Média	1,9014± 0,224	2,1412± 0,218	2,9818± 0,326	3,2258± 0,147	2,4438± 0,176	2,4344± 0,207	2,3922± 0,135	2,4962± 0,102	2,7388± 0,155	
Rz (µm)										
Média	13,08± 1,29	14,334± 2,47	17,444± 0,88	18,334± 1,40	15,15± 1,16	14,898± 2,09	13,79± 1,21	14,504± 1,05	16,316± 1,84	

Tabela 50 Tabela resumo das forças resultantes para as componentes negativas, positivas, e de rugosidade Ra e Rz para a ferramenta Effgen6U

Comparação das forças resultantes para as componentes negativas (N)										
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	
Média	82,27±1 ,22	121,85± 9,48	140,65± 2,34	82,06± 1,08	145,64± 5,43	246,48± 16,08	113,81± 2,03	205,76± 3,06	303,30± 23,63	
Comparação das forças resultantes para as componentes positivas (N)										
Média	74,50± 2,60	120,65± 10,24	134,21± 2,48	84,18± 2,71	148,17± 9,94	224,28± 14,65	107,81± 1,32	197,23± 4,00	306,38± 27,38	
Ra (µm)										
Média	1,705± 0,091	2,400± 0,024	2,256± 0,093	2,287± 0,175	2,203± 0,165	2,799± 0,058	2,668± 0,160	1,801±0,063	2,910± 0,136	
Rz (µm)										
Média	9,337± 3,93	15,504± 0,70	14,124± 0,83	14,550± 1,09	13,872± 1,05	15,760± 0,95	15,266± 0,95	11,518± 0,40	17,086± 1,39	

A Tabela 50 mostra a média dos resultados para a componente das forças e da rugosidade superficial da ferramenta Effgen6U.

À semelhança do que acontece no ensaio pelo método convencional, o ensaio E1 é o que apresenta valores mais baixos de força resultante e de rugosidade, o que corresponde aos parâmetros $V_f=250\text{mm/min}$, rotação de 6000rpm e $A_p=0,05\text{mm}$.

A Tabela 51 mostra a média dos resultados para a componente das forças e da rugosidade superficial da ferramenta Effgen6D46U. O ensaio E1 é o que apresenta valores mais baixos de força resultante, o que corresponde aos parâmetros $V_f=250\text{mm/min}$, rotação de 6000rpm e $A_p=0,05\text{mm}$, enquanto o ensaio E2 é o que apresenta menor rugosidade ($V_f=250\text{mm/min}$, rotação de 8000rpm e $A_p=0,125\text{mm}$). A partir do ensaio E6 os resultados não devem ser considerados devido à degradação da ferramenta.

Tabela 51 Tabela resumo das forças resultantes para as componentes negativas, positivas, e de rugosidade Ra e Rz para a ferramenta Effgen6D46U

Comparação das forças resultantes para as componentes negativas (N)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
Média	55,38± 1,20	89,97± 2,72	160,31±9,49	71,25± 1,68	224,42±8,15	463,06± 155,80	164,05± 17,72	218,80± 74,63	190,14± 18,57
Comparação das forças resultantes para as componentes positivas (N)									
Média	51,87± 4,90	77,19± 2,57	146,19±4,91	66,23± 3,17	214,27±7,56	813,87± 147,85	165,28± 22,01	214,98± 60,32	198,43± 13,35
Ra (µm)									
Média	1,213± 0,054	1,096± 0,026	1,351± 0,044	1,358± 0,015	1,580± 0,030	-	-	-	-
Média	7,81± 0,59	7,79± 0,58	8,85± 0,77	10,04± 0,40	10,04± 0,43	-	-	-	-

A Tabela 52 mostra a média dos resultados para a componente das forças e da rugosidade superficial da ferramenta Schott20U. O ensaio E1 ($V_f=250\text{mm/min}$ e $A_p=0,05\text{mm}$) é o que apresenta forças mais baixas. Quanto à rugosidade o ensaio que apresenta rugosidade mais baixa é o ensaio E3 ($V_f=250\text{mm/min}$ e $A_p=0,2\text{mm}$).

Tabela 52 Tabela resumo das forças resultantes para as componentes negativas, positivas, e de rugosidade Ra e Rz para a ferramenta Scott20U

Comparação das forças resultantes para as componentes negativas (N)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
Média	30,42± 0,20	46,66± 0,42	61,71± 1,31	44,10± 0,96	75,31± 1,00	98,27± 0,41	58,23± 0,46	90,92± 0,99	123,89± 3,40
Comparação das forças resultantes para as componentes positivas (N)									
Média	44,18± 0,36	61,79± 0,61	88,52± 0,95	59,88± 0,81	105,25 ±0,72	117,01± 2,08	71,38± 1,82	115,79± 0,95	139,82± 6,77
Ra (µm)									
Média	1,094± 0,065	1,081± 0,098	0,795± 0,066	1,130± 0,071	0,980± 0,096	0,971± 0,063	1,483± 0,079	1,715± 0,061	1,444± 0,045
Rz (µm)									
Média	7,924± 0,864	8,551± 0,625	5,752± 0,174	9,411± 0,900	7,806± 1,211	7,200± 0,820	11,113± 1,040	11,154± 0,430	10,202± 0,713

A Tabela 53 mostra a média dos resultados para a componente das forças resultantes e das rugosidades finais da ferramenta Schott10U. O ensaio que apresenta forças de corte mais baixas é o ensaio E7 com os parâmetros $V_f=750\text{mm/min}$, rotação de 6000rpm e $A_p=0,05\text{mm}$, enquanto as

rugosidades mais baixas são obtidas no ensaio E1, que corresponde aos parâmetros Vf=250mm/min, rotação de 6000rpm e Ap=0,125mm.

Tabela 53 Tabela resumo das forças resultantes para as componentes negativas, positivas, e de rugosidade Ra e Rz para a ferramenta Scott10U

Comparação das forças resultantes para as componentes negativas (N)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
Média	54,44± 1,18	55,75± 0,95	57,57± 0,72	62,24± 0,78	60,87± 1,34	77,33± 1,63	44,78± 0,54	99,78± 2,85	148,14± 6,57
Comparação das forças resultantes para as componentes positivas (N)									
Média	61,49± 1,61	66,22± 0,78	72,68± 0,40	81,96± 0,44	81,73± 1,37	84,85± 1,93	58,97± 1,09	131,83± 1,86	182,24± 5,86
Ra (µm)									
Média	1,575± 0,085	1,342± 0,028	1,463± 0,031	1,513± 0,027	1,660± 0,068	1,591± 0,079	1,754± 0,073	1,871± 0,072	1,999± 0,116
Rz (µm)									
Média	10,115± 0,865	8,784± 0,720	9,353± 0,248	9,987± 0,472	11,006± 0,677	10,534± 1,297	11,734± 0,658	13,176± 1,351	13,332± 1,102

A Tabela 54 exibe as médias das componentes das força e da rugosidades da ferramenta Schott6U. Verifica-se que o ensaio que apresenta menor força é o ensaio E1 (Vf=250mm/min, rotação de 6000rpm e Ap=0,05mm). O ensaio E5 é o que apresenta menor rugosidade (Vf=500mm/min, rotação de 6000rpm e Ap=0,0875mm).

Tabela 54 Tabela resumo das forças resultantes para as componentes negativas, positivas, e de rugosidade Ra e Rz para a ferramenta Scott6U

Comparação das forças resultantes para as componentes negativas (N)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
Média	19,40± 0,43	27,69± 0,77	30,28± 0,80	28,80± 0,57	29,11± 0,59	44,18± 1,12	32,77± 0,39	40,07± 0,55	44,67± 0,77
Comparação das forças resultantes para as componentes positivas (N)									
Média	27,73± 0,99	38,98± 0,54	43,81± 1,17	38,96± 0,66	38,36± 0,56	59,07± 3,77	45,25± 1,45	53,70± 0,67	57,51± 0,68
Ra (µm)									
Média	1,186± 0,032	1,190± 0,035	1,174± 0,016	1,207± 0,104	0,934± 0,039	1,417± 0,150	1,041± 0,018	1,059± 0,091	1,178± 0,049
Rz (µm)									
Média	9,84± 2,88	9,23± 0,49	8,85± 0,54	9,53± 0,90	7,01± 0,42	10,19± 1,55	7,39± 0,61	8,16± 0,74	10,16± 2,44

A Tabela 55 mostra a média dos resultados para a componente das forças e da rugosidade superficial da ferramenta SchottHM10U. O ensaio E1 (Vf=250mm/min, rotação de 6000rpm e Ap=0,05mm) é o que apresenta menor força de corte, em contrapartida o ensaio E3 (Vf=250mm/min, rotação de 6000rpm e Ap=0,2mm) é o que apresenta menor rugosidade.

Tabela 55 Tabela resumo das forças e de rugosidade ScottHM10U

Comparação das forças resultantes para as componentes negativas (N)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
Média	34,95± 0,65	42,28± 1,59	58,47± 0,90	73,47± 1,47	51,16± 1,80	60,32± 0,26	58,38± 1,04	63,31± 0,61	60,85± 1,42
Comparação das forças resultantes para as componentes positivas (N)									
Média	26,23± 0,65	37,60± 2,97	56,69± 0,96	52,15± 1,84	51,53± 0,50	57,84± 1,12	44,95± 0,55	63,34± 0,89	60,25± 1,24
Ra (µm)									
Média	1,885± 0,106	1,218± 0,057	1,211± 0,064	1,575± 0,234	1,682± 0,205	1,578± 0,049	1,486± 0,106	1,555± 0,172	1,321± 0,041
Rz (µm)									
Média	12,76± 0,81	9,12± 0,52	8,95± 0,83	11,21± 2,12	11,98± 1,64	10,96± 0,87	9,91± 0,78	9,26± 4,12	9,52± 0,32

A Tabela 56 mostra a média dos resultados para a componente das forças resultantes (componente negativa e positiva) e da rugosidade superficial da ferramenta SchottHM6U. O ensaio que apresenta menor força de corte é o ensaio E4 ($V_f=500\text{mm/min}$, rotação de 6000rpm e $A_p=0,05\text{mm}$). No caso da rugosidade o ensaio que apresenta menor rugosidade também é o ensaio E4 ($V_f=500\text{mm/min}$, rotação de 6000rpm e $A_p=0,05\text{mm}$).

Tabela 56 Tabela resumo das forças resultantes para as componentes negativas, positivas, e de rugosidade Ra e Rz para a ferramenta Scott6U

Comparação das forças resultantes para as componentes negativas (N)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
Média	18,77± 0,57	19,72± 0,59	19,76± 0,36	18,53± 0,74	58,65± 1,80	61,91± 2,30	56,88± 3,17	60,76± 11,90	65,72± 1,11
Comparação das forças resultantes para as componentes positivas (N)									
Média	23,60± 0,25	21,47± 1,11	21,69± 0,56	19,44± 1,00	64,44± 1,12	72,06± 4,41	57,75± 1,71	70,69± 15,51	68,78± 1,23
Ra (μm)									
Média	1,955± 0,153	1,536± 0,127	1,938± 0,118	1,366± 0,058	2,520± 0,136	3,013± 0,375	1,657± 0,072	1,554± 0,080	3,379± 0,347
Rz (μm)									
Média	13,55± 2,05	10,34± 0,81	12,02± 5,45	9,71± 1,00	16,89± 2,20	20,93± 2,13	12,63± 1,58	10,82± 1,19	22,95± 3,06

Na Tabela 57 são apresentadas as médias dos resultados para a componente das forças e da rugosidade superficial da ferramenta Besdia10U. O ensaio E1 ($V_f=250\text{mm/min}$; rotação=6000rpm e $A_p=0,05\text{mm}$) apresenta os valores de força resultante e de rugosidade mais baixos.

Tabela 57 Tabela resumo das forças resultantes para as componentes negativas, positivas, e de rugosidade Ra e Rz para a ferramenta Besdia10U

Comparação das forças resultantes para as componentes negativas (N)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
Média	24,57± 1,00	81,57± 11,26	530,23± 31,25	43,65± 1,45	190,93± 7,13	689,19± 17,02	48,86± 1,60	95,87± 2,91	815,15± 26,16
Comparação das forças resultantes para as componentes positivas (N)									
Média	26,22± 2,04	90,87± 14,10	538,08± 36,50	44,35± 1,49	197,14± 3,87	666,27± 21,80	49,25± 1,09	102,60± 4,17	851,21± 13,81
Ra (μm)									
Média	1,800± 0,169	1,838± 0,071	2,431± 0,225	2,550± 0,130	2,805 $\pm 0,138$	2,999± 0,265	2,690± 0,179	2,913± 0,132	3,719± 0,091
Rz (μm)									
Média	12,85± 1,70	12,74± 1,83	16,09± 2,54	16,28± 1,27	17,34± 1,88	18,31± 1,24	16,47± 1,63	16,67± 0,67	22,19± 2,21

A Tabela 58 mostra a média dos resultados para a componente das forças e da rugosidade superficial da ferramenta Besdia6U. O ensaio que apresenta valores mais baixos de força e rugosidade é o ensaio E1 ($V_f=250\text{mm/min}$, rotação=6000rpm; $A_p=0,05\text{mm}$).

Tabela 58 Tabela resumo das forças resultantes para as componentes negativas, positivas, e de rugosidade Ra e Rz para a ferramenta Besdia6U

Comparação das forças resultantes para as componentes negativas (N)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
Média	32,21± 1,58	79,05± 8,06	147,90± 3,86	42,99± 1,08	88,97± 2,26	152,96± 18,32	61,01± 1,50	133,47± 0,83	267,35± 3,42
Comparação das forças resultantes para as componentes positivas (N)									
Média	33,82± 1,65	80,60± 8,76	163,47± 3,03	42,78± 0,89	102,64± 0,76	189,58± 32,11	62,26± 1,34	138,10± 5,29	288,49± 18,31
Ra (μm)									
Média	1,311± 0,052	1,443± 0,060	1,571± 0,105	2,002± 0,078	2,924± 0,153	3,181± 0,494	3,262± 0,149	3,019± 0,231	3,202± 0,113
Rz (μm)									
Média	9,95± 0,47	10,76± 0,93	11,15± 1,66	12,74± 1,19	17,62± 1,67	18,68± 3,63	18,28± 0,57	18,57± 1,12	19,14± 1,73

A Tabela 59 exibe a média dos resultados para a componente das forças e da rugosidade superficial da ferramenta Pferd10U. O ensaio E1 ($V_f=250\text{mm/min}$; rotação=6000rpm e $A_p=0,05\text{mm}$) é o que apresenta valores mais baixos.

Tabela 59 Tabela resumo das forças resultantes para as componentes negativas, positivas, e de rugosidade Ra e Rz para a ferramenta Pferd10U

Comparação das forças resultantes para as componentes negativas (N)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
Média	21,29± 0,50	62,18± 5,83	117,94± 8,78	23,08± 0,75	89,37± 7,72	161,37± 3,65	33,27± 0,93	88,95± 4,23	81,41± 8,55
Comparação das forças resultantes para as componentes positivas (N)									
Média	21,35± 0,68	65,59± 8,47	124,97± 7,55	25,94± 0,50	87,48± 12,91	158,30± 2,87	37,10± 1,07	78,76± 1,61	106,73± 9,74
Ra (μm)									
Média	1,195± 0,044	1,590± 0,054	1,610± 0,067	2,072± 0,072	2,232± 0,092	2,274± 0,121	2,210± 0,087	2,486± 0,115	2,135± 0,078
Rz (μm)									
Média	8,18± 0,60	11,52± 0,87	10,93± 0,61	12,54± 0,42	14,25± 1,17	13,44± 0,70	13,60± 1,06	15,35± 1,66	14,42± 1,66

A Tabela 60 mostra a média dos resultados para a componente das forças e da rugosidade superficial da ferramenta Pferd6U. Verifica-se que o ensaio com menor força e rugosidade é o ensaio E1 ($V_f=250\text{mm/min}$; rotação=6000rpm e $A_p=0,05\text{mm}$).

Tabela 60 Tabela resumo das forças resultantes para as componentes negativas, positivas, e de rugosidade Ra e Rz para a ferramenta Pferd6U

Comparação das forças resultantes para as componentes negativas (N)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
Média	35,27± 1,32	47,80± 2,16	46,79± 1,05	45,29± 4,91	52,67± 1,54	65,46± 2,08	48,99± 1,46	60,71± 1,57	62,38± 1,43
Comparação das forças resultantes para as componentes positivas (N)									
Média	38,83± 1,29	54,26± 0,13	63,47± 1,48	49,39± 5,39	59,79± 2,15	80,82± 1,61	55,86± 1,40	67,79± 3,43	79,38± 1,53
Ra (μm)									
Média	1,666± 0,140	1,956± 0,069	1,900± 0,102	1,712± 0,124	1,963± 0,047	2,104± 0,110	2,178± 0,126	2,438± 0,139	2,709± 0,161
Rz (μm)									
Média	11,03± 1,47	12,54± 0,79	12,51± 0,83	11,04± 0,99	12,64± 0,54	13,11± 0,72	14,33± 1,17	14,91± 0,87	16,78± 1,66

4.2.2 Otimização das forças com auxílio de ultrassons

A Tabela 61 mostra os resultados da razão sinal-ruído e as forças de corte de cada ensaio realizado da ferramenta Effgen20U.

Tabela 61 Relação entre os ensaios de força e as razões sinal-ruído Effgen20U

Ensaio	V_f (mm/min)	A_p (mm)	Força (N)	S/N
E1	250	0,05	23,60	-27,4590
E2	250	0,125	21,47	-26,6358
E3	250	0,2	21,69	-26,7252
E4	500	0,05	19,44	-25,7721
E5	500	0,125	64,44	-36,1828
E6	500	0,2	72,06	-37,1534
E7	750	0,05	57,75	-35,2310
E8	750	0,125	70,69	-36,9872
E9	750	0,2	68,78	-36,7490

Tal como verificado anteriormente, o ensaio que apresenta menor força de corte é o E4, apresentando o maior valor da razão sinal-ruído.

A Figura 31 mostra a curva de S/N para cada parâmetro para os ensaios da força resultante.

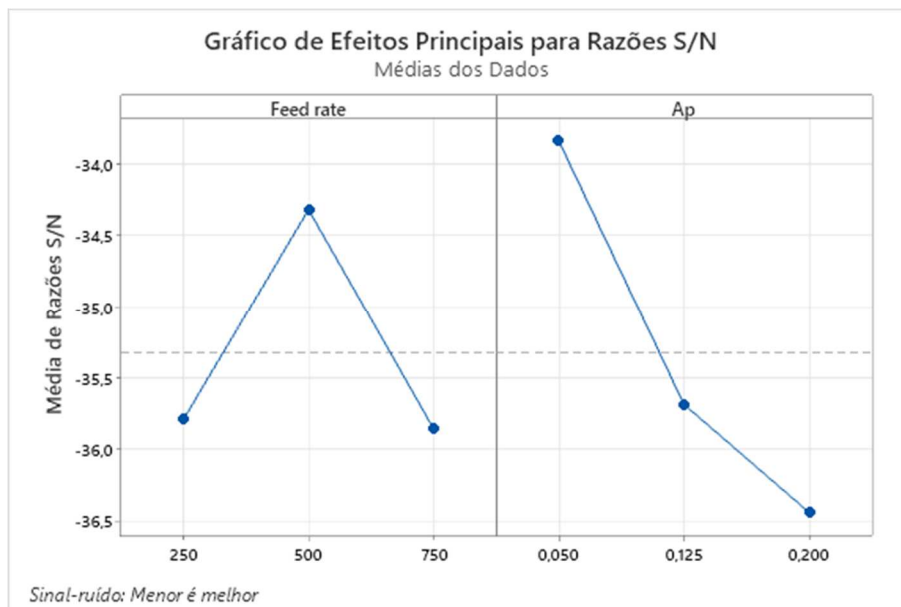


Figura 31 Gráfico curva de S/N para cada parâmetro para os ensaios de força resultante Effgen20U

Analisando o gráfico para a razão sinal-ruído, o ensaio que apresentaria melhor resultado seria um ensaio com os parâmetros ($V_f=500\text{mm/min}$, $\text{rotação}=6000\text{rpm}$ e $A_p=0,05\text{mm}$). Neste sentido também é realizada uma otimização nas respostas com o objetivo prever qual a força de corte esperada utilizando os parâmetros ótimos.

A análise de variância permite obter o grau de influência para os parâmetros dos ensaios das forças de corte, apresentados na Tabela 62.

Tabela 62 Análise de variância força Effgen20U

Fonte	GL	Soma dos quadrados	Quadrados médios	Valor F	Valor-P	Contribuição
Vf	2	159,7	79,83	1,66	0,298	20,03%
Ap	2	445,0	222,51	4,63	0,091	55,84%
Erro	2	192,2	48,06			24,12%
Total	8	796,9				100,00%

Como se pode verificar na tabela anterior, os parâmetros têm influência na resposta, sendo o V_f com 20,03%, profundidade com 55,84% e com um erro de 24,12%.

A Tabela 63 apresenta os parâmetros ótimos (V_{fo} e A_{po}), grau de significância (C_t) dos parâmetros e força esperada ótima (F_e). Após a otimização das forças os melhores parâmetros consistem numa velocidade de avanço baixa, e A_p baixo. Analisando o grau de significância, o parâmetro que mais contribui para a obtenção dos parâmetros ótimos é o A_p . Devido à incerteza associada ao intervalo de confiança obtido, as ferramentas Effgen10U, Effgen6D46U e Besdia10U originaram uma força estimada negativa não podendo este resultado ser considerado como relevante.

Tabela 63 Parâmetros ótimos, grau de significância e força estimada método com auxílio de ultrassons.

Ferramenta	Vf		Ap		Erro Ct (%)	Fe (N)	IC a 95%
	Vfo(mm/min)	Ct (%)	Apo(mm)	Ct (%)			
Effgen20U	500	20,03	0,05	55,84	24,12	34,02	15,95;52,09
Effgen10U	250	1,81	0,05	75,35	22,84	-	-423;426
Effgen6U	250	29,64	0,05	58,94	11,42	43,3	-30,7;117,4
Effgen6D46U	-	-	-	-	-	-	-
Schott20U	250	36,67	0,05	59,63	3,69	34,02	15,95;52,09
Schott10U	250	40,57	0,05	24,24	35,19	42,9	-27,2;113
Schott6U	250	41,78	0,05	46,91	11,31	29,33	19;39,46
Schott HM10U	250	39,31	0,05	38,92	21,76	31,22	14,92;47,52
SchottHM6U	250	63,31	0,05	16,52	20,17	9,2	-22,6;41,0
Besdia10U	250	2,73	0,05	92,82	4,45	-	-220,6;167
Besdia6U	250	14,71	0,05	79,98	5,31	16,5	-38,9;71,9
Pferd10U	250	3,92	0,05	89,94	6,14	20,3	-13,5;54,01
Pferd6U	250	25,84	0,05	71,28	2,88	39,15	32,39;45,90

4.2.3 Otimização da rugosidade superficial com auxílio de ultrassons

A Tabela 64 apresenta os resultados da rugosidade e do sinal-ruído respectivo a cada ensaio para a ferramenta Effgen20U. O ensaio E3 é o que apresenta melhor resultado.

Tabela 64 Relação entre a rugosidade superficial e as razões sinal-ruído Effgen20U

Ensaio	Vf (mm/min)	Ap (mm)	Ra (μm)	S/N
E1	250	0,05	0,7540	2,45257
E2	250	0,125	0,6560	3,66192
E3	250	0,2	0,5990	4,45146
E4	500	0,05	0,8406	1,50821
E5	500	0,125	0,8238	1,68356
E6	500	0,2	0,8288	1,63101
E7	750	0,05	1,0496	-0,42048
E8	750	0,125	0,8862	1,04937
E9	750	0,2	0,8398	1,51648

A Figura 32 mostra que um Vf de 250mm/min e uma profundidade de corte de 0,2mm é a combinação que apresenta melhor resultado.



Figura 32 Gráfico Curva de S/N para cada parâmetro para rugosidade superficial Effgen20U

A Tabela 65 mostra a contribuição de cada um dos fatores na resposta do sistema. O parâmetro que mais influencia a rugosidade superficial é o Vf.

Tabela 65 Análise de variância para rugosidade superficial Effgen20U

Fonte	GL	Soma dos quadrados	Quadrados médios	Valor F	Valor-P	Contribuição
Vf	2	0,10021	0,050104	17,74	0,010	73,18%
Ap	2	0,02543	0,012717	4,50	0,095	18,57%
Erro	2	0,01130	0,002824			8,25%
Total	8	0,13694				100,00%

A Tabela 66 apresenta os parâmetros ótimos, grau de significância e rugosidade estimada.

Tabela 66 Parâmetros ótimos, grau de significância e rugosidade estimada para método com auxílio de ultrassons

Ferramenta	Vf		Ap		Erro Ct (%)	Re (µm)	IC de 95%
	Vfo(mm/min)	Ct (%)	Apo(mm)	Ct (%)			
Effgen20U	250	73,18%	0,2	18,57	8,25	0,853	0,6350;1,108
Effgen10U	250	14,84	0,125	14,78	70,38	2,173	1,178;3,169
Effgen6U	250	15,49	0,0875	34,15	50,36	1,918	1,059;2,777
Effgen6D46U	-	-	-	-	-	-	-
Schott20U	250	83,4	0,05	9,1	7,5	0,8719	0,6350;1,108
Schott10U	250	79,91	0,05	2,56	17,53	1,4331	1,181;1,6852
Schott6U	750	11,74	0,0875	39,42	48,84	0,9998	0,723;1,2756
SchottHM10U	250	14,16	0,2	30,1	55,74	1,307	0,823;1,790
SchottHM6U	250	9,9	0,05	52,29	37,81	1,367	0,087;2,647
Besdia10U	250	66,47	0,05	28,81	4,71	1,731	1,356;2,107
Besdia6U	250	85,08	0,05	5,73	9,19	1,198	0,457;1,940
Pferd10U	250	85,65	0,05	8,49	5,86	1,312	1,016;1,608
Pferd6U	250	70,39	0,05	25,94	3,68	1,623	1,4347;1,812

Para a obtenção de uma menor rugosidade deve ser utilizado um Vf baixo, sendo este o parâmetro mais significativo. Para a ferramentas Effgen10U, Effgen6U, Schott6U e SchottHM10U o erro de significância é bastante elevado. Uma vez que a ferramenta ficou destruída não são apresentados os dados para a Effgen6D46U.

4.3 Avaliação do desgaste da ferramenta

Através de um perfilômetro foram realizadas medições de rugosidade na zona de contacto da ferramenta com a peça a maquinar de forma a perceber qual o desgaste da ferramenta Effgen20. A Tabela 67 mostra as medições de rugosidade realizadas quando a ferramenta era nova, após o ensaio convencional (sem ultrassons) e após o ensaio com o auxílio de ultrassons. Os resultados da tabela foram obtidos a partir da mesma ferramenta.

Tabela 67 Rugosidade da ferramenta Effgen20

Rugosidade (Ra) µm		
Ferramenta nova	Após ensaio convencional	Após ensaio com ultrassons
10,2	6,6	7,4

A ferramenta nova apresenta uma rugosidade Ra 10,2µm, contudo após o ensaio sem ultrassons a rugosidade baixa para 6,6µm. Este facto pode dever-se a uma nova orientação dos cristais ou até mesmo ao seu arrancamento do corpo da ferramenta. Em relação ao ensaio com auxílio de ultrassons houve um aumento ligeiro da rugosidade o que pode dever-se a uma nova orientação

das partículas de diamante ou à remoção do material de suporte dos cristais de diamante da ferramenta.

Figura 33 apresenta o desgaste da ferramenta Effgen20 após o término dos ensaios. A nível visual a ferramenta Effgen20 não apresenta sinais de desgaste.



Figura 33 Ferramenta Effgen20 após os ensaios

A Tabela 68 apresenta os valores de rugosidade para a ferramenta Effgen10 em cada etapa.

Tabela 68 Rugosidade de ferramenta Effgen10

Rugosidade (Ra) μm		
Ferramenta nova	Após ensaio convencional	Após ensaio com ultrassons
11,5	8,9	7,4

A ferramenta nova apresentava uma rugosidade Ra de 11,5 μm , tendo diminuído após a realização do ensaio pelo método convencional (sem ultrassons). Se compararmos o convencional com o ensaio com auxílio de ultrassons também se verifica uma diminuição da rugosidade. As principais causas poderão ser o arranque ou a alteração da orientação dos cristais.

A Figura 34 apresenta o desgaste da ferramenta Effgen10 após o término dos ensaios. A ferramenta Effgen10 apresentou um desgaste significativo, tendo ficado aproximadamente 2mm mais curta.



Figura 34 Ferramenta Effgen10 após os ensaios

Como ilustrado na Tabela 69 a ferramenta Effgen6 nova apresentava uma rugosidade de 12,5 μm , tendo baixado cerca de 1 μm após cada ensaio.

Tabela 69 Rugosidade de ferramenta Effgen6

Rugosidade (Ra) μm		
Ferramenta nova	Após ensaio convencional	Após ensaio com ultrassons
12,5	11,1	10,0

A Figura 35 mostra o estado da ferramenta após os ensaios. A ferramenta sofreu desgaste que é visível havendo uma redução do comprimento de aproximadamente 1,5mm.



Figura 35 Ferramenta Effgen6 após os ensaios

A Tabela 70 mostra os resultados da rugosidade da ferramenta Effgen6D46 após cada conjunto de ensaios realizados.

Tabela 70 Rugosidade de ferramenta Effgen6D46

Rugosidade (Ra) μm		
Ferramenta nova	Após ensaio convencional	Após ensaio com ultrassons
5,8	6,1	-

A ferramenta nova apresentava um Ra de 5,8 μm , tendo aumentado após cada ensaio. Ao contrário das ferramentas anteriores do mesmo fabricante, houve um aumento de rugosidade ao longo do seu ciclo de utilização. No ensaio E6 com auxílio de ultrassons houve mesmo a destruição da ponta da ferramenta como se pode verificar na Figura 36, ao atingir um pico na força de corte de 813,9N.



Figura 36 Ferramenta Effgen6D46 após os ensaios

Na Tabela 71 encontram-se os valores de rugosidade da ferramenta Schott20.

Tabela 71 Rugosidade de ferramenta Schott20

Rugosidade (Ra) μm		
Ferramenta nova	Após ensaio convencional	Após ensaio com ultrassons
5,4	6,5	6,8

A ferramenta Schott20 nova, apresentou uma rugosidade de 5,4 μm . Após os ensaios pelo método convencional e com auxílio de ultrassons a rugosidade aumentou para 6,5 μm e 6,8 μm , respetivamente. A rugosidade da ferramenta foi aumentando à medida que os ensaios foram realizados. Este aumento de rugosidade pode dever-se ao facto de haver um desgaste do substrato que suporta os cristais de diamante, mesmo que se consigam manter os cristais. No processo de ultrassons o aumento da rugosidade foi menor, possivelmente devido ao ensaio realizado sem ultrassons ter limpo o substrato, tendo-se mantido uma estrutura semelhante da ferramenta a partir daí. Na Figura 37, pode-se visualizar a ferramenta após os ensaios. A nível visual a ferramenta não apresenta sinais de desgaste.



Figura 37 Ferramenta Schott20 após os ensaios

A Tabela 72 mostra as rugosidades da ferramenta Schott10 nas diferentes etapas.

Tabela 72 Rugosidade de ferramenta Schott10

Rugosidade (Ra) μm		
Ferramenta nova	Após ensaio convencional	Após ensaio com ultrassons
6,3	7,2	7,4

A ferramenta antes de ser utilizada apresentava uma rugosidade de 6,3 μm . Após o ensaio convencional verificou-se um aumento de rugosidade para 7,2 μm . Tal como aconteceu na ferramenta Schott20 também houve um aumento de rugosidade pouco significativo após a utilização pelo método com auxílio de ultrassons. Possivelmente, como já descrito, este aumento de rugosidade pode dever-se ao facto de o material de suporte sofrer desgaste ao longo dos ensaios convencionais e tornar os cristais de diamante mais salientes.

A Figura 38 apresenta uma imagem da ferramenta Schott10 após a realização dos ensaios. Após a realização dos ensaios, visualmente não se verificou um desgaste significativo.



Figura 38 Ferramenta Schott10 após os ensaios

A Tabela 73 apresenta a rugosidade da ferramenta Schott6 sem utilização e após os ensaios pelo método convencional e com auxílio de ultrassons.

Tabela 73 Rugosidade de ferramenta Schott6

Rugosidade (Ra) μm		
Ferramenta nova	Após ensaio convencional	Após ensaio com ultrassons
9,0	10,6	11,1

A ferramenta nova apresentava uma rugosidade de 9,0 μm , tendo aumentado após os ensaios pelo método convencional (10,6 μm) e com auxílio de ultrassons (11,1 μm). O aumento da rugosidade da ferramenta pode dever-se ao facto de haver perda do substrato que suporta os cristais de diamante.

Na Figura 39 é possível verificar o desgaste na ferramenta após a realização dos ensaios. Realizando uma análise visual após os ensaios não se verifica um desgaste significativo.



Figura 39 Ferramenta Schott6 após os ensaios

A Tabela 74 mostra os valores da rugosidade da ferramenta SchottHM10 em cada etapa.

Tabela 74 Rugosidade da ferramenta SchottHM10

Rugosidade (Ra) μm		
Ferramenta nova	Após ensaio convencional	Após ensaio com ultrassons
5,9	8,9	9,7

Após a maquinagem pelo método convencional e com auxílio de ultrassons houve um aumento de rugosidade. Como referido anteriormente, é possível que o material que suporta os cristais de diamante tenha sido desgastado. Uma vez mais, após o processo com auxílio de ultrassons o incremento de rugosidade foi menor. Como a ferramenta já tinha sido utilizada no processo convencional é possível que houvesse menos material de suporte para desgastar.

Através de uma análise visual não se verifica desgaste significativo na ferramenta como mostra a Figura 40.



Figura 40 Ferramenta SchottHM10 após os ensaios

Na Tabela 75 são apresentados os resultados para a ferramenta SchottHM6. Nos ensaios desta ferramenta foram utilizados os parâmetros das ferramentas em geral e não com os parâmetros que estavam especificados para a ferramenta de 6mm ($A_p=0,05;0,125$ e $0,2\text{mm}$).

Tabela 75 Rugosidade da ferramenta SchottHM6

Rugosidade (Ra) μm		
Ferramenta nova	Após ensaio convencional	Após ensaio com ultrassons
9,6	9,7	11,6

Neste caso, verifica-se que o aumento de rugosidade se dá apenas após os ensaios com auxílio de ultrassons. Tal pode dever-se à rugosidade inicial mais elevada que esta ferramenta apresenta, quando comparada com as restantes ferramentas desta marca.

Através de uma análise visual da ferramenta SchottHM6 não se verifica desgaste significativo na ferramenta como mostra a Figura 41.



Figura 41 Ferramenta SchottHM6 após os ensaios

Ao contrário das ferramentas anteriores, nas seguintes são apresentados os valores de desgaste e rugosidade considerando a utilização de ferramentas novas tanto para o processo convencional como para o método com auxílio de ultrassons.

A Tabela 76 apresenta a rugosidade da ferramenta Besdia10 em cada etapa.

Tabela 76 Rugosidade de ferramenta Besdia10

Rugosidade (Ra) μm		
Ferramenta nova	Após ensaio convencional	Após ensaio com ultrassons
20,2	16,4	15,6

A ferramenta nova apresenta uma rugosidade mais elevada que as restantes devido ao tamanho do grão superior (D151). O arrancamento do grão durante os ensaios pode explicar a diminuição de rugosidade verificada.

A Tabela 77 apresenta as dimensões da zona de trabalho da ferramenta através da sua digitalização. Posteriormente com recurso ao software Calypso e tendo como base o modelo CAD e a ferramenta digitalizada são realizadas as medições.

A Figura 42 mostra como foram feitas as medições na ferramenta. Foram realizadas três medições de diâmetro nos intervalos de altura 0-0,5mm; 0,1-0,6mm e restante. A medição de 0 a 0,5 teve

como objetivo incluir o raio de canto da ferramenta, ao contrário da medida realizada de 0,1 a 0,6mm. A altura Y corresponde à altura de corte da ferramenta.

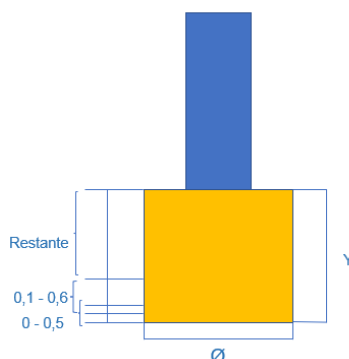


Figura 42 Esquema de medição das ferramentas

Tabela 77 Desgaste da ferramenta Besdia10 no ensaio convencional e com auxílio de ultrassons

	Valor Nominal (mm)	Ferramenta nova (mm)	Após ensaio convencional (mm)	Após ensaio com ultrassons (mm)
Ø 0-0,5 (mm)	10	9,86	9,55	9,29
Ø 0,1-0,6 (mm)	10	9,89	9,70	9,39
Ø restante (mm)	10	9,94	9,87	9,70
Altura y (mm)	10	10,28	10,14	10,16

Quando comparada com as dimensões nominais, a ferramenta nova apresenta um diâmetro mais pequeno. O método com auxílio de ultrassons teve uma diminuição de diâmetro superior à verificada no método convencional. O processo de ultrassons levou a uma maior diminuição de diâmetro, quando comparado com o método convencional.

A Figura 43 (a) apresenta o desgaste após os ensaios pelo método convencional, enquanto a Figura 43 (b) mostra o desgaste após os ensaios pelo método com auxílio de ultrassons.



Figura 43 (a) Ferramenta Besdia10 após os ensaios convencionais



(b) Ferramenta Besdia10 após os ensaios com ultrassons

Na Tabela 78 é apresentada a rugosidade da ferramenta Besdia6 nova e após os ensaios com o método convencional e os ensaios com auxílio de ultrassons.

Tabela 78 Rugosidade de ferramenta Besdia6

Rugosidade (Ra) μm		
Ferramenta nova	Após ensaio convencional	Após ensaio com ultrassons
15,2	10,8	14,7

Na tabela anterior verifica-se que os ensaios com o método convencional apresentaram uma maior diminuição de rugosidade que o processo de ultrassons.

A Tabela 79 mostra os resultados das medições da ferramenta enquanto a ferramenta é nova, após a realização de ensaios pelo método convencional e com o método com auxílio de ultrassons.

Tabela 79 Desgaste da ferramenta Besdia6 no ensaio convencional e com auxílio de ultrassons

	Valor Nominal	Ferramenta Nova	Ensaio convencional	Ensaio com ultrassons
Ø 0-0,5 (mm)	6	5,79	5,62	5,59
Ø 0,1-0,6 (mm)	6	5,86	5,69	5,65
Ø restante (mm)	6	5,93	5,80	5,72
Altura y (mm)	10,20	10,65	10,46	10,30

Na tabela anterior verifica-se que o processo de ultrassons originou um diâmetro de ferramenta semelhante ao processo convencional.

A Figura 44 (a) apresenta o desgaste após os ensaios pelo método convencional enquanto a Figura 44 (b) mostra o desgaste após os ensaios pelo método com auxílio de ultrassons. Ao analisar as imagens da Figura 44 verifica-se que pelos dois métodos a ferramenta sofreu desgaste na sua aresta de corte.



Figura 44 (a) Ferramenta Besdia6 após os ensaios convencionais



(b) Ferramenta Besdia6 após os ensaios com ultrassons

A Tabela 80 apresenta as rugosidades da ferramenta Pferd10. As rugosidades das ferramentas mantiveram-se praticamente constantes mesmo após a realização dos ensaios.

Tabela 80 Rugosidade de ferramenta Pferd10 finais

Rugosidade (Ra) µm		
Ferramenta nova	Após ensaio convencional	Após ensaio com ultrassons
17,7	17,2	17,1

Tabela 81 Desgaste da ferramenta Pferd10 no ensaio convencional e com auxílio de ultrassons

	Valor Nominal	Ferramenta nova	Ensaio sem ultrassons	Ensaio com ultrassons
Ø 0-0,05 (mm)	10	9,79	9,56	9,37
Ø 0,1-0,6 (mm)	10	9,87	9,66	9,47
Ø restante (mm)	10	9,92	9,79	9,71
Altura y (mm)	8	8	7,84	7,82

Comparando as dimensões reais com as dimensões nominais a ferramenta apresenta dimensões reais inferiores. Após os ensaios realizados as ferramentas apresentaram diâmetros e alturas semelhantes.

A Figura 45 (a) apresenta o desgaste após os ensaios pelo método convencional enquanto a Figura 45 (b) mostra o desgaste após os ensaios pelo método com auxílio de ultrassons. Analisando a Figura 45 verifica-se desgaste na aresta da ferramenta.



Figura 45 (a) Ferramenta Pferd10 após os ensaios convencionais



(b) Ferramenta Pferd10 após os ensaios com ultrassons

A Tabela 82 mostra o resultado da rugosidade da área de trabalho da ferramenta Pferd6 em cada etapa.

Tabela 82 Rugosidade de ferramenta Pferd6 finais

Rugosidade (Ra) μm		
Ferramenta nova	Após ensaio convencional	Após ensaio com ultrassons
18,5	18,4	15,7

Observando a tabela anterior os ensaios realizados pelo processo com auxílio de ultrassons diminuiram mais a rugosidade que o processo convencional.

A Tabela 83 apresenta as medições da ferramenta de forma a compreender o desgaste nos dois ensaios.

Tabela 83 Desgaste da ferramenta Pferd6 no ensaio convencional e com auxílio de ultrassons

	Valor Nominal	Ferramenta nova	Ensaio convencional	Ensaio com ultrassons
\varnothing 0-0,05 (mm)	6	5,75	5,66	5,59
\varnothing 0,1-0,6 (mm)	6	5,80	5,73	5,66
\varnothing restante (mm)	6	5,89	5,79	5,75
Altura y (mm)	6	5,58	5,51	5,50

Comparando o valor nominal com as medidas das ferramentas novas, as ferramentas novas têm dimensões mais reduzidas que o valor nominal. Comparando os dois métodos verifica-se que as dimensões das ferramentas são equivalentes.

A Figura 46 (a) apresenta o desgaste após os ensaios pelo método convencional enquanto a Figura 46 (b) mostra o desgaste após os ensaios pelo método com auxílio de ultrassons. Analisando a Figura 46 verifica-se desgaste na aresta da ferramenta.

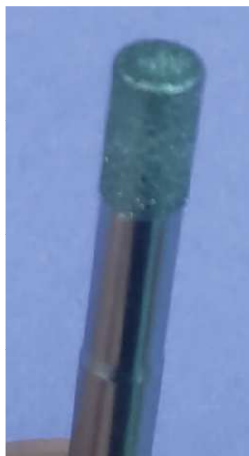


Figura 46 (a) Ferramenta Pferd6 após os ensaios convencionais



(b) Ferramenta Pferd6 após os ensaios com ultrassons

4.4 Comparação método convencional com auxílio de ultrassons

Para além das forças de corte e rugosidade superficial das peças, outra variável a ter em consideração é o tempo de maquinagem. Para a otimização das três variáveis é utilizado o programa Minitab e a metodologia ANOVA na otimização de resposta. A Tabela 84 mostra os parâmetros de corte, considerando a otimização das três variáveis, para o processo convencional e com auxílio de ultrassons. As próximas tabelas mostram os parâmetros ótimos e os correspondentes valores estimados Fe, Re e tempo (Te), obtidos a partir do Minitab. Para efeitos de comparação é apresentado o tempo simulado no Powermill com os parâmetros ótimos.

Tabela 84 Otimização dos resultados para convencional e com auxílio ultrassons Efftgen20

	Vf (mm/min)	Rotação (rpm)	Ap (mm)	Fe (N)	IC a 95% Fe	Re (μm)	IC a 95% Re	Te (min)	IC a 95% Te	Tempo (min) Powermill (Ts)
Convencional	250	10000	0,125	40	10,61; 70,23	1,5	-0,55; 3,64	32,54	-4,32; 69,41	33
Aux. Ultrassons	500	6000	0,125	55	41,02; 69,71	0,8	0,70; 0,92	15,94	-3,88; 35,75	16

Analisando a Tabela 84, o método de maquinagem com auxílio de ultrassons apresenta um Vf superior ao método convencional, o que se traduz numa redução de tempo de 50%. Por outro lado, o valor ótimo de rugosidade estimado com auxílio de ultrassons é de 0,8μm enquanto através do método convencional é de 1,1μm. O tempo estimado pelo Minitab é semelhante ao tempo de simulação obtido pelo Powermill.

A Tabela 85 apresenta os melhores parâmetros para o processo de maquinagem convencional e com auxílio de ultrassons para a ferramenta Effgen10.

Tabela 85 Otimização dos resultados para convencional e com auxílio ultrassons Effgen10

	Vf (mm/min)	Rotação (rpm)	Ap (mm)	Fe (N)	IC a 95% Fe	Re (µm)	IC a 95% Re	Te (min)	IC a 95% Te	Tempo (min) Powermill (Ts)
Convencional	500	10000	0,125	-	-840; 710	1,3	0,049; 2,495	7,88	-27,92; 43,67	16
Aux. Ultrassons	750	6000	0,125	183	-242; 608	2,4	1,379; 3,370	8,79	-11,02; 28,61	9

Não é possível obter uma estimativa para a força de corte no método convencional uma vez que o valor estimado é negativo. Devido à incerteza dos resultados, conforme se pode verificar pela amplitude do tempo do IC a 95%, o Te difere do tempo simulado pelo Powermill. Assim sendo verifica-se que o tempo com auxílio de ultrassons tende a ser menor. Em contrapartida apresenta uma rugosidade alvo mais elevada (2,4µm) que o processo convencional (1,3µm).

A Tabela 86 apresenta os melhores parâmetros para a ferramenta Effgen6.

Tabela 86 Otimização dos resultados para convencional e com auxílio ultrassons Effgen6

	Vf (mm/min)	Rotação (rpm)	Ap (mm)	Fe (N)	IC a 95% Fe	Re (µm)	IC a 95% Re	Te (min)	IC a 95% Te	Tempo (min) Powermill (Ts)
Convencional	500	10000	0,05	56,4	-29,5; 142,2	1,3	0,178; 2,435	40,39	10,18; 70,59	45
Aux. Ultrassons	250	6000	0,0875	109,9	35,8; 184,0	1,9	1,059; 2,777	45,94	29,25; 62,64	44

Apesar da incerteza dos resultados, a estimativa de tempo é semelhante para ambos os métodos, contudo o método convencional apresenta rugosidade alvo e força de corte mais baixas.

A Tabela 87 mostra a otimização dos parâmetros para a ferramenta Effgen6D46.

Tabela 87 Otimização dos resultados para convencional e com auxílio ultrassons Effgen6D46

	Vf (mm/min)	Rotação (rpm)	Ap (mm)	Fe (N)	IC a 95% Fe	Re (µm)	IC a 95% Re	Te (min)	IC a 95% Te	Tempo (min) Powermill (Ts)
Convencional	500	8000	0,0875	225	-457; 907	1,3	0,479; 2,168	19,89	-10,32; 50,09	27
Aux. Ultrassons	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

No processo com auxílio de ultrassons a ferramenta danificou-se, não sendo por isso apresentados os respetivos valores. No caso do método convencional obtém-se um tempo estimado de 20min enquanto o simulado é de 27min. Estima-se um Re de 1,3µm e um Fe de 225N.

A Tabela 88 mostra a otimização dos parâmetros para a ferramenta Schott20.

Tabela 88 Otimização dos resultados para convencional e com auxílio ultrassons Schott20

	Vf (mm/min)	Rotação (rpm)	Ap (mm)	Fe (N)	IC a 95% Fe	Re (µm)	IC a 95% Re	Te (min)	IC a 95% Te	Tempo (min) Powermill(Ts)
Convencional	250	10000	0,125	34	1,29; 67,48	1,1	-0,685; 2,934	32,54	4,32; 69,41	31
Aux. Ultrassons	500	6000	0,2	91	72,59; 108,72	0,9	0,6350; 1,1088	27,94	8,12; 47,75	11

Observando a Tabela 88 o processo realizado com auxílio de ultrassons é o mais rápido. No método convencional o tempo estimado e o tempo simulado são semelhantes, enquanto no processo com auxílio por ultrassons apresenta um desfasamento entre os dois tempos. As rugosidades superficiais estimadas das peças são semelhantes independentemente do método utilizado. No método convencional a força de corte é inferior.

A Tabela 89 mostra a otimização dos parâmetros para a ferramenta Schott10, considerando os dois métodos estudados.

Tabela 89 Otimização dos resultados para convencional e com auxílio ultrassons Schott10

	Vf (mm/min)	Rotação (rpm)	Ap (mm)	Fe (N)	IC a 95% Fe	Re (μ m)	IC a 95% Re	Te (min)	IC a 95% Te	Tempo (min) Powermill (Ts)
Convencional	500	10000	0,2	65,6	22,1; 109,1	1,6	-0,297; 3,548	5,88	-30,99; 42,74	11
Aux. Ultrassons	250	6000	0,125	68,7	-1,4; 138,8	1,4	1,1914; 1,6955	35,27	15,46; 55,09	31

Neste caso, o método convencional possibilita um processo de maquinagem mais rápido que o com o auxílio de ultrassons. Na comparação entre o tempo estimado e simulado o método com auxílio de ultrassons apresenta tempos parecidos, enquanto no método convencional a estimativa é praticamente metade do tempo simulado. A rugosidade e forças esperadas são semelhantes.

A Tabela 90 mostra a otimização dos parâmetros para a ferramenta Schott6.

Tabela 90 Otimização dos resultados para convencional e com auxílio ultrassons Schott6

	Vf (mm/min)	Rotação (rpm)	Ap (mm)	Fe (N)	IC a 95% Fe	Re (μ m)	IC a 95% Re	Te (min)	IC a 95% Te	Tempo (min) Powermill (Ts)
Convencional	250	10000	0,0875	20,6	10,14; 31,00	1,0	0,079; 1,930	36,89	5,88; 67,90	44,2
Aux. Ultrassons	500	6000	0,0875	44,3	34,20; 54,45	1,1	0,8176; 1,3692	22,44	5,75; 39,14	25,5

Comparando os dois processos verifica-se que o método com auxílio de ultrassons é mais rápido que o método convencional. Com esta combinação de resultados verifica-se que o método com auxílio de ultrassons apresenta uma rugosidade final equivalente comparando com o convencional. Em relação à força o método convencional apresenta menor força que o método com auxílio de ultrassons.

Na Tabela 91 são apresentados os melhores parâmetros para a ferramenta SchottHM10.

Tabela 91 Otimização dos resultados para convencional e com auxílio ultrassons SchottHM10

	Vf (mm/min)	Rotação (rpm)	Ap (mm)	Fe (N)	IC a 95% Fe	Re (μ m)	IC a 95% Re	Te (min)	IC a 95% Te	Tempo (min) Powermill (Ts)
Convencional	500	10000	0,125	49,8	2,9; 102,6	1,4	0,851; 2,043	13,21	-23,66; 50,07	18
Aux. Ultrassons	250	6000	0,125	40,9	24,64; 57,23	1,4	0,938; 1,905	35,27	15,46; 55,09	31

O método convencional é o que apresenta menor tempo de maquinagem estimado e simulado. Os restantes resultados são equivalentes.

A Tabela 92 mostra a otimização dos parâmetros para o processo convencional e com auxílio de ultrassons para a ferramenta SchottHM6.

Tabela 92 Otimização dos resultados para convencional e com auxílio ultrassons SchottHM6

	Vf (mm/min)	Rotação (rpm)	Ap (mm)	Fe (N)	IC a 95% Fe	Re (µm)	IC a 95% Re	Te (min)	IC a 95% Te	Tempo (min) Powermill (Ts)
Convencional	250	10000	0,2	30,5	26,962; 34,118	1,0	0,113; 1,889	25,21	-11,66; 62,07	20
Aux. Ultrassons	250	6000	0,125	27,8	-4,0; 59,6	1,6	0,298; 2,857	35,27	15,46; 55,09	31

O ensaio com menor tempo de maquinagem é o ensaio realizado pelo método convencional. O tempo estimado é semelhante ao tempo simulado. Quanto à força esperada os resultados são semelhantes. Em relação à rugosidade o método convencional apresenta menor rugosidade que o método com auxílio de ultrassons.

A Tabela 93 mostra a otimização dos parâmetros para o processo convencional e com auxílio de ultrassons para a ferramenta Besdia10.

Tabela 93 Otimização dos resultados para convencional e com auxílio ultrassons Besdia10

	Vf (mm/min)	Rotação (rpm)	Ap (mm)	Fe (N)	IC a 95% Fe	Re (µm)	IC a 95% Re	Te (min)	IC a 95% Te	Tempo (min) (Powermill (Ts)
Convencional	500	6000	0,05	58,5	22,6; 94,4	1,7	1,5332; 1,9271	45,46	25,64; 65,27	45
Aux. Ultrassons	250	6000	0,125	63,5	-130,4; 257,3	1,9	1,528; 2,279	35,27	15,46; 55,09	31

Se o objetivo for o menor tempo o ensaio realizado pelo método com auxílio de ultrassons é a melhor solução. O tempo resultante da simulação e da estimativa são semelhantes. Os resultados para a força e acabamento superficial são equivalentes.

A Tabela 94 apresenta os melhores parâmetros para a ferramenta Besdia6.

Tabela 94 Otimização dos resultados para convencional e com auxílio ultrassons Besdia6

	Vf (mm/min)	Rotação (rpm)	Ap (mm)	Fe (N)	IC a 95% Fe	Re (µm)	IC a 95% Re	Te (min)	IC a 95% Te	Tempo (min) (Powermill (Ts)
Convencional	250	6000	0,0875	50,1	33,35; 66,96	1,5	,3887; 1,6653	45,94	29,25; 62,64	44
Aux. Ultrassons	250	6000	0,0875	77,3	21,9; 132,7	1,46	0,727; 2,210	45,94	29,25; 62,64	44

As forças de corte apresentadas são mais baixas para o método convencional. Para os dois métodos a rugosidade e o tempo são iguais.

A Tabela 95 mostra a otimização dos parâmetros para a ferramenta Pferd10.

Tabela 95 Otimização dos resultados para convencional e com auxílio ultrassons Pferd10

	Vf (mm/min)	Rotação (rpm)	Ap (mm)	Fe (N)	IC a 95% Fe	Re (µm)	IC a 95% Re	Te (min)	IC a 95% Te	Tempo (min) (Powermill (Ts)
Convencional	750	6000	0,05	48,4	-170,0; 266,8	2,3	1,852; 2,699	22,5	-29,0; 73,9	34
Aux. Ultrassons	250	6000	0,05	20,3	-13,5; 54,0	1,6	1,0; 1,6	48,4	-2,5; 100,4	77

Analisando a tabela anterior verifica-se que o método convencional é o que apresenta menor força de corte. Contudo, também é o método que apresenta maior rugosidade e tempo de maquinagem. O tempo estimado e o tempo simulado apresentam uma diferença significativa para os dois processos.

A Tabela 96 mostra a otimização dos parâmetros para a ferramenta Pferd6.

Tabela 96 Otimização dos resultados para convencional e com auxílio ultrassons Pferd6

	Vf (mm/min)	Rotação (rpm)	Ap (mm)	Fe (N)	IC a 95% Fe	Re (μ m)	IC a 95% Re	Te (min)	IC a 95% Te	Tempo (min) (Powermill (Ts))
Convencional	250	6000	0,0875	58,3	37,23; 75,38	1,1	0,817; 1,408	45,94	29,25; 62,64	44
Aux. Ultrassons	500	6000	0,05	50,3	43,54; 57,05	1,7	,5204; 1,8973	43,28	26,58; 59,97	45

Considerando os valores da força, o método convencional apresenta maior força que o método com auxílio de ultrassons. Relativamente á rugosidade o método convencional apresenta uma rugosidade mais baixa que o processo com auxílio de ultrassons. Os tempos de maquinagem, estimados e simulados, são semelhantes entre os dois métodos.

4.5 Comparação entre ferramentas

Nesta secção é realizada uma comparação entre as forças de corte, rugosidade superficial mínima e máxima, rugosidade das ferramentas, tempo de maquinagem e custos de aquisição das diferentes ferramentas estudadas.

A Figura 47 mostra as forças máximas e mínimas resultantes dos ensaios realizados pelo método convencional e com auxílio de ultrassons.

No que diz respeito aos resultados das forças de corte mínimas obtidos recorrendo aos parâmetros mais favoráveis (Vf baixo, rotação alta e Ap baixo) verifica-se que todas as ferramentas utilizadas apresentam forças de corte abaixo de 100N. Para as ferramentas do fabricante Schott com o corpo em aço, a força de corte é menor para o método convencional comparativamente com o método com auxílio de ultrassons. Já para as ferramentas Schott com o corpo em metal duro acontece o oposto. Isto pode dever-se à maior rigidez das ferramentas em metal duro o que origina uma menor vibração e consequentemente uma redução da força.

Os valores de força mínima mais elevada foram obtidos para a ferramenta Effgen6 e Effgen6D46 provavelmente devido ao corpo mais comprido e diâmetro mais reduzido o que pode induzir uma maior vibração da ferramenta. As forças mais baixas são alcançadas nas ferramentas Effgen20, Schott6, SchottHM10 e SchottHM6.

Para as forças de corte máximas, relativamente à comparação do método convencional com o auxílio de ultrassons, verifica-se a mesma tendência para as ferramentas do fabricante Schott discutida nas forças de corte mínimas. Nas ferramentas Besdia é possível verificar um aumento das

forças de corte com o auxílio de ultrassons. No caso das Pferd acontece o oposto. Tal pode-se dever às ferramentas Besdia apresentarem um maior comprimento. Uma vez que a aplicação de ultrassons amplifica a vibração da ferramenta, a menor rigidez do corpo contribui para o elevado aumento da força de corte. Na maquinagem com auxílio de ultrassons observou-se que para as ferramentas Effgen10, Effgen6, Effgen6D46, Besdia10 e Besdia6 a utilização de parâmetros desfavoráveis (V_f alto, rotação baixa e A_p alto) causa um aumento significativo das forças de corte (acima de 250N). O mesmo acontece para as ferramentas Effgen10, Effgen6, Effgen6D46 e Pferd10 utilizando o método convencional.

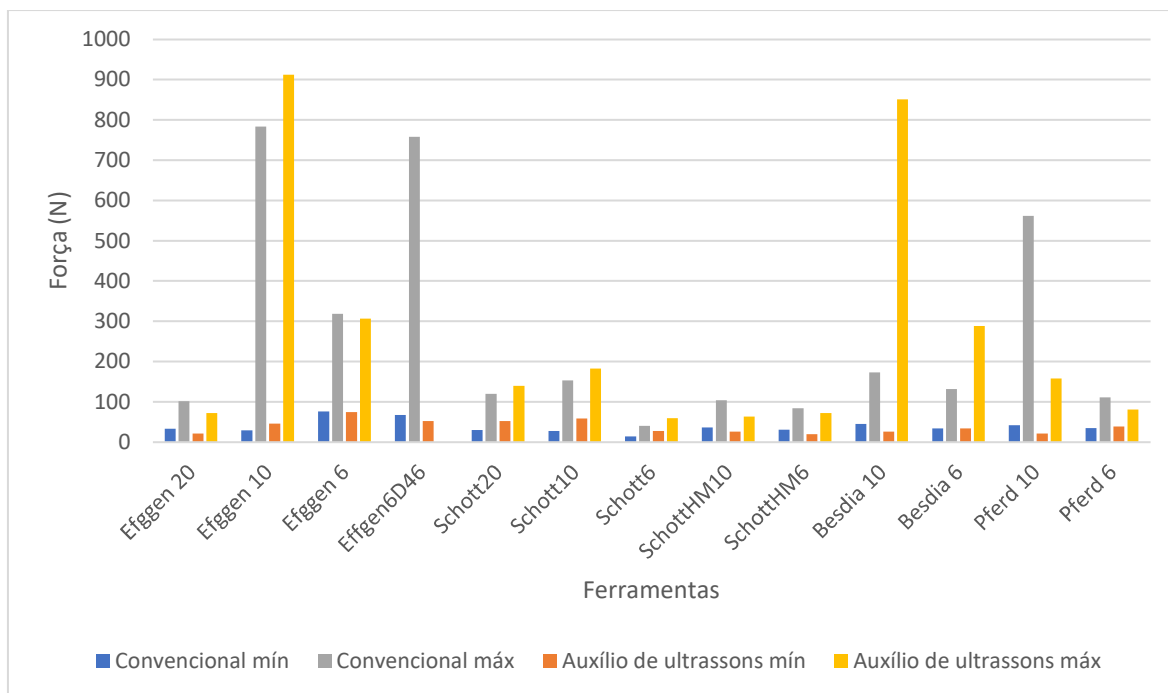


Figura 47 Forças máximas e mínimas para o método convencional e com auxílio de ultrassons.

Por outro lado, as ferramentas Effgen20, Schott20, Schott6, SchottHM10 e SchottHM6 são as que apresentam as menores forças de corte (abaixo de 150N). Estes resultados podem ser explicados pela maior robustez do corpo das ferramentas de maior diâmetro, pela geometria específica da ferramenta Schott6 e pelo material do corpo das ferramentas HM (metal duro).

A Figura 48 apresenta as rugosidades máximas e mínimas resultantes dos ensaios realizados pelo método convencional e com auxílio de ultrassons. Atendendo aos valores mínimos de rugosidade, a única ferramenta que pelo método convencional apresenta valores inferiores a $1\mu\text{m}$ é a SchottHM6. Já com o auxílio de ultrassons, existem mais ferramentas abaixo desse valor: Effgen20, Effgen6D46, Schott20 e a Schott6.

Relativamente aos valores máximos, as ferramentas que apresentam uma melhoria na rugosidade superficial das amostras aplicando o método por auxílio de ultrassons são as Schott20, Schott10 e Schott6, sendo que a Effgen20 é a que apresenta uma melhoria mais significativa. A ferramenta Effgen6D46 é excluída por se ter destruído no final dos ensaios.

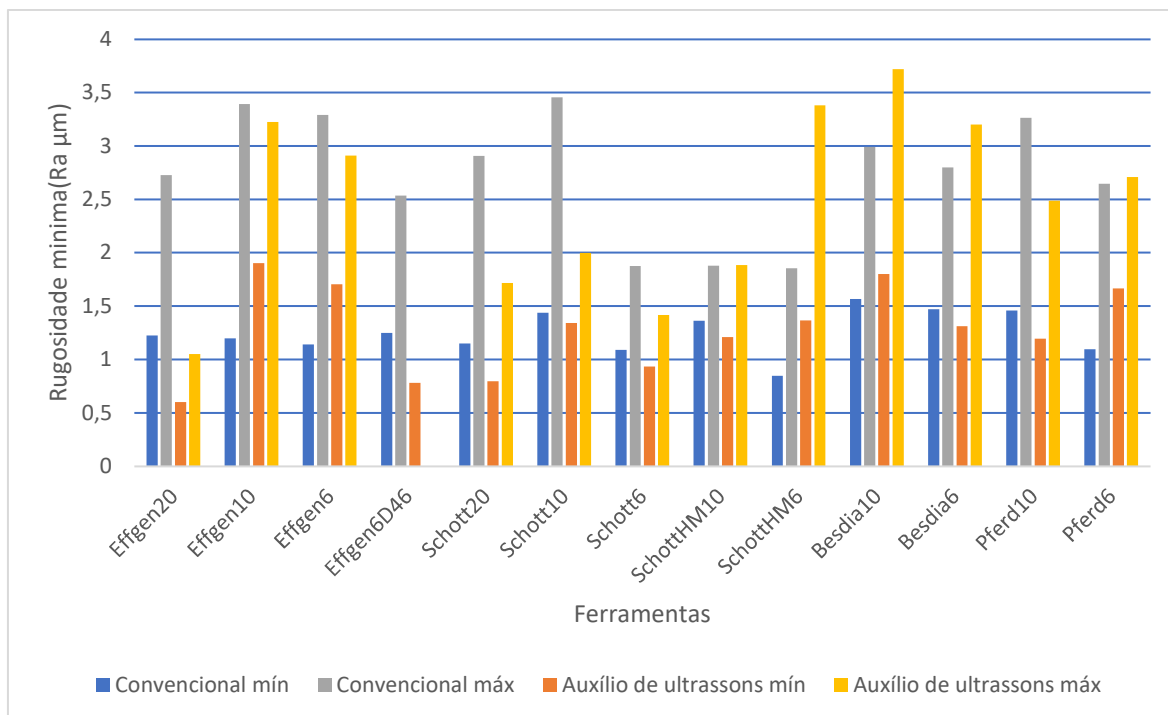


Figura 48 Rugosidades máximas e mínimas para o método convencional e com auxílio de ultrassons

Observando o gráfico da figura anterior a Schott6 e SchottHM10 são as ferramentas que apresentam valores de rugosidade mais próximos entre ensaios.

As ferramentas Effgen20, Schott20, Schott6, SchottHM10 e Pferd10 mantêm uma rugosidade mais baixa no ensaio com auxílio de ultrassons. As ferramentas que aumentaram a rugosidade com a utilização do método com auxílio de ultrassons são a Besdia10 e a Pferd6. Comparativamente com os dados da força de corte, verificou-se uma menor coerência nos resultados obtidos.

A Figura 49 mostra a rugosidade das ferramentas novas, e a rugosidade medidas após serem utilizadas nos ensaios pelo método convencional e com auxílio de ultrassons. Como já descrito neste documento as ferramentas Schott ao longo dos ensaios foram aumentando de rugosidade. Isto pode dever-se à perda de material de suporte dos cristais de diamante.

As ferramentas Effgen tiveram tendência a perder rugosidade possivelmente devido à perda de cristais de diamante. No caso da ferramenta Effgen6D46 houve um aumento da rugosidade no método convencional. Já no método com auxílio de ultrassons verificou-se a destruição da ferramenta. Olhando para as ferramentas Besdia10 e Pferd6 houve uma maior degradação com a utilização do método com auxílio de ultrassons. No caso da Besdia6 o método convencional apresentou uma maior perda de rugosidade.

Se procurarmos estabelecer uma relação entre as forças de corte e a perda de rugosidade, no caso da Besdia10 o método com auxílio de ultrassons sujeitou a ferramenta a uma maior força o que levou a uma maior perda de rugosidade. No entanto na Besdia6 e na Pferd6 esse facto não se verifica. Este resultado indica que a rugosidade não representa o desgaste real da ferramenta.

Geralmente a ferramenta na zona de corte tem alguma espessura com material abrasivo que ao se desgastar pode originar um aumento ou diminuição da rugosidade da ferramenta.

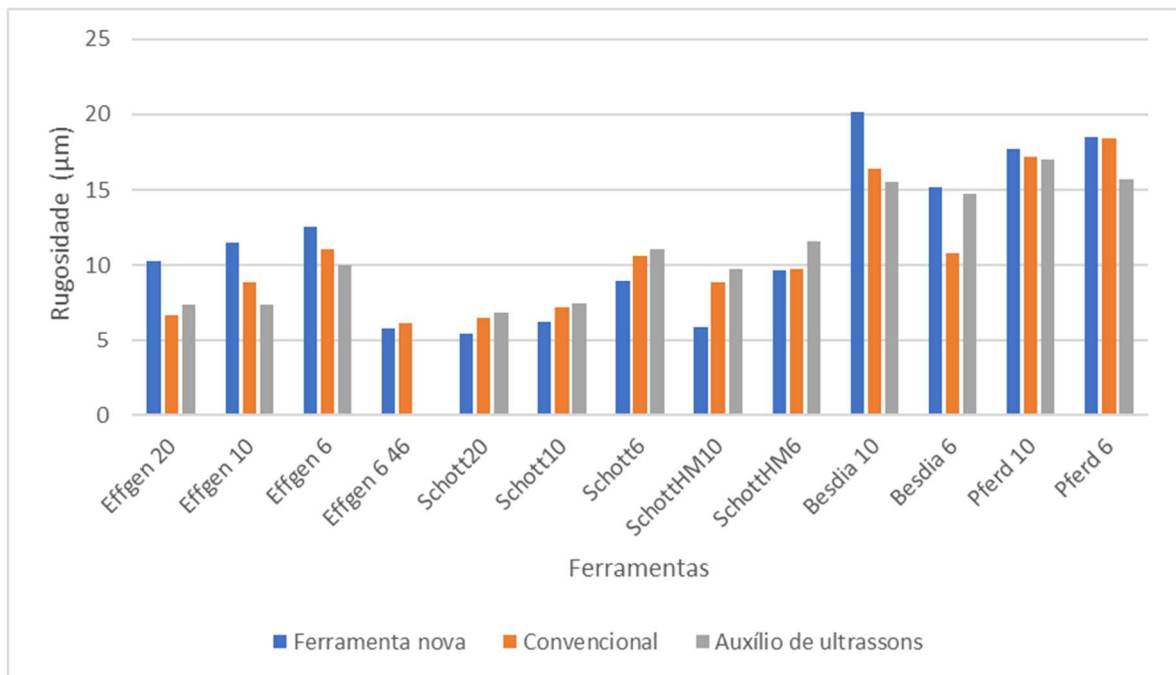


Figura 49 Rugosidades das ferramentas nas várias etapas

A Figura 50 apresenta a comparação dos preços de aquisição das várias ferramentas.

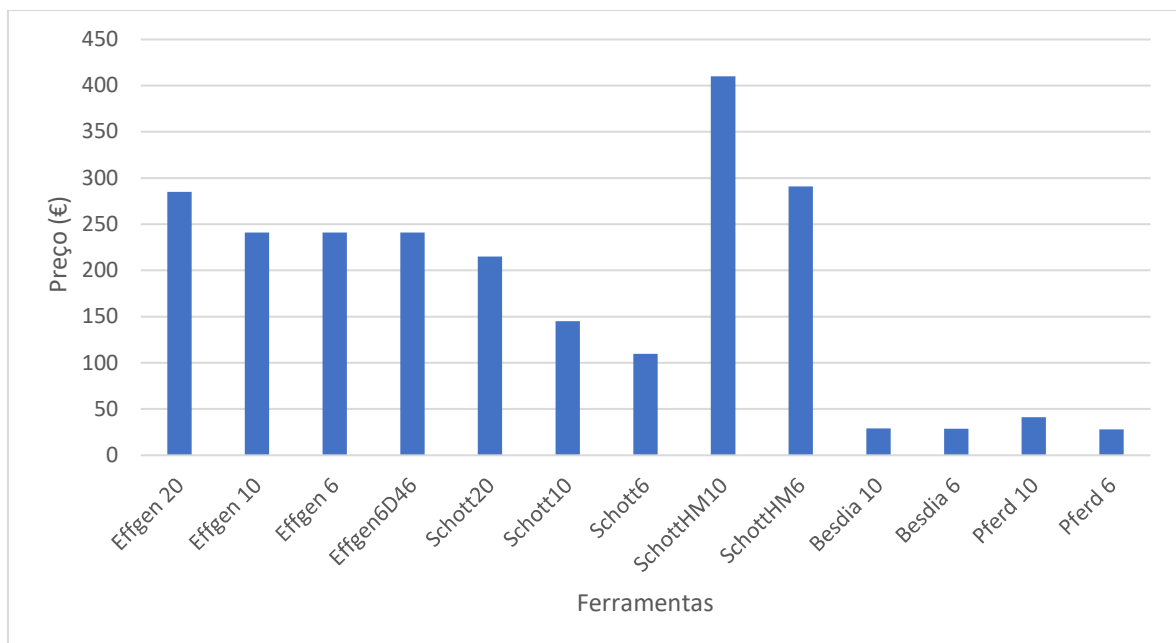


Figura 50 Custo de aquisição das ferramentas

Observando o gráfico anterior verifica-se que as ferramentas SchottHM e as ferramentas Effgen são as mais dispendiosas enquanto as ferramentas Besdia e Pferd são as menos dispendiosas.

Procurando fazer uma relação custo benefício a ferramenta Effgen20 apesar de ser das mais caras, é a que apresenta as menores forças de corte, menor rugosidade superficial na superfície maquinada e reduzido desgaste na ferramenta, apesar de ter perdido rugosidade na ferramenta. Esta ferramenta apresenta melhores resultados no método com auxílio de ultrassons. A ferramenta Schott20 tem um desempenho muito similar à Effgen20 mas com um custo inferior.

As ferramentas Effgen10, Effgen6 e Effgen6D46 também são das ferramentas com custo mais elevado. Com parâmetros favoráveis apresentam força e rugosidade considerados aceitáveis, mas quando se utilizam parâmetros mais exigentes as forças de corte são muito elevadas, bem como a rugosidade. No final dos ensaios as ferramentas apresentam bastante desgaste. Sendo ferramentas compridas podem ser utilizadas para trabalhar em locais de difícil acesso, mas com parâmetros favoráveis.

As ferramentas Schott têm um preço intermédio, apresentam forças de corte baixas em todos os ensaios, tendência a aumentar a rugosidade na superfície da ferramenta sendo o desgaste pouco visível. Relativamente à rugosidade na superfície da peça no método convencional as ferramentas Schott20 e Schott10 apresentam valores mais elevados com parâmetros não favoráveis. As ferramentas SchottHM10 e SchottHM6 são as mais caras, mas em contrapartida são as que com parâmetros desfavoráveis apresentam as menores forças, o que leva a pensar que possa suportar V_f , rotação e A_p mais elevados que os testados. Apesar da rugosidade mínima não ser das mais baixas comparando com as restantes ferramentas, em contrapartida na rugosidade máxima também são das mais baixas, tendo como exceção a SchottHM6 no ensaio com auxílio de ultrassons.

As ferramentas Besdia são as menos dispendiosas e apresentam resultados das forças considerados aceitáveis, exceto quando aplicados parâmetros desfavoráveis no método com auxílio de ultrassons. Em relação à rugosidade na superfície da peça maquinada nos parâmetros desfavoráveis utilizando o método com auxílio de ultrassons apresentam rugosidade mais elevada. As ferramentas Pferd são das que apresentam um custo de aquisição mais baixo. Em relação às forças de corte as ferramentas Pferd são consideradas aceitáveis à exceção do ensaio pelo método convencional na ferramenta Pferd10. Relativamente à rugosidade no caso da ferramenta Pferd10 para a rugosidade máxima o método convencional apresenta-se desfavorável.

A Tabela 97 apresenta os parâmetros ótimos para a força, rugosidade e a combinação da força, rugosidade e tempo (FRT) para o método convencional. Uma vez que o tempo de maquinagem é um fator determinante a nível industrial, o objetivo do FRT é conjugar a menor força e rugosidade superficial no menor tempo de maquinagem possível.

Considerando os níveis previamente escolhidos, os resultados de força e rugosidade ótimos apontam para um V_f menor (250mm/min) e uma rotação maior (10000rpm). No caso da força verifica-se ainda que o A_p ótimo tende a ser o menor (0,05mm).

Tabela 97 Melhores parâmetros do método convencional

	Força			Rugosidade			FRT		
	Vf (mm/min)	Rotação (rpm)	Ap (mm)	Vf (mm/min)	Rotação (rpm)	Ap (mm)	Vf (mm/min)	Rotação (rpm)	Ap (mm)
Effgen20	250	10000	0,05	750	10000	0,125	250	10000	0,125
Effgen10	250	10000	0,05	250	10000	0,125	500	10000	0,125
Effgen6	250	10000	0,05	500	10000	0,05	500	10000	0,05
Effgen6D46	250	8000	0,05	250	10000	0,05	500	8000	0,0875
Schott20	250	10000	0,05	500	10000	0,125	250	10000	0,125
Schott10	250	10000	0,05	250	10000	0,2	500	10000	0,2
Schott6	250	8000	0,05	250	8000	0,0875	250	10000	0,0875
SchottHM10	250	10000	0,05	250	8000	0,125	500	10000	0,125
SchottHM6	250	10000	0,05	250	8000	0,125	250	10000	0,2
Besdia10	250	-	0,05	250	-	0,05	500	-	0,05
Besdia6	250	-	0,05	250	-	0,05	250	-	0,0875
Pferd10	250	-	0,05	250	-	0,05	750	-	0,05
Pferd6	250	-	0,05	250	-	0,05	250	-	0,0875

Para a rugosidade e FRT, na maioria das ferramentas ensaiadas, não é possível verificar nenhuma tendência para o valor ótimo de Ap devido à elevada variabilidade nos resultados obtidos. Nas ferramentas Besdia e Pferd os valores de rugosidade ótimos são obtidos para um Ap menor. Ao considerar a conjugação de parâmetros FRT, a variável tempo vai contribuir para o aumento do Vf: quanto maior o Vf, menor o tempo de maquinagem. A rotação ótima continua a ser a máxima.

Na Tabela 98 encontram-se os parâmetros ótimos para a força, rugosidade e a combinação da força, rugosidade e tempo (FRT) com o auxílio de ultrassons.

Tabela 98 Melhores parâmetros do método com auxílio de ultrassons

	Força		Rugosidade		FRT	
	Vf (mm/min)	Ap (mm)	Vf (mm/min)	Ap (mm)	Vf (mm/min)	Ap (mm)
Effgen20	500	0,05	250	0,2	500	0,125
Effgen10	250	0,05	250	0,125	750	0,125
Effgen6	250	0,05	250	0,0875	250	0,0875
Effgen6D46	-	-	-	-	-	-
Schott20	250	0,05	250	0,05	500	0,2
Schott10	250	0,05	250	0,05	250	0,125
Schott6	250	0,05	750	0,0875	500	0,0875
SchottHM10	250	0,05	250	0,2	250	0,125
SchottHM6	250	0,05	250	0,05	250	0,125
Besdia10	250	0,05	250	0,05	250	0,125
Besdia6	250	0,05	250	0,05	250	0,0875
Pferd10	250	0,05	250	0,05	250	0,05
Pferd6	250	0,05	250	0,05	500	0,05

As tendências que se verificaram no método convencional são semelhantes às obtidas com o auxílio de ultrassons. Tal como discutido para os ensaios no método convencional, verificou-se que a força ótima aponta para um Vf menor (250mm/min) e um Ap menor (0,05mm). Na rugosidade e FRT continua a não ser possível verificar nenhuma tendência para o valor ótimo de Ap devido à elevada variabilidade nos resultados obtidos. Relativamente à ferramenta Effgen6D46 não é possível obter a estimativa devido à destruição da ferramenta durante os ensaios.

5 Maquinagem da escultura

Esta secção apresenta o processo de maquinagem de uma peça em vidro cristal que consiste no aperto, centragem e maquinagem da peça, programação CAM com a definição de estratégias e parâmetros e controlo dimensional da peça.

5.1 Aperto, centragem e maquinagem

A fixação do bloco na máquina CNC levantou algumas dificuldades. Numa fase inicial o bloco de cristal foi preso diretamente numa prensa, acabando por partir. Na fase seguinte utilizou-se um tubo de perfil retangular em alumínio onde foi colado o bloco de cristal (Figura 25). Num primeiro teste o bloco acabou por se descolar durante o processo. Na segunda tentativa foi utilizada a cola Ceys Araldite standard que possibilitou a maquinagem da peça até final.

A prensa está posicionada no centro da mesa de modo a permitir a maquinagem a 3+2 eixos sem colisões entre a árvore e a mesa da máquina. O bloco está apertado na prensa de modo a permitir a maquinagem de toda a geometria da peça sem necessidade de apertos adicionais. Para isso o plano de simetria da peça está perpendicular aos mordentes da prensa. Assim, com 3 direções de maquinagem (planos A, B e C) será possível alcançar toda a geometria. A partir do modelo da Figura 24 foram escolhidas estratégias e ferramentas para executar a sua maquinagem. De seguida neste capítulo serão descritas todas as operações realizadas e respetivas ferramentas, estratégias e parâmetros utilizados.

5.2 Programas CAM

A primeira estratégia utilizada é a estratégia de desbaste com uma ferramenta de diâmetro 32mm (Figura 51). O desbaste é realizado até uma profundidade de 50mm devido à altura da ferramenta. A maquinagem é feita com o bloco na vertical denominado por plano de trabalho A.

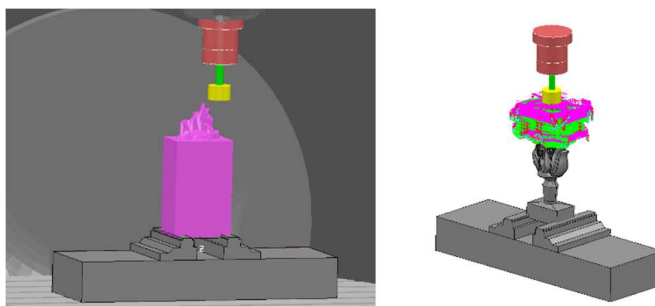


Figura 51 Desbaste da ferramenta de $\varnothing 32$ no plano A

A Tabela 99 apresenta os parâmetros utilizados: avanço de corte (A_c) de 500mm/min, avanço de mergulho (A_m) 1000mm/min, avanço rasante (A_r) 3000mm/min, a rotação no spindle (rotação)

6000rpm, o passo lateral (Ae) 20mm e o passo vertical (Ap) 0,1mm, originando um tempo total da maquinação (t total) de 9h47.

Tabela 99 Principais parâmetros de desbaste da ferramenta de Ø32 no plano A

Estratégia	Desbaste Modelo (Offset ao Modelo, PowerMill)		
Tolerância (mm)	0,01	Vf (mm/min)	500
Sobre-espessura (mm)	0,2	Am (mm/min)	1000
Ae (mm)	20	Ar (mm/min)	3000
Ap (mm)	0,1	Rotação (rpm)	6000
t de corte (horas)	8:43:02	t total (horas)	9:47:12

A Figura 52 mostra o resultado da estratégia seguinte de re-desbaste com a ferramenta de diâmetro 20mm.

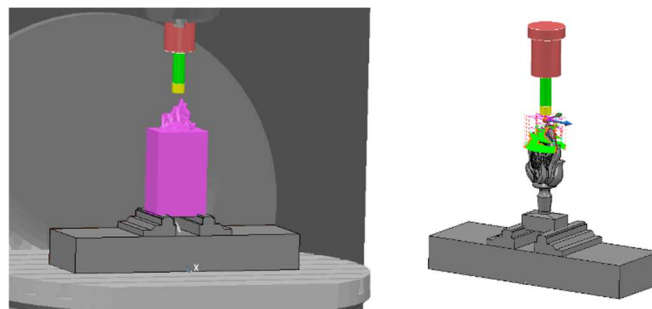


Figura 52 Re-desbaste da ferramenta de Ø20 no plano A

A Tabela 100 apresenta os principais parâmetros do re-desbaste da ferramenta no plano A. É utilizado um avanço de corte 500mm/min e rotação de 8000rpm com um tempo total estimado de aproximadamente 1h00.

Tabela 100 Principais parâmetros de re-desbaste da ferramenta de Ø20 no plano A

Estratégia	Desbaste Modelo (Offset ao Modelo, PowerMill)		
Tolerância (mm)	0,01	Vf (mm/min)	500
Sobre-espessura (mm)	0,2	Am (mm/min)	500
Ae (mm)	10	Ar (mm/min)	3000
Ap (mm)	0,1	Rotação (rpm)	8000
t de corte (min)	54:37	t total (horas)	1:04:14

A estratégia seguinte passou por um segundo re-desbaste com uma ferramenta de diâmetro 10mm, que pode ser visualizado na Figura 53.

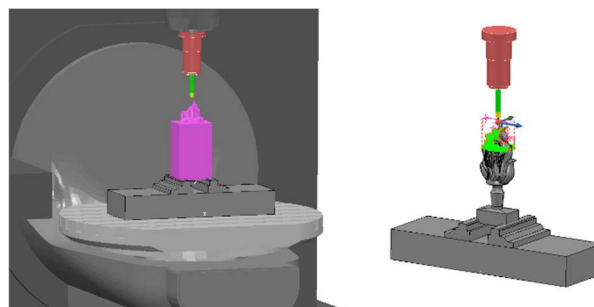


Figura 53 Re-desbaste da ferramenta de Ø10 no plano A

Os parâmetros utilizados na estratégia de re-desbaste são apresentados na Tabela 101. Os parâmetros utilizados são bastante parecidos com a estratégia anterior. De destacar a diferença no Ae para 5mm devido ao diâmetro da ferramenta.

Tabela 101 Principais parâmetros de desbaste da ferramenta de Ø10 no plano A

Estratégia	Desbaste Modelo (Offset ao Modelo, PowerMill)		
Tolerância (mm)	0,01	Vf (mm/min)	500
Sobre-espessura (mm)	0,2	Am (mm/min)	500
Ae (mm)	5	Ar (mm/min)	3000
Ap (mm)	0,1	Rotação (rpm)	8000
t de corte (min)	48:33	t total (min)	58:53

Para continuar o processo de maquinagem, uma vez que a ferramenta não tem altura suficiente, é necessário rodar a mesa do centro de maquinagem como se pode verificar na Figura 54, criando assim o plano de trabalho B. Esta direção de corte também tem a vantagem de alcançar mais rapidamente a geometria final da peça (impossível de alcançar no plano A). A maquinagem não é executada até próximo da prensa para permitir alguma rigidez na peça nas operações de re-desbaste mais exigentes. No plano B é possível maquinar até ao plano de simetria da peça, sendo a outra metade maquinada no plano C. Na Figura 54 está visível a peça maquinada no plano B.

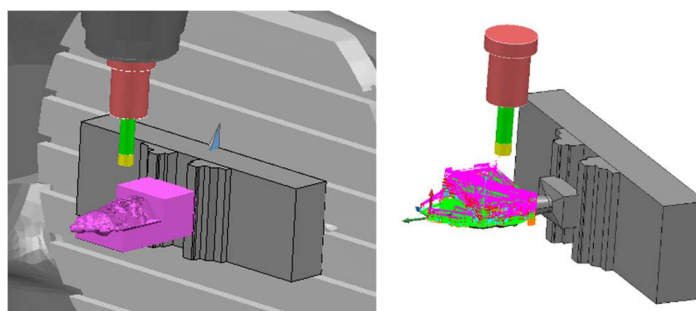


Figura 54 Re-desbaste da ferramenta de Ø20 no plano B

Na Tabela 102 estão apresentados os principais parâmetros para o re-desbaste do plano B. O tempo de execução desta estratégia para cada lado é de aproximadamente 6h30.

Tabela 102 Principais parâmetros de desbaste da ferramenta de Ø20 no plano B e C

Estratégia	Desbaste Modelo (Offset ao Modelo, PowerMill)		
Tolerância (mm)	0,01	Vf (mm/min)	500
Sobre-espessura (mm)	0,2	Am (mm/min)	500
Ae (mm)	10	Ar (mm/min)	3000
Ap (mm)	0,1	Rotação (rpm)	8000
t de corte (horas)	5:21:00	t total (horas)	6:30:38

Tal como no lado A, para maquinar o lado B e C após a utilização de uma ferramenta de diâmetro 20mm é utilizada uma ferramenta de diâmetro 10mm. Na Figura 55, pode ser visualizado o resultado da peça após a maquinagem com a ferramenta de diâmetro 10mm e na segunda imagem é visível a trajetória para esta ferramenta.

Na Tabela 103 estão apresentados os parâmetros utilizados na estratégia de re-desbaste. O tempo necessário para a execução desta estratégia para cada lado é de aproximadamente 1h00.

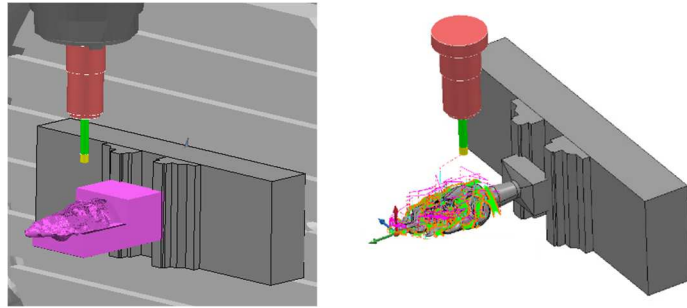


Figura 55 Re-desbaste da ferramenta de Ø10 no plano B

Tabela 103 Principais parâmetros de desbaste da ferramenta de Ø10 no plano B e C

Estratégia	Desbaste Modelo (Offset ao Modelo, PowerMill)		
Tolerância (mm)	0,01	Vf (mm/min)	500
Sobre-espessura (mm)	0,2	Am (mm/min)	500
Ae (mm)	5	Ar (mm/min)	3000
Ap (mm)	0,1	Rotação (rpm)	8000
t de corte (min)	36:01	t total (horas)	1:02:18

De seguida é utilizada a ferramenta SchottHM6. A Figura 56 mostra o percurso e o resultado final do re-desbaste com a ferramenta de diâmetro 6 no lado B.

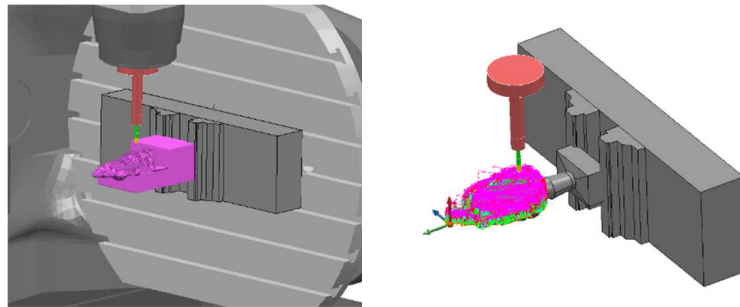


Figura 56 Re-desbaste da ferramenta de Ø6 no plano B

Tabela 104 Principais parâmetros de desbaste da ferramenta de Ø6 no plano B e C

Estratégia	Desbaste Modelo (Offset ao Modelo, PowerMill)		
Tolerância (mm)	0,01	Vf (mm/min)	500
Sobre-espessura (mm)	0,2	Am (mm/min)	500
Ae (mm)	3	Ar (mm/min)	3000
Ap (mm)	0,05	Rotação (rpm)	8000
t de corte (horas)	1:59:41	t total (horas)	2:44:38

A Figura 57 mostra o resultado do re-desbaste do lado C com a ferramenta de 20mm e a trajetória da maquinação. Os parâmetros utilizados são os descritos na Tabela 102.

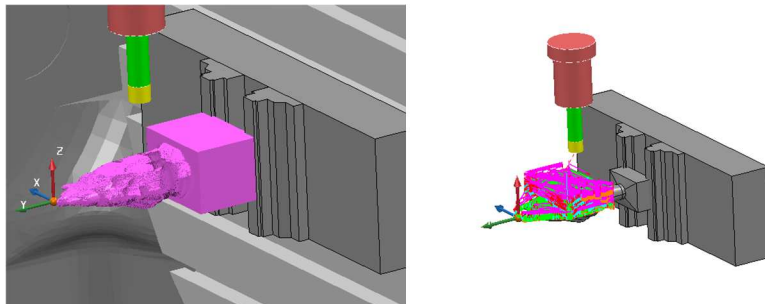


Figura 57 Re-desbaste da ferramenta de Ø20 no plano C

Na Figura 58 está apresentado o resultado do re-desbaste utilizando a ferramenta de diâmetro 10mm no lado C. Em relação aos parâmetros utilizados podem ser consultados na Tabela 103.

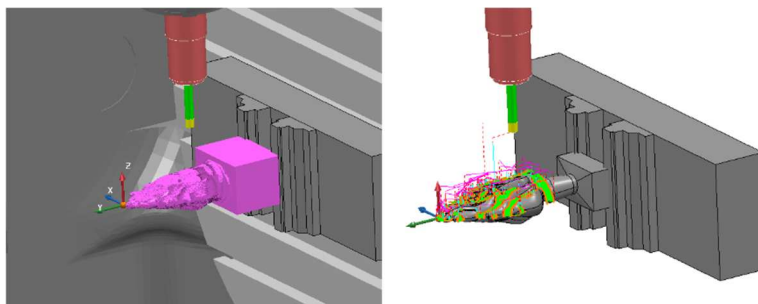


Figura 58 Re-desbaste da ferramenta de $\varnothing 10$ no plano C

O re-desbaste utilizando a ferramenta de 6mm é apresentado na Figura 59. Na Tabela 104 são apresentados os parâmetros com a ferramenta $\varnothing 6$ mm para o plano C.

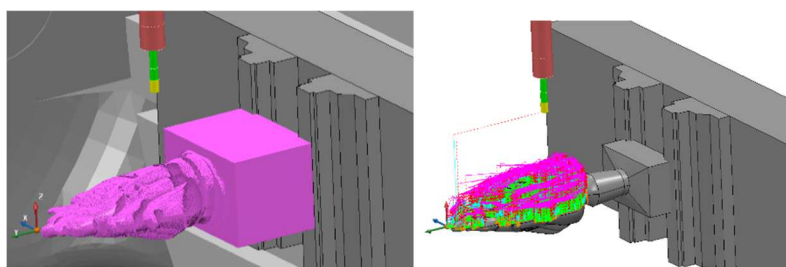


Figura 59 Re-desbaste da ferramenta de $\varnothing 6$ no plano C

Para continuar o processo de maquinagem é utilizada uma estratégia de re-desbaste, mas utilizando uma ferramenta de diâmetro 4mm. Na Figura 60 e Figura 61 é apresentado o re-desbaste.

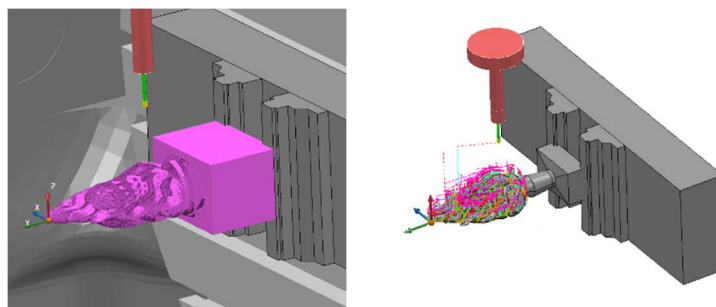


Figura 60 Re-desbaste da ferramenta de $\varnothing 4$ no plano B

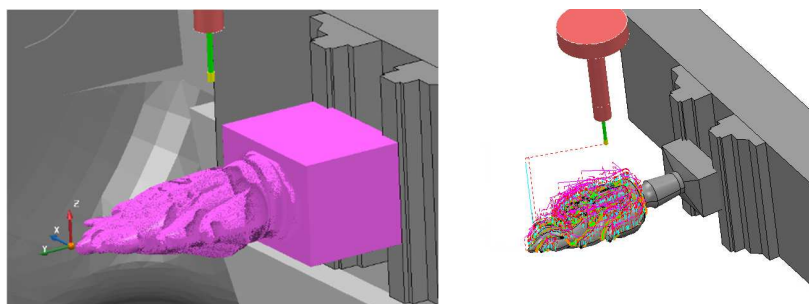


Figura 61 Re-desbaste da ferramenta de $\varnothing 4$ no plano C

Os parâmetros utilizados no re-desbaste para o plano B e C com a ferramenta de diâmetro 4mm são apresentados na Tabela 105.

Tabela 105 Principais parâmetros de desbaste da ferramenta de Ø4 no plano B e C

Estratégia	Desbaste Modelo (Offset ao Modelo, PowerMill)		
Tolerância (mm)	0,01	Vf (mm/min)	500
Sobre-espessura (mm)	0,2	Am (mm/min)	500
Ae (mm)	2	Ar (mm/min)	3000
Ap (mm)	0,05	Rotação (rpm)	8000
t de corte (min)	25:46	t total (min)	58:37

Os resultados finais resultantes do re-desbaste utilizando a ferramenta de 2mm para o plano B e plano C são apresentados na Figura 62 e Figura 63.

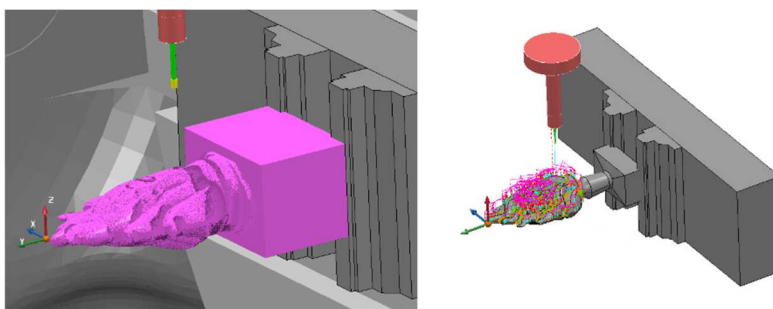


Figura 62 Re-desbaste da ferramenta de Ø2 no plano B

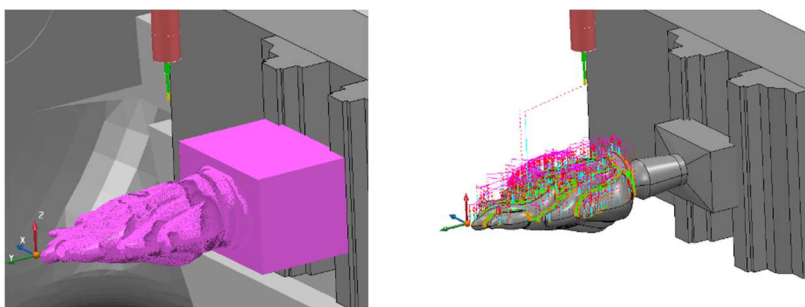


Figura 63 Re-desbaste da ferramenta de Ø2 no plano C

Os principais parâmetros utilizados para o re-desbaste com a ferramenta de diâmetro 2mm para o plano B e plano C são apresentados na Tabela 106.

Tabela 106 Principais parâmetros de desbaste da ferramenta de Ø2 no plano B e C

Estratégia	Desbaste Modelo (Offset ao Modelo, PowerMill)		
Tolerância (mm)	0,01	Vf (mm/min)	500
Sobre-espessura (mm)	0,2	Am (mm/min)	500
Ae (mm)	1	Ar (mm/min)	3000
Ap (mm)	0,05	Rotação (rpm)	8000
t de corte (min)	38:50	t total (horas)	1:11:22

As Figura 64 e Figura 65 mostram o resultado do re-desbaste com a ferramenta Ø1mm assim como as trajetórias para o plano B plano C.

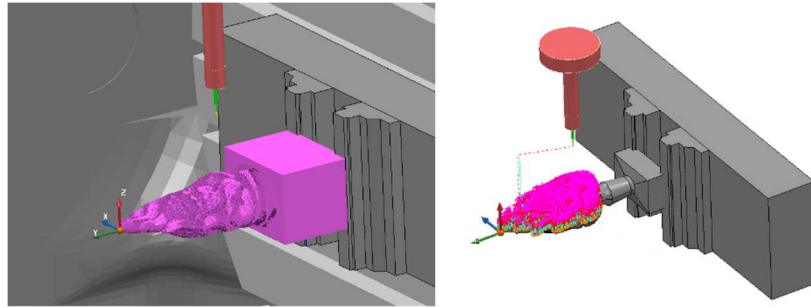


Figura 64 Re-desbaste da ferramenta de Ø1 no plano B

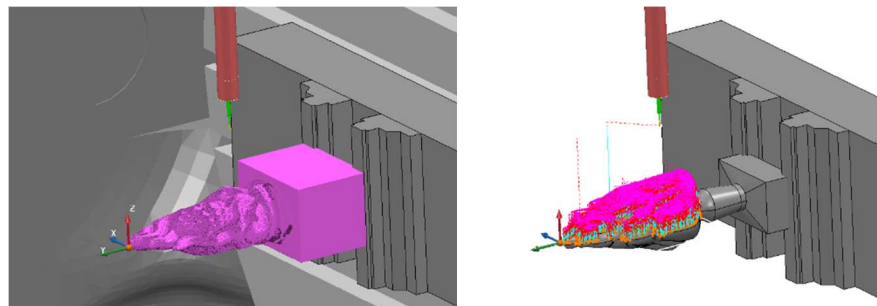


Figura 65 Re-desbaste da ferramenta de Ø1 no plano C

A Tabela 107 mostra os parâmetros utilizados no re-desbaste com a ferramenta de Ø1mm. O tempo utilizado é de aproximadamente 8h30.

Tabela 107 Principais parâmetros de desbaste da ferramenta de Ø1 mm no plano B e C

Estratégia	Desbaste Modelo (Offset ao Modelo, PowerMill)		
Tolerância (mm)	0,01	Vf (mm/min)	500
Sobre-espessura (mm)	0,2	Am (mm/min)	500
Ae (mm)	0,5	Ar (mm/min)	3000
Ap (mm)	0,01	Rotação (rpm)	10000
t de corte (horas)	3:39:54	t total (horas)	8:24:47

Na Figura 66 e Figura 67 é apresentado o resultado final da estratégia de re-desbaste e as suas trajetórias utilizando a ferramenta esférica de Ø6mm.

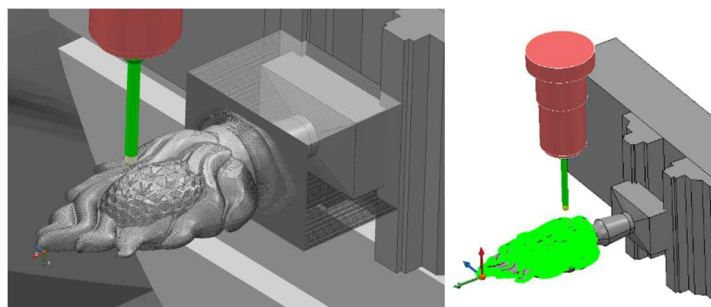


Figura 66 Re-desbaste da ferramenta de Ø6 esférica no plano B

A Tabela 108 apresenta os principais parâmetros para o re-desbaste utilizando a ferramenta esférica Ø6mm para o plano B e plano C. O tempo estimado para cada lado é de aproximadamente 3h20.

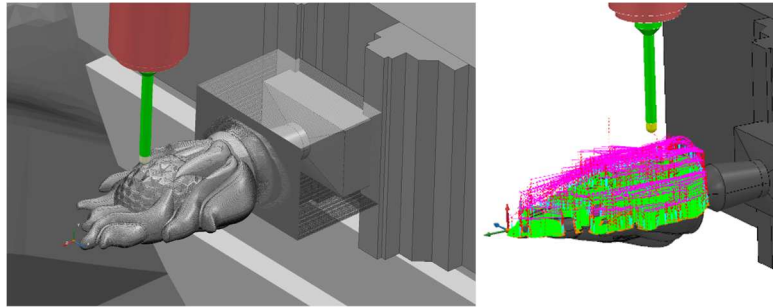


Figura 67 Re-desbaste da ferramenta de Ø6 esférica no plano C

Tabela 108 Principais parâmetros de desbaste da ferramenta de Ø6 esférica no plano B e C

Estratégia	Desbaste Modelo (Offset ao Modelo, PowerMill)		
Tolerância (mm)	0,01	Vf (mm/min)	500
Sobre-espessura (mm)	0,2	Am (mm/min)	500
Ae (mm)	0,1	Ar (mm/min)	3000
Ap (mm)	0,05	Rotação (rpm)	8000
t de corte (horas)	2:53:22	t total (horas)	3:19:47

Finalizada a operação anterior a maquinação da escultura entra na fase dos acabamentos.

A ferramenta utilizada na primeira etapa de acabamento (denominada de pré-acabamento) é a mesma da estratégia anterior, ou seja, ferramenta de Ø6mm esférica.

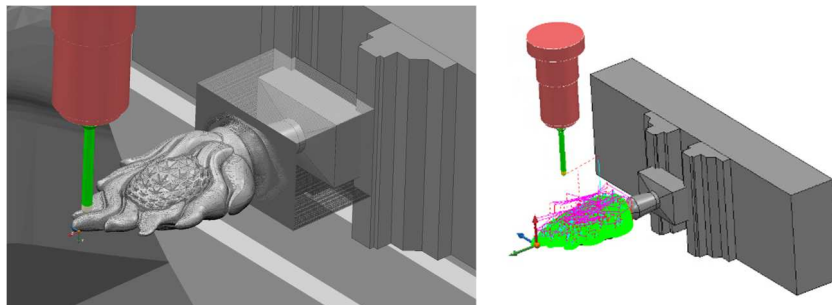


Figura 68 Estratégia de pré-acabamento da ferramenta de Ø6 esférica no plano B

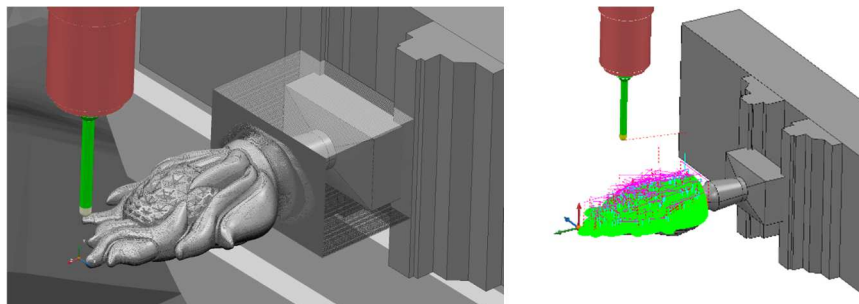


Figura 69 Estratégia de pré-acabamento da ferramenta de Ø6 esférica no plano C

A Tabela 109 expõe os principais parâmetros do pré-acabamento da ferramenta Ø6 esférica para os planos B e C. A peça fica com uma sobre-espessura de 0,2mm. A estratégia utilizada é o acabamento inclinado e raso.

Tabela 109 Principais parâmetros de pré-acabamento da ferramenta de Ø6 esférica no plano B e C

Estratégia	Acabamento inclinado e raso		
Tolerância (mm)	0,01	Vf (mm/min)	500
Sobre-espessura (mm)	0,2	Am (mm/min)	500
Ae (mm)	0,1	Ar (mm/min)	3000
Ap (mm)	0,05	Rotação (rpm)	8000
t de corte (horas)	2:43:56	t total (horas)	2:53:41

Utilizando a ferramenta Ø6mm esférica é executada a estratégia de acabamento seguinte (Acabamento inclinado e raso) reduzindo a sobre-espessura para 0,15mm nos planos B e C conforme mostra a Figura 70 e Figura 71.

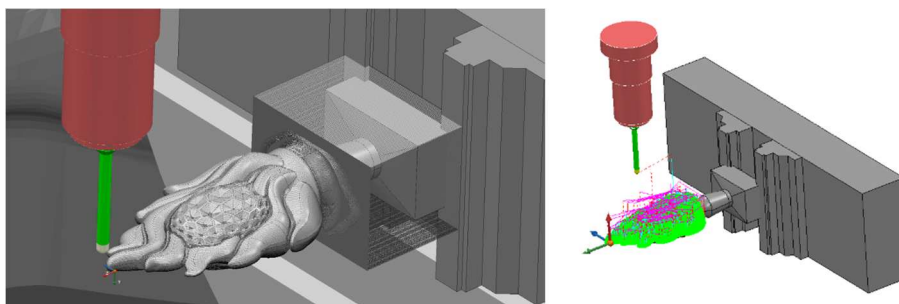


Figura 70 Estratégia de acabamento da ferramenta de Ø6 esférica no plano B

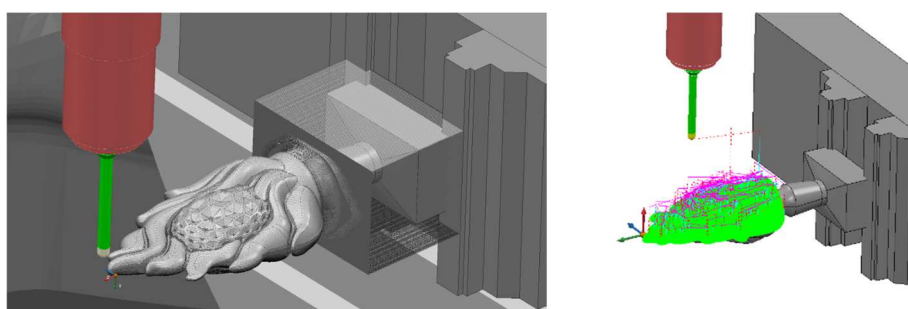


Figura 71 Estratégia de acabamento da ferramenta de Ø6 esférica no plano C

Na Tabela 110 estão representados os principais parâmetros da estratégia de acabamento com a ferramenta de diâmetro 6mm esférica. A sobre-espessura é de 0,15mm. A estratégia utilizada é o acabamento inclinado e raso.

Tabela 110 Principais parâmetros de acabamento da ferramenta de Ø6 esférica no plano B e C

Estratégia	Acabamento inclinado e raso		
Tolerância (mm)	0,01	Vf (mm/min)	500
Sobre-espessura (mm)	0,15	Am (mm/min)	500
Ae (mm)	0,1	Ar (mm/min)	3000
Ap (mm)	0,15	Rotação (rpm)	8000
t de corte (horas)	2:43:56	t total (horas)	2:53:41

As Figura 72 e Figura 73 apresenta as trajetórias da estratégia de acabamento com a ferramenta Ø4 esférica assim como o resultado após a maquinação para os dois planos.

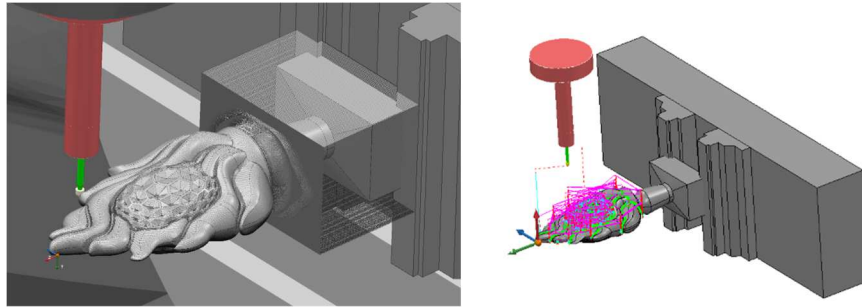


Figura 72 Estratégia de acabamento da ferramenta de Ø4 esférica no plano B

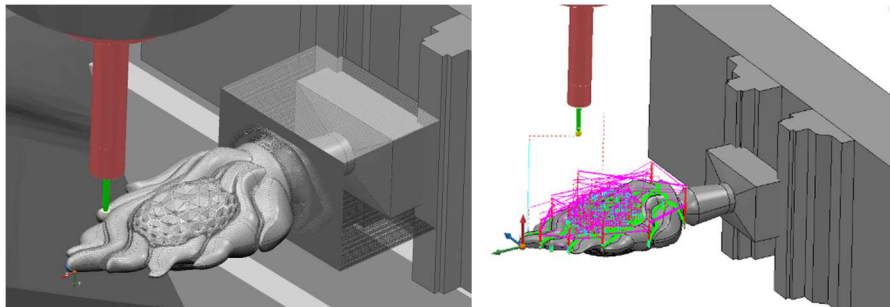


Figura 73 Estratégia de acabamento da ferramenta de Ø4 esférica no plano C

A Tabela 111 apresenta os principais parâmetros da ferramenta esférica de Ø4mm. Nesta primeira passagem com a estratégia de acabamento multipencil corner é deixada uma sobre-espessura de 0,2mm.

Tabela 111 Principais parâmetros de acabamento multipencil corner da ferramenta de Ø4 esférica no plano B e C

Estratégia	Acabamento Multipencil Corner		
Tolerância (mm)	0,01	Vf (mm/min)	500
Sobre-espessura (mm)	0,2	Am (mm/min)	500
Ae (mm)		Ar (mm/min)	3000
Ap (mm)		Rotação (rpm)	10000
t de corte (horas)	1:17:03	t total (horas)	1:36:09

Para realizar a maquinação da estratégia de acabamento representada nas Figura 74 e Figura 75 é utilizada a ferramenta esférica de Ø4mm. Nesta estratégia é deixada uma sobre-espessura de 0,15mm.

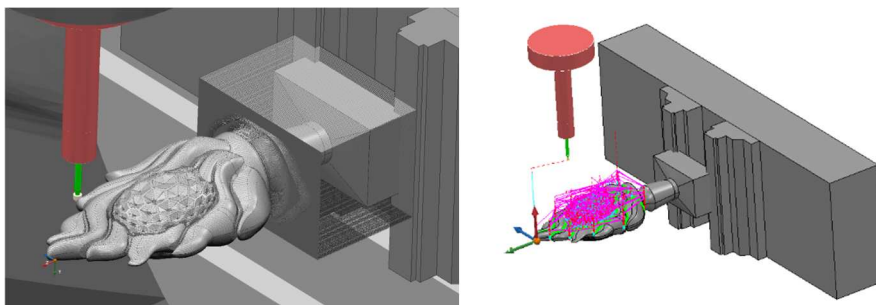


Figura 74 Estratégia de acabamento da ferramenta de Ø4 esférica (0,15 mm) no plano B

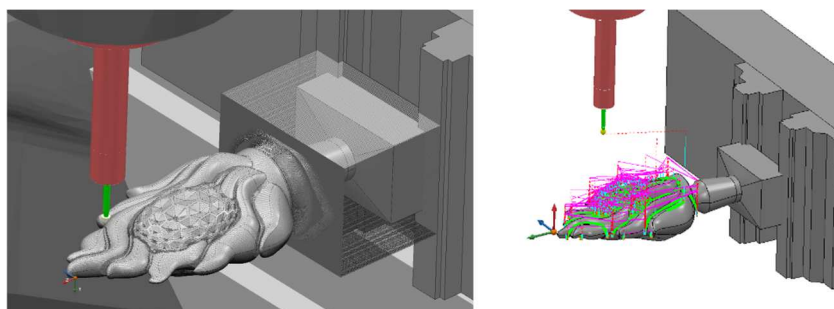


Figura 75 Estratégia de acabamento da ferramenta de $\varnothing 4$ esférica (0,15 mm) no plano C

Os principais parâmetros utilizados na estratégia multipencil corner estão representados na Tabela 112.

Tabela 112 Principais parâmetros de acabamento multipencil corner da ferramenta de $\varnothing 4$ esférica no plano B e C

Estratégia	Acabamento Multipencil Corner		
Tolerância (mm)	0,01	Vf (mm/min)	500
Sobre-espessura (mm)	0,15	Am (mm/min)	500
Ae (mm)		Ar (mm/min)	3000
Ap (mm)		Rotação (rpm)	10000
t de corte (horas)	1:17:03	t total (horas)	1:35:42

A Figura 76 e Figura 77 apresentam o resultado da aplicação da estratégia de acabamento multipencil corner utilizando a ferramenta de $\varnothing 2$ mm. A sobre-espessura no final da aplicação da estratégia é de 0,15mm.

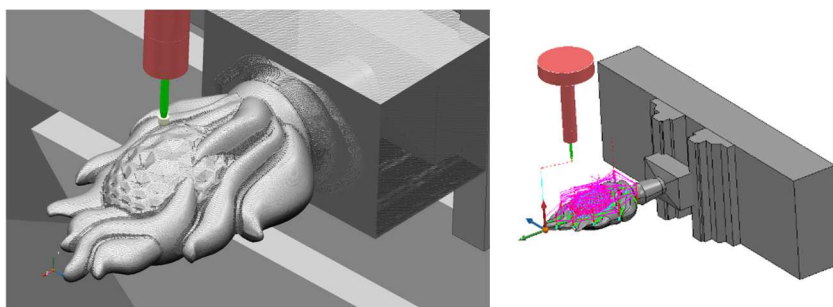


Figura 76 Estratégia de acabamento da ferramenta de $\varnothing 2$ esférica no plano B

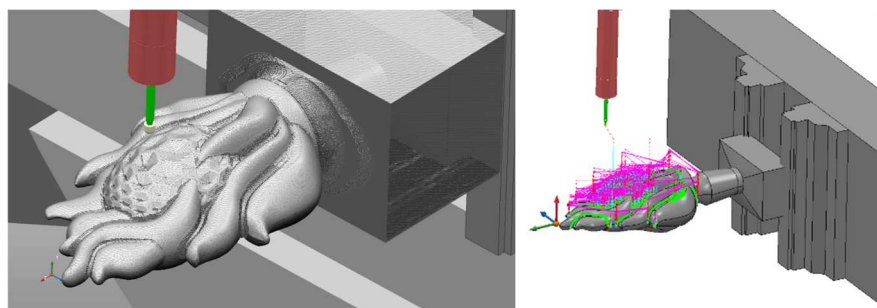


Figura 77 Estratégia de acabamento da ferramenta de $\varnothing 2$ esférica no plano C

A Tabela 113 mostra os principais parâmetros utilizados na estratégia multipencil corner para a ferramenta de $\varnothing 2$ esférica.

Tabela 113 Principais parâmetros de acabamento multipencil corner da ferramenta de Ø2 esférica no plano B e C

Estratégia	Acabamento Multipencil Corner		
Tolerância (mm)	0,01	Vf (mm/min)	500
Sobre-espessura (mm)	0,15	Am (mm/min)	500
Ae (mm)		Ar (mm/min)	3000
Ap (mm)		Rotação (rpm)	10000
t de corte (horas)	1:48:29	t total (horas)	4:34:19

Utilizando a ferramenta Ø2 esférica é utilizada a estratégia de acabamento inclinado e raso. A Figura 78 e Figura 79 mostram o resultado da aplicação dessa estratégia.

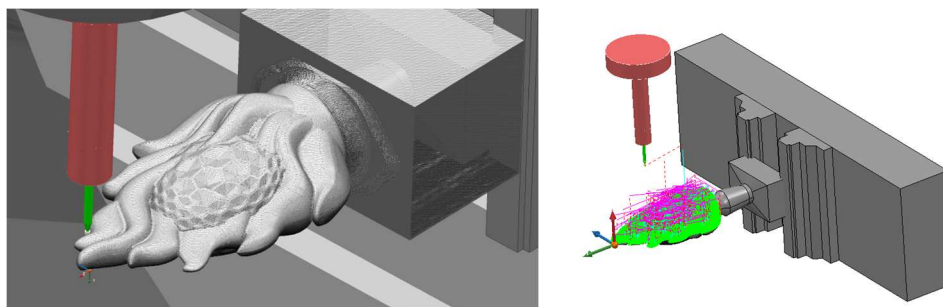


Figura 78 Estratégia de acabamento inclinado e raso da ferramenta de Ø2 esférica no plano B

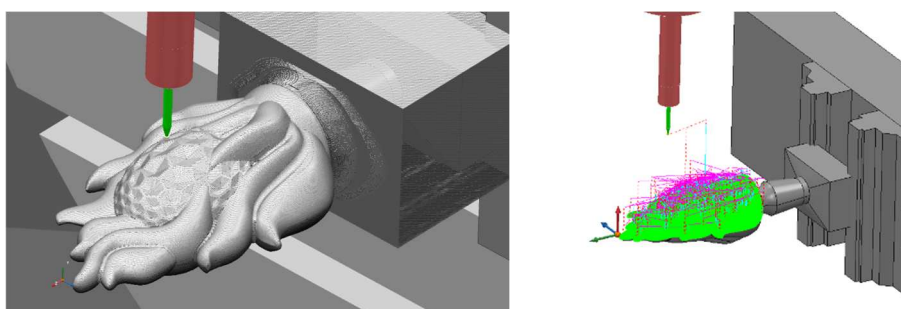


Figura 79 Estratégia de acabamento inclinado e raso da ferramenta de Ø2 esférica no plano C

Na Tabela 114 estão apresentados os principais parâmetros aplicados na estratégia de acabamento inclinado e raso utilizando a ferramenta Ø2mm esférica.

Tabela 114 Principais parâmetros de acabamento inclinado e raso da ferramenta de Ø2 esférica no plano B e C

Estratégia	Acabamento inclinado e raso		
Tolerância (mm)	0,01	Vf (mm/min)	500
Sobre-espessura (mm)	0,15	Am (mm/min)	500
Ae (mm)	0,05	Ar (mm/min)	3000
Ap (mm)		Rotação (rpm)	10000
t de corte (horas)	5:00:13	t total (horas)	5:16:04

5.3 Peça maquinada

A Figura 80 mostra a sequência de maquinagem da escultura.



Figura 80 Sequência de maquinagem da escultura

A Figura 81 mostra a peça após a maquinagem.



Figura 81 Peça final após maquinagem

Na comparação com o modelo nominal (Figura 24) verifica-se que uma das pontas acabou por partir, este facto pode dever-se a possíveis tensões internas no cristal. Ainda comparando com o modelo nominal, a parte inferior também não é maquinada devido ao facto de o bloco de cristal não ter dimensão suficiente.

Após a maquinagem e controlo dimensional (secção 5.4) a escultura é sujeita a um banho químico que lhe confere o brilho característico. O resultado desse processo é visível na Figura 82.



Figura 82 Escultura após banho químico

5.4 Controlo dimensional

Após a maquinagem é realizada uma digitalização 3D utilizando o scanner Carl Zeiss (Modelo COMET L3D 2 5M). Para tal recorreu-se ao software Colin para controlar o scanner. Na Figura 83 é apresentado um dos lados da peça denominado lado A enquanto na Figura 84 é apresentado o outro lado da peça digitalizada denominado lado B. O software Colin procura fazer um ajustamento do modelo nominal com a peça digitalizada. Após o ajustamento é realizada a comparação do modelo nominal com o resultado da digitalização. Como verificado anteriormente a peça final ficou com uma sobre-espessura mínima de 0,15mm.

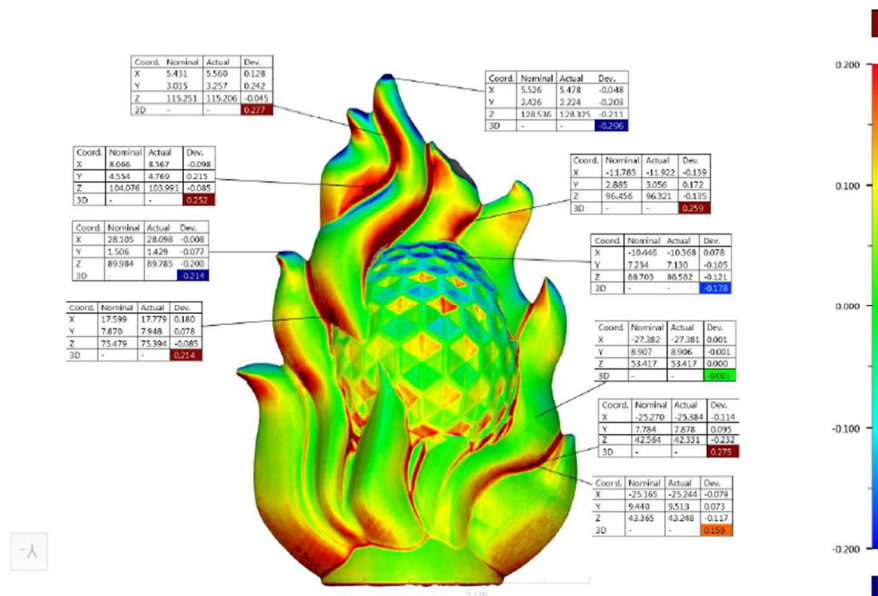


Figura 83 Resultado da digitalização da escultura lado A

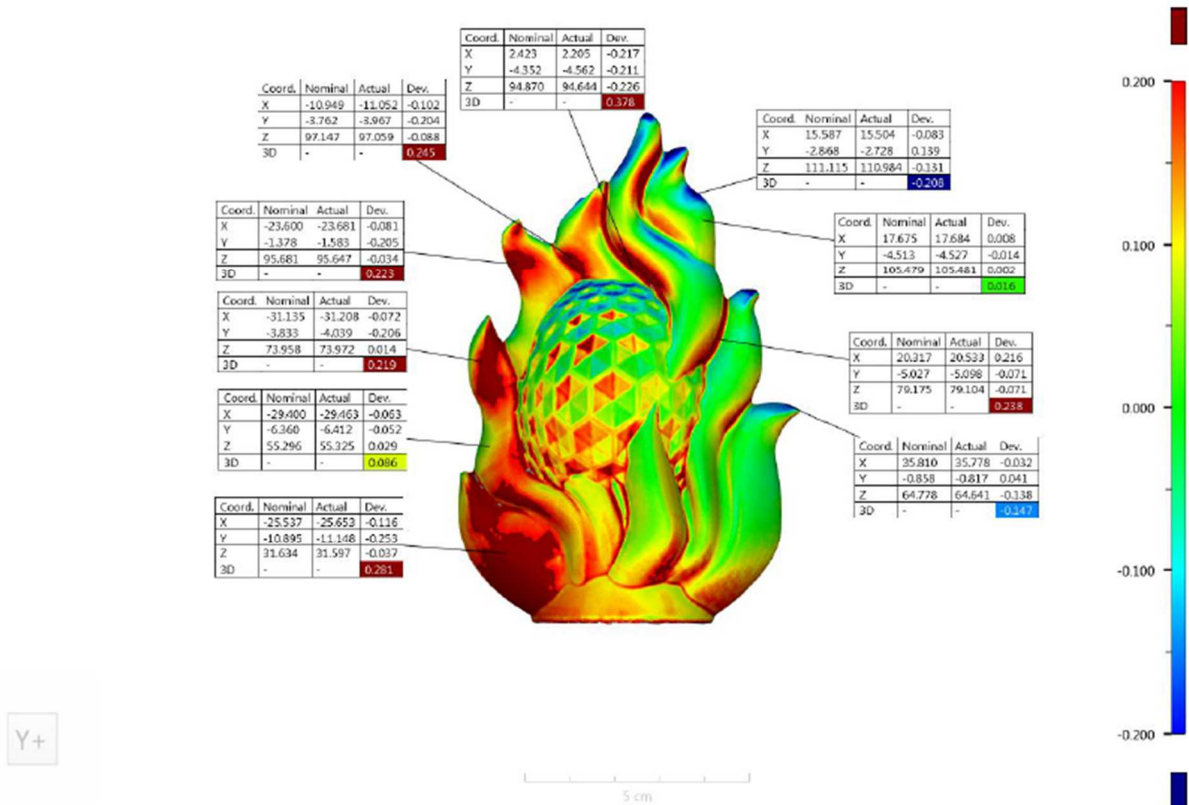


Figura 84 Resultado da digitalização da escultura lado B

Pela análise das duas figuras anteriores verifica-se que o modelo digitalizado em termos de ajustamento ficou mais encostado no lado A e ligeiramente descido pois nas partes inferiores apresenta excesso de material enquanto nas partes superiores apresenta défice de material. Contudo, apesar da peça ter ficado com sobre-espessura verifica-se uma maioria das superfícies com uma variação de $\pm 0,05$ mm (área a verde). Também se verifica em áreas “entre chamas” no lado A e lado B excesso de material por remover (+0,2mm). Para além de se eliminar a sobre-espessura possivelmente seria necessário utilizar ferramentas menores que as utilizadas.

6 Conclusões e trabalhos futuros

6.1 Conclusões

Considerando os níveis definidos, conclui-se que para obter uma força de corte mínima o A_p e o V_f devem ter valores mínimos. Estes parâmetros demonstraram ser os mais significativos para a obtenção destes resultados. Embora a rotação seja o parâmetro com menor impacto, os resultados de otimização demonstram que a utilização de uma rotação máxima auxilia na diminuição da força de corte.

Para a obtenção de uma rugosidade mínima o V_f deve ter valores mínimos. Este parâmetro é o mais significativo para a obtenção deste resultado. Verificou-se uma grande variabilidade nos parâmetros A_p e rotação. No entanto, os resultados provenientes da otimização dos parâmetros demonstram que a utilização de uma rotação máxima beneficia a rugosidade superficial.

A força máxima e a rugosidade máxima foram obtidas para a conjugação de parâmetros com um V_f máximo, rotação mínima e A_p máximo.

Para a menor força de corte as ferramentas com melhores resultados foram Schott6, SchottHM6, Effgen20 e SchottHM10. Das ferramentas testadas com um a_p de 0,2mm, a SchottHM6, a SchottHM10, a Effgen20 e a Schott20 apresentaram os melhores resultados, isto é, obtiveram a menor força de corte e rugosidade superficial.

No método com auxílio de ultrassons verifica-se uma tendência para uma rugosidade mais reduzida quando comparada com o método convencional. Segundo a literatura a maquinagem com auxílio de ultrassons reduz a força de corte, algo que não foi verificado neste trabalho.

Conclui-se que as ferramentas mais robustas, isto é, mais curtas ou com um corpo mais rígido, quando sujeitas a parâmetros mais exigentes apresentam forças menores que as restantes. Isto possivelmente ocorre devido a uma menor vibração, causando também um menor desgaste da ferramenta.

A maioria das ferramentas foram perdendo rugosidade ao longo da utilização. As ferramentas Schott, por outro lado, foram aumentando a sua rugosidade ao longo do ciclo de utilização. Esse fenómeno pode dever-se à perda do substrato que suporta os cristais de diamante na superfície da ferramenta.

As ferramentas Efggen20, SchottHM10 e SchottHM6 são as que apresentam um custo de aquisição mais elevado, mas em contrapartida são as que apresentaram as forças mais baixas mesmo em parâmetros mais exigentes. Também são as que produzem uma rugosidade superficial mais baixa.

Foi possível executar a maquinagem da escultura (prova de conceito) sem danificar o bloco de cristal. No entanto, existem ainda alguns aspetos a otimizar, tais como a fixação da peça, desenvolvimento de estratégias para redução do tempo de maquinagem e remoção de sobre-espessura em algumas regiões da peça.

6.2 Sugestão de trabalho futuro

Serão realizados ensaios para validar os parâmetros ótimos encontrados nesta dissertação.

A máquina CNC utilizada não permite rotação acima de 10000rpm e o cone com auxílio de ultrassons não permite rotação acima de 6000rpm. Tendo em consideração que a máquina adquirida pela Vista Alegre Atlantis permite rotações até 15000rpm com e sem o auxílio de ultrassons, seria importante realizar estudos com rotações mais elevadas em ambos os métodos neste equipamento.

Em trabalhos futuros devem ser estudadas soluções de fixação das peças de cristal na máquina CNC, por exemplo fixação a vácuo.

Bibliografia

- [1] Q. Liang, D. Zhang, W. Wu, and K. Zou, "Methods and research for multi-component cutting force sensing devices and approaches in machining," *Sensors (Switzerland)*, vol. 16, no. 11. MDPI AG, pp. 1–17, Nov. 16, 2016, doi: 10.3390/s16111926.
- [2] R. P. Singh and S. Singhal, "Rotary Ultrasonic Machining: A Review," *Mater. Manuf. Process.*, vol. 31, no. 14, pp. 1795–1824, 2016, doi: 10.1080/10426914.2016.1140188.
- [3] T. A. R. Ferreira, "Automatic volume inspection for glass blow moulds Automatic volume inspection for glass blow moulds," Master degree in Product Design Engineering. Instituto Politecnico de Leiria, 2020.
- [4] P. Li *et al.*, "Topographical characterization and wear behavior of diamond wheel at different processing stages in grinding of N-BK7 optical glass," *Tribol. Int.*, vol. 151, no. May, pp. 1–13, 2020, doi: 10.1016/j.triboint.2020.106453.
- [5] T. J. C. R. Paiva, "Preparação de trabalho e programação CAM para a maquinação de componentes aeronáuticos Engenharia mecânica," Dissertação para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Mecânica. Técnico Lisboa, 2013.
- [6] N. José and L. Paulo, "Otimização dos Parâmetros de Maquinação para Minimizar as Vibrações no Processo de Fresagem," Dissertação para obtenção do Grau de Mestre Engenharia Industrial. Instituto Politecnico de Bragança, 2016.
- [7] T. B. Neves, "Definição De Parâmetros De Utilização Para Ferramentas De Corte Com Insertos PCD," Dissertação Mestrado em Engenharia Mecânica – Produção Industrial Definição. Instituto Politecnico de Leiria, 2017.
- [8] Sandvik, "Fórmulas e definições de fresamento," 2021. <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/machining-formulas-definitions/pages/milling.aspx> (accessed Feb. 17, 2021).
- [9] A. E. Correia, "Uma Abordagem à Maquinação a Alta Velocidade, com recurso a turbinas pneumáticas de alta rotação," Dissertação de grau de Mestre em Engenharia Mecânica. Universidade de Aveiro, 2005.
- [10] B. B. Fernandes, "Otimização da Programação das Estratégias de Maquinação de um Componente para a Indústria Aeroespacial," Dissertação de Mestrado Integrado em engenharia Metalúrgica e de MAteriais Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, 2020.
- [11] Essel, "Calculando a rpm e o gpm a partir da velocidade de corte." <https://essel.com.br/cursos/material/01/CalculoTecnico/aula11b.pdf> (accessed Oct. 25, 2022).
- [12] A. Krelling, "Parâmetros de Corte no processo de usinagem: Fresamento." Instituto Federal de Santa Catarina, pp. 1–13, Accessed: Feb. 13, 2021. [Online]. Available: <http://joinville.ifsc.edu.br/~anael.krelling/Tecnologia em Mecatrônica/PFB64/11 - Parametros>

- de Corte no Processo de Usinagem Fresamento.pdf.
- [13] “Técnicas Específicas de maquinação - Moldes,” 2021. http://formacao.training.pt/?page_id=2258 (accessed Jun. 26, 2021).
- [14] Autodesk, “Help | Corner Multi-Pencil Finishing Overview | Autodesk.” <https://help.autodesk.com/view/PWRM/2019/ENU/?guid=GUID-1160E4B6-4062-4A2A-9270-F7CA1B245DF3> (accessed Sep. 14, 2022).
- [15] T. Hegade, J. R. Konanur, L. R. Nagarjuna, P. P. Babu, and T. Nanjundeswaraswamy, “Process Characteristics in Ultrasonic Machining,” *Int. J. Eng. Res. Technol.*, vol. 8, no. 11, pp. 657–664, 2019, [Online]. Available: www.ijert.org.
- [16] M. Mandegari and S. Behbahani, “Experimental Analysis of a Novel Rotary Ultrasonic Assisted Drilling (RUAD) Machine,” *Mater. Manuf. Process.*, vol. 28, no. 4, pp. 481–487, 2013, doi: 10.1080/10426914.2012.727122.
- [17] F. D. Ning, W. L. Cong, Z. J. Pei, and C. Treadwell, “Rotary ultrasonic machining of CFRP: A comparison with grinding,” *Ultrasonics*, vol. 66, pp. 125–132, 2016, doi: 10.1016/j.ultras.2015.11.002.
- [18] M. Zhou, M. Wang, and G. Dong, “Experimental Investigation on Rotary Ultrasonic Face Grinding of SiCp/Al Composites,” *Mater. Manuf. Process.*, vol. 31, pp. 673–678, 2016, doi: 10.1080/10426914.2015.1025962.
- [19] Q. Feng, W. L. Cong, Z. J. Pei, and C. Z. Ren, “Rotary Ultrasonic Machining of carbon Fiber-Reinforced Polymer: Feasibility Study,” *Mach. Sci. Technol.*, vol. 16, no. 3, pp. 380–398, 2012, doi: 10.1080/10910344.2012.698962.
- [20] A. Sharma, V. Jain, and D. Gupta, “Characterization of chipping and tool wear during drilling of float glass using rotary ultrasonic machining,” *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 128, no. June, pp. 254–263, 2018, doi: 10.1016/j.measurement.2018.06.040.
- [21] C. Zhang, W. Cong, P. Feng, and Z. Pei, “Rotary ultrasonic machining of optical K9 glass using compressed air as coolant: A feasibility study,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, vol. 228, no. 4, pp. 504–514, 2014, doi: 10.1177/0954405413506195.
- [22] P. K. S. C. Fernando, M. Zhang, and Z. Pei, “Rotary ultrasonic machining: effects of tool natural frequency on ultrasonic vibration amplitude,” *Mach. Sci. Technol.*, vol. 23, no. 4, pp. 595–611, 2019, doi: 10.1080/10910344.2019.1575404.
- [23] V. I. Babitsky, A. N. Kalashnikov, A. Meadows, and A. A. H. P. Wijesundara, “Ultrasonically assisted turning of aviation materials,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 132, no. 1–3, pp. 157–167, Jan. 2003, doi: 10.1016/S0924-0136(02)00844-0.
- [24] C. Nath, M. Rahman, and S. S. K. Andrew, “A study on ultrasonic vibration cutting of low alloy steel,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 192–193, pp. 159–165, Oct. 2007, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2007.04.047.
- [25] M. Xiao, K. Sato, S. Karube, and T. Soutome, “The effect of tool nose radius in ultrasonic vibration cutting of hard metal,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 43, no. 13, pp. 1375–1382, Oct. 2003, doi: 10.1016/S0890-6955(03)00129-9.

- [26] A. V. Mitrofanov, V. I. Babitsky, and V. V. Silberschmidt, "Finite element simulations of ultrasonically assisted turning," in *Computational Materials Science*, Nov. 2003, vol. 28, no. 3-4 SPEC. ISS., pp. 645–653, doi: 10.1016/j.commatsci.2003.08.020.
- [27] A. V. Mitrofanov, N. Ahmed, V. I. Babitsky, and V. V. Silberschmidt, "Effect of lubrication and cutting parameters on ultrasonically assisted turning of Inconel 718," in *Journal of Materials Processing Technology*, May 2005, vol. 162–163, no. SPEC. ISS., pp. 649–654, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2005.02.170.
- [28] M. Xiao, Q. M. Wang, K. Sato, S. Karube, T. Soutome, and H. Xu, "The effect of tool geometry on regenerative instability in ultrasonic vibration cutting," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 46, no. 5, pp. 492–499, Apr. 2006, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2005.07.002.
- [29] C. S. Liu, B. Zhao, G. F. Gao, and F. Jiao, "Research on the characteristics of the cutting force in the vibration cutting of a particle-reinforced metal matrix composites SiCp/Al," in *Journal of Materials Processing Technology*, Oct. 2002, vol. 129, no. 1–3, pp. 196–199, doi: 10.1016/S0924-0136(02)00649-0.
- [30] C. Nath and M. Rahman, "Effect of machining parameters in ultrasonic vibration cutting," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 48, no. 9, pp. 965–974, Jul. 2008, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2008.01.013.
- [31] A. V. Mitrofanov, V. I. Babitsky, and V. V. Silberschmidt, "Finite element analysis of ultrasonically assisted turning of Inconel 718," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 153–154, no. 1–3, pp. 233–239, 2004, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2004.04.299.
- [32] T. B. Thoe, D. K. Aspinwall, and M. L. H. Wise, "Review on ultrasonic machining," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 38, no. 4, pp. 239–255, 1998, doi: 10.1016/S0890-6955(97)00036-9.
- [33] R. Ferreira, "Aspecto Tecnológico Relativos a Ensaio de Vidro," ISEC, 2014.
- [34] M. Hasanuzzaman, A. Rafferty, M. Sajjia, and A.-G. Olabi, "Properties of Glass Materials," in *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*, Elsevier, 2016.
- [35] E. Giacomini, "Material, O Vidro," Mestrado em Construção de edifícios tecnologias de fachada.Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2012.
- [36] E. K. Antwi, K. Liu, and H. Wang, "A review on ductile mode cutting of brittle materials," *Journal.hep; Springer*, pp. 1–13, 2018, doi: 10.1007/s11465-018-0504-z.
- [37] H. N. Li, T. B. Yu, L. Da Zhu, and W. S. Wang, "Evaluation of grinding-induced subsurface damage in optical glass BK7," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 229, pp. 785–794, 2016, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2015.11.003.
- [38] J. H. Giovanola and I. Finnie, "On the machining of glass," *J. Mater. Sci.*, vol. 15, pp. 2508–2514, 1980.
- [39] Diamut, "Glass tooling." pp. 1–19, 2021, [Online]. Available: https://www.diamut.com/downloads/18207/423/Dia_CatGen_GLASS_lug19_ENG_Lr.pdf.
- [40] "A Company of the Swarovski Group Glass Diamond Drills Advanced technologies for glass drilling Clean edge quality High drilling feed rate Long lifetime," 2021. Accessed: Feb. 27, 2021. [Online]. Available: www.tyrolit.com.

- [41] M. Sayuti, A. A. D. Sarhan, M. Fadzil, and M. Hamdi, "Enhancement and verification of a machined surface quality for glass milling operation using CBN grinding tool-Taguchi approach," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 60, no. 9–12, pp. 939–950, 2012, doi: 10.1007/s00170-011-3657-z.
- [42] Diatrim, "Diamond versus CBN – What material does each work best on." <https://diatrim.com/en/diamond-blades/diamond-versus-cbn-what-material-does-each-work-best-on/> (accessed Oct. 05, 2022).
- [43] Engenheiro de Materiais, "Ferramentas de diamante com cBN," 2015. <https://engenheirodemateriais.com.br/2015/12/09/ferramentas-de-diamante-com-cbn/> (accessed Oct. 05, 2022).
- [44] Solutions Magazine Your Resource to the Gear Industry; Pavel Brazda, "Hard Choices: Diamond or CBN? | Gear," 2006. <https://gearsolutions.com/features/hard-choices-diamond-or-cbn/> (accessed Oct. 05, 2022).
- [45] P. Li *et al.*, "Effects of local strain rate and temperature on the workpiece subsurface damage in grinding of optical glass," *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 182, no. May, 2020, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2020.105737.
- [46] A. Sharma and V. Jain, "Experimental investigation of cutting temperature during drilling of float glass specimen," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 715, no. 1, 2020, doi: 10.1088/1757-899X/715/1/012050.
- [47] SCHOTT Diamantwerkzeuge GmbH, "Diamond tools for glass processing." 2020, Accessed: Mar. 04, 2021. [Online]. Available: https://www.schott-diamantwerkzeuge.com/files/Kataloge/EN/catalog_glass_processing_engl.pdf.
- [48] W. Höland and G. H. Beall, "Advanced Ceramics Machining," in *Handbook of Advanced Ceramics: Materials, Applications, Processing, and Properties: Second Edition*, Ioan D. Marinescu, Ed. 2013, pp. 371–381.
- [49] José Neto;, "Óleos de corte - Metalurgia e Metalomecânica." Cenfim, Amarante, pp. 1–4, 2018.
- [50] M. Kawabe, "Applied Machining Technology," in *Springer*, vol. 63, no. 9, Dresden: Springer Dordrecht Heidelberg London New York, 1973, pp. 552–555.
- [51] A. V. Mitrofanov, N. Ahmed, V. I. Babitsky, and V. V. Silberschmidt, "Effect of lubrication and cutting parameters on ultrasonically assisted turning of Inconel 718," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 162–163, no. SPEC. ISS., pp. 649–654, May 2005, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2005.02.170.
- [52] M. Emonds, "Synthetic coolants improve the glass grinding process," *Glass*, vol. 76, no. 4, 1999.
- [53] K. A. Risbood, U. S. Dixit, and A. D. Sahasrabudhe, "Prediction of surface roughness and dimensional deviation by measuring cutting forces and vibrations in turning process," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 132, no. 1–3, pp. 203–214, Jan. 2003, doi: 10.1016/S0924-0136(02)00920-2.

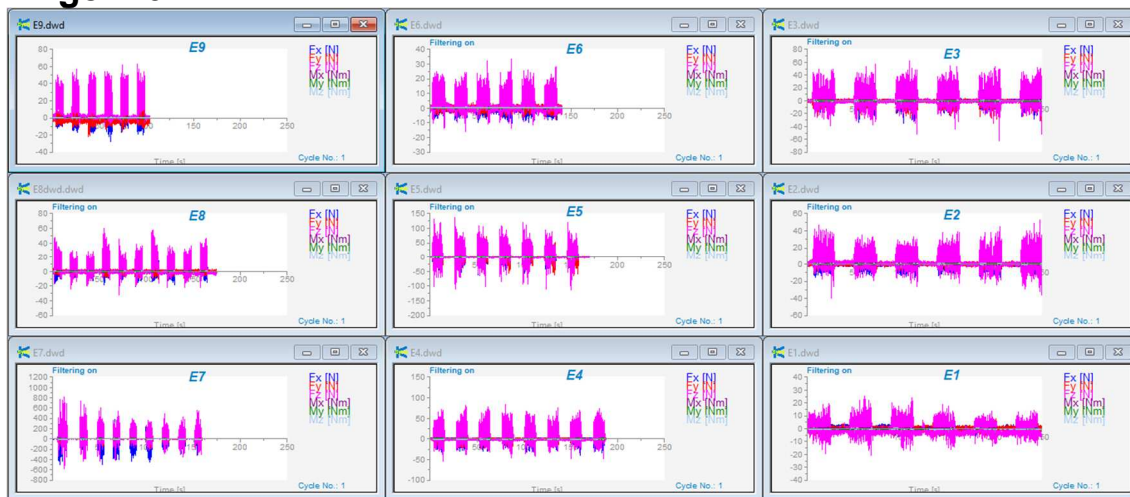
- [54] S. Sastry, S. G. Kapoor, and R. E. Devor, "Compensation of progressive radial run-out in face-milling by spindle speed variation," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 40, no. 8, pp. 1121–1139, Jun. 2000, doi: 10.1016/S0890-6955(99)00115-7.
- [55] D. A. Axinte, W. Belluco, and L. De Chiffre, "Evaluation of cutting force uncertainty components in turning," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 41, no. 5, pp. 719–730, Apr. 2001, doi: 10.1016/S0890-6955(00)00095-X.
- [56] N. Tounsi and A. Otho, "Dynamic cutting force measuring," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 40, no. 8, pp. 1157–1170, Jun. 2000, doi: 10.1016/S0890-6955(99)00117-0.
- [57] L. R. Castro, P. Viéville, and P. Lipinski, "Correction of dynamic effects on force measurements made with piezoelectric dynamometers," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 46, no. 14, pp. 1707–1715, 2006, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2005.12.006.
- [58] M. B. Jun, O. Burak Ozdoganlar, R. E. DeVor, S. G. Kapoor, A. Kirchheim, and G. Schaffner, "Evaluation of a spindle-based force sensor for monitoring and fault diagnosis of machining operations," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 42, no. 6, pp. 741–751, May 2002, doi: 10.1016/S0890-6955(01)00156-0.
- [59] G. Totis, G. Wirtz, M. Sortino, D. Veselovac, E. Kuljanic, and F. Klocke, "Development of a dynamometer for measuring individual cutting edge forces in face milling," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 24, no. 6, pp. 1844–1857, Aug. 2010, doi: 10.1016/j.ymsp.2010.02.010.
- [60] "Acelerômetros Omega. Medição da Vibração e Aceleração do Movimento.," 2021. <https://br.omega.com/prodinfo/acelerometros.html> (accessed Feb. 28, 2021).
- [61] S. M. Tavares Oliveira, "Analysis of surface roughness and models of mechanical contacts," p. 139, 2005, [Online]. Available: https://paginas.fe.up.pt/~em00021/eramus/project_english.pdf.
- [62] Y. Gong, J. Xu, and R. C. Buchanan, "Surface roughness: A review of its measurement at micro-/nano-scale," *Phys. Sci. Rev.*, vol. 3, no. 1, pp. 1–10, 2019, doi: 10.1515/psr-2017-0057.
- [63] L. Henke, N. Nagy, and U. J. Krull, "An AFM determination of the effects on surface roughness caused by cleaning of fused silica and glass substrates in the process of optical biosensor preparation," *Biosens. Bioelectron.*, vol. 17, no. 6–7, pp. 547–555, 2002, doi: 10.1016/S0956-5663(02)00012-X.
- [64] U. Lohbauer, F. A. Müller, and A. Petschelt, "Influence of surface roughness on mechanical strength of resin composite versus glass ceramic materials," *Dent. Mater.*, vol. 24, no. 2, pp. 250–256, 2008, doi: 10.1016/j.dental.2007.05.006.
- [65] L. R. Staroiski, "Scatterometer and scatteroscope for testing optical surfaces," *Diffraction Scatt.*, vol. 1991, no. 1993, [Online]. Available: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org>.
- [66] S. Sinha Ray, "Techniques for characterizing the structure and properties of polymer nanocomposites," in *Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering*, S. B. T.-E. F. P. N. Sinha Ray, Ed. Woodhead Publishing, 2013, pp. 74–88.
- [67] R. R. L. De Oliveira, D. A. C. Albuquerque, T. G. S. Cruz, F. M. Yamaji, and F. L. Leite,

- “Measurement of the nanoscale roughness by atomic force microscopy: basic principles and applications,” *At. force Microsc. Meas. Manip. surfaces At. scale*, vol. 3, 2012.
- [68] “O que é AFM? Aprenda sobre Microscopia de Força Atômica! - NanoAndMais.” https://www.nanoandmore.com/what-is-atomic-force-microscopy?gclid=CjwKCAjw7eSZBhB8EiwA60kCW4k_AwBhsqc-gptvs1Ueoz33c_0sITFLKe0pciINbGDaQV9DCmZMhTxoCv-0QAvD_BwE (accessed Oct. 02, 2022).
- [69] D. E. Guedes, “Análise Metrológica de Acabamento de Superfícies Aplicada a Componentes Mecânicos,” Dissertação mestrado Engenharia Mecânica. Universidade Nova de Lisboa, 2014.
- [70] “ISO 3274:1996(en), Geometrical Product Specifications (GPS) — Surface texture: Profile method — Nominal characteristics of contact (stylus) instruments.” <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:3274:ed-2:v1:en> (accessed Feb. 28, 2021).
- [71] Innovatest, “Surface roughness tester,” *Metal Finishing*, vol. 98, no. 4. Maastricht, p. 65, 2000, [Online]. Available: https://www.salutron.de/fileadmin/redakteure/dokumente/InnovaTest/Manual_TR-220.pdf.
- [72] “Metrologia de superfície 3D sem contato e inspeção de dispositivos – Sensofar.” <https://www.sensofar.com/> (accessed Sep. 12, 2022).
- [73] “Scanner 3D Zeiss Comet L3D 5MP - EMS EUA.” <https://ems-usa.com/products/3d-scanners/zeiss/comet-l3d-5mp/> (accessed Sep. 12, 2022).
- [74] “Revisão ZEISS Optotechnik COMET L3D - scanner 3D.” <https://www.aniwaa.com/product/3d-scanners/zeiss-optotechnik-comet-l3d/> (accessed Sep. 12, 2022).
- [75] S. K. Nayak, J. K. Patro, S. Dewangan, and S. Gangopadhyay, “Multi-objective Optimization of Machining Parameters During Dry Turning of AISI 304 Austenitic Stainless Steel Using Grey Relational Analysis,” *Procedia Mater. Sci.*, vol. 6, pp. 701–708, 2014, doi: 10.1016/J.MSPRO.2014.07.086.
- [76] W. H. Yang and Y. S. Tarng, “Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 84, no. 1–3, pp. 122–129, 1998, doi: 10.1016/S0924-0136(98)00079-X.
- [77] D. António and B. Pereira, “Estudo comparativo da vida útil das ferramentas e acabamento superficial para diferentes ferramentas de fresagem Engenharia Industrial,” Dissertação Engenharia Industrial. Instituto Politecnico de Bragança, 2017.
- [78] D. Thakur, B. Ramamoorthy, and L. Vijayaraghavan, “Optimization of high speed turning parameters of superalloy Inconel 718 material using Taguchi technique,” *Indian J. Eng. Mater. Sci.*, vol. 16, no. 1, pp. 44–50, 2009.
- [79] G. A. Prates, “Otimização em robustez física -mecânica- sustentável baseados em métodos de delineamento experimental de taguchi para desenvolvimento de produtos e processos,” *Espacios*, vol. 36, no. 23, Dec. 2015, Accessed: Sep. 17, 2022. [Online]. Available:

- <https://www.revistaespacios.com/a15v36n23/15362308.html>.
- [80] “Usinagem ultrassônica: Novos porta-ferramentas para materiais duros e frágeis.”
<https://www.etmm-online.com/ultrasonic-machining-new-toolholders-for-hard-and-brittle-materials-a-1052102/> (accessed Sep. 12, 2022).
- [81] “How to use ultrasonically-assisted processing without a specialised machine | Sirris.”
<https://sirris.be/fr/node/48729> (accessed Sep. 12, 2022).
- [82] “Minitab Statistical Software Reviews 2022: Details, Pricing, & Features | G2.”
<https://www.g2.com/products/minitab-statistical-software/reviews> (accessed Sep. 17, 2022).
- [83] “O que é Minitab? Saiba por que o Minitab é preferível ao Excel.”
<https://www.invensislearning.com/blog/what-is-minitab/> (accessed Sep. 17, 2022).
- [84] “ZEISS CALYPSO: software de medição geométrica.”
<https://www.zeiss.pt/metrologia/produtos/software/calypso-visao-geral/calypso.html>
(accessed Sep. 12, 2022).
- [85] “PLu neox, perfilador de superfície 3D óptico - Sensofar.”
<https://www.sensofar.com/sensofar-introduces-their-most-advanced-optical-3d-profiler-plu-neox/> (accessed Sep. 12, 2022).
- [86] “Startseite - FIS Diamantwerkzeuge und CBN-Werkzeuge.” <https://www.diamant-cbn-werkzeuge.de/> (accessed Oct. 15, 2022).

Anexos

Effgen10



Gráficos DynoWare para os diferentes ensaios fresa Effgen10

Análise comparativa das componentes mínimas de forças resultantes de corte Effgen10

		Comparação das forças resultantes para as componentes negativas (N)								
		E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
		25,23	44,55	60,59	81,62	150,94	25,42	836,69	49,05	39,28
		22,05	40,41	79,43	94,45	167,79	27,82	694,96	52,58	42,91
		30,26	43,54	80,39	82,93	157,94	25,90	822,28	53,76	49,21
		25,69	53,07	84,00	102,83	175,61	28,17	866,32	50,35	45,56
		28,05	63,64	80,90	87,00	165,15	25,99	784,71	51,71	41,36
	Média	26,26	49,04	77,06	89,77	163,49	26,66	800,99	51,49	43,66
	desvio Padrão	2,77	8,42	8,38	7,92	8,44	1,11	59,17	1,65	3,45

Análise comparativa das componentes máximas de forças resultantes de corte Effgen10

		Comparação das forças resultantes para as componentes positivas (N)								
		E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
		26,83	57,84	85,26	119,03	168,86	28,36	795,34	62,14	48,10
		26,07	57,42	93,14	128,20	163,18	25,18	750,63	60,01	46,63
		28,04	56,54	86,99	138,07	151,98	32,80	768,37	56,43	58,69
		32,29	60,28	87,73	136,09	167,03	25,13	824,84	54,63	46,19
		31,02	68,78	95,32	142,75	152,51	27,39	776,98	49,40	52,20
	Média	28,85	60,17	89,69	132,83	160,71	27,77	783,23	56,52	50,36
	desvio Padrão	2,41	4,48	3,85	8,35	7,16	2,81	25,30	4,43	4,67

Valores de Ra para cada um dos provetes Effgen10

		Ra (µm)								
		E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
		1,82	1,30	1,26	1,77	2,07	1,34	2,99	2,07	2,02
		1,87	1,27	1,00	2,11	2,02	1,90	3,73	2,13	1,67
		1,84	1,19	1,23	1,90	1,88	1,78	3,61	2,25	1,55
		1,60	1,23	1,21	1,88	2,14	1,71	3,60	2,04	1,88
		1,77	1,11	1,28	1,94	1,70	1,83	3,03	2,18	1,82
	Média	1,78	1,22	1,20	1,92	1,96	1,71	3,39	2,13	1,79
	Desvio padrão	0,11	0,07	0,11	0,12	0,18	0,22	0,35	0,08	0,18

Valores de Rz para cada um dos provetes Effgen10

	Rz (μm)								
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
	13,10	10,19	9,34	11,77	13,58	10,55	16,64	13,19	12,27
	13,60	8,91	7,85	12,95	13,60	12,98	18,49	13,37	10,71
	13,17	8,64	10,09	12,88	13,23	12,74	19,07	12,08	11,02
	13,67	7,81	9,36	12,57	13,83	12,14	17,56	12,20	11,94
	12,33	8,32	8,71	12,88	11,97	11,70	17,89	12,92	12,82
Média	13,17	8,77	9,07	12,61	13,24	12,02	17,93	12,75	11,75
Desvio padrão	0,54	0,89	0,84	0,49	0,74	0,96	0,92	0,58	0,88

Forças de corte Effgen10

Relação entre os ensaios de força e as razões sinal-ruído Effgen10

Ensaio	Vf (mm/min)	Rotação (rpm)	Ap (mm)	Força (N)	S/N
E1	250	6000	0,05	28,85	-29,2029
E2	250	8000	0,125	60,17	-35,5876
E3	250	10000	0,2	89,69	-39,0549
E4	500	6000	0,125	132,83	-42,4659
E5	500	8000	0,2	160,71	-44,1209
E6	500	10000	0,05	27,77	-28,8715
E7	750	6000	0,2	783,23	-57,8778
E8	750	8000	0,05	56,52	-35,0440
E9	750	10000	0,125	50,36	-34,0417

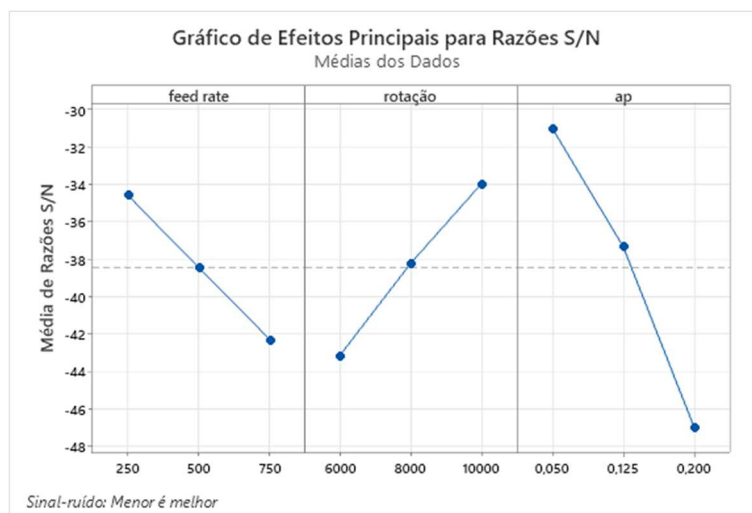


Gráfico curva de S/N de cada parâmetro para os ensaios de força resultante Effgen 10

Análise de variância da força Effgen10

Fonte	GL	Soma dos quadrados	Quadrados médios	Valor F	Valor-P	Contribuição
Vf	2	94440	47220	1,13	0,469	20,48%
Rotação	2	117938	58969	1,41	0,414	25,57%
Ap	2	165421	82710	1,98	0,335	35,87%
Erro	2	83403	41701			18,08%
Total	8	461202				100,00%

Força estimada método convencional Effgen10

Resposta	Ajuste	EP do Ajustado	IC de 95%	IP de 95%
força	-156	180	(-931; 619)	(-1327; 1016)

Rugosidade superficial Effgen10

Relação entre a rugosidade superficial e as razões sinal-ruído Effgen 10

Ensaio	Vf (mm/min)	Rotação (rpm)	Ap (mm)	Ra (µm)	S/N
E1	250	6000	0,05	1,78	-1,74142
E2	250	8000	0,125	1,222	-1,74142
E3	250	10000	0,2	1,196	-1,55462
E4	500	6000	0,125	1,921	-5,67055
E5	500	8000	0,2	1,962	-5,85398
E6	500	10000	0,05	1,713	-4,67515
E7	750	6000	0,2	3,391	-10,6066
E8	750	8000	0,05	2,134	-6,58389
E9	750	10000	0,125	1,222	-5,03763

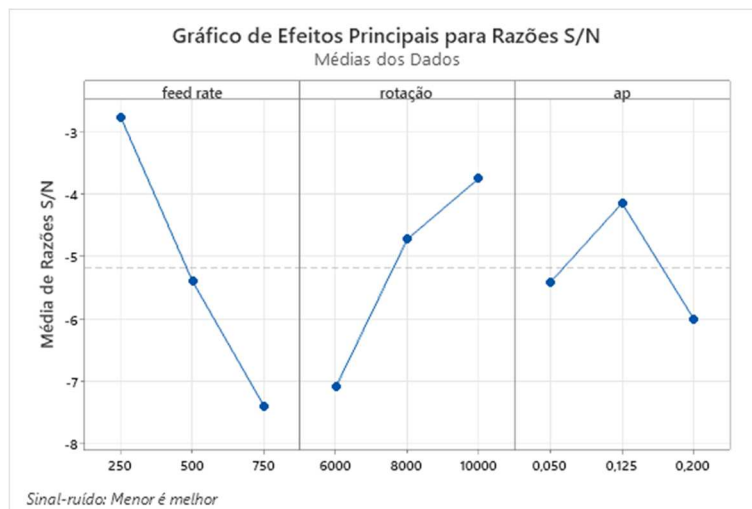


Gráfico Curva de S/N de cada parâmetro para rugosidade superficial Effgen10

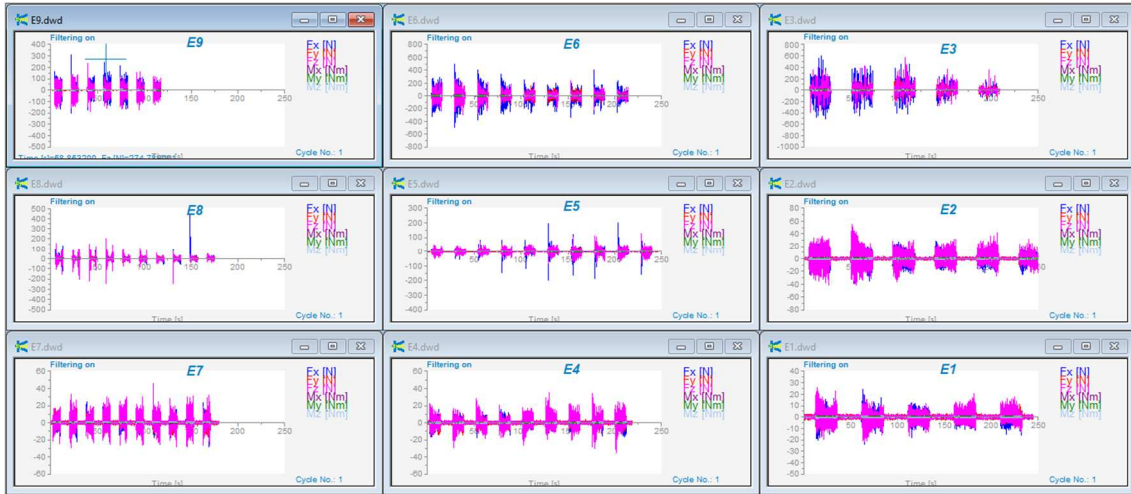
Análise de variância para rugosidade superficial Effgen10

Fonte	GL	Soma dos quadrados	Quadrados médios	Valor F	Valor-P	Contribuição
Vf	2	1,6207	0,8104	7,80	0,114	49,12%
Rotação	2	1,0312	0,5156	4,97	0,168	31,25%
Ap	2	0,4402	0,2201	2,12	0,321	13,34%
Erro	2	0,2077	0,1038			6,29%
Total	8	3,2998				100,00%

Rugosidade estimada método convencional Effgen10

Resposta	Ajuste	EP do Ajustado	IC de 95%	IP de 95%
Ra	0,806	0,284	(-0,417; 2,029)	(-1,042; 2,655)

Effgen10U



DynoWare para os diferentes ensaios fresa Effgen10U

Análise comparativa das componentes mínimas de forças resultantes de corte Effgen10U

Comparação das forças resultantes para as componentes negativas (N)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
	40,82	88,41	1034,26	51,36	227,61	626,24	57,65	317,04	372,67
	42,36	89,97	850,01	53,06	238,27	643,12	60,29	332,34	401,67
	44,80	92,53	882,80	53,79	260,66	647,19	62,04	394,26	411,02
	45,53	93,44	696,46	54,30	271,54	661,39	62,20	406,35	415,96
	46,24	96,05	588,30	54,74	282,46	670,80	63,63	424,14	454,58
Média	43,95	92,08	810,37	53,45	256,11	649,75	61,16	374,83	411,18
Desvio Padrão	2,28	2,99	172,65	1,32	22,82	17,19	2,29	47,30	29,50

Análise comparativa das componentes máximas de forças resultantes de corte Effgen10U

Comparação das forças resultantes para as componentes positivas (N)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
	39,17	82,64	1127,12	57,95	235,02	649,77	58,63	295,67	325,77
	42,97	83,34	941,07	59,14	272,71	612,29	58,77	308,71	332,15
	44,13	83,51	995,99	59,43	291,42	662,20	61,49	357,51	348,30
	45,47	85,95	785,08	59,56	297,62	727,30	62,06	378,56	417,47
	45,87	89,82	709,01	59,74	302,25	660,76	62,29	387,14	444,43
Média	46,09	85,05	911,65	59,16	279,80	662,46	60,65	345,52	373,62
Desvio Padrão	2,69	2,94	166,95	0,71	27,44	41,49	1,80	41,25	53,82

Valores de Ra para cada um dos provetes Effgen10U

Ra (µm)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
	1,670	1,949	2,560	3,010	2,223	2,243	2,265	2,347	2,547
	1,769	1,954	2,735	3,169	2,286	2,318	2,294	2,444	2,605
	1,792	2,055	3,049	3,230	2,531	2,339	2,332	2,517	2,790
	2,087	2,339	3,265	3,354	2,572	2,512	2,495	2,586	2,856
	2,189	2,409	3,300	3,366	2,607	2,760	2,575	2,587	2,896
Média	1,901	2,141	2,982	3,226	2,444	2,434	2,392	2,496	2,739
Desvio padrão	0,224	0,218	0,326	0,147	0,176	0,207	0,135	0,102	0,155

Valores de Rz para cada um dos provetes Effgen10U

Rz (µm)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
	13,67	12,05	17,83	16,01	14,81	12,26	11,92	14,02	14,51
	11,22	14,35	15,89	18,30	13,99	15,52	13,88	13,75	15,42
	12,27	11,76	17,64	18,66	14,51	13,61	14,89	13,54	19,10
	14,19	16,10	17,86	19,74	15,43	15,32	14,82	15,96	17,19
	14,05	17,41	18,00	18,96	17,01	17,78	13,44	15,25	15,36
Média	13,08	14,33	17,44	18,33	15,15	14,90	13,79	14,50	16,32
Desvio padrão	1,29	2,47	0,88	1,40	1,16	2,09	1,21	1,05	1,84

Forças de corte Effgen10U

Relação entre os ensaios de força e as razões sinal-ruído Effgen10U

Ensaio	Vf (mm/min)	Ap (mm)	Força (N)	S/N
E1	250	0,05	46,09	-33,2721
E2	250	0,125	85,05	-38,5937
E3	250	0,2	911,65	-59,1966
E4	500	0,05	59,16	-35,4412
E5	500	0,125	279,80	-48,9371
E6	500	0,2	662,46	-56,4232
E7	750	0,05	60,65	-35,6563
E8	750	0,125	345,52	-50,7694
E9	750	0,2	373,62	-51,4487

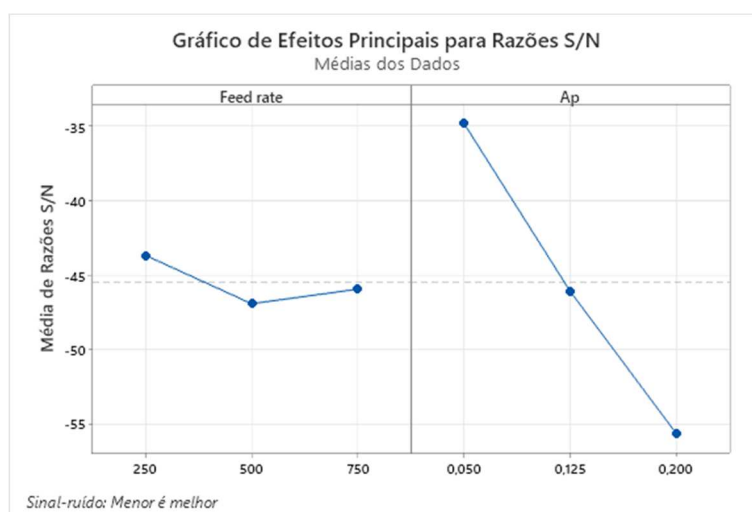


Gráfico curva de S/N para cada parâmetro para os ensaios de força resultante Effgen10U

Análise de variância força Effgen10U

Fonte	GL	Soma dos quadrados	Quadrados médios	Valor F	Valor-P	Contribuição
Vf	2	13334	6667	0,16	0,859	1,81%
Ap	2	555831	277916	6,60	0,054	75,35%
Erro	2	168491	42123			22,84%
Total	8	737656				100,00%

Força estimada método convencional Effgen10U

Resposta	Ajuste	EP do Ajustado	IC de 95%	IP de 95%
Força	1	153	(-423; 426)	(-709; 712)

Rugosidade superficial Effgen10U

Relação entre a rugosidade superficial e as razões sinal-ruído Effgen10U

Ensaio	Vf (mm/min)	Ap (mm)	Ra (μm)	S/N
E1	250	0,05	1,901	-5,5815
E2	250	0,125	2,141	-6,6131
E3	250	0,2	2,982	-9,4896
E4	500	0,05	3,226	-10,1727
E5	500	0,125	2,444	-7,7613
E6	500	0,2	2,434	-7,7278
E7	750	0,05	2,392	-7,5759
E8	750	0,125	2,496	-7,9456
E9	750	0,2	2,739	-8,7512

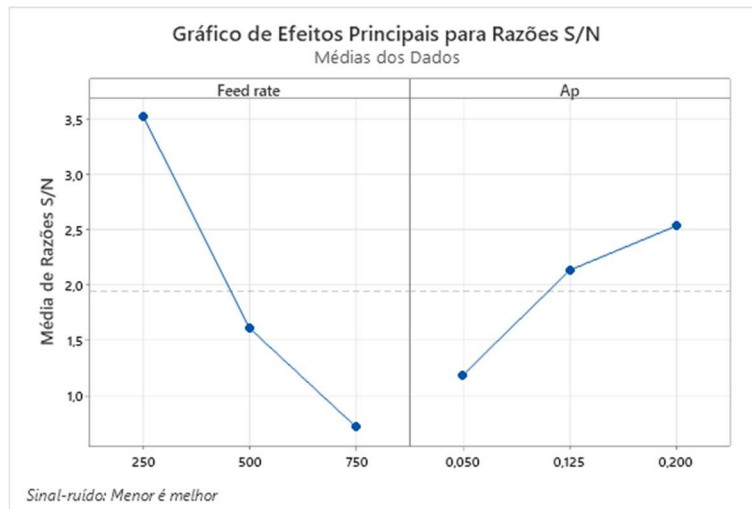


Gráfico Curva de S/N para cada parâmetro para rugosidade superficial Effgen10U

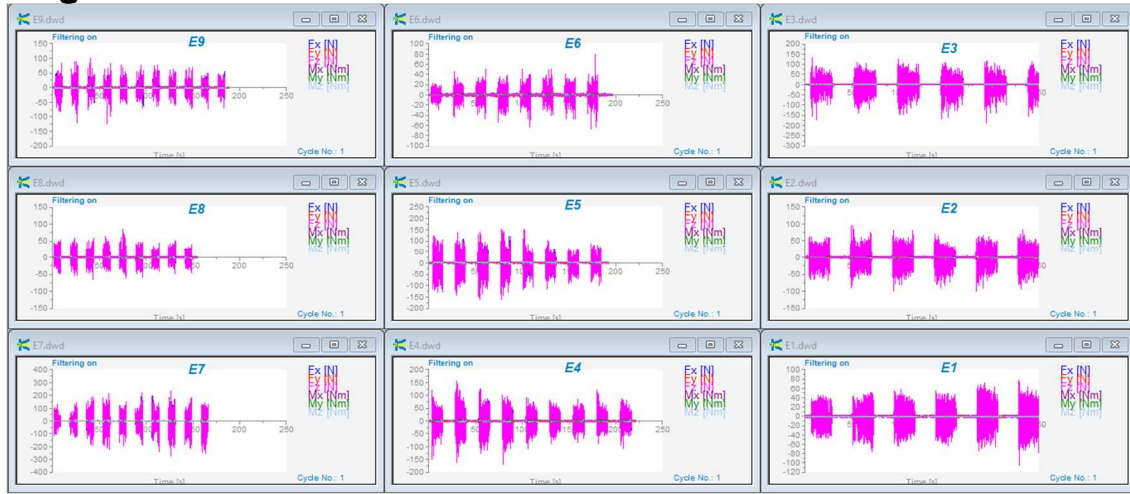
Análise de variância para rugosidade superficial Effgen10U

Fonte	GL	Soma dos quadrados	Quadrados médios	Valor F	Valor-P	Contribuição
Vf	2	0,1951	0,09757	0,42	0,682	14,84%
Ap	2	0,1943	0,09717	0,42	0,683	14,78%
Erro	2	0,9254	0,23134			70,38%
Total	8	1,3148				100,00%

Rugosidade estimada método convencional Effgen10U

Resposta	Ajuste	EP do		
		Ajustado	IC de 95%	IP de 95%
Ra	2,173	0,359	(1,178; 3,169)	(0,508; 3,839)

Effgen6



Gráficos DynoWare para os diferentes ensaios fresa Effgen 6

Análise comparativa das componentes mínimas de forças resultantes de corte Effgen6 ferramenta de Effgen6mm

		Comparação das forças resultantes para as componentes negativas (N)								
		E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
		64,94	90,72	111,56	169,29	209,72	57,48	278,19	108,05	119,62
		79,02	106,55	132,65	196,30	243,80	69,87	316,04	77,18	122,01
		109,92	127,76	168,54	171,06	229,53	75,65	270,62	92,68	135,73
		96,52	123,87	157,03	203,40	229,93	86,73	352,70	101,48	116,64
		105,12	112,42	153,91	163,64	288,71	104,01	347,94	103,54	134,88
	Média	91,10	112,26	144,74	180,74	240,34	78,75	313,10	96,59	125,78
	Desvio Padrão	18,78	14,76	22,63	17,84	29,64	17,62	38,13	12,20	8,91

Análise comparativa das componentes máximas de forças resultantes de corte Effgen6 ferramenta de Effgen6

		Comparação das forças resultantes para as componentes positivas (N)								
		E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
		58,92	100,27	188,48	173,31	191,20	50,78	324,38	105,26	143,76
		70,72	110,00	186,33	156,98	215,69	68,57	299,05	83,35	138,57
		77,75	120,18	183,45	176,86	210,66	71,49	271,96	92,67	157,51
		89,42	122,75	196,89	147,07	202,46	83,56	360,91	122,65	123,07
		84,55	120,72	185,56	149,66	227,13	78,88	335,40	111,33	143,23
	Média	76,27	114,79	188,14	160,78	209,43	70,66	318,34	103,05	141,23
	Desvio Padrão	12,00	9,51	5,21	13,62	13,56	12,59	34,14	15,44	12,37

Valores de Ra para cada um dos provetes Effgen 6

		Ra (µm)								
		E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
		1,994	2,386	2,325	3,465	2,285	3,273	3,527	4,593	3,624
		1,634	2,457	2,435	2,574	2,635	3,543	2,568	3,735	4,323
		2,188	2,325	2,492	4,583	2,180	3,520	4,146	4,452	3,511
		2,035	2,519	2,502	3,104	2,202	3,476	4,016	4,015	3,220
		1,664	2,414	2,645	4,530	2,549	3,330	3,040	4,529	3,864
	Média	1,903	2,420	2,480	3,651	2,370	3,428	3,459	4,265	3,708
	Desvio padrão	0,243	0,073	0,116	0,885	0,208	0,120	0,663	0,373	0,414

Valores de Rz para cada um dos provetes Effgen6

		Rz (µm)								
		E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
		13,580	15,330	13,690	20,410	13,730	20,140	20,660	22,470	20,500
		9,937	14,310	15,970	16,740	19,420	21,510	18,590	22,760	22,560
		14,390	13,370	15,330	20,480	16,750	20,100	22,530	25,200	23,190
		10,580	13,780	14,750	18,370	14,590	19,750	21,650	21,310	18,510
		11,360	13,400	14,250	24,370	15,210	19,510	18,530	23,870	19,540
	Média	11,969	14,038	14,798	20,074	15,940	20,202	20,392	23,122	20,860
	Desvio padrão	1,929	0,816	0,893	2,861	2,236	0,776	1,799	1,476	1,982

Forças de corte Effgen6

Relação entre os ensaios de força e as razões sinal-ruído Effgen6

Ensaio	Vf (mm/min)	Rotação (rpm)	Ap (mm)	Força (N)	S/N
E1	250	6000	0,05	76,27	-37,6471
E2	250	8000	0,0875	114,79	-41,1981
E3	250	10000	0,125	188,14	-45,4896
E4	500	6000	0,0875	160,78	-44,1246
E5	500	8000	0,125	209,43	-46,4208
E6	500	10000	0,05	70,66	-36,9835
E7	750	6000	0,125	318,34	-50,0578
E8	750	8000	0,05	103,05	-40,2610
E9	750	10000	0,0875	141,23	-42,9985

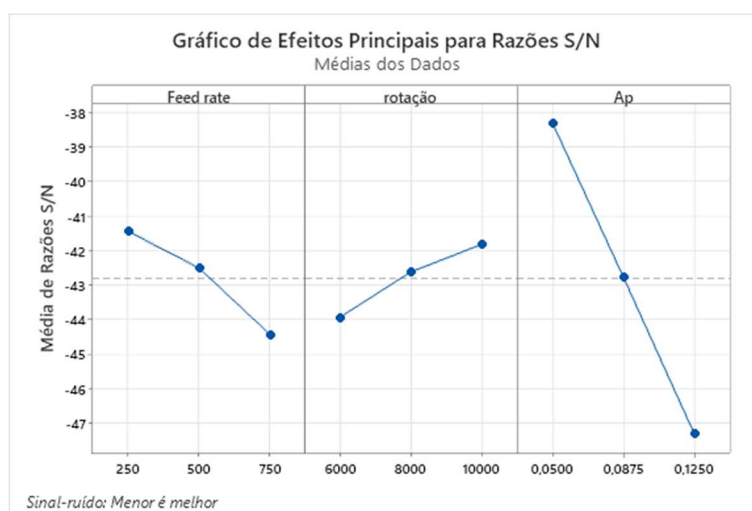


Gráfico curva de S/N de cada parâmetro para os ensaios de força resultante Effgen6

Análise de variância da força Effgen6

Fonte	GL	Soma dos quadrados	Quadrados médios	Valor F	Valor-P	Contribuição
Vf	2	5808	2903,8	5,67	0,150	11,96%
Rotação	2	4588	2294,1	4,48	0,183	9,45%
Ap	2	37154	18577	36,27	0,027	76,49%
Erro	2	1024	512,2			2,11%
Total	8	48574				100%

Força estimada método convencional Effgen6

Resposta	Ajuste	EP do Ajustado	IC de 95%	IP de 95%
Força	35,8	20,0	(-50,1; 121,7)	(-94,0; 165,6)

Rugosidade superficial Effgen6

Relação entre a rugosidade superficial e as razões sinal-ruído Effgen 6

Ensaio	Vf (mm/min)	Rotação (rpm)	Ap (mm)	Ra (µm)	S/N
E1	250	6000	0,05	2,009	-6,0596
E2	250	8000	0,0875	2,218	-6,9200
E3	250	10000	0,125	2,193	-6,8216
E4	500	6000	0,0875	2,582	-8,2391
E5	500	8000	0,125	1,753	-4,8737
E6	500	10000	0,05	1,139	-1,1289
E7	750	6000	0,125	3,290	-10,3450
E8	750	8000	0,05	2,901	-9,2522
E9	750	10000	0,0875	3,364	-10,5382

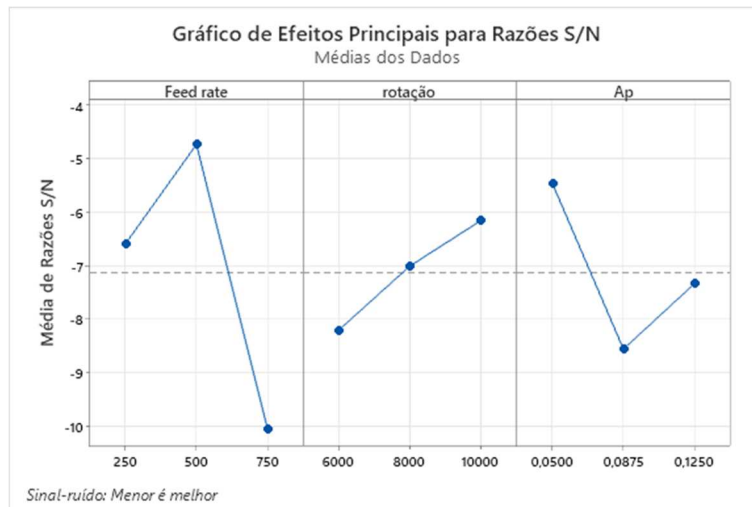


Gráfico Curva de S/N para cada parâmetro para rugosidade superficial Effgen 6

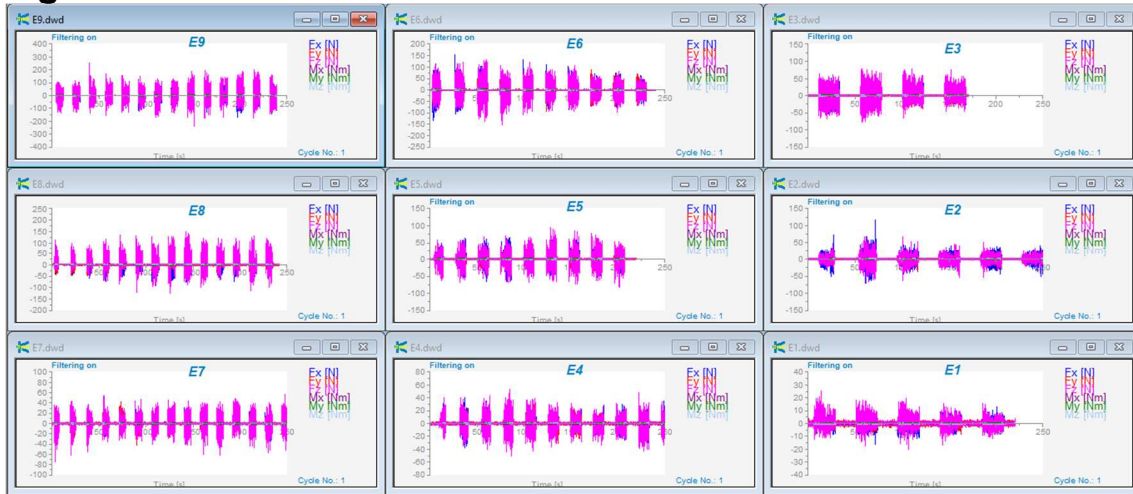
Análise de variância para rugosidade superficial Effgen6

Fonte	GL	Soma dos quadrados	Quadrados médios	Valor F	Valor-P	Contribuição
Vf	2	3,0420	1,52098	17,21	0,055	71,73%
Rotação	2	0,2726	0,13629	1,54	0,393	6,43%
Ap	2	0,7493	0,37463	4,24	0,191	17,67%
Erro	2	0,1768	0,1768			4,17%
Total	8	4,2406				100,00%

Rugosidade estimada método convencional Effgen6

Resposta	Ajuste	EP do Ajustado	IC de 95%	IP de 95%
Ra	1,306	0,262	(0,178; 2,435)	(-0,400; 3,012)

Effgen6U



Gráficos DynoWare para os diferentes ensaios fresa Effgen6U
Análise comparativa das componentes mínimas de forças resultantes de corte Effgen6U

		Comparação das forças resultantes para as componentes negativas (N)								
		E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
		80,70	114,60	138,20	80,65	139,26	230,35	110,95	202,02	262,42
		81,21	116,00	138,91	81,37	140,68	232,05	113,18	204,12	308,46
		82,89	116,31	140,15	82,05	147,77	243,66	113,40	205,75	308,58
		83,19	125,35	142,08	83,07	148,52	262,68	115,37	206,69	313,78
		83,35	137,01	143,89	83,15	151,96	263,66	116,13	210,22	323,26
	Média	82,27	121,85	140,65	82,06	145,64	246,48	113,81	205,76	303,30
	Desvio Padrão	1,22	9,48	2,34	1,08	5,43	16,08	2,03	3,06	23,63

Análise comparativa das componentes máximas de forças resultantes de corte Effgen6U

		Comparação das forças resultantes para as componentes positivas (N)								
		E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
		70,29	112,93	131,75	81,47	137,53	208,62	106,09	193,99	281,86
		74,67	116,05	132,29	82,39	141,31	208,93	107,28	194,43	289,34
		75,00	117,23	134,05	83,36	145,75	230,91	107,64	194,53	289,80
		75,10	118,46	134,95	85,44	154,20	232,20	108,37	201,49	327,01
		77,44	138,59	137,99	88,24	162,05	240,73	109,66	201,73	343,88
	Média	74,50	120,65	134,21	84,18	148,17	224,28	107,81	197,23	306,38
	Desvio Padrão	2,60	10,24	2,48	2,71	9,94	14,65	1,32	4,00	27,38

Valores de Ra para cada um dos provetes Effgen6U

		Ra (µm)								
		E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
		1,612	2,365	2,162	2,062	2,012	2,722	2,542	1,716	2,770
		1,616	2,387	2,162	2,218	2,090	2,760	2,544	1,770	2,787
		1,728	2,406	2,288	2,249	2,170	2,815	2,581	1,813	2,940
		1,744	2,414	2,288	2,381	2,344	2,832	2,775	1,823	2,951
		1,826	2,426	2,379	2,526	2,399	2,868	2,896	1,884	3,101
	Média	1,705	2,400	2,256	2,287	2,203	2,799	2,668	1,801	2,910
	Desvio padrão	0,091	0,024	0,093	0,175	0,165	0,058	0,160	0,063	0,136

Valores de Rz para cada um dos provetes Effgen6U

		Rz (µm)								
		E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
		11,72	16,21	13,39	13,62	13,12	15,44	14,66	11,38	16,91
		11,04	14,46	13,97	13,76	13,82	14,71	15,66	11,44	15,19
		11,53	16,07	14,51	15,10	13,19	15,59	14,01	11,20	16,70
		9,99	15,26	13,39	16,21	15,68	15,76	16,46	12,21	19,00
		2,41	15,52	15,36	14,06	13,55	17,30	15,54	11,36	17,63
	Média	9,34	15,50	14,12	14,55	13,87	15,76	15,27	11,52	17,09
	Desvio padrão	3,93	0,70	0,83	1,09	1,05	0,95	0,95	0,40	1,39

Forças de corte Effgen 6U

Relação entre os ensaios de força e as razões sinal-ruído Effgen6U

Ensaio	Vf (mm/min)	Ap (mm)	Força (N)	S/N
E1	250	0,05	74,50	-37,4431
E2	250	0,0875	120,65	-41,6307
E3	250	0,125	134,21	-42,5554
E4	500	0,05	84,18	-38,5042
E5	500	0,0875	148,17	-43,4151
E6	500	0,125	224,28	-47,0157
E7	750	0,05	107,81	-40,6530
E8	750	0,0875	197,23	-45,8996
E9	750	0,125	306,38	-49,7252

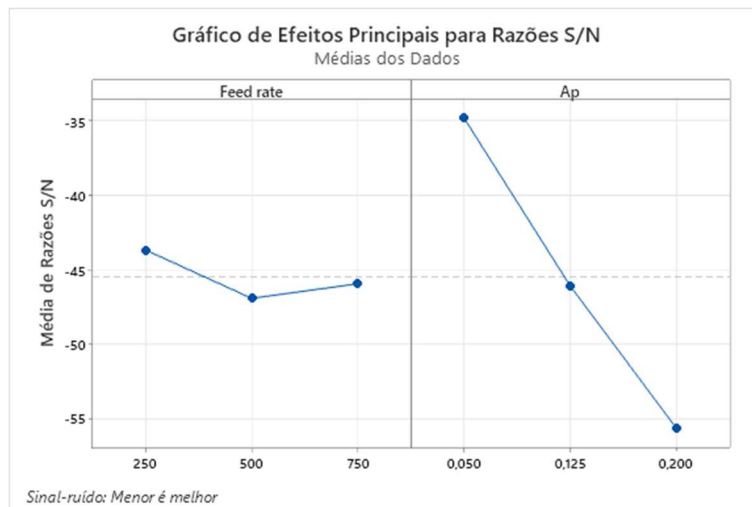


Gráfico curva de S/N para cada parâmetro para os ensaios de força resultante Effgen6U

Análise de variância força Effgen6U

Fonte	GL	Soma dos quadrados	Quadrados médios	Valor F	Valor-P	Contribuição
Vf	2	13302	6651	5,19	0,077	29,64%
Ap	2	26450	13225	10,32	0,026	58,94%
Erro	2	5127	1282			11,42%
Total	8	44880				100,00%

Força estimada método convencional Effgen6U

Resposta	Ajuste	EP do Ajustado	IC de 95%	IP de 95%
Força	43,3	26,7	(-30,7; 117,4)	(-80,6; 167,3)

Rugosidade superficial Effgen6U

Relação entre a rugosidade superficial e as razões sinal-ruído Effgen6U

Ensaio	Vf (mm/min)	Ap (mm)	Ra (μm)	S/N
E1	250	0,05	1,705	-4,63551
E2	250	0,0875	2,400	-7,60278
E3	250	0,125	2,256	-7,06601
E4	500	0,05	2,287	-7,18608
E5	500	0,0875	2,203	-6,86029
E6	500	0,125	2,799	-8,94130
E7	750	0,05	2,668	-8,52241
E8	750	0,0875	1,801	-5,11124
E9	750	0,125	2,910	-9,27726

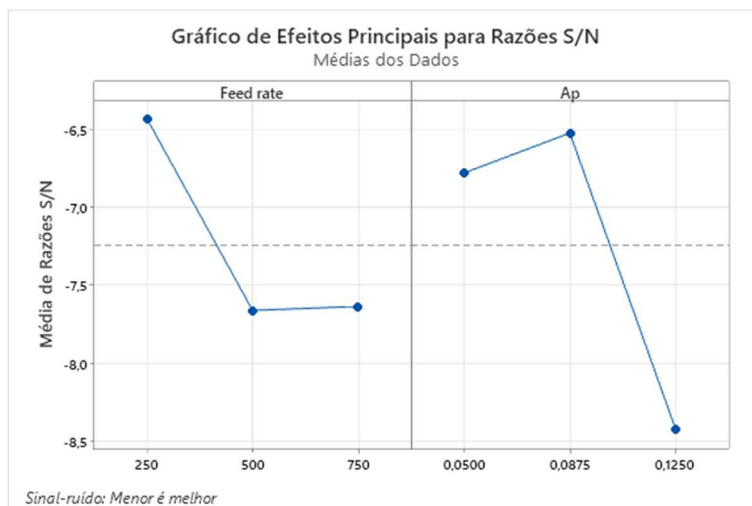


Gráfico Curva de S/N para cada parâmetro para rugosidade superficial Effgen6U

Análise de variância para rugosidade superficial Effgen6U

Fonte	GL	Soma dos quadrados	Quadrados médios	Valor F	Valor-P	Contribuição
Vf	2	0,2119	0,1060	0,62	0,585	15,49%
Ap	2	0,4673	0,2337	1,36	0,355	34,15%
Erro	2	0,6892	0,1723			50,36%
Total	8	1,3684				100,00%

Rugosidade estimada método convencional Effgen6U

Resposta	Ajuste	EP do	
		Ajustado	IC de 95%
Ra	1,918	0,309	(1,059; 2,777)
			(0,481; 3,356)

Effgen6 D46



Gráficos DynoWare para os diferentes ensaios fresa Effgen 6 D46

Análise comparativa das componentes mínimas de forças resultantes de corte Effgen6 D46

Comparação das forças resultantes para as componentes negativas (N)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
	60,35	195,20	302,09	282,43	422,69	121,57	635,72	131,53	248,89
	65,58	163,78	265,33	273,70	376,57	154,70	926,91	122,66	312,16
	67,28	218,91	324,07	265,78	358,38	131,73	692,66	94,82	227,00
	64,37	213,07	283,69	368,92	375,37	127,19	484,73	106,35	263,27
	72,80	282,38	263,48	314,47	364,54	109,18	667,79	108,01	261,24
Média	66,08	214,67	287,73	301,06	379,51	128,88	681,56	112,67	262,51
Desvio Padrão	4,54	43,51	25,66	42,20	25,30	16,73	159,18	14,45	31,28

Análise comparativa das componentes máximas de forças resultantes de corte Effgen6 D46

Comparação das forças resultantes para as componentes positivas (N)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
	61,00	193,55	286,50	247,17	437,83	119,90	831,45	122,02	848,87
	70,78	238,79	268,64	215,00	373,62	132,51	949,31	111,71	965,00
	68,85	168,04	261,60	235,38	316,74	121,03	912,72	112,31	927,53
	70,37	196,52	259,17	237,62	365,23	116,75	479,93	110,00	506,03
	67,22	218,68	266,27	242,49	319,49	120,35	614,35	105,39	634,83
Média	67,64	203,11	268,44	235,53	362,58	122,11	757,55	112,28	776,45
Desvio Padrão	3,97	26,83	10,77	12,35	49,37	6,04	202,42	6,08	197,99

Valores de Ra para cada um dos provetes Effgen6 D46

Ra (µm)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
	1,379	1,296	1,343	1,587	1,745	1,171	2,641	1,339	1,509
	1,293	1,196	1,238	1,666	1,726	1,345	2,404	1,279	1,495
	1,460	1,278	1,319	1,520	1,630	1,222	2,610	1,460	1,516
	1,383	1,341	1,344	1,640	1,490	1,165	2,732	1,446	1,388
	1,534	1,329	1,131	1,677	1,586	1,332	2,287	1,582	1,674
Média	1,410	1,288	1,275	1,618	1,635	1,247	2,535	1,421	1,516
Desvio padrão	0,091	0,057	0,091	0,065	0,105	0,087	0,183	0,117	0,102

Valores de Rz para cada um dos provetes Effgen6 D46

Rz (µm)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
	8,843	7,734	9,757	9,585	9,515	6,714	14,090	8,234	9,515
	8,277	8,710	8,007	10,840	10,280	9,062	11,790	8,425	8,222
	9,277	8,636	8,578	9,332	10,000	7,781	14,630	10,050	10,080
	8,191	9,636	7,917	11,980	9,500	7,292	14,760	9,074	8,519
	9,632	9,085	7,125	12,050	10,030	8,066	14,320	10,870	10,300
Média	8,844	8,760	8,277	10,757	9,865	7,783	13,918	9,331	9,327
Desvio padrão	0,624	0,697	0,976	1,282	0,344	0,880	1,218	1,115	0,925

Forças de corte Effgen6 D46

Relação entre os ensaios de força e as razões sinal-ruído Effgen6 D46

Ensaio	Vf (mm/min)	Rotação (rpm)	Ap (mm)	Força (N)	S/N
E1	250	6000	0,05	67,64	-36,1541
E2	250	8000	0,0875	203,11	-46,1546
E3	250	10000	0,125	368,44	-48,5769
E4	500	6000	0,0875	235,53	-47,4409
E5	500	8000	0,125	362,58	-51,1881
E6	500	10000	0,05	122,11	-41,7350
E7	750	6000	0,125	101,362	-57,5882
E8	750	8000	0,05	757,55	-41,0060
E9	750	10000	0,0875	112,28	-57,8023

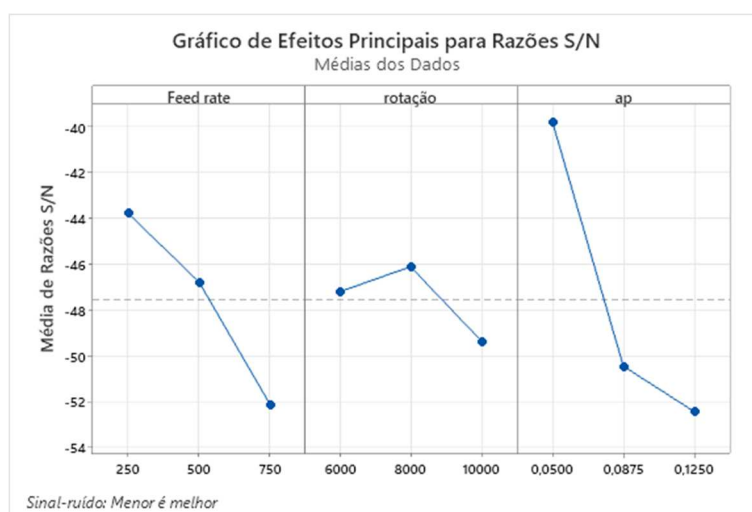


Gráfico curva de S/N de cada parâmetro para os ensaios de força resultante Effgen 6 D46

Análise de variância da força Effgen6 D46

Fonte	GL	Soma dos quadrados	Quadrados médios	Valor F	Valor-P	Contribuição
Vf	2	235112	117556	3,64	0,216	41,18%
Rotação	2	44105	22052	0,68	0,594	7,72%
Ap	2	227149	113575	3,52	0,221	39,78%
Erro	2	64621	32621			11,32%
Total	8	570987				100,00%

Força estimada método convencional Effgen6D46

Resposta	Ajuste	EP do Ajustado	IC de 95%	IP de 95%
força	-139	159	(-821; 543)	(-1171; 892)

Rugosidade superficial Effgen6 D46

Relação entre a rugosidade superficial e as razões sinal-ruído Effgen 6 D46

Ensaio	Vf (mm/min)	Rotação (rpm)	Ap (mm)	Ra (µm)	S/N
E1	250	6000	0,05	1,410	-2,98438
E2	250	8000	0,0875	1,288	-2,19832
E3	250	10000	0,125	1,275	-2,11020
E4	500	6000	0,0875	1,618	-4,17957
E5	500	8000	0,125	1,635	-4,27036
E6	500	10000	0,05	1,247	-1,91733
E7	750	6000	0,125	2,535	-8,07956
E8	750	8000	0,05	1,421	-3,05188
E9	750	10000	0,0875	1,516	-3,61398

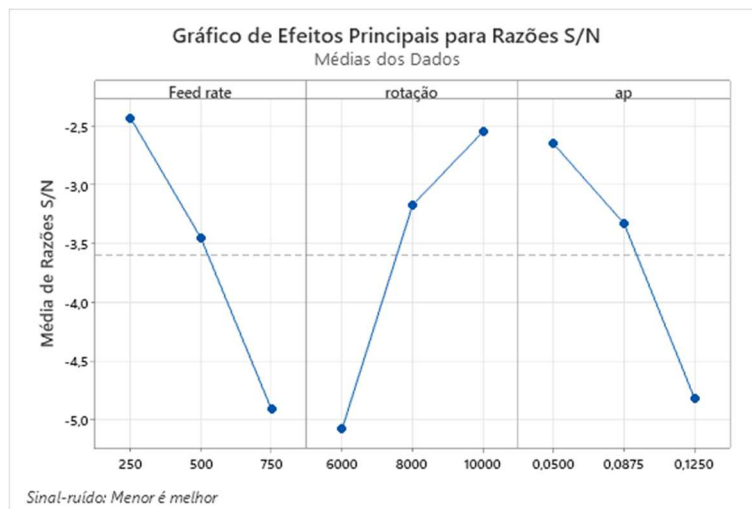


Gráfico Curva de S/N para cada parâmetro para rugosidade superficial Effgen6 D46

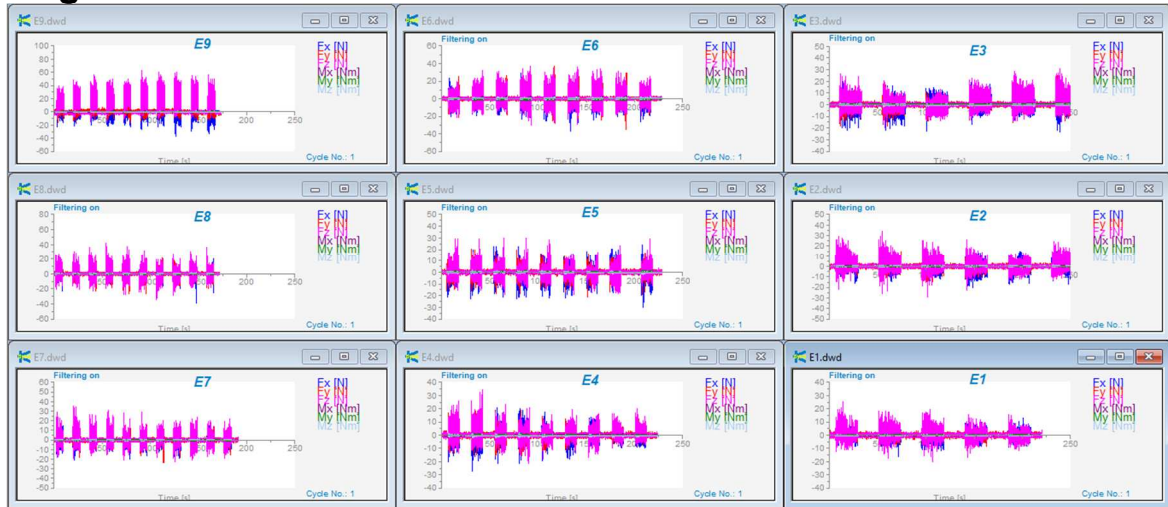
Análise de variância para rugosidade superficial Effgen6 D46

Fonte	GL	Soma dos quadrados	Quadrados médios	Valor F	Valor-P	Contribuição
Vf	2	0,38550	0,19275	3,89	0,204	30,70%
Rotação	2	0,43391	0,21696	4,38	0,186	34,56%
Ap	2	0,33706	0,16853	3,40	0,227	26,85%
Erro	2	0,09907	0,04953			7,89%
Total	8	1,25555				100,00%

Rugosidade estimada método convencional Effgen6D46

Resposta	Ajuste	EP do Ajustado	IC de 95%	IP de 95%
Ra	0,931	0,196	(0,086; 1,775)	(-0,346; 2,208)

Effgen6 D46U



Gráficos DynoWare para os diferentes ensaios fresa Effgen6 D46U

Análise comparativa das componentes mínimas de forças resultantes de corte Effgen6 D46U

Comparação das forças resultantes para as componentes negativas (N)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
	54,30	86,85	147,00	69,86	214,06	227,94	146,84	167,59	172,51
	54,41	87,18	157,28	70,06	219,46	427,93	151,62	171,87	179,55
	54,89	91,42	158,42	70,34	224,08	449,11	155,45	194,27	180,99
	56,36	92,01	167,87	72,27	229,93	604,02	182,58	211,85	199,51
	56,96	92,39	170,96	73,71	234,57	606,28	183,74	348,42	218,16
Média	55,38	89,97	160,31	71,25	224,42	463,06	164,05	218,80	190,14
Desvio Padrão	1,20	2,72	9,49	1,68	8,15	155,80	17,72	74,63	18,57

Análise comparativa das componentes máximas de forças resultantes de corte Effgen6 D46U

Comparação das forças resultantes para as componentes positivas (N)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
	45,08	75,04	138,82	62,40	204,91	590,80	140,57	182,57	183,61
	48,55	75,22	144,92	63,49	207,23	739,69	144,66	182,93	186,52
	53,49	75,87	145,96	67,44	218,74	870,33	170,23	191,11	198,69
	55,75	79,05	149,98	67,88	220,23	933,28	179,90	195,89	210,87
	56,47	80,75	151,28	69,94	220,24	935,25	191,05	322,41	212,44
Média	51,87	77,19	146,19	66,23	214,27	813,87	165,28	214,98	198,43
Desvio Padrão	4,90	2,57	4,91	3,17	7,56	147,85	22,01	60,32	13,35

Valores de Ra para cada um dos provetes Effgen6D46U

Ra (µm)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
	1,150	1,076	1,297	1,336	1,542	1,077	0,995	0,737	1,142
	1,191	1,079	1,310	1,354	1,568	ND	1,016	0,741	1,197
	1,196	1,081	1,370	1,357	1,577	ND	1,018	0,755	1,237
	1,231	1,109	1,382	1,368	1,591	ND	1,065	0,829	1,307
	1,295	1,135	1,395	1,375	1,622	ND	1,080	0,844	1,445
Média	1,213	1,096	1,351	1,358	1,580	#VALOR!	1,035	0,781	1,266
Desvio padrão	0,054	0,026	0,044	0,015	0,030	#DIV/0!	0,036	0,051	0,117

Valores de Rz para cada um dos provetes Effgen6D46U

	Rz (µm)								
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
	7,34	7,29	8,20	9,77	9,71	7,00	7,28	5,61	7,30
	7,89	7,78	8,08	9,76	10,30	ND	7,23	6,57	7,14
	7,12	8,58	8,85	10,71	10,55	ND	6,74	4,82	7,56
	8,13	7,19	9,15	9,87	9,51	ND	7,67	5,79	8,59
	8,59	8,13	9,96	10,07	10,14	ND	7,53	6,21	8,71
Média	7,81	7,79	8,85	10,04	10,04	ND	7,29	5,80	7,86
Desvio padrão	0,59	0,58	0,77	0,40	0,43	ND	0,36	0,66	0,74

Força de corte Effgen6D46U

Relação entre os ensaios de força e as razões sinal-ruído Effgen6D46U

Ensaio	Vf (mm/min)	Ap	Força (N)	S/N
E1	250	0,05	55,38	-34,8677
E2	250	0,0875	89,97	-39,0820
E3	250	0,125	160,31	-44,0990
E4	500	0,05	71,25	-37,0555
E5	500	0,0875	224,42	-47,0212
E6	500	0,125	463,06	-53,3127
E7	750	0,05	164,05	-44,2993
E8	750	0,0875	218,80	-46,8009
E9	750	0,125	190,14	-45,5817

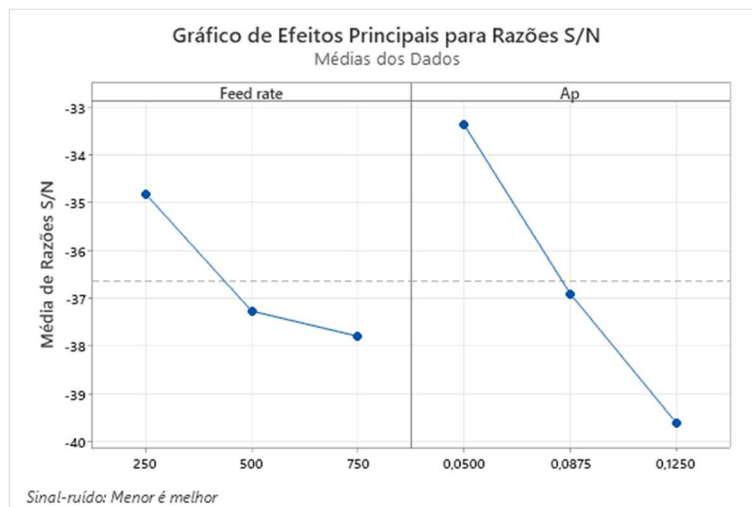


Gráfico curva de S/N para cada parâmetro para os ensaios de força resultante Effgen6 D46U

Análise de variância da força Effgen 6 D46U

Fonte	GL	Soma dos quadrados	Quadrados médios	Valor F	Valor-P	Contribuição
Vf	2	893,8	446,91	5,26	0,076	17,92%
Ap	2	3752,7	1876,34	22,08	0,007	75,26%
Erro	2	340,0	84,99			6,82%
Total	8	4986,5				100,00%

Rugosidade estimada método convencional Effgen6D46

Resposta	Ajuste	EP do Ajustado	IC de 95%	IP de 95%
Ra	0,931	0,196	(0,086; 1,775)	(-0,346; 2,208)

Rugosidade superficial Effgen6D46U

Relação entre a rugosidade superficial e as razões sinal-ruído Effgen6D46U

Ensaio	Vf (mm/min)	Rotação (rpm)	Ap (mm)	Ra (µm)	S/N
E1	250	6000	0,05	1,213	-1,67435
E2	250	6000	0,0875	1,096	-0,79621
E3	250	6000	0,125	1,351	-2,61182
E4	500	6000	0,0875	1,358	-2,65800
E5	500	6000	0,125	1,580	-3,97314
E6	500	6000	0,05	*	*
E7	750	6000	0,125	1,035	-0,29713
E8	750	6000	0,05	0,781	2,14476
E9	750	6000	0,0875	1,266	-2,04593

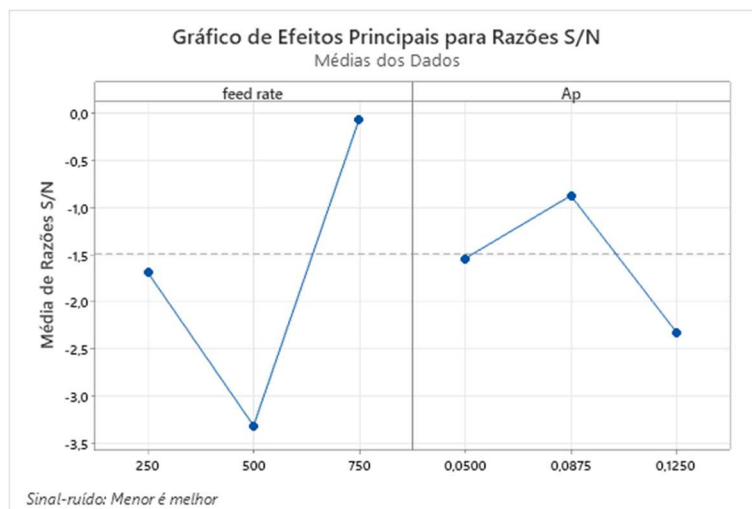
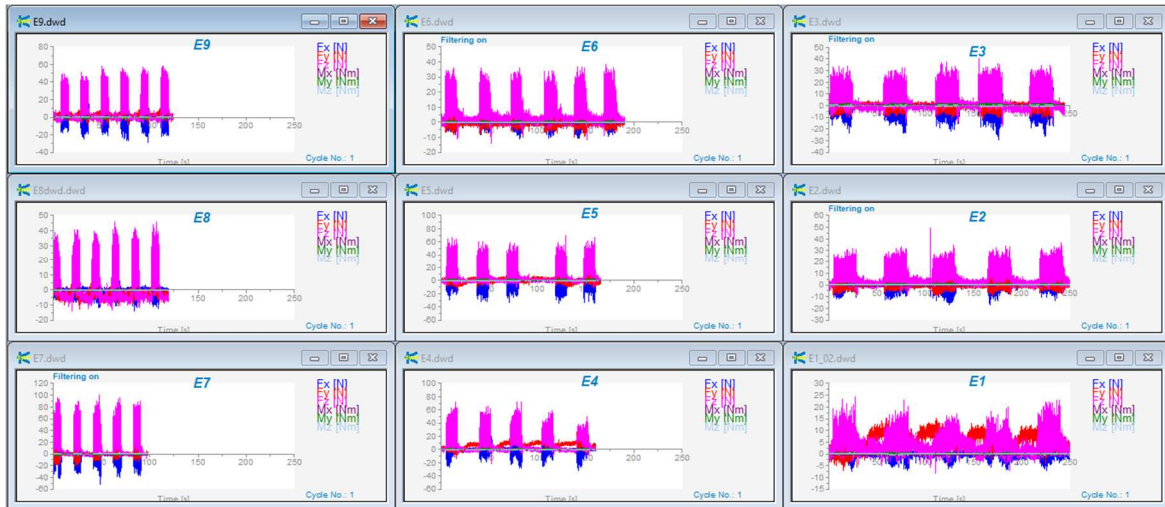


Gráfico Curva de S/N para cada parâmetro para rugosidade superficial Effgen 6 D46U

Análise de variância para rugosidade superficial Effgen6D46U

Fonte	GL	Soma dos quadrados	Quadrados médios	Valor F	Valor-P	Contribuição
Vf	2	0,23470	0,15563	6,81	0,077	57,34%
Ap	2	0,10600	0,05300	2,32	0,246	25,90%
Erro	3	0,06859	0,02286			16,76%
Total	7	0,40929				100,00%

Schott20



Gráficos DynoWare para os diferentes ensaios fresa Schott20

Análise comparativa das componentes mínimas de forças resultantes de corte Schott20

		Comparação das forças resultantes para as componentes negativas (N)								
		E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
		19,33	21,86	36,01	43,98	49,32	22,23	50,27	22,58	27,38
		15,78	20,76	31,91	43,53	43,58	20,69	40,24	19,56	23,48
		15,42	21,57	33,62	37,46	51,26	22,62	35,31	22,66	25,07
		15,76	24,57	36,21	36,80	44,24	27,32	37,85	18,29	24,00
		18,88	24,59	35,64	37,71	40,51	21,10	46,93	22,16	28,54
	Média	17,03	22,67	34,68	39,90	45,78	22,79	42,12	21,05	25,69
	Desvio Padrão	1,90	1,79	1,86	3,54	4,40	2,65	6,28	2,00	2,19

Análise comparativa das componentes máximas de forças resultantes de corte Schott20

		Comparação das forças resultantes para as componentes positivas (N)								
		E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
		27,79	47,38	49,99	91,63	88,84	43,45	126,35	51,54	54,95
		30,62	47,30	56,52	96,91	93,36	45,80	115,67	52,96	58,41
		29,91	48,65	52,57	96,78	92,99	42,27	122,98	50,08	66,99
		30,15	50,75	56,14	96,94	88,75	45,05	118,72	50,96	61,80
		31,33	55,29	54,15	95,66	95,05	47,33	114,75	50,91	69,96
	Média	29,96	49,87	53,87	95,58	91,80	44,78	119,69	51,29	62,42
	Desvio Padrão	1,33	3,33	2,69	2,27	2,85	1,98	4,92	1,07	6,12

Valores de Ra para cada um dos provetes Schott20

		Ra (µm)								
		E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
		2,356	1,159	1,292	1,828	1,886	1,102	2,432	2,048	1,782
		2,045	0,968	1,414	1,863	1,770	1,298	2,542	2,082	2,020
		2,061	1,254	1,292	2,093	1,647	1,323	2,755	2,169	2,197
		2,012	1,147	1,231	1,900	1,866	1,306	2,641	2,021	2,239
		2,020	1,084	1,205	1,717	1,709	1,314	2,662	2,398	1,899
	Média	2,099	1,122	1,287	1,880	1,776	1,269	2,606	2,144	2,027
	Desvio padrão	0,145	0,106	0,081	0,137	0,102	0,094	0,123	0,153	0,194

Valores de Rz para cada um dos provetes Schott20

		Rz (µm)								
		E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
		15,930	9,054	9,699	11,980	14,410	8,789	14,910	13,540	11,470
		12,770	7,214	9,976	11,030	12,010	9,785	14,580	13,940	13,120
		13,410	8,238	9,636	14,850	11,210	9,980	16,690	15,750	16,830
		11,810	7,722	10,160	12,690	11,860	8,812	16,000	13,810	14,730
		12,600	7,421	8,207	12,010	12,410	8,484	15,490	16,380	11,620
	Média	13,304	7,930	9,536	12,512	12,380	9,170	15,534	14,684	13,554
	Desvio padrão	1,575	0,737	0,772	1,434	1,214	0,667	0,845	1,288	2,258

Forças de corte Schott20

Relação entre os ensaios de força e as razões sinal-ruído Schott20

Ensaio	Vf (mm/min)	Rotação (rpm)	Ap (mm)	Força (N)	S/N
E1	250	6000	0,05	29,960	-29,5308
E2	250	8000	0,125	49,870	-33,9568
E3	250	10000	0,2	53,874	-34,6276
E4	500	6000	0,125	95,584	-39,6077
E5	500	8000	0,2	91,798	-39,2567
E6	500	10000	0,05	44,780	-33,0217
E7	750	6000	0,2	119,694	-41,5614
E8	750	8000	0,05	51,290	-34,2007
E9	750	10000	0,125	62,422	-35,9068

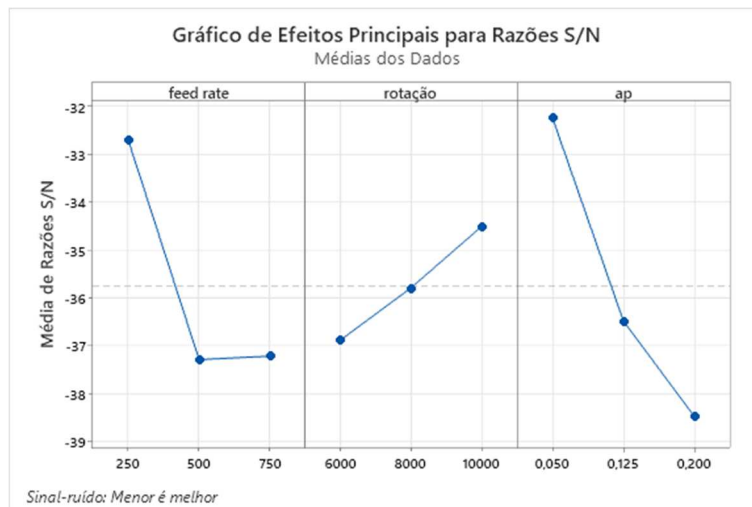


Gráfico curva de S/N de cada parâmetro para os ensaios de força resultante Schott20

Análise de variância da força Schott20

Fonte	GL	Soma dos quadrados	Quadrados médios	Valor F	Valor-P	Contribuição
Vf	2	2181,8	1090,89	14,34	0,065	32,06%
Rotação	2	1203,7	601,83	7,91	0,112	17,68%
Ap	2	3268,7	1634,35	21,49	0,044	48,02%
Erro	2	152,1	76,07			2,24%
Total	8	6806,3				100,00%

Força estimada método convencional Schott20

Resposta	Ajuste	EP do Ajustado	IC de 95%	IP de 95%
força	7,10	7,69	(-26,00; 40,19)	(-42,94; 57,13)

Rugosidade superficial Schott20

Relação entre a rugosidade superficial e as razões sinal-ruído Schott20

Ensaio	Vf (mm/min)	Rotação (rpm)	Ap (mm)	Ra (µm)	S/N
E1	250	6000	0,05	2,907	-9,26890
E2	250	8000	0,125	1,149	-1,20640
E3	250	10000	0,2	1,096	-0,796211
E4	500	6000	0,125	1,559	-3,85692
E5	500	8000	0,2	1,522	-3,64829
E6	500	10000	0,05	1,459	-3,28111
E7	750	6000	0,2	2,090	-6,40293
E8	750	8000	0,05	1,838	-5,28691
E9	750	10000	0,125	1,517	-3,61971

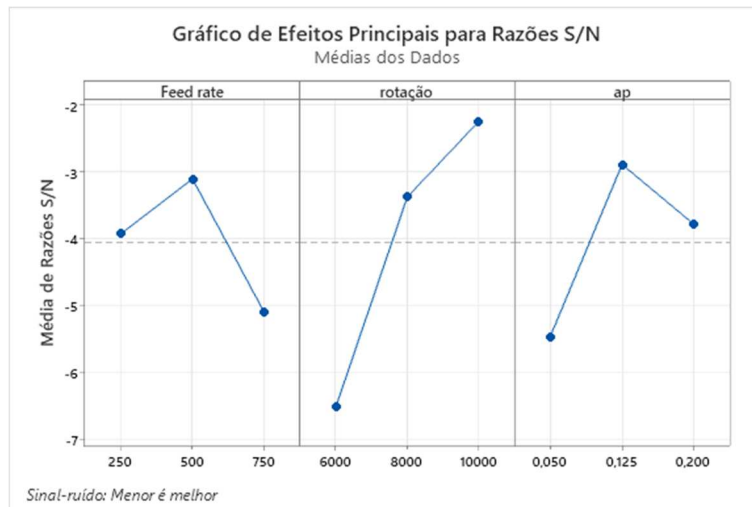


Gráfico Curva de S/N para cada parâmetro para rugosidade superficial Schott20

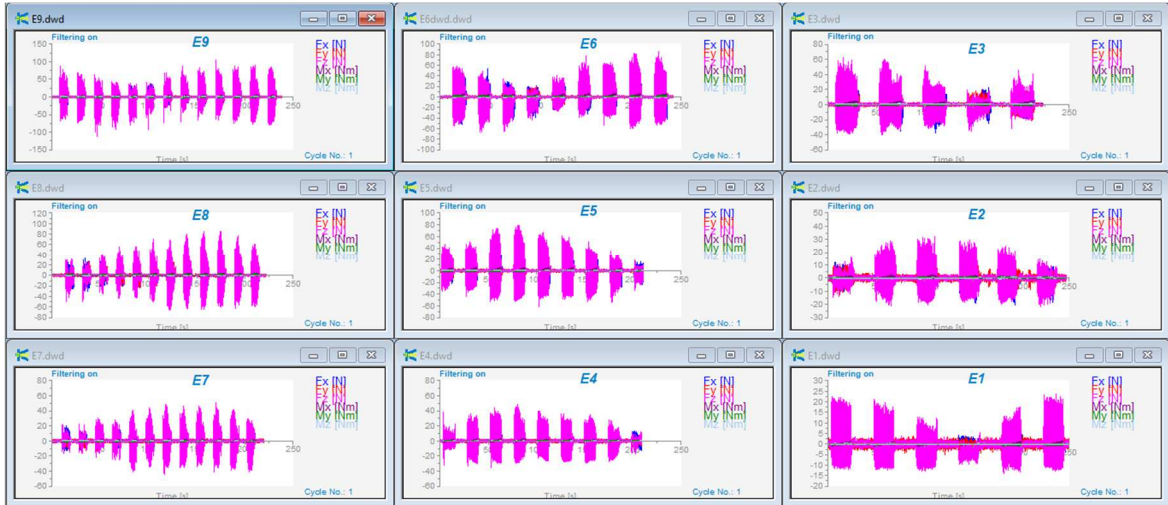
Análise de variância para rugosidade superficial Schott20

Fonte	GL	Soma dos quadrados	Quadrados médios	Valor F	Valor-P	Contribuição
Vf	2	0,2385	0,1193	0,52	0,656	9,50%
Rotação	2	1,2794	0,6397	2,81	0,262	50,98%
Ap	2	0,5367	0,2683	1,18	0,459	21,39%
Erro	2	0,4548	0,2274			18,12%
Total	8	2,5094				100,00%

Rugosidade estimada método convencional Schott20

Resposta	Ajuste	EP do		
		Ajustado	IC de 95%	IP de 95%
Ra	0,823	0,421	(-0,987; 2,632)	(-1,913; 3,559)

Schott20U



Gráficos DynoWare para os diferentes ensaios fresa Schott20U

Análise comparativa das componentes mínimas de forças resultantes de corte Schott20U

		Comparação das forças resultantes para as componentes negativas (N)								
		E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
		30,12	46,01	60,13	42,68	73,85	97,90	57,72	89,76	120,14
		30,36	46,51	60,44	43,93	74,69	97,94	57,76	89,95	121,62
		30,42	46,82	62,58	44,08	75,87	98,11	58,37	91,42	122,91
		30,58	46,88	62,62	44,47	75,90	98,68	58,53	91,68	126,45
		30,63	47,08	62,79	45,32	76,22	98,74	58,75	91,80	128,31
	Média	30,42	46,66	61,71	44,10	75,31	98,27	58,23	90,92	123,89
	Desvio Padrão	0,20	0,42	1,31	0,96	1,00	0,41	0,46	0,99	3,40

Análise comparativa das componentes máximas de forças resultantes de corte Schott20U

		Comparação das forças resultantes para as componentes positivas (N)								
		E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
		43,64	60,85	87,34	59,04	104,41	113,66	68,61	114,46	134,58
		43,99	61,54	87,79	59,08	104,89	116,33	70,49	115,49	134,69
		44,37	62,04	88,76	60,06	104,93	117,99	72,15	115,66	138,46
		44,40	62,13	88,99	60,36	105,92	118,40	72,72	116,36	140,28
		44,49	62,41	89,72	60,88	106,08	118,66	72,92	116,99	151,10
	Média	44,18	61,79	88,52	59,88	105,25	117,01	71,38	115,79	139,82
	Desvio Padrão	0,36	0,61	0,95	0,81	0,72	2,08	1,82	0,95	6,77

Valores de Ra para cada um dos provetes Schott20U

		Ra (µm)								
		E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
		1,119	1,015	0,795	1,166	1,062	0,902	1,563	1,610	1,476
		1,064	0,982	0,832	1,138	0,963	0,933	1,406	1,714	1,468
		1,193	1,175	0,879	1,098	0,924	0,948	1,406	1,760	1,399
		1,025	1,037	0,762	1,031	0,859	1,020	1,564	1,748	1,484
		1,069	1,197	0,707	1,218	1,090	1,052	1,475	1,742	1,391
	Média	1,094	1,081	0,795	1,130	0,980	0,971	1,483	1,715	1,444
	Desvio padrão	0,065	0,098	0,066	0,071	0,096	0,063	0,079	0,061	0,045

Valores de Rz para cada um dos provetes Schott20U

		Rz (µm)								
		E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
		8,371	7,742	5,726	9,929	9,089	6,078	11,860	10,760	10,800
		7,381	8,199	5,562	9,628	7,285	6,980	10,620	10,770	10,450
		9,242	9,253	5,941	8,300	7,148	7,343	9,816	11,640	9,050
		7,269	8,476	5,609	8,699	6,429	7,230	10,830	11,020	10,010
		7,355	9,085	5,921	10,500	9,078	8,367	12,440	11,580	10,700
	Média	7,924	8,551	5,752	9,411	7,806	7,200	11,113	11,154	10,202
	Desvio padrão	0,864	0,625	0,174	0,900	1,211	0,820	1,040	0,430	0,713

Força de corte Schott20U

Relação entre os ensaios de força e as razões sinal-ruído Schott20U

Ensaio	Vf (mm/min)	Ap (mm)	Força (N)	S/N
E1	250	0,05	44,18	-32,9045
E2	250	0,125	61,79	-35,8184
E3	250	0,2	88,52	-38,9408
E4	500	0,05	59,88	-35,5456
E5	500	0,125	105,25	-40,4444
E6	500	0,2	117,01	-41,3645
E7	750	0,05	71,38	-37,0715
E8	750	0,125	115,79	-41,2734
E9	750	0,2	139,82	-42,9114

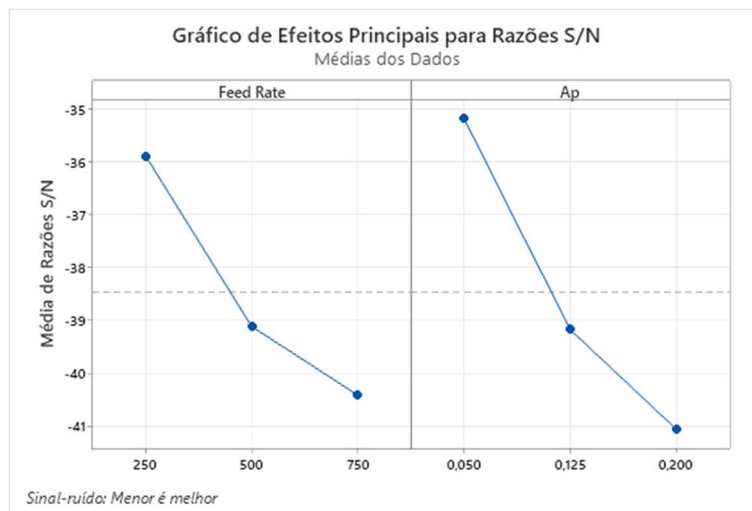


Gráfico curva de S/N para cada parâmetro para os ensaios de força resultante Schott20U

Análise de variância da força Schott20U

Fonte	GL	Soma dos quadrados	Quadrados médios	Valor F	Valor-P	Contribuição
Vf	2	3027,8	1513,91	19,86	0,008	36,67%
Ap	2	4923,4	2461,71	32,30	0,003	59,63%
Erro	2	304,9	76,22			3,69%
Total	8	8256,1				100,00%

Força estimada método convencional Schott20U

Resposta	Ajuste	EP do Ajustado	IC de 95%	IP de 95%
Força	34,02	6,51	(15,95; 52,09)	(3,79; 64,25)

Rugosidade superficial Schott20U

Relação entre a rugosidade superficial e as razões sinal-ruído Schott20U

Ensaio	Vf (mm/min)	Ap (mm)	Ra (μm)	S/N
E1	250	0,05	1,094	-0,780346
E2	250	0,125	1,081	-0,676514
E3	250	0,2	0,795	1,99266
E4	500	0,05	1,130	-1,06157
E5	500	0,125	0,980	0,175478
E6	500	0,2	0,971	0,255615
E7	750	0,05	1,483	-3,42282
E8	750	0,125	1,715	-4,68528
E9	750	0,2	1,444	-3,19134

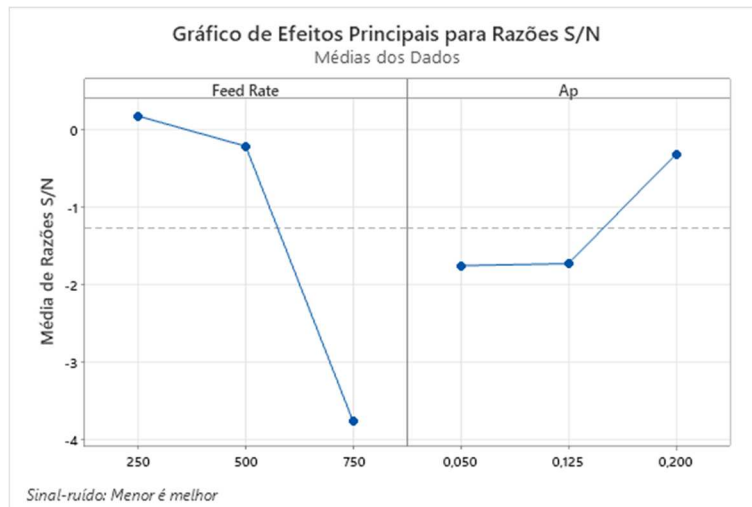


Gráfico Curva de S/N para cada parâmetro para rugosidade superficial Schott20U

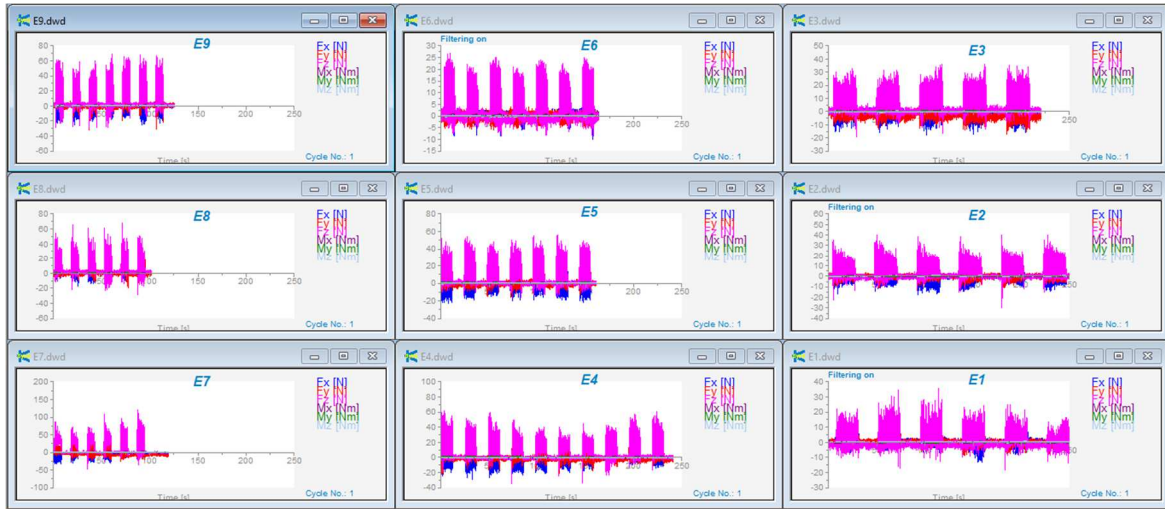
Análise de variância para rugosidade superficial Schott20U

Fonte	GL	Soma dos quadrados	Quadrados médios	Valor F	Valor-P	Contribuição
Vf	2	0,58274	0,29137	22,23	0,007	83,40%
Ap	2	0,06357	0,03178	2,42	0,204	9,10%
Erro	2	0,05244	0,01311			7,50%
Total	8	0,69874				100,00%

Rugosidade estimada método convencional Schott20U

Resposta	Ajuste	EP do		
		Ajustado	IC de 95%	IP de 95%
Ra	0,8719	0,0853	(0,6350; 1,1088)	(0,4754; 1,2684)

Schott10



Gráficos DynoWare para os diferentes ensaios fresa Schott10

Análise comparativa das componentes mínimas de forças resultantes de corte Schott10

		Comparação das forças resultantes para as componentes negativas (N)								
		E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
		40,41	44,94	41,72	71,96	36,25	28,22	61,18	50,28	84,07
		41,01	41,49	41,73	76,95	38,69	25,24	65,15	47,79	84,65
		43,17	43,25	47,74	62,98	37,23	28,99	66,73	43,94	84,99
		39,74	42,02	42,65	59,52	35,08	27,29	67,50	48,32	87,38
		44,85	42,40	45,18	62,99	37,77	28,12	68,19	42,74	85,25
	Média	41,84	42,82	43,80	66,88	37,00	27,57	65,75	46,61	85,27
	Desvio Padrão	2,12	1,35	2,61	7,27	1,39	1,44	2,79	3,16	1,26

Análise comparativa das componentes máximas de forças resultantes de corte Schott10

		Comparação das forças resultantes para as componentes positivas (N)								
		E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
		38,93	55,07	53,30	87,78	73,19	26,62	158,13	79,54	86,80
		42,02	54,01	52,21	89,26	76,69	30,02	144,87	69,45	80,62
		40,50	55,32	50,57	78,63	72,37	28,20	170,65	79,11	83,09
		38,80	55,14	50,92	83,14	77,44	29,02	151,84	74,63	80,73
		41,36	58,37	48,55	83,23	69,79	25,91	142,03	75,63	87,71
	Média	40,32	55,58	51,11	84,41	73,90	27,95	153,50	75,67	83,79
	Desvio Padrão	1,44	1,64	1,79	4,22	3,16	1,69	11,45	4,08	3,33

Valores de Ra para cada um dos provetes Schott10

		Ra (µm)								
		E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
		2,421	1,951	1,472	3,106	1,984	1,402	2,613	3,682	3,291
		2,351	1,832	1,464	3,133	1,725	2,179	2,523	3,244	2,289
		2,234	1,907	1,494	3,020	1,919	2,170	2,088	3,724	2,662
		2,192	1,780	1,339	3,235	1,913	2,234	2,171	3,061	2,435
		2,469	1,459	1,415	3,040	1,988	2,339	2,723	3,571	2,413
	Média	2,333	1,786	1,437	3,107	1,906	2,065	2,424	3,456	2,618
	Desvio padrão	0,119	0,194	0,062	0,085	0,107	0,377	0,279	0,290	0,400

Valores de Rz para cada um dos provetes Schott10

		Rz (µm)								
		E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
		16,720	12,440	9,808	18,050	11,620	9,925	17,450	22,230	18,270
		13,390	12,830	9,695	19,420	11,610	13,420	16,440	19,700	13,190
		13,030	14,080	11,400	17,570	12,510	13,990	13,920	22,430	17,220
		12,840	12,320	13,020	17,770	12,440	15,700	13,860	18,280	15,920
		14,330	9,921	10,580	18,960	14,800	16,370	17,640	19,580	15,650
	Média	14,062	12,318	10,901	18,354	12,596	13,881	15,862	20,444	16,050
	Desvio padrão	1,593	1,511	1,369	0,799	1,305	2,519	1,857	1,811	1,914

Forças de corte Schott10

Relação entre os ensaios de força e as razões sinal-ruído Schott10

Ensaio	Vf (mm/min)	Rotação (rpm)	Ap (mm)	Força (N)	S/N
E1	250	6000	0,05	40,32	-32,1104
E2	250	8000	0,125	55,58	-34,8984
E3	250	10000	0,2	51,11	-34,1701
E4	500	6000	0,125	84,41	-38,5279
E5	500	8000	0,2	73,90	-37,3729
E6	500	10000	0,05	27,95	-28,9276
E7	750	6000	0,2	153,50	-43,7222
E8	750	8000	0,05	75,67	-37,5785
E9	750	10000	0,125	83,79	-38,4638

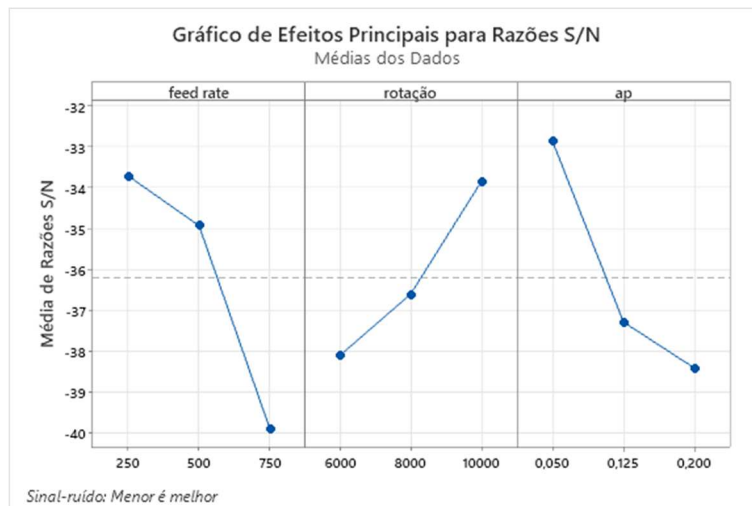


Gráfico curva de S/N de cada parâmetro para os ensaios de força resultante Schott10

Análise de variância da força Schott10

Fonte	GL	Soma dos quadrados	Quadrados médios	Valor F	Valor-P	Contribuição
Vf	2	5014,8	2507,4	19,09	0,050	47,30%
Rotação	2	2271,4	1135,7	8,65	0,104	21,42%
Ap	2	3053,2	1526,6	11,62	0,079	28,80%
Erro	2	262,7	131,3			2,48%
Total	8	10602,0				100,00%

Força estimada método convencional Schott10

Resposta	Ajuste	EP do Ajustado	IC de 95%	IP de 95%
força	7,7	10,1	(-35,8; 51,1)	(-58,1; 73,4)

Rugosidade superficial Schott10

Relação entre a rugosidade superficial e as razões sinal-ruído Schott10

Ensaio	Vf (mm/min)	Rotação (rpm)	Ap (mm)	Ra (µm)	S/N
E1	250	6000	0,05	2,333	-7,3583
E2	250	8000	0,125	1,786	-5,0376
E3	250	10000	0,2	1,437	-3,1491
E4	500	6000	0,125	3,107	-9,8468
E5	500	8000	0,2	1,906	-5,6025
E6	500	10000	0,05	2,065	-6,2984
E7	750	6000	0,2	2,424	-7,6907
E8	750	8000	0,05	3,456	-10,7715
E9	750	10000	0,125	2,618	-8,3594

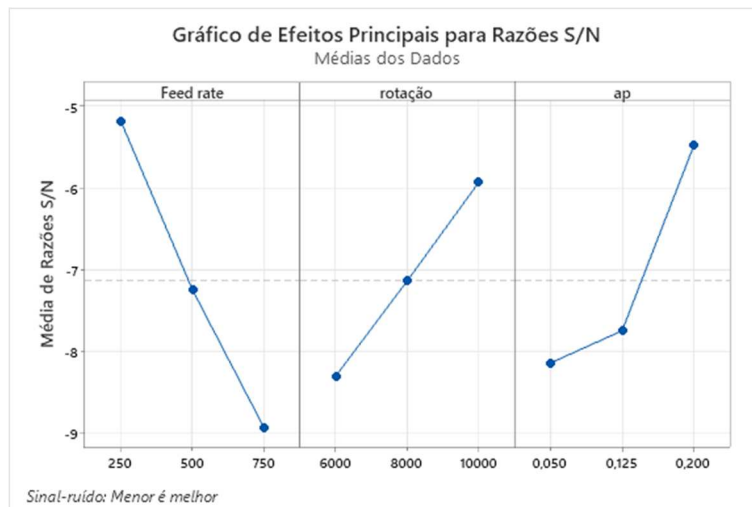


Gráfico Curva de S/N para cada parâmetro para rugosidade superficial Schott10

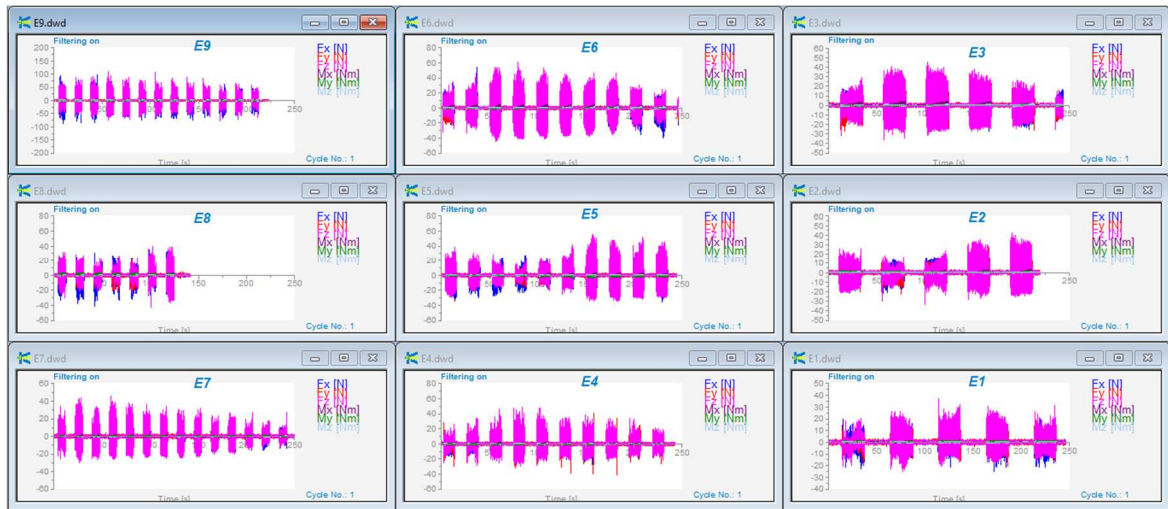
Análise de variância para rugosidade superficial Schott10

Fonte	GL	Soma dos quadrados	Quadrados médios	Valor F	Valor-P	Contribuição
Vf	2	1,4431	1,4431	2,81	0,262	43,68%
Rotação	2	0,5123	0,5123	1,00	0,501	15,51%
Ap	2	0,8350	0,8350	1,63	0,381	25,27%
Erro	2	0,5134	0,5134			15,54%
Total	8	3,3039				100,00%

Rugosidade estimada método convencional Schott10

Resposta	Ajuste	EP do Ajustado	IC de 95%	IP de 95%
Ra	1,470	0,106	(1,014; 1,925)	(0,781; 2,159)

Schott10U



Gráficos DynoWare para os diferentes ensaios fresa Schott10U

Análise comparativa das componentes mínimas de forças resultantes de corte Schott10U

Comparação das forças resultantes para as componentes negativas (N)		E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
		53,32	54,19	56,88	61,50	59,62	74,73	44,30	94,86	143,14
		53,39	55,74	56,93	61,75	59,47	76,81	44,42	99,90	144,07
		54,20	55,90	57,46	61,79	62,61	77,84	44,48	100,92	144,89
		55,27	56,23	58,05	63,06	60,99	78,51	45,18	101,17	149,54
		56,01	56,71	58,55	63,11	61,64	78,74	45,54	102,04	159,04
Média		54,44	55,75	57,57	62,24	60,87	77,33	44,78	99,78	148,14
Desvio Padrão		1,18	0,95	0,72	0,78	1,34	1,63	0,54	2,85	6,57

Análise comparativa das componentes máximas de forças resultantes de corte Schott10U

Comparação das forças resultantes para as componentes positivas (N)		E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
		59,55	65,31	72,06	81,40	80,06	82,66	57,62	129,49	174,90
		59,96	65,76	72,63	81,61	80,58	82,87	58,34	130,34	178,82
		62,20	65,94	72,71	82,09	81,96	85,76	58,96	132,21	182,00
		62,82	66,98	72,84	82,29	82,94	86,24	59,42	133,35	185,33
		62,90	67,09	73,15	82,41	83,09	86,70	60,51	133,76	190,14
Média		61,49	66,22	72,68	81,96	81,73	84,85	58,97	131,83	182,24
Desvio Padrão		1,61	0,78	0,40	0,44	1,37	1,93	1,09	1,86	5,86

Valores de Ra para cada um dos provetes Schott10U

Ra (µm)		E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
		1,480	1,337	1,499	1,529	1,577	1,518	1,697	1,776	2,091
		1,518	1,374	1,414	1,529	1,605	1,529	1,707	1,835	2,100
		1,550	1,350	1,464	1,534	1,676	1,568	1,707	1,873	1,844
		1,655	1,352	1,472	1,505	1,697	1,636	1,799	1,903	1,998
		1,674	1,299	1,465	1,470	1,745	1,706	1,862	1,969	2,128
Média		1,575	1,342	1,463	1,513	1,660	1,591	1,754	1,871	1,999
Desvio padrão		0,085	0,028	0,031	0,027	0,068	0,079	0,073	0,072	0,116

Valores de Rz para cada um dos provetes Schott10U

Rz (µm)		E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
		9,691	8,871	9,277	9,914	10,040	8,937	12,340	12,340	12,380
		10,460	9,472	9,710	10,630	10,590	11,440	11,270	12,590	15,150
		8,816	8,941	9,179	9,421	11,220	9,511	11,460	11,780	13,300
		10,970	9,070	9,105	10,260	11,560	10,740	11,070	14,170	12,530
		10,640	7,566	9,496	9,710	11,620	12,040	12,530	15,000	13,300
Média		10,115	8,784	9,353	9,987	11,006	10,534	11,734	13,176	13,332
Desvio padrão		0,865	0,720	0,248	0,472	0,677	1,297	0,658	1,351	1,102

Força de corte Schott10U

Relação entre os ensaios de força e as razões sinal-ruído Schott10U

Ensaio	Vf (mm/min)	Ap (mm)	Força (N)	S/N
E1	250	0,05	61,49	-35,7761
E2	250	0,125	66,22	-36,4198
E3	250	0,2	72,68	-37,2283
E4	500	0,05	81,96	-38,2720
E5	500	0,125	81,73	-38,2476
E6	500	0,2	84,85	-38,5730
E7	750	0,05	58,97	-35,4126
E8	750	0,125	131,83	-42,4003
E9	750	0,2	182,24	-45,2129

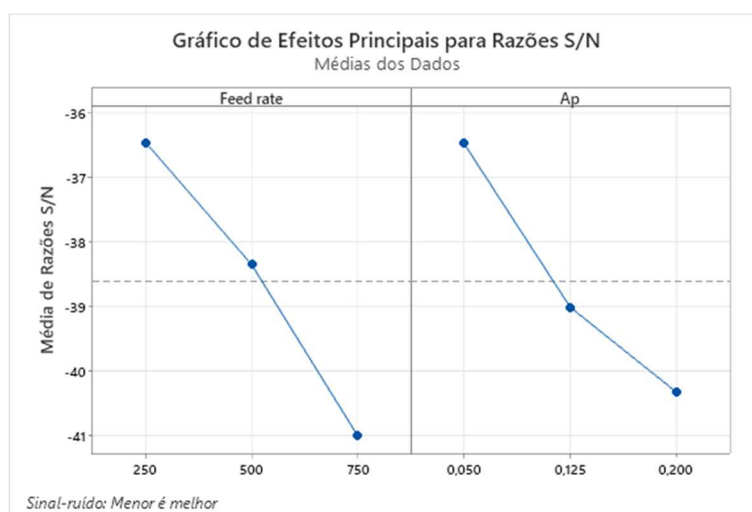


Gráfico curva de S/N para cada parâmetro para os ensaios de força resultante Schott10U

Análise de variância da força Schott10U

Fonte	GL	Soma dos quadrados	Quadrados médios	Valor F	Valor-P	Contribuição
Vf	2	5292	2646	2,31	0,216	40,57%
Ap	2	3161	1580	1,38	0,351	24,24%
Erro	2	4590	1147			35,19%
Total	8	13043				100,00%

Força estimada método convencional Schott10U

Resposta	Ajuste	EP do Ajustado	IC de 95%	IP de 95%
Força	42,9	25,2	(-27,2; 113,0)	(-74,4; 160,2)

Rugosidade superficial Schott10U

Relação entre a rugosidade superficial e as razões sinal-ruído Schott10U

Ensaio	Vf (mm/min)	Ap (mm)	Ra (μm)	S/N
E1	250	0,05	1,575	-3,94561
E2	250	0,125	1,342	-2,55505
E3	250	0,2	1,463	-3,30489
E4	500	0,05	1,513	-3,59678
E5	500	0,125	1,660	-4,40216
E6	500	0,2	1,591	-4,03340
E7	750	0,05	1,754	-4,88059
E8	750	0,125	1,871	-5,44148
E9	750	0,2	1,999	-6,01626

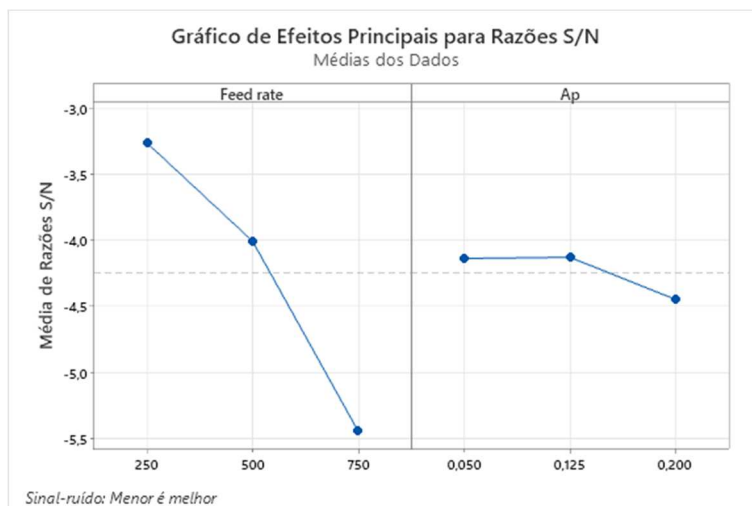


Gráfico Curva de S/N para cada parâmetro para rugosidade superficial Schott10U

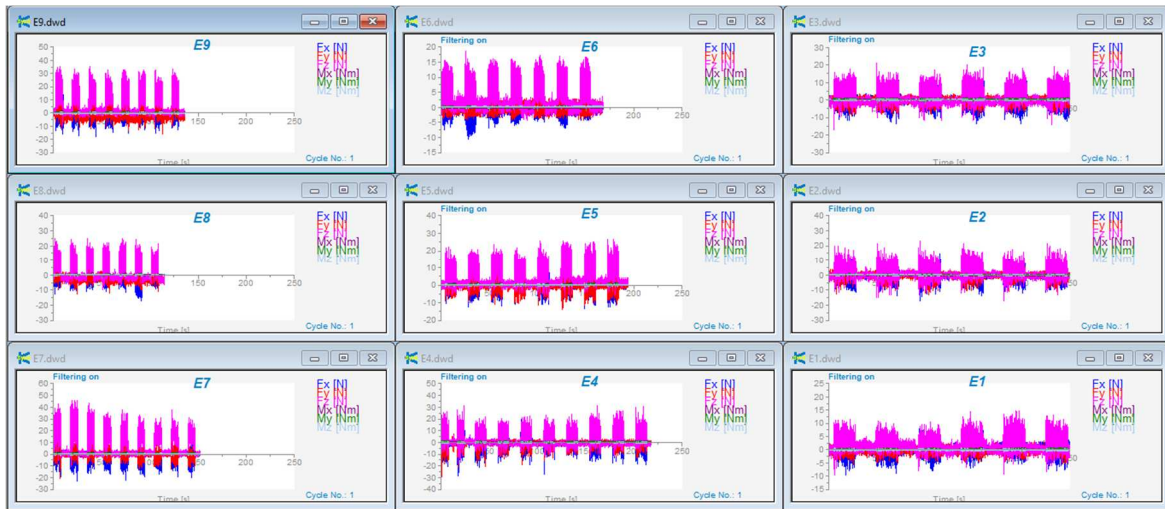
Análise de variância para rugosidade superficial Schott10U

Fonte	GL	Soma dos quadrados	Quadrados médios	Valor F	Valor-P	Contribuição
Vf	2	0,270510	0,135255	9,11	0,032	79,91%
Ap	2	0,008654	0,004327	0,29	0,032	2,56%
Erro	2	0,059355	0,014839			17,53%
Total	8	0,338519				100,00%

Rugosidade estimada método convencional Schott10U

Resposta	Ajuste	EP do Ajustado	IC de 95%	IP de 95%
Ra	1,4331	0,0908	(1,1810; 1,6852)	(1,0113; 1,8549)

Schott6



Gráficos DynoWare para os diferentes ensaios fresa Schott6

Análise comparativa das componentes mínimas de forças resultantes de corte Schott6

Comparação das forças resultantes para as componentes negativas (N)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
	13,18	18,65	20,12	29,34	27,80	24,08	35,23	27,02	34,27
	14,25	17,26	19,39	28,15	28,45	22,78	33,30	26,02	37,54
	14,71	18,28	19,46	29,39	32,01	24,50	36,87	25,76	32,59
	13,45	19,48	19,74	29,43	29,88	22,18	44,22	22,85	33,62
	16,69	17,40	19,82	28,53	28,92	22,83	39,87	24,70	34,11
Média	14,46	18,22	19,71	28,97	29,41	23,28	37,90	25,27	34,43
Desvio Padrão	1,39	0,92	0,29	0,59	1,64	0,97	4,28	1,59	1,86

Análise comparativa das componentes máximas de forças resultantes de corte Schott6

Comparação das forças resultantes para as componentes positivas (N)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
	15,02	18,91	21,23	30,82	28,87	22,70	38,06	27,43	32,19
	13,46	20,04	22,00	32,56	28,81	22,49	38,88	24,12	37,54
	14,17	22,45	21,93	28,84	26,93	28,43	42,98	23,72	34,44
	14,08	20,08	21,31	31,03	27,53	22,38	42,06	25,49	29,09
	13,03	20,05	21,18	29,77	27,28	24,96	39,20	25,71	36,55
Média	13,95	20,31	21,53	30,60	27,88	24,19	40,24	25,29	33,96
Desvio Padrão	0,76	1,30	0,40	1,40	0,90	2,60	2,15	1,47	3,41

Valores de Ra para cada um dos provetes Schott6

Ra (µm)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
	1,420	1,079	1,216	1,349	1,267	1,495	1,842	1,240	1,230
	1,280	1,073	1,157	1,271	1,389	1,544	1,787	1,241	1,163
	1,455	1,080	1,115	1,225	1,195	1,561	1,796	1,228	1,176
	1,496	1,190	1,141	1,216	1,152	1,584	1,988	1,357	1,029
	1,290	1,026	1,257	1,283	1,168	1,410	1,968	1,383	1,149
Média	1,388	1,090	1,177	1,269	1,234	1,519	1,876	1,290	1,149
Desvio padrão	0,098	0,060	0,058	0,053	0,097	0,069	0,096	0,074	0,074

Valores de Rz para cada um dos provetes Schott6

Rz (µm)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
	11,120	8,789	9,234	11,420	10,120	12,520	12,810	8,937	10,270
	11,030	8,457	8,765	10,380	10,730	11,480	12,300	9,804	10,230
	10,980	7,835	8,230	10,380	10,510	11,820	11,440	8,296	10,170
	12,950	9,464	8,175	8,582	7,539	10,660	15,950	10,850	8,121
	8,914	8,703	10,300	11,190	9,042	9,179	13,750	10,270	10,960
Média	10,999	8,650	8,941	10,390	9,588	11,132	13,250	9,631	9,950
Desvio padrão	1,429	0,589	0,874	1,115	1,317	1,280	1,726	1,023	1,072

Forças de corte Schott6

Relação entre os ensaios de força e as razões sinal-ruído Schott6

Ensaio	Vf (mm/min)	Rotação (rpm)	Ap (mm)	Força (N)	S/N
E1	250	6000	0,05	13,95	-22,8926
E2	250	8000	0,0875	20,31	-26,1523
E3	250	10000	0,125	21,53	-26,6613
E4	500	6000	0,0875	30,60	-29,7156
E5	500	8000	0,125	27,88	-28,9070
E6	500	10000	0,05	24,19	-27,6737
E7	750	6000	0,125	40,24	-32,0927
E8	750	8000	0,05	25,29	-28,0606
E9	750	10000	0,0875	33,96	-30,6198

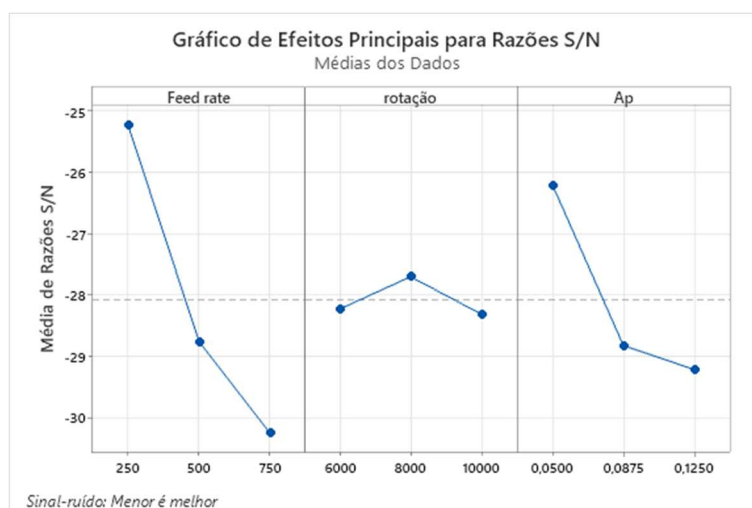


Gráfico curva de S/N de cada parâmetro para os ensaios de força resultante Schott6

Análise de variância da força Schott6

Fonte	GL	Soma dos quadrados	Quadrados médios	Valor F	Valor-P	Contribuição
Vf	2	324,01	162,004	21,45	0,045	66,07%
Rotação	2	21,39	10,694	1,42	0,414	4,36%
Ap	2	129,93	64,964	8,60	0,104	26,49%
Erro	2	15,11	7,553			3,08%
Total	8	490,43				100,00%

Força estimada método convencional Schott6

Resposta	Ajuste	EP do Ajustado	IC de 95%	IP de 95%
Força	11,36	2,42	(0,93; 21,79)	(-4,41; 27,12)

Rugosidade superficial Schott6

Relação entre a rugosidade superficial e as razões sinal-ruído Schott6

Ensaio	Vf (mm/min)	Rotação (rpm)	Ap (mm)	Ra (µm)	S/N
E1	250	6000	0,05	1,388	-2,84904
E2	250	8000	0,0875	1,090	-0,74534
E3	250	10000	0,125	1,177	-1,41701
E4	500	6000	0,0875	1,269	-2,06786
E5	500	8000	0,125	1,234	-1,82771
E6	500	10000	0,05	1,519	-3,63001
E7	750	6000	0,125	1,876	-5,46558
E8	750	8000	0,05	1,290	-2,21045
E9	750	10000	0,0875	1,149	-1,20942

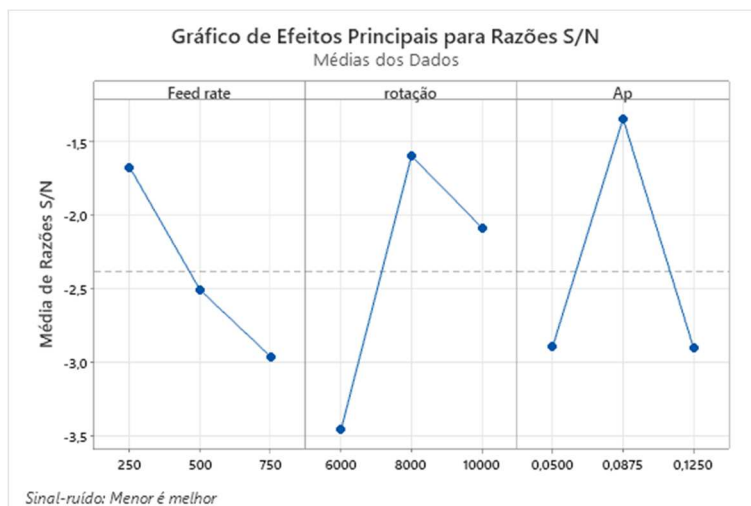


Gráfico Curva de S/N para cada parâmetro para rugosidade superficial Schott6

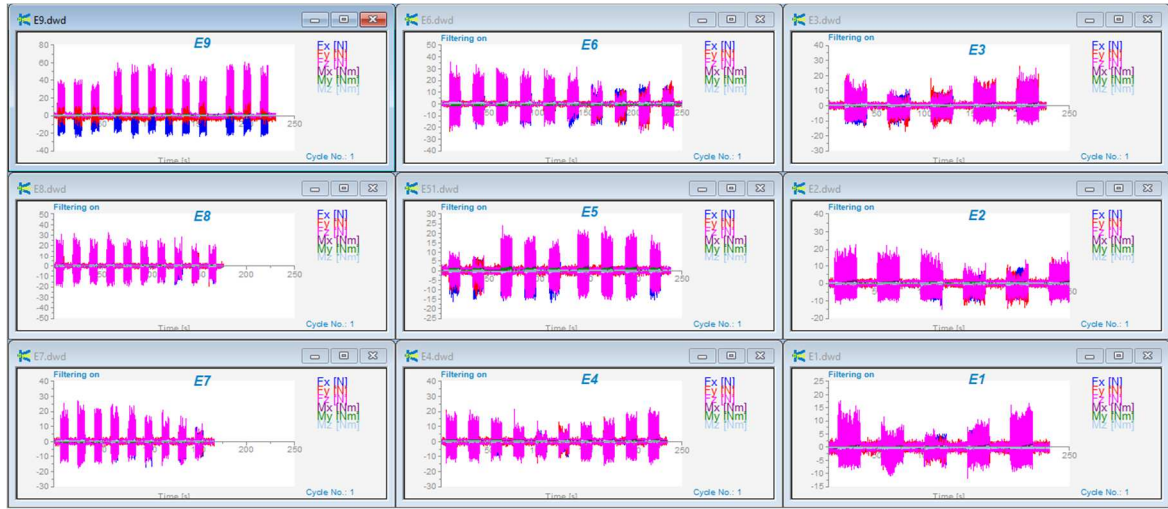
Análise de variância para rugosidade superficial Schott6

Fonte	GL	Soma dos quadrados	Quadrados médios	Valor F	Valor-P	Contribuição
Vf	2	0,07299	0,03649	0,61	0,620	15,68%
Rotação	2	0,15250	0,07625	1,28	0,438	32,75%
Ap	2	0,12123	0,06061	1,02	0,495	26,04%
Erro	2	0,11890	0,05945			25,54%
Total	8	0,46561				100,00%

Rugosidade estimada método convencional Schott6

Resposta	Ajuste	EP do		
		Ajustado	IC de 95%	IP de 95%
Ra	0,927	0,215	(0,002; 1,852)	(-0,472; 2,326)

Schott6U



DynoWare para os diferentes ensaios fresa Schott6U

Análise comparativa das componentes mínimas de forças resultantes de corte Schott6U

		Comparação das forças resultantes para as componentes negativas (N)								
		E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
		18,84	26,91	29,53	28,02	28,60	43,30	32,16	39,52	43,61
		19,05	27,03	29,78	28,42	28,69	44,33	32,71	39,52	44,19
		19,63	27,63	30,00	29,01	28,97	45,79	32,82	40,11	44,90
		19,74	28,16	30,52	29,18	29,22	44,53	32,96	40,44	45,11
		19,75	28,73	31,55	29,39	30,06	42,96	33,20	40,74	45,54
	Média	19,40	27,69	30,28	28,80	29,11	44,18	32,77	40,07	44,67
	Desvio Padrão	0,43	0,77	0,80	0,57	0,59	1,12	0,39	0,55	0,77

Análise comparativa das componentes máximas de forças resultantes de corte Schott6U

		Comparação das forças resultantes para as componentes positivas (N)								
		E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
		26,29	38,28	42,63	38,17	37,63	61,20	43,48	52,80	56,47
		27,23	38,84	43,18	38,67	37,95	64,52	44,23	53,24	57,34
		28,07	38,99	43,32	38,73	38,48	58,05	45,19	53,96	57,52
		28,26	39,00	44,29	39,39	38,86	56,05	46,40	54,08	58,00
		28,81	39,78	45,61	39,84	38,90	55,53	46,95	54,44	58,21
	Média	27,73	38,98	43,81	38,96	38,36	59,07	45,25	53,70	57,51
	Desvio Padrão	0,99	0,54	1,17	0,66	0,56	3,77	1,45	0,67	0,68

Valores de Ra para cada um dos provetes Schott6U

		Ra (µm)								
		E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
		1,147	1,133	1,157	1,067	0,886	1,272	1,029	0,920	1,117
		1,164	1,186	1,165	1,146	0,903	1,312	1,031	1,022	1,139
		1,188	1,197	1,169	1,211	0,943	1,378	1,035	1,088	1,181
		1,207	1,212	1,181	1,303	0,956	1,475	1,036	1,116	1,225
		1,226	1,224	1,198	1,310	0,983	1,648	1,072	1,151	1,226
	Média	1,186	1,190	1,174	1,207	0,934	1,417	1,041	1,059	1,178
	Desvio padrão	0,032	0,035	0,016	0,104	0,039	0,150	0,018	0,091	0,049

Valores de Rz para cada um dos provetes Schott6U

		Rz (µm)								
		E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
		7,714	9,558	9,75	10,58	6,74	8,50	7,62	7,26	8,93
		14,70	9,91	8,60	9,46	7,68	9,77	7,19	8,10	7,09
		9,85	8,92	8,85	8,32	6,57	9,73	8,27	7,63	13,55
		7,68	8,95	8,76	10,19	7,09	10,23	6,62	8,96	9,93
		9,25	8,79	8,31	9,09	6,96	12,70	7,26	8,84	11,30
	Média	9,84	9,23	8,85	9,53	7,01	10,19	7,39	8,16	10,16
	Desvio padrão	2,88	0,49	0,54	0,90	0,42	1,55	0,61	0,74	2,44

Força de corte Schott6U

Relação entre os ensaios de força e as razões sinal-ruído Schott6U

Ensaio	Vf (mm/min)	Ap (mm)	Força (N)	S/N
E1	250	0,05	27,73	-28,8590
E2	250	0,0875	38,98	-31,8168
E3	250	0,125	43,81	-32,8315
E4	500	0,05	38,96	-31,8124
E5	500	0,0875	38,36	-31,6776
E6	500	0,125	59,07	-35,4273
E7	750	0,05	45,25	-33,1124
E8	750	0,0875	53,70	-34,5995
E9	750	0,125	57,51	-35,1949

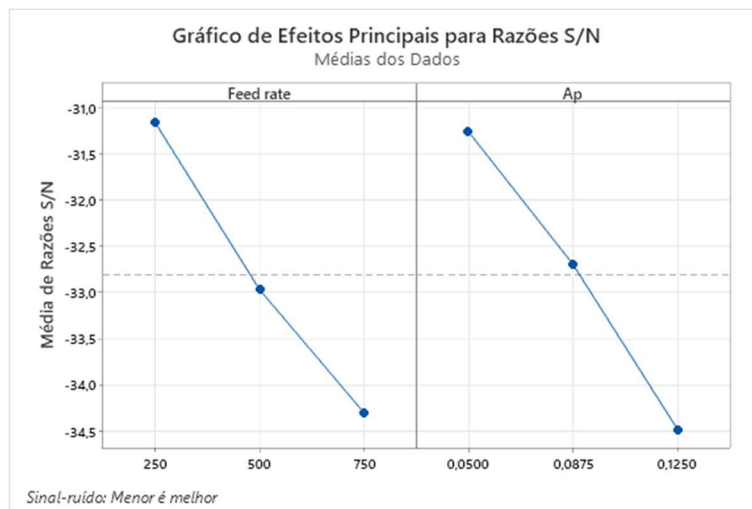


Gráfico curva de S/N para cada parâmetro para os ensaios de força resultante Schott6U

Análise de variância da força Schott6U

Fonte	GL	Soma dos quadrados	Quadrados médios	Valor F	Valor-P	Contribuição
Vf	2	353,62	176,81	7,39	0,045	41,78%
Ap	2	397,07	198,54	8,30	0,038	46,91%
Erro	2	95,72	23,93			11,31%
Total	8	846,40				100,00%

Força estimada método convencional Schott6U

Resposta	Ajuste	EP do Ajustado	IC de 95%	IP de 95%
Força	29,33	3,65	(19,21; 39,46)	(12,40; 46,27)

Rugosidade superficial Schott6U

Relação entre a rugosidade superficial e as razões sinal-ruído Schott6U

Ensaio	Vf (mm/min)	Ap (mm)	Ra (μm)	S/N
E1	250	0,05	1,186	-1,48462
E2	250	0,0875	1,190	-1,51386
E3	250	0,125	1,174	-1,39336
E4	500	0,05	1,207	-1,63702
E5	500	0,0875	0,934	0,59120
E6	500	0,125	1,417	-3,02740
E7	750	0,05	1,041	-0,34568
E8	750	0,0875	1,059	-0,50120
E9	750	0,125	1,178	-1,41996

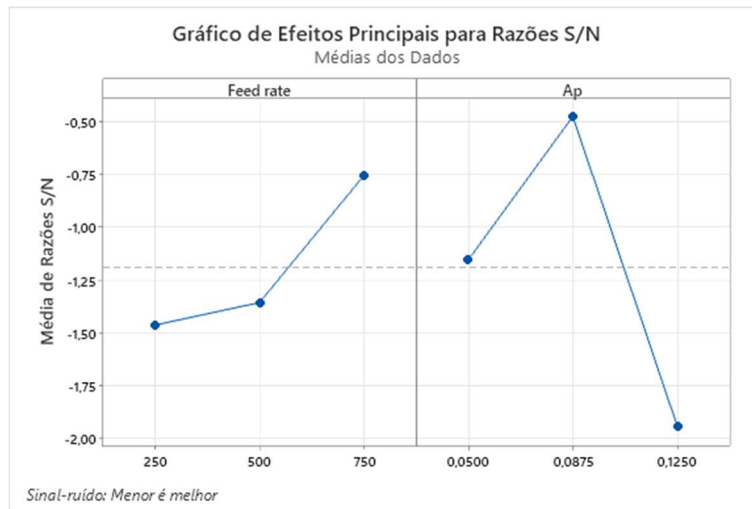


Gráfico Curva de S/N para cada parâmetro para rugosidade superficial Schott6U

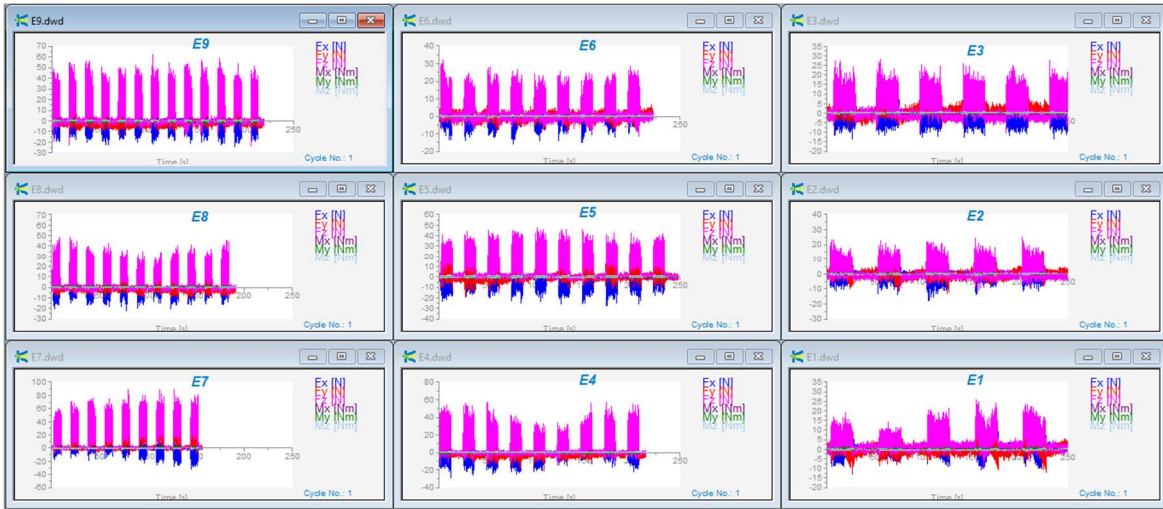
Análise de variância para rugosidade superficial Schott6U

Fonte	GL	Soma dos quadrados	Quadrados médios	Valor F	Valor-P	Contribuição
Vf	2	0,01707	0,008537	0,48	0,650	11,74%
Ap	2	0,05735	0,028675	1,61	0,306	39,42%
Erro	2	0,07105	0,017762			48,84%
Total	8	0,14547				100,00%

Rugosidade estimada método convencional Schott6U

Resposta	Ajuste	EP do		
		Ajustado	IC de 95%	IP de 95%
Ra	0,9998	0,0993	(0,7239; 1,2756)	(0,5382; 1,4613)

SchottHM10



Gráficos DynoWare para os diferentes ensaios fresa SchottHM10

Análise comparativa das componentes mínimas de forças resultantes de corte SchottHM10

Comparação das forças resultantes para as componentes negativas (N)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
	29,49	37,15	40,27	57,32	63,44	36,17	104,89	30,59	41,98
	28,02	35,96	42,15	52,16	63,67	29,11	81,12	32,01	46,17
	28,05	38,07	37,57	54,13	61,83	32,50	66,78	32,01	44,07
	27,71	38,22	39,43	62,14	54,84	30,06	64,52	34,80	40,41
	27,90	43,75	36,83	54,82	57,14	32,22	66,25	33,53	43,34
Média	28,23	38,63	39,25	56,11	60,18	32,01	76,71	32,59	43,19
Desvio Padrão	0,72	3,00	2,13	3,84	3,98	2,73	17,10	1,62	2,17

Análise comparativa das componentes máximas de forças resultantes de corte SchottHM10

Comparação das forças resultantes para as componentes positivas (N)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
	44,56	50,88	44,31	66,58	74,73	40,23	107,87	40,28	52,58
	42,46	54,33	47,29	64,56	72,80	41,91	105,95	31,02	60,67
	40,04	53,69	47,35	71,12	61,53	40,81	102,51	40,31	52,64
	39,34	55,25	52,82	66,57	64,07	44,85	102,71	40,57	47,72
	43,38	51,10	45,09	65,19	64,48	43,66	101,55	45,83	55,94
Média	41,96	53,05	47,37	66,80	67,52	42,29	104,12	39,60	53,91
Desvio Padrão	2,21	1,96	3,32	2,57	5,85	1,94	2,67	5,35	4,78

Valores de Ra para cada um dos provetes SchottHM10

Ra (µm)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
	1,663	1,382	1,437	1,410	1,638	1,639	1,920	1,593	1,398
	1,629	1,302	1,413	1,454	1,556	1,779	1,922	1,538	1,488
	1,625	1,373	1,412	1,512	1,493	1,712	1,890	1,464	1,552
	1,522	1,328	1,310	1,661	1,728	1,536	1,825	1,375	1,431
	1,680	1,431	1,375	1,512	1,690	1,682	1,832	1,399	1,480
Média	1,624	1,363	1,389	1,510	1,621	1,670	1,878	1,474	1,470
Desvio padrão	0,061	0,050	0,050	0,095	0,096	0,090	0,047	0,092	0,059

Valores de Rz para cada um dos provetes SchottHM10

Rz (µm)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
	11,940	11,450	12,130	8,093	11,710	11,250	13,900	11,190	9,335
	13,860	10,450	9,757	11,730	10,870	11,830	14,090	12,450	10,330
	11,170	9,808	10,800	10,640	12,110	11,870	13,490	11,620	11,760
	11,710	7,820	8,601	10,250	11,760	10,310	13,040	8,386	11,100
	11,210	11,660	9,515	10,640	11,630	10,750	10,770	9,482	10,160
Média	11,978	10,238	10,161	10,271	11,616	11,202	13,058	10,626	10,537
Desvio padrão	1,102	1,547	1,351	1,337	0,456	0,679	1,341	1,655	0,928

Forças de corte SchottHM10

Relação entre os ensaios de força e as razões sinal-ruído SchottHM10

Ensaio	Vf (mm/min)	Rotação (rpm)	Ap (mm)	Força (N)	S/N
E1	250	6000	0,05	41,96	-32,4559
E2	250	8000	0,125	53,05	-34,4938
E3	250	10000	0,2	47,37	-33,5104
E4	500	6000	0,05	66,80	-36,4956
E5	500	8000	0,125	67,52	-36,5891
E6	500	10000	0,2	42,29	-32,5254
E7	750	6000	0,05	104,12	-40,3505
E8	750	8000	0,125	39,60	-31,9541
E9	750	10000	0,2	53,91	-34,6334

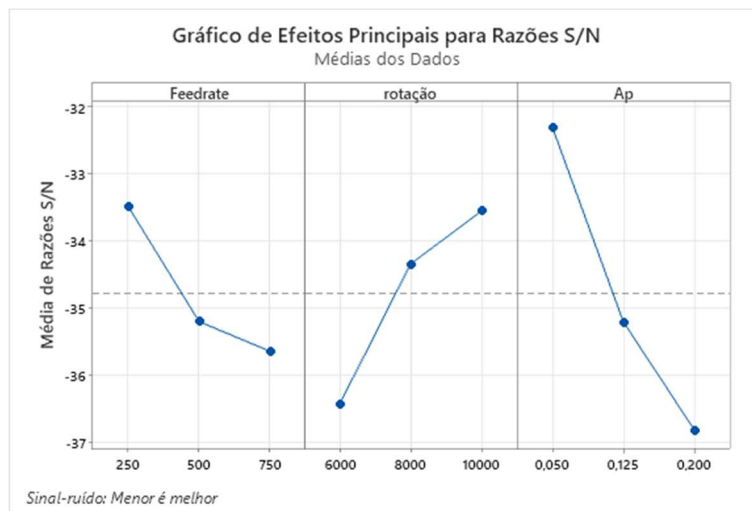


Gráfico curva de S/N de cada parâmetro para os ensaios de força resultante SchottHM10

Análise de variância da força SchottHM10

Fonte	GL	Soma dos quadrados	Quadrados médios	Valor F	Valor-P	Contribuição
Vf	2	518,5	259,2	1,34	0,427	15,77%
Rotação	2	872,8	436,4	2,26	0,307	26,54%
Ap	2	1510,5	755,3	3,91	0,204	45,93%
Erro	2	386,8	193,4			11,76%
Total	8	3288,6				100,00%

Força estimada método convencional SchottHM10

Resposta	Ajuste	EP do Ajustado	IC de 95%	IP de 95%
força	21,8	12,3	(-31,0; 74,6)	(-58,0; 101,6)

Rugosidade superficial SchottHM10

Relação entre a rugosidade superficial e as razões sinal-ruído SchottHM10

Ensaio	Vf (mm/min)	Rotação (rpm)	Ap (mm)	Ra (μm)	S/N
E1	250	6000	0,05	1,624	-4,21065
E2	250	8000	0,125	1,363	-2,69119
E3	250	10000	0,2	1,389	-2,85655
E4	500	6000	0,05	1,510	-3,57839
E5	500	8000	0,125	1,621	-4,19566
E6	500	10000	0,2	1,670	-4,45225
E7	750	6000	0,05	1,878	-5,47299
E8	750	8000	0,125	1,474	-3,36877
E9	750	10000	0,2	1,149	-3,34516

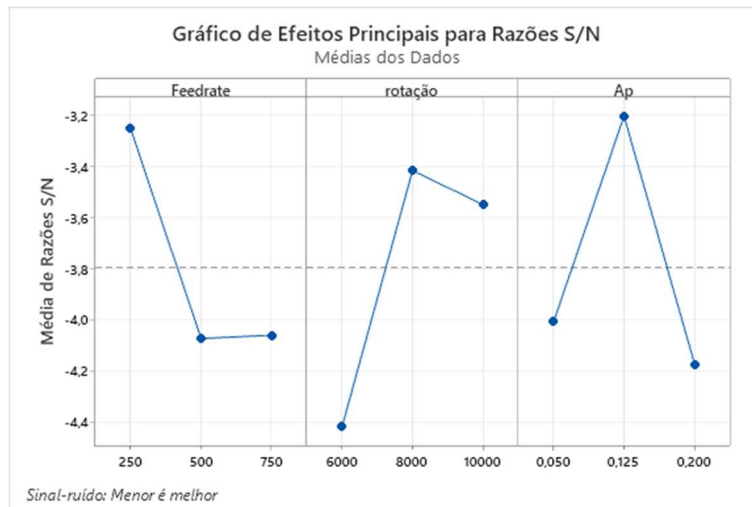


Gráfico Curva de S/N para cada parâmetro para rugosidade superficial SchottHM10

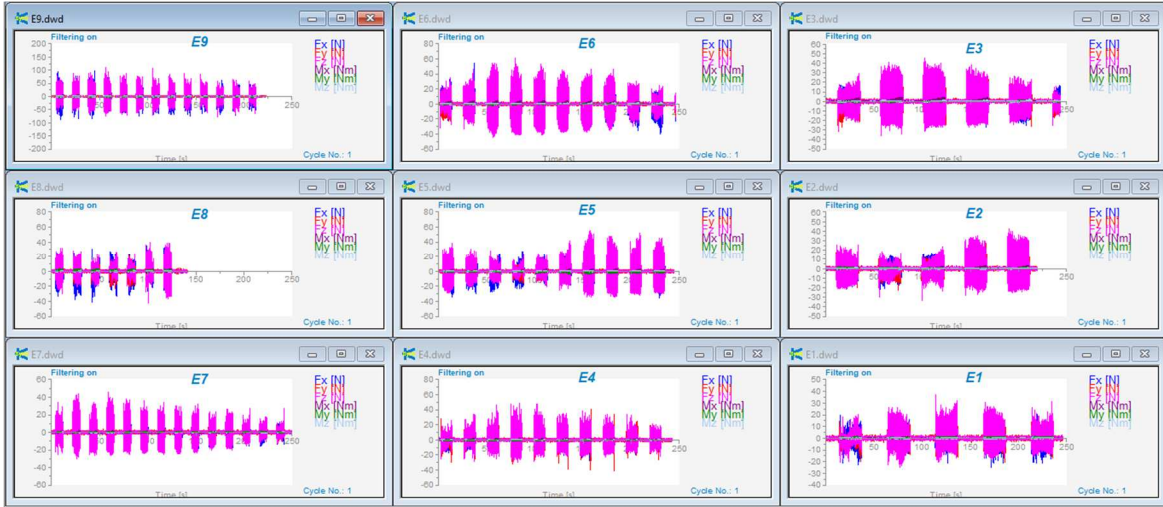
Análise de variância para rugosidade superficial SchottHM10

Fonte	GL	Soma dos quadrados	Quadrados médios	Valor F	Valor-P	Contribuição
Vf	2	0,04203	0,02101	0,85	0,540	20,35%
Rotação	2	0,06046	0,03023	1,23	0,449	29,28%
Ap	2	0,05469	0,02735	1,11	0,474	26,48%
Erro	2	0,04935	0,02467			23,89%
Total	8	0,20653				100,00%

Rugosidade estimada método convencional SchottHM10

Resposta	Ajuste	EP do Ajustado	IC de 95%	IP de 95%
Ra	1,282	0,139	(0,686; 1,878)	(0,381; 2,183)

SchottHM10U



DynoWare para os diferentes ensaios fresa SchottHM10U

Análise comparativa das componentes mínimas de forças resultantes de corte SchottHM10U

Comparação das forças resultantes para as componentes negativas (N)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
	34,60	40,80	57,37	71,35	49,16	60,03	57,03	62,59	59,53
	34,60	41,16	57,84	73,01	49,64	60,15	58,01	62,75	59,93
	34,72	42,21	58,57	73,29	51,08	60,24	58,31	63,43	60,46
	34,72	42,39	58,90	74,64	52,66	60,52	58,63	63,81	61,21
	36,11	44,86	59,67	75,06	53,25	60,64	59,90	63,95	63,14
Média	34,95	42,28	58,47	73,47	51,16	60,32	58,38	63,31	60,85
Desvio Padrão	0,65	1,59	0,90	1,47	1,80	0,26	1,04	0,61	1,42

Análise comparativa das componentes máximas de forças resultantes de corte SchottHM10U

Comparação das forças resultantes para as componentes Positivas (N)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
	25,94	35,53	55,92	50,40	50,75	55,87	44,35	62,43	58,65
	25,94	35,67	55,99	50,73	51,45	57,94	44,52	62,54	59,84
	25,95	36,06	56,17	51,91	51,49	58,42	44,94	63,29	59,95
	25,95	38,20	57,28	52,70	51,94	58,48	45,22	63,94	60,81
	27,39	42,56	58,10	54,99	52,00	58,49	45,73	64,50	62,00
Média	26,23	37,60	56,69	52,15	51,53	57,84	44,95	63,34	60,25
Desvio Padrão	0,65	2,97	0,96	1,84	0,50	1,12	0,55	0,89	1,24

Valores de Ra para cada um dos provetes SchottHM10U

Ra (µm)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
	1,760	1,145	1,160	1,296	1,477	1,515	1,372	1,329	1,277
	1,819	1,174	1,166	1,367	1,528	1,538	1,374	1,456	1,291
	1,886	1,231	1,167	1,666	1,863	1,591	1,521	1,554	1,309
	1,924	1,263	1,272	1,705	1,608	1,622	1,579	1,667	1,354
	2,038	1,276	1,289	1,843	1,934	1,624	1,583	1,768	1,372
Média	1,885	1,218	1,211	1,575	1,682	1,578	1,486	1,555	1,321
Desvio padrão	0,106	0,057	0,064	0,234	0,205	0,049	0,106	0,172	0,041

Valores de Rz para cada um dos provetes SchottHM10U

Rz (µm)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
	12,96	9,17	8,68	9,48	10,14	10,79	9,20	9,03	9,03
	13,43	8,74	9,00	8,61	10,31	9,76	9,63	10,14	9,83
	11,64	8,80	7,71	13,02	13,71	10,66	9,25	11,85	9,72
	13,54	8,89	9,50	13,42	12,78	11,57	10,52	12,87	9,37
	12,25	10,01	9,88	11,51	12,95	12,01	10,94	2,38	9,65
Média	12,76	9,12	8,95	11,21	11,98	10,96	9,91	9,26	9,52
Desvio padrão	0,81	0,52	0,83	2,12	1,64	0,87	0,78	4,12	0,32

Força de corte SchottHM10U

Relação entre os ensaios de força e as razões sinal-ruído SchottHM10U

Ensaio	Vf (mm/min)	Ap (mm)	Força (N)	S/N
E1	250	0,05	26,23	-28,3773
E2	250	0,125	37,60	-31,5047
E3	250	0,2	56,69	-35,0704
E4	500	0,05	52,15	-34,3444
E5	500	0,125	51,53	-34,2405
E6	500	0,2	57,84	-35,2446
E7	750	0,05	44,95	-33,0550
E8	750	0,125	63,34	-36,0336
E9	750	0,2	60,25	-35,5991

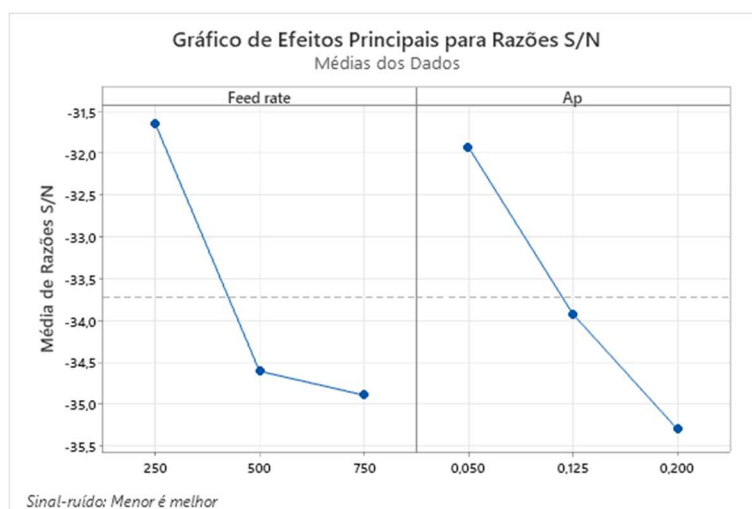


Gráfico curva de S/N para cada parâmetro para os ensaios de força resultante SchottHM10U

Análise de variância da força SchottHM10U

Fonte	GL	Soma dos quadrados	Quadrados médios	Valor F	Valor-P	Contribuição
Vf	2	448,2	224,12	3,61	0,127	39,31%
Ap	2	443,8	221,89	3,58	0,129	38,92%
Erro	2	248,1	62,03			21,76%
Total	8	1140,1				100,00%

Força estimada método convencional SchottHM10U

Resposta	Ajuste	EP do Ajustado	IC de 95%	IP de 95%
Força	31,22	5,87	(14,92; 47,52)	(3,95; 58,50)

Rugosidade superficial SchottHM10U

Relação entre a rugosidade superficial e as razões sinal-ruído SchottHM10U

Ensaio	Vf (mm/min)	Ap	Ra	S/N
E1	250	0,05	1,8850	-5,50623
E2	250	0,125	1,2180	-1,71295
E3	250	0,2	1,2108	-1,66145
E4	500	0,05	1,5754	-3,94782
E5	500	0,125	1,6820	-4,51652
E6	500	0,2	1,5780	-3,96214
E7	750	0,05	1,4858	-3,43921
E8	750	0,125	1,5548	-3,83349
E9	750	0,2	1,3206	-2,41543

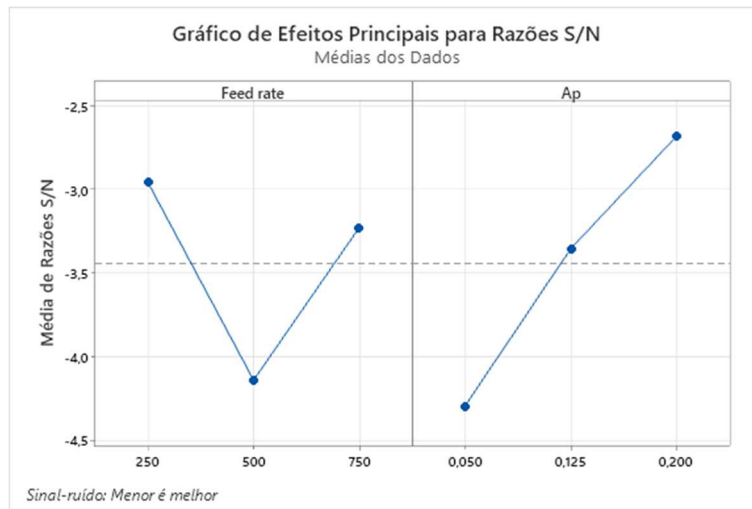


Gráfico Curva de S/N para cada parâmetro para rugosidade superficial SchottHM10U

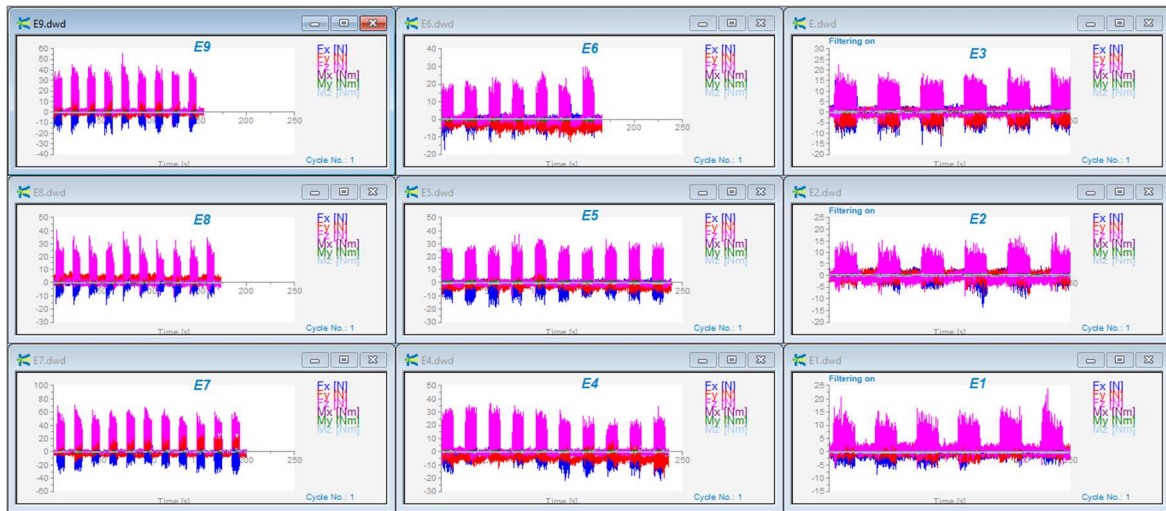
Análise de variância para rugosidade superficial SchottHM10U

Fonte	GL	Soma dos quadrados	Quadrados médios	Valor F	Valor-P	Contribuição
Vf	2	0,05546	0,02773	0,51	0,636	14,16%
Ap	2	0,11789	0,05894	1,08	0,422	30,10%
Erro	2	0,21830	0,05458			55,74%
Total	8	0,39166				100,00%

Rugosidade estimada método convencional SchottHM10U

Resposta	Ajuste	EP do Ajustado	IC de 95%	IP de 95%
Ra	1,307	0,174	(0,823; 1,790)	(0,498; 2,116)

SchottHM6



Gráficos DynoWare para os diferentes ensaios fresa SchottHM6

Análise comparativa das componentes mínimas de forças resultantes de corte SchottHM6

Comparação das forças resultantes para as componentes negativas (N)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
	26,09	28,95	24,70	53,42	60,73	31,37	76,17	56,32	43,50
	27,99	27,75	26,62	58,73	45,65	31,03	59,27	59,51	63,95
	26,21	31,38	24,64	54,15	47,30	32,89	70,79	66,26	55,46
	27,56	27,21	25,61	53,78	47,13	33,49	78,50	56,10	53,55
	29,85	32,32	26,60	49,64	48,27	27,93	65,21	64,65	58,49
Média	27,54	29,52	25,64	53,94	49,82	31,34	69,99	60,57	54,99
Desvio Padrão	1,53	2,24	0,97	3,23	6,17	2,16	7,89	4,69	7,53

Análise comparativa das componentes máximas de forças resultantes de corte SchottHM6

Comparação das forças resultantes para as componentes positivas (N)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
	36,88	37,27	31,09	60,96	60,62	35,71	84,82	70,84	52,12
	39,82	37,84	30,34	62,75	57,87	40,51	76,15	61,23	63,60
	33,67	42,14	33,00	63,23	54,32	42,30	80,60	70,05	59,43
	35,46	35,53	30,63	58,80	58,43	40,53	89,39	77,30	79,06
	41,03	37,30	30,72	63,39	57,83	40,47	89,49	81,35	83,82
Média	37,37	38,01	31,15	61,83	57,81	39,90	84,09	72,16	67,61
Desvio Padrão	3,04	2,46	1,07	1,95	2,26	2,47	5,77	7,69	13,39

Valores de Ra para cada um dos provetes SchottHM6

Ra (µm)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
	1,236	0,910	0,858	1,487	1,720	1,828	1,959	1,509	1,661
	1,403	0,832	0,767	1,577	1,524	1,810	1,800	1,430	1,489
	1,266	0,992	0,838	1,428	1,654	1,681	1,747	1,394	1,638
	1,380	0,833	0,986	1,456	1,648	1,698	1,894	1,589	1,614
	1,340	1,000	0,776	1,583	1,587	1,647	1,868	1,401	1,512
Média	1,325	0,913	0,845	1,506	1,627	1,733	1,854	1,465	1,583
Desvio padrão	0,072	0,082	0,088	0,071	0,074	0,081	0,082	0,083	0,077

Valores de Rz para cada um dos provetes SchottHM6

Rz (µm)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
	10,200	7,750	7,765	11,280	11,390	12,090	14,660	10,750	11,100
	7,367	7,398	7,160	11,830	11,060	12,140	14,340	10,630	10,470
	10,610	9,816	7,347	10,650	12,050	12,450	13,290	9,539	10,470
	11,560	7,292	8,882	10,200	9,703	12,370	13,520	10,820	9,878
	9,804	8,234	6,101	11,730	12,810	10,690	13,950	10,010	
Média	9,908	8,098	7,451	11,138	11,403	11,948	13,952	10,350	8,384
Desvio padrão	1,563	1,028	1,008	0,701	1,163	0,719	0,565	0,555	0,499

Forças de corte SchottHM6

Relação entre os ensaios de força e as razões sinal-ruído SchottHM6

Ensaio	Vf (mm/min)	Rotação (rpm)	Ap (mm)	Força (N)	S/N
E1	250	6000	0,05	37,37	-31,4505
E2	250	8000	0,125	38,01	-31,5980
E3	250	10000	0,2	31,15	-29,8692
E4	500	6000	0,125	61,83	-35,8240
E5	500	8000	0,2	57,81	-35,2401
E6	500	10000	0,05	39,90	-32,0195
E7	750	6000	0,2	84,09	-38,4949
E8	750	8000	0,05	72,16	-37,1659
E9	750	10000	0,125	67,61	-36,6002

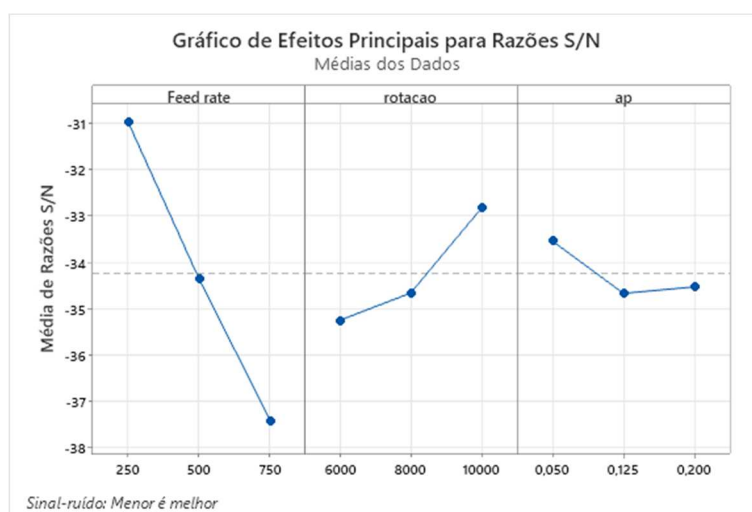


Gráfico curva de S/N de cada parâmetro para os ensaios de força resultante SchottHM6

Análise de variância da força SchottHM6

Fonte	GL	Soma dos quadrados	Quadrados médios	Valor F	Valor-P	Contribuição
Vf	2	2301,49	1150,75	1294,09	0,001	83,76%
Rotação	2	342,88	171,44	192,79	0,005	12,48%
Ap	2	101,55	50,78	57,10	0,017	3,70%
Erro	2	1,78	0,89			0,06%
Total	8	2747,70				100,00%

Força estimada método convencional SchottHM6

Resposta	Ajuste	EP do Ajustado	IC de 95%	IP de 95%
Força	22,667	0,832	(19,088; 26,245)	(17,257; 28,076)

Rugosidade superficial SchottHM6

Relação entre a rugosidade superficial e as razões sinal-ruído SchottHM6

Ensaio	Vf (mm/min)	Rotação (rpm)	Ap (mm)	Ra (µm)	S/N
E1	250	6000	0,05	1,325	-2,44432
E2	250	8000	0,125	0,913	0,78678
E3	250	10000	0,2	0,845	1,46287
E4	500	6000	0,125	1,506	-3,55765
E5	500	8000	0,2	1,627	-4,22562
E6	500	10000	0,05	1,733	-4,77497
E7	750	6000	0,2	1,854	-5,36032
E8	750	8000	0,05	1,465	-3,31438
E9	750	10000	0,125	1,583	-3,98852

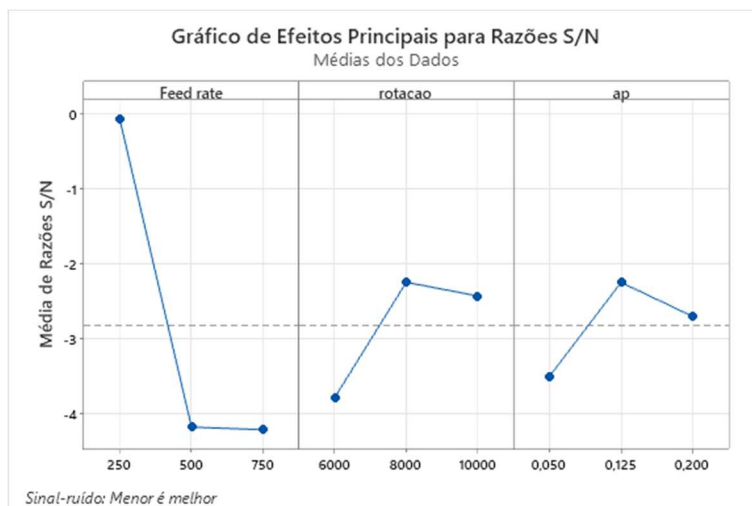


Gráfico Curva de S/N para cada parâmetro para rugosidade superficial SchottHM6

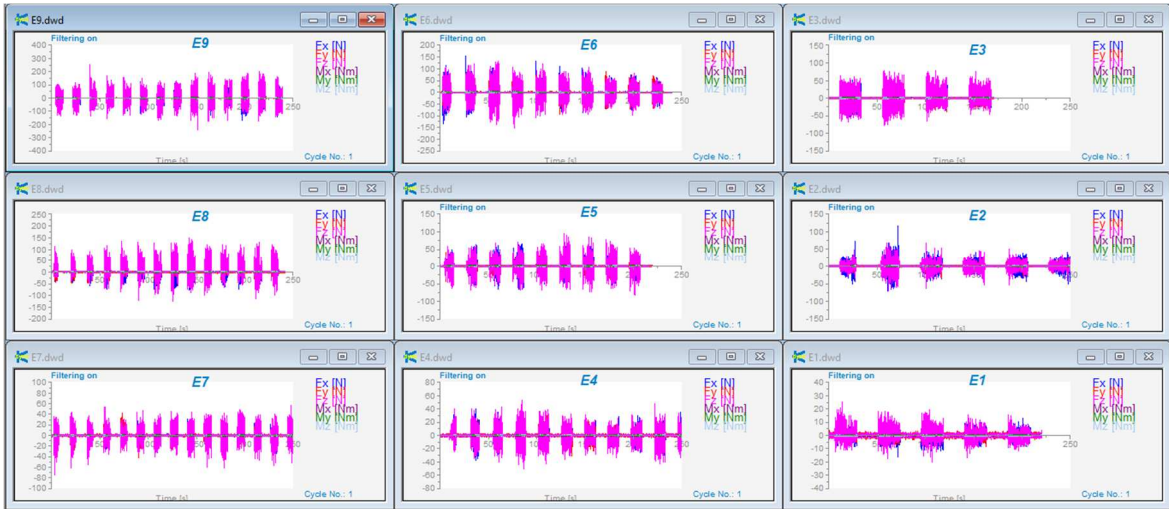
Análise de variância para rugosidade superficial SchottHM6

Fonte	GL	Soma dos quadrados	Quadrados médios	Valor F	Valor-P	Contribuição
Vf	2	0,72013	0,36006	6,58	0,132	75,00%
Rotação	2	0,08464	0,04232	0,77	0,564	8,82%
Ap	2	0,04594	0,02297	0,42	0,704	4,78%
Erro	2	0,10949	0,05475			11,40%
Total	8	0,96021				100,00%

Rugosidade estimada método convencional SchottHM6

Resposta	Ajuste	EP do Ajustado	IC de 95%	IP de 95%
Ra	0,841	0,206	(-0,047; 1,729)	(-0,501; 2,184)

SchottHM6U



DynoWare para os diferentes ensaios fresa SchottHM6U

Análise comparativa das componentes mínimas de forças resultantes de corte SchottHM6U

		Comparação das forças resultantes para as componentes negativas (N)								
		E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
		18,05	18,90	19,35	17,41	55,86	58,92	54,12	49,19	64,66
		18,33	19,28	19,49	18,40	57,90	60,62	54,94	51,22	64,93
		18,93	20,04	19,67	18,61	59,31	62,01	55,34	57,73	65,17
		19,10	20,14	20,13	18,81	60,05	63,06	58,11	68,28	66,84
		19,44	20,23	20,14	19,43	60,15	64,95	61,88	77,38	66,98
	Média	18,77	19,72	19,76	18,53	58,65	61,91	56,88	60,76	65,72
	Desvio Padrão	0,57	0,59	0,36	0,74	1,80	2,30	3,17	11,90	1,11

Análise comparativa das componentes máximas de forças resultantes de corte SchottHM6U

		Comparação das forças resultantes para as componentes positivas (N)								
		E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
		23,23	19,78	20,79	18,27	63,47	68,28	55,99	58,18	66,81
		23,52	21,39	21,51	18,74	63,64	69,36	56,64	59,31	68,54
		23,68	21,64	21,94	19,39	64,35	71,15	56,97	60,65	69,00
		23,68	21,66	22,00	19,97	64,44	71,98	59,44	87,41	69,57
		23,90	22,87	22,21	20,81	66,29	79,51	59,71	87,90	69,97
	Média	23,60	21,47	21,69	19,44	64,44	72,06	57,75	70,69	68,78
	Desvio Padrão	0,25	1,11	0,56	1,00	1,12	4,41	1,71	15,51	1,23

Valores de Ra para cada um dos provetes SchottHM6U

		Ra (µm)								
		E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
		1,808	1,409	1,829	1,296	2,328	2,641	1,576	1,460	2,787
		1,875	1,451	1,850	1,330	2,487	2,756	1,618	1,500	3,377
		1,898	1,517	1,899	1,362	2,533	2,898	1,646	1,568	3,492
		1,993	1,568	1,999	1,396	2,543	3,204	1,676	1,572	3,583
		2,202	1,736	2,113	1,447	2,709	3,567	1,767	1,669	3,657
	Média	1,955	1,536	1,938	1,366	2,520	3,013	1,657	1,554	3,379
	Desvio padrão	0,153	0,127	0,118	0,058	0,136	0,375	0,072	0,080	0,347

Valores de Rz para cada um dos provetes SchottHM6U

		Rz (µm)								
		E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
		12,14	9,70	13,62	9,48	16,97	20,12	12,52	9,02	20,36
		12,50	9,25	2,51	11,47	14,55	19,69	10,68	10,45	23,52
		11,84	10,86	12,91	9,10	14,97	19,02	14,22	11,71	21,08
		14,64	11,05	15,09	9,48	19,80	21,40	14,20	10,88	21,79
		16,65	10,83	15,96	9,03	18,18	24,40	11,55	12,03	28,00
	Média	13,55	10,34	12,02	9,71	16,89	20,93	12,63	10,82	22,95
	Desvio padrão	2,05	0,81	5,45	1,00	2,20	2,13	1,58	1,19	3,06

Força de corte SchottHM6U

Relação entre os ensaios de força e as razões sinal-ruído SchottHM6U

Ensaio	Vf (mm/min)	Ap (mm)	Força (N)	S/N
E1	250	0,05	23,60	-27,4590
E2	250	0,0875	21,47	-26,6358
E3	250	0,125	21,69	-26,7252
E4	500	0,05	19,44	-25,7721
E5	500	0,0875	64,44	-36,1828
E6	500	0,125	72,06	-37,1534
E7	750	0,05	57,75	-35,2310
E8	750	0,0875	70,69	-36,9872
E9	750	0,125	68,78	-36,7490

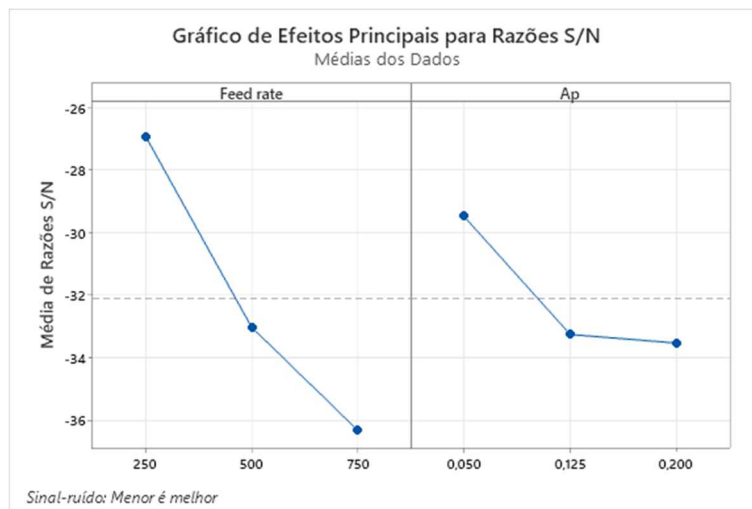


Gráfico curva de S/N para cada parâmetro para os ensaios de força resultante SchottHM6U

Análise de variância da força SchottHM6U

Fonte	GL	Soma dos quadrados	Quadrados médios	Valor F	Valor-P	Contribuição
Vf	2	2963,9	1482,0	6,28	0,058	63,31%
Ap	2	773,4	386,7	1,64	0,302	16,52%
Erro	2	944,2	236,1			20,17%
Total	8	4681,6				100,00%

Força estimada método convencional SchottHM6U

Resposta	Ajuste	EP do		
		Ajustado	IC de 95%	IP de 95%
Força	9,2	11,5	(-22,6; 41,0)	(-44,0; 62,4)

Rugosidade superficial SchottHM6U

Relação entre a rugosidade superficial e as razões sinal-ruído SchottHM6U

Ensaio	Vf (mm/min)	Ap (mm)	Ra (µm)	S/N
E1	250	0,05	1,955	-5,8238
E2	250	0,125	1,536	-3,7290
E3	250	0,2	1,938	-5,7471
E4	500	0,05	1,366	-2,7103
E5	500	0,125	2,520	-8,0280
E6	500	0,2	3,013	-9,5806
E7	750	0,05	1,657	-4,3844
E8	750	0,125	1,554	-3,8279
E9	750	0,2	3,379	-10,5763

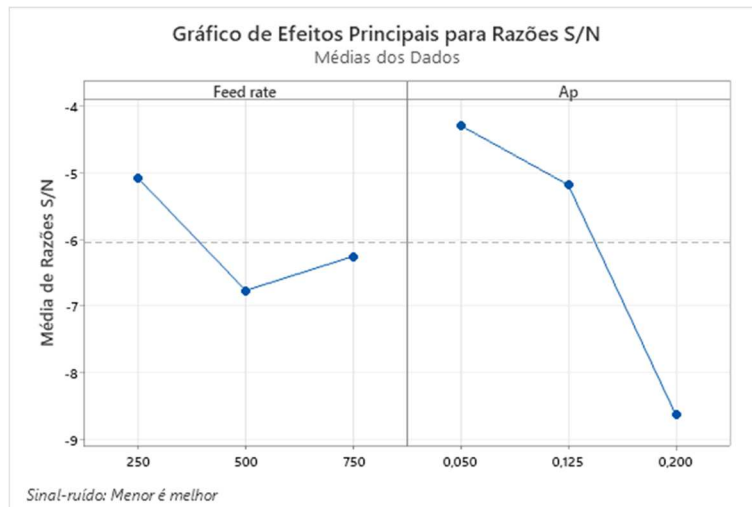


Gráfico Curva de S/N para cada parâmetro para rugosidade superficial SchottHM6U

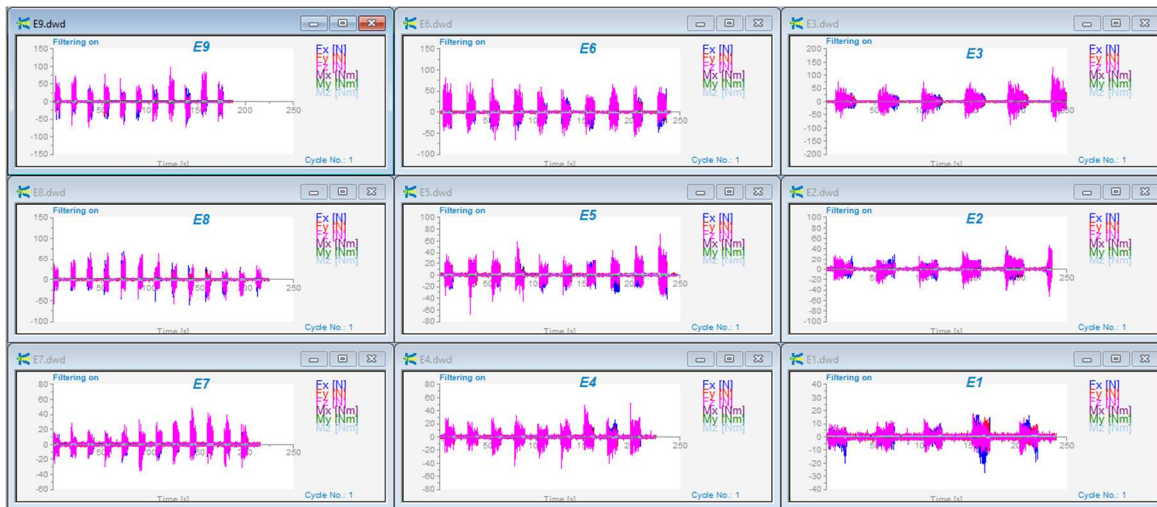
Análise de variância para rugosidade superficial SchottHM6U

Fonte	GL	Soma dos quadrados	Quadrados médios	Valor F	Valor-P	Contribuição
Vf	2	0,4003	0,2002	0,52	0,628	9,90%
Ap	2	2,1154	1,0577	2,77	0,176	52,29%
Erro	2	1,5294	0,3824			37,81%
Total	8	4,0451				100,00%

Rugosidade estimada método convencional SchottHM6U

Resposta	Ajuste	EP do		
		Ajustado	IC de 95%	IP de 95%
Ra	1,367	0,461	(0,087; 2,647)	(-0,774; 3,508)

Besdia10



Gráficos DynoWare para os diferentes ensaios fresa Besdia10

Análise comparativa das componentes mínimas de forças resultantes de corte Besdia10

Comparação das forças resultantes para as componentes negativas (N)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
	42,55	86,05	144,78	66,24	84,38	110,24	65,02	100,80	138,58
	42,59	90,08	154,47	66,61	87,69	112,05	65,49	103,78	140,28
	44,05	91,25	163,78	67,36	90,17	113,84	67,62	106,27	145,87
	44,16	94,36	167,49	67,70	90,36	116,36	71,12	108,18	146,03
	45,93	98,20	167,58	69,93	95,65	116,82	71,40	114,04	151,77
Média	43,86	91,99	159,62	67,57	89,65	113,86	68,13	106,61	144,51
Desvio Padrão	1,39	4,57	9,87	1,44	4,13	2,80	3,02	4,99	5,24

Análise comparativa das componentes máximas de forças resultantes de corte Besdia10

Comparação das forças resultantes para as componentes positivas (N)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
	44,24	86,11	160,52	73,95	94,70	134,89	64,03	116,19	162,87
	43,40	96,24	163,52	74,80	99,66	135,15	67,49	117,08	155,25
	46,06	97,59	173,32	75,34	101,55	136,15	69,36	119,43	166,49
	46,07	101,57	181,20	75,43	102,43	136,49	72,61	120,42	163,30
	44,89	102,66	185,09	75,54	108,63	137,42	73,20	126,76	163,39
Média	44,93	96,83	172,73	75,01	101,39	136,02	69,34	119,98	162,26
Desvio Padrão	1,16	6,56	10,71	0,66	5,03	1,03	3,78	4,16	4,18

Valores de Ra para cada um dos provetes Besdia10

Ra (µm)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
	1,496	1,782	2,096	1,671	1,859	2,235	2,043	2,588	2,907
	1,559	1,797	2,151	1,759	2,021	2,279	2,157	2,598	2,925
	1,562	1,807	2,175	1,798	2,068	2,354	2,185	2,908	2,937
	1,589	1,829	2,268	1,830	2,088	2,418	2,217	2,914	3,086
	1,624	2,022	2,322	1,959	2,315	2,514	2,372	2,926	3,099
Média	1,566	1,847	2,202	1,803	2,070	2,360	2,195	2,787	2,991
Desvio padrão	0,047	0,099	0,091	0,105	0,164	0,111	0,119	0,177	0,094

Valores de Rz para cada um dos provetes Besdia10

Rz (µm)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
	10,82	10,70	14,03	11,83	11,16	14,17	14,30	16,44	18,05
	12,28	10,60	14,19	11,70	13,12	13,83	13,13	14,55	19,24
	10,23	11,27	15,03	13,37	12,99	12,78	14,70	16,61	19,12
	11,38	12,14	13,94	12,76	12,90	13,98	12,26	18,45	18,02
	10,92	13,95	12,95	11,85	12,44	17,68	13,23	16,39	17,39
Média	11,13	11,73	14,03	12,30	12,52	14,49	13,52	16,49	18,36
Desvio padrão	0,76	1,38	0,74	0,73	0,80	1,86	0,98	1,38	0,79

Forças de corte Besdia10

Relação entre os ensaios de força e as razões sinal-ruído Besdia10

Ensaio	Vf (mm/min)	Ap (mm)	Força (N)	S/N
E1	250	0,05	44,93	-33,0511
E2	250	0,125	96,83	-39,7206
E3	250	0,2	172,73	-44,7474
E4	500	0,05	75,01	-37,5026
E5	500	0,125	101,39	-40,1202
E6	500	0,2	136,02	-42,6721
E7	750	0,05	69,34	-36,8194
E8	750	0,125	119,98	-41,5819
E9	750	0,2	162,26	-44,2042

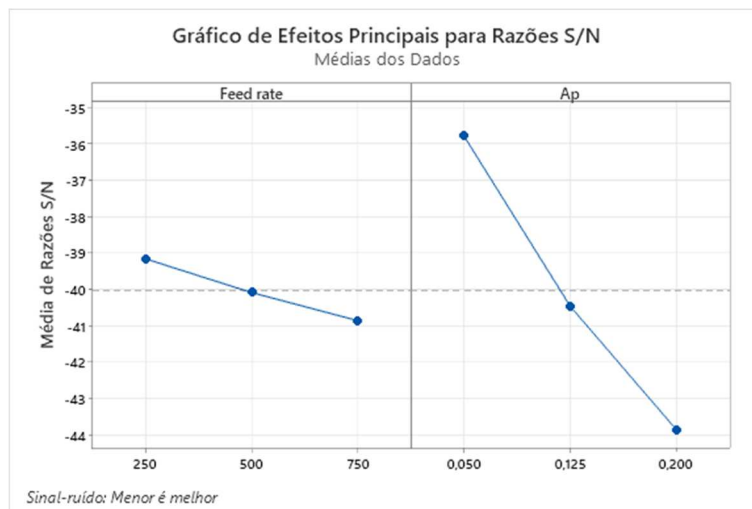


Gráfico curva de S/N de cada parâmetro para os ensaios de força resultante Besdia10

Análise de variância da força Besdia10

Fonte	GL	Soma dos quadrados	Quadrados médios	Valor F	Valor-P	Contribuição
Vf	2	323,5	161,8	0,54	0,621	2,19%
Ap	2	13260,1	6630,1	22,04	0,007	89,68%
Erro	2	1203,2	300,8			8,14%
Total	8	14786,8				100,00%

Força estimada método convencional Besdia10

Resposta	Ajuste	EP do Ajustado	IC de 95%	IP de 95%
Força	58,5	12,9	(22,6; 94,4)	(-1,5; 118,6)

Rugosidade superficial Besdia10

Relação entre a rugosidade superficial e as razões sinal-ruído Besdia10

Ensaio	Vf (mm/min)	Ap (mm)	Ra (μm)	S/N
E1	250	0,05	1,566	-3,89584
E2	250	0,125	1,847	-5,33122
E3	250	0,2	2,202	-6,85792
E4	500	0,05	1,803	-5,12184
E5	500	0,125	2,070	-6,32025
E6	500	0,2	2,360	-7,45824
E7	750	0,05	2,195	-6,82790
E8	750	0,125	2,787	-8,90212
E9	750	0,2	2,991	-9,51575

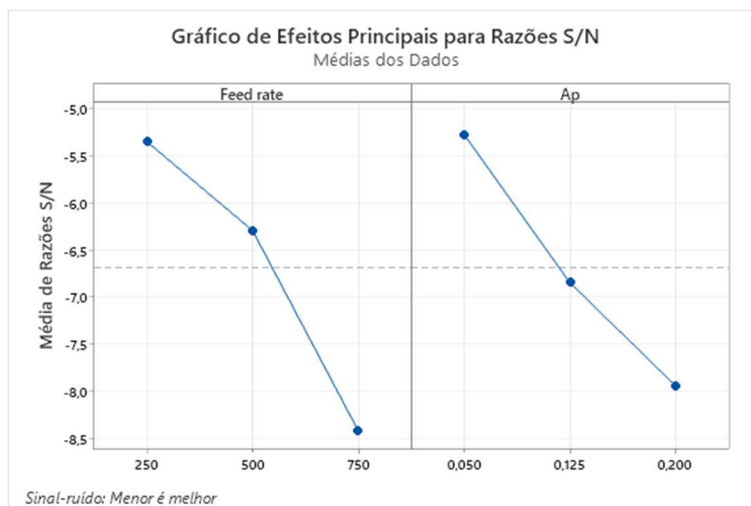


Gráfico Curva de S/N para cada parâmetro para rugosidade superficial Besdia10

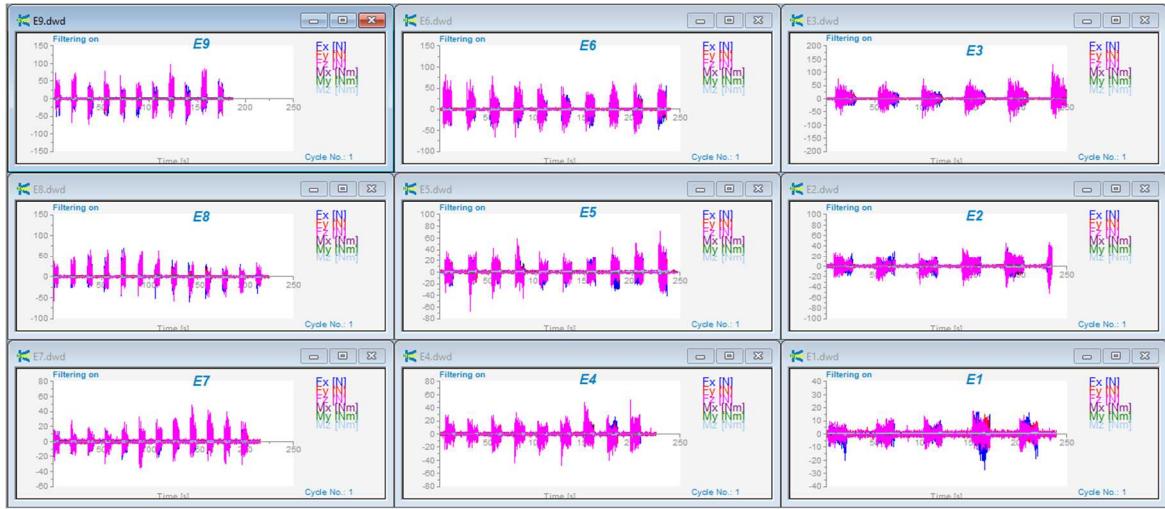
Análise de variância para rugosidade superficial Besdia10

Fonte	GL	Soma dos quadrados	Quadrados médios	Valor F	Valor-P	Contribuição
Vf	2	0,99541	0,497704	54,96	0,001	58,70%
Ap	2	0,66407	0,332035	36,67	0,003	39,16%
Erro	2	0,03622	0,009056			2,14%
Total	8	1,69570				100,00%

Rugosidade estimada método convencional Besdia10

Resposta	Ajuste	EP do Ajustado	IC de 95%	IP de 95%
Ra	1,5242	0,0709	(1,3273; 1,7212)	(1,1947; 1,8538)

Besdia10U



DynoWare para os diferentes ensaios fresa Besdia10U

Análise comparativa das componentes mínimas de forças resultantes de corte Besdia10U

Comparação das forças resultantes para as componentes negativas (N)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
	23,48	66,30	489,66	41,58	184,79	667,22	47,30	92,19	777,62
	23,48	73,56	518,68	43,24	184,87	678,41	47,40	93,4	802,18
	25,20	85,31	519,95	43,48	187,95	690,89	48,67	97,06	819,55
	25,20	89,85	555,31	44,48	196,94	698,57	49,97	97,88	831,89
	25,50	92,85	567,53	45,46	200,1	710,85	50,96	98,82	844,51
Média	24,57	81,57	530,23	43,65	190,93	689,19	48,86	95,87	815,15
Desvio Padrão	1,00	11,26	31,25	1,45	7,13	17,02	1,60	2,91	26,16

Análise comparativa das componentes máximas de forças resultantes de corte Besdia10U

Comparação das forças resultantes para as componentes positivas (N)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
	24,10	75,85	503,39	43,13	192,91	639,56	47,99	98,23	836,13
	24,10	78,51	506,94	43,61	194,1	657,00	48,31	99,80	844,58
	27,11	89,60	528,79	43,85	197,23	657,22	49,56	101,54	848,07
	27,11	103,68	564,48	44,24	198,88	687,01	49,73	104,76	854,32
	28,70	106,73	586,80	46,91	202,6	690,56	50,65	108,68	872,94
Média	26,22	90,87	538,08	44,35	197,14	666,27	49,25	102,60	851,21
Desvio Padrão	2,04	14,10	36,50	1,49	3,87	21,80	1,09	4,17	13,81

Valores de Ra para cada um dos provetes Besdia10U

Ra (µm)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
	1,527	1,733	2,179	2,335	2,630	2,646	2,462	2,809	3,635
	1,798	1,815	2,200	2,553	2,743	2,901	2,608	2,824	3,657
	1,834	1,839	2,520	2,558	2,764	2,955	2,634	2,865	3,673
	1,852	1,896	2,612	2,625	2,911	3,142	2,869	2,935	3,780
	1,989	1,909	2,644	2,677	2,975	3,351	2,876	3,133	3,848
Média	1,800	1,838	2,431	2,550	2,805	2,999	2,690	2,913	3,719
Desvio padrão	0,169	0,071	0,225	0,130	0,138	0,265	0,179	0,132	0,091

Valores de Rz para cada um dos provetes Besdia10

Rz (µm)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
	11,94	10,59	13,83	15,44	14,54	17,25	13,62	17,29	21,10
	12,07	13,43	13,60	15,86	16,23	19,45	16,80	17,20	19,90
	12,01	11,66	16,05	17,83	18,72	16,71	16,96	16,19	21,61
	12,35	15,40	19,71	14,88	18,76	18,91	17,25	15,76	25,74
	15,88	12,64	17,28	17,39	18,43	19,21	17,71	16,92	22,60
Média	12,85	12,74	16,09	16,28	17,34	18,31	16,47	16,67	22,19
Desvio padrão	1,70	1,83	2,54	1,27	1,88	1,24	1,63	0,67	2,21

Força de corte Besdia10U

Relação entre os ensaios de força e as razões sinal-ruído Besdia10U

Ensaio	Vf (mm/min)	Ap (mm)	Força (N)	S/N
E1	250	0,05	26,22	-28,3740
E2	250	0,125	90,87	-39,1688
E3	250	0,2	538,08	-54,6169
E4	500	0,05	44,35	-32,9375
E5	500	0,125	197,14	-45,8957
E6	500	0,2	666,27	-56,4730
E7	750	0,05	49,25	-33,8478
E8	750	0,125	102,60	-40,2231
E9	750	0,2	851,21	-58,6007

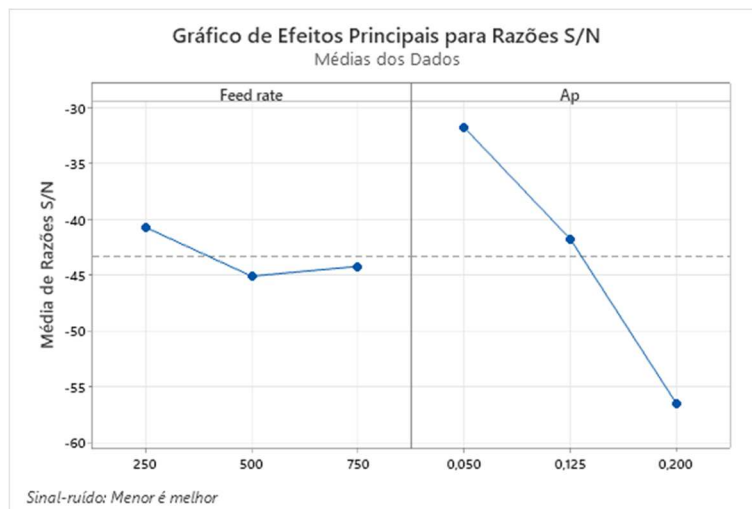


Gráfico curva de S/N para cada parâmetro para os ensaios de força resultante Besdia10U

Análise de variância da força Besdia10U

Fonte	GL	Soma dos quadrados	Quadrados médios	Valor F	Valor-P	Contribuição
Vf	2	21544	10772	1,23	0,384	2,73%
Ap	2	732493	366246	41,74	0,002	92,82%
Erro	2	35101	8775			4,45%
Total	8	789138				100,00%

Força estimada método convencional Besdia10U

Resposta	Ajuste	EP do Ajustado	IC de 95%	IP de 95%
Força	-26,8	69,8	(-220,6; 167,1)	(-351,2; 297,6)

Rugosidade superficial Besdia10U

Relação entre a rugosidade superficial e as razões sinal-ruído Besdia10U

Ensaio	Vf (mm/min)	Ap (mm)	Ra (μm)	S/N
E1	250	0,05	1,800	-5,1055
E2	250	0,0875	1,838	-5,2888
E3	250	0,125	2,431	-7,7157
E4	500	0,05	2,550	-8,1294
E5	500	0,0875	2,805	-8,9574
E6	500	0,125	2,999	-9,5395
E7	750	0,05	2,690	-8,5944
E8	750	0,0875	2,913	-9,2874
E9	750	0,125	3,719	-11,4076

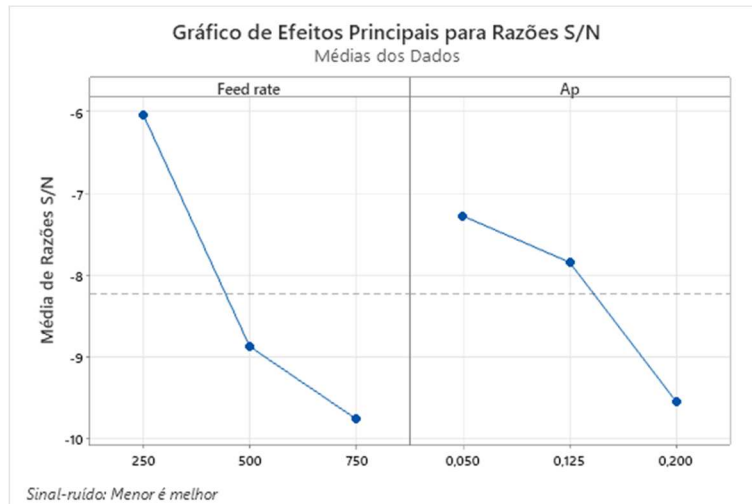


Gráfico Curva de S/N para cada parâmetro para rugosidade superficial Besdia10U

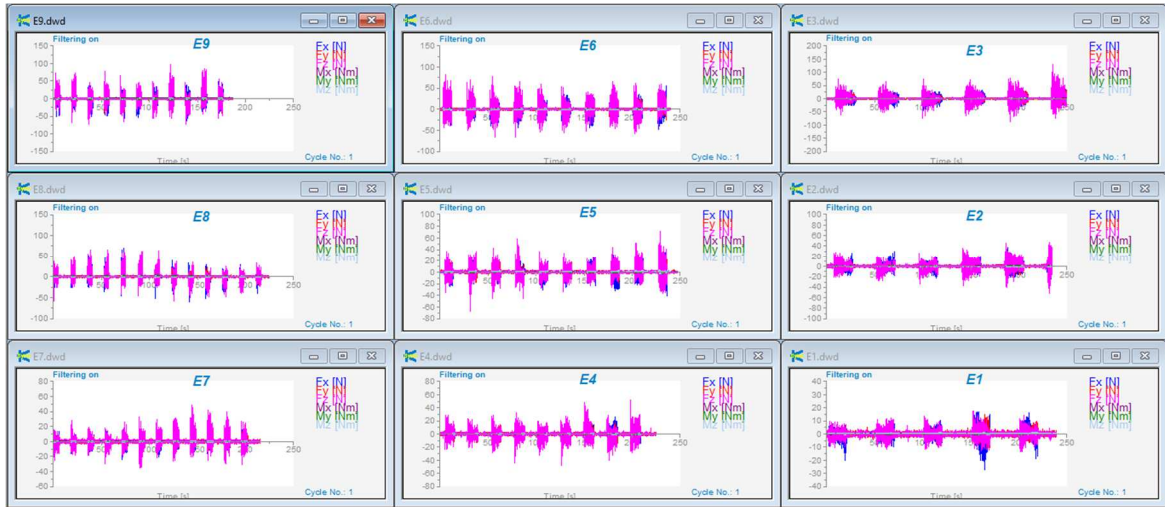
Análise de variância para rugosidade superficial Besdia10U

Fonte	GL	Soma dos quadrados	Quadrados médios	Valor F	Valor-P	Contribuição
Vf	2	1,8589	0,92946	28,21	0,004	66,47%
Ap	2	0,8057	0,40286	12,23	0,020	28,81%
Erro	2	0,1318	0,03295			4,71%
Tot	8	2,7965				100,00%

Rugosidade estimada método convencional Besdia10U

Resposta	Ajuste	EP do Ajustado	IC de 95%	IP de 95%
Ra	1,731	0,135	(1,356; 2,107)	(1,103; 2,360)

Besdia6



Gráficos DynoWare para os diferentes ensaios fresa Besdia6

Análise comparativa das componentes mínimas de forças resultantes de corte Besdia6

Comparação das forças resultantes para as componentes negativas (N)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
	33,42	45,17	73,19	52,03	71,01	116,65	72,67	84,75	109,77
	33,42	45,88	73,82	52,58	73,59	117,23	73,45	88,41	110,64
	34,12	46,62	74,93	53,16	73,97	121,41	76,20	88,45	114,26
	34,12	49,89	75,44	53,24	74,64	121,85	80,38	89,71	114,56
	34,65	50,39	80,11	55,17	76,50	123,90	80,43	89,91	115,47
Média	33,95	47,59	75,50	53,24	73,94	120,21	76,63	88,25	112,94
Desvio Padrão	0,53	2,39	2,73	1,19	1,98	3,13	3,69	2,07	2,55

Análise comparativa das componentes máximas de forças resultantes de corte Besdia6

Comparação das forças resultantes para as componentes positivas (N)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
	33,86	46,93	78,75	50,77	81,47	126,99	66,46	89,38	127,15
	33,86	51,70	79,37	51,92	82,66	128,43	70,73	90,45	127,51
	33,93	51,95	81,78	52,40	83,00	133,30	71,33	91,91	129,10
	33,93	53,00	84,34	53,16	83,05	134,86	75,44	93,88	129,19
	34,13	53,17	85,38	54,42	83,07	136,23	77,43	94,60	135,50
Média	33,94	51,35	81,92	52,53	82,65	131,96	72,28	92,04	129,69
Desvio Padrão	0,11	2,55	2,93	1,37	0,68	4,05	4,29	2,21	3,37

Valores de Ra para cada um dos provetes Besdia6

Ra (µm)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
	1,424	1,362	1,605	2,008	2,246	2,375	2,225	2,356	2,708
	1,450	1,405	1,714	2,010	2,255	2,408	2,249	2,399	2,772
	1,470	1,439	1,787	2,112	2,344	2,551	2,306	2,414	2,833
	1,484	1,540	1,820	2,181	2,349	2,636	2,389	2,713	2,834
	1,532	1,601	1,868	2,185	2,387	2,754	2,453	2,795	2,845
Média	1,472	1,469	1,759	2,099	2,316	2,545	2,324	2,535	2,798
Desvio padrão	0,040	0,099	0,103	0,087	0,062	0,158	0,096	0,203	0,058

Valores de Rz para cada um dos provetes Besdia6

Rz (µm)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
	9,52	10,09	10,39	12,39	13,22	16,16	14,66	14,43	16,60
	8,76	9,26	11,14	12,94	13,74	15,78	14,93	14,61	16,55
	9,95	8,24	12,98	13,99	17,14	15,62	14,34	14,80	17,57
	8,93	10,17	11,94	12,39	14,26	15,75	17,11	10,87	16,44
	9,72	9,58	12,05	13,09	15,34	18,05	14,92	16,98	16,12
Média	9,38	9,47	11,70	12,96	14,74	16,27	15,19	14,34	16,66
Desvio padrão	0,51	0,78	0,98	0,66	1,55	1,01	1,10	2,20	0,54

Forças de corte Besdia6

Relação entre os ensaios de força e as razões sinal-ruído Besdia6

Ensaio	Vf (mm/min)	Ap (mm)	Força (N)	S/N
E1	250	0,05	33,94	-30,6147
E2	250	0,0875	51,35	-34,2108
E3	250	0,125	81,92	-38,2682
E4	500	0,05	52,53	-34,4088
E5	500	0,0875	82,65	-38,3449
E6	500	0,125	131,96	-42,4090
E7	750	0,05	72,28	-37,1801
E8	750	0,0875	92,04	-39,2799
E9	750	0,125	129,69	-42,2581

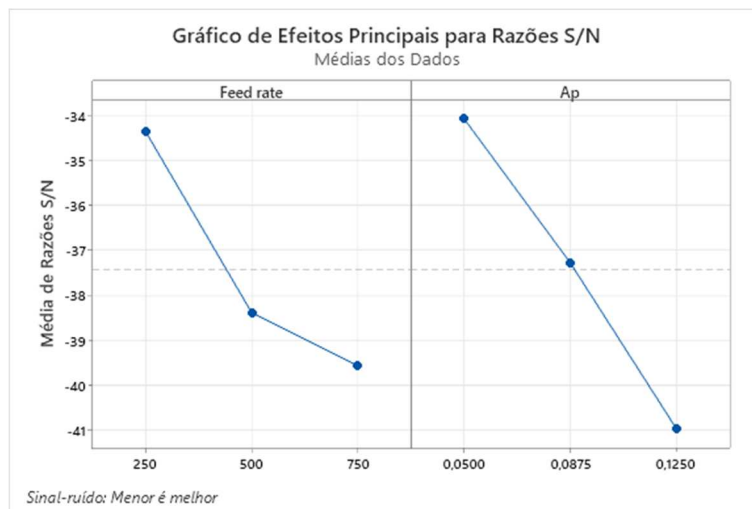


Gráfico curva de S/N de cada parâmetro para os ensaios de força resultante Besdia6

Análise de variância da força Besdia6

Fonte	GL	Soma dos quadrados	Quadrados médios	Valor F	Valor-P	Contribuição
Vf	2	2976,1	1488,06	22,57	0,007	32,80%
Ap	2	5833,4	2916,72	44,23	0,002	64,29%
Erro	2	263,8	65,94			2,91%
Total	8	9073,3				100,00%

Força estimada método convencional Besdia6

Resposta	Ajuste	EP do Ajustado	IC de 95%	IP de 95%
Força	27,73	6,05	(10,92; 44,53)	(-0,39; 55,85)

Rugosidade superficial Besdia6

Relação entre a rugosidade superficial e as razões sinal-ruído Besdia6

Ensaio	Vf (mm/min)	Ap (mm)	Ra (μm)	S/N
E1	250	0,05	1,472	-3,35816
E2	250	0,0875	1,469	-3,34044
E3	250	0,125	1,759	-4,90532
E4	500	0,05	2,099	-6,44025
E5	500	0,0875	2,316	-7,29477
E6	500	0,125	2,545	-8,11376
E7	750	0,05	2,324	-7,32472
E8	750	0,0875	2,535	-8,07956
E9	750	0,125	2,798	-8,93695

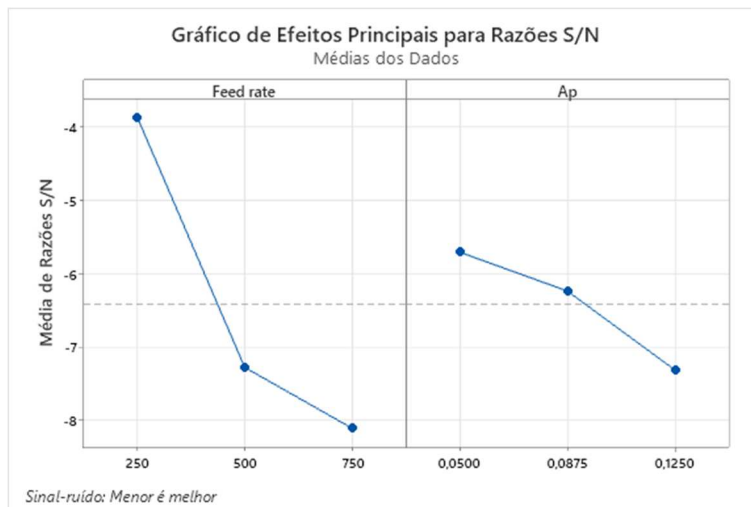


Gráfico Curva de S/N para cada parâmetro para rugosidade superficial Besdia6

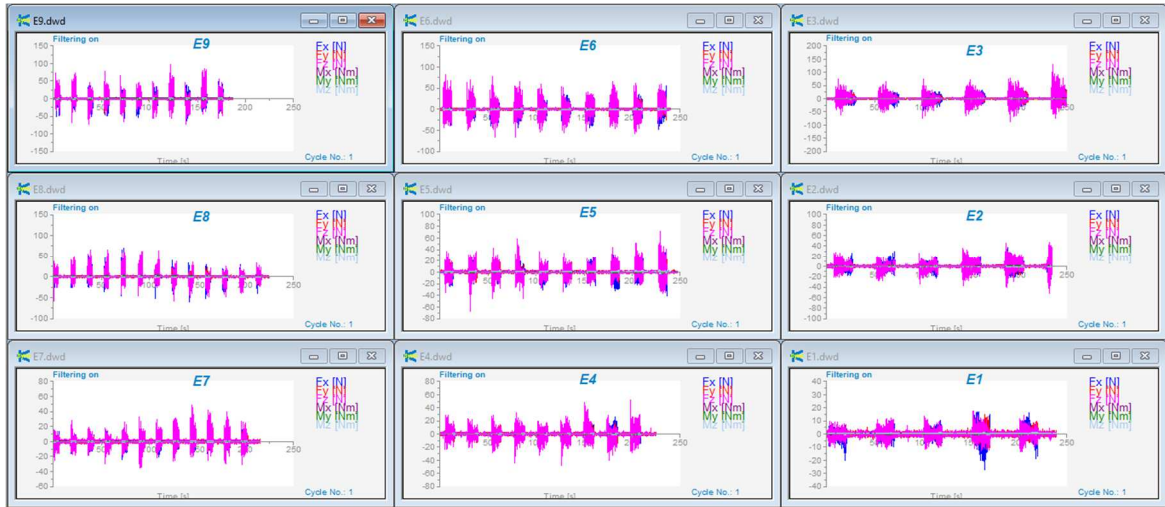
Análise de variância para rugosidade superficial Besdia6

Fonte	GL	Soma dos quadrados	Quadrados médios	Valor F	Valor-P	Contribuição
Vf	2	1,59303	0,796514	178,24	0,000	85,61%
Ap	2	0,24989	0,124944	27,96	0,004	13,43%
Erro	2	0,01787	0,004469			0,96%
Total	8	1,86079				100,00%

Rugosidade estimada método convencional Besdia6

Resposta	Ajuste	EP do Ajustado	IC de 95%	IP de 95%
Ra	1,3853	0,0498	(1,2470; 1,5237)	(1,1538; 1,6168)

Besdia6U



DynoWare para os diferentes ensaios fresa Besdia6U

Análise comparativa das componentes mínimas de forças resultantes de corte Besdia6U

		Comparação das forças resultantes para as componentes negativas (N)								
		E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
		29,68	70,32	143,21	41,66	85,78	133,61	58,77	132,98	261,90
		31,65	73,77	146,13	42,31	88,24	136,75	60,59	132,99	266,05
		33,10	75,96	146,53	42,87	89,32	157,05	60,90	133,2	269,41
		33,14	87,17	150,79	43,74	89,48	158,86	62,31	133,25	269,42
		33,48	88,01	152,82	44,36	92,02	178,53	62,48	134,95	269,96
	Média	32,21	79,05	147,90	42,99	88,97	152,96	61,01	133,47	267,35
	Desvio Padrão	1,58	8,06	3,86	1,08	2,26	18,32	1,50	0,83	3,42

Análise comparativa das componentes máximas de forças resultantes de corte Besdia6U

		Comparação das forças resultantes para as componentes positivas (N)								
		E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
		32,07	71,37	159,53	41,47	101,65	149,40	60,51	134,31	262,47
		32,49	74,37	161,34	42,31	102,29	168,55	61,16	134,61	283,94
		33,62	77,77	163,98	43,04	102,55	193,37	62,96	134,65	285,18
		34,88	87,85	165,53	43,38	103,06	204,05	63,12	140,64	300,04
		36,03	91,66	166,95	43,68	103,65	232,53	63,55	146,28	310,83
	Média	33,82	80,60	163,47	42,78	102,64	189,58	62,26	138,10	288,49
	Desvio Padrão	1,65	8,76	3,03	0,89	0,76	32,11	1,34	5,29	18,31

Valores de Ra para cada um dos provetes Besdia6U

		Ra (µm)								
		E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
		1,279	1,352	1,435	1,948	2,726	2,489	3,058	2,679	3,081
		1,281	1,420	1,507	1,958	2,872	2,959	3,216	2,953	3,136
		1,295	1,466	1,577	1,978	2,905	3,152	3,219	2,999	3,149
		1,296	1,466	1,634	1,989	2,968	3,634	3,400	3,204	3,304
		1,403	1,510	1,704	2,138	3,147	3,671	3,416	3,261	3,340
	Média	1,311	1,443	1,571	2,002	2,924	3,181	3,262	3,019	3,202
	Desvio padrão	0,052	0,060	0,105	0,078	0,153	0,494	0,149	0,231	0,113

Valores de Rz para cada um dos provetes Besdia6U

		Rz (µm)								
		E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
		10,43	9,85	9,49	11,32	15,83	16,12	18,03	18,15	17,57
		9,73	10,40	10,67	11,98	18,67	15,90	18,27	16,80	18,48
		9,82	11,75	9,99	12,75	17,08	16,07	17,69	19,02	19,72
		10,42	11,75	13,58	13,22	16,57	22,84	19,23	19,33	18,06
		9,34	10,05	12,03	14,42	19,96	22,48	18,20	19,55	21,88
	Média	9,95	10,76	11,15	12,74	17,62	18,68	18,28	18,57	19,14
	Desvio padrão	0,47	0,93	1,66	1,19	1,67	3,63	0,57	1,12	1,73

Força de corte Besdia6U

Relação entre os ensaios de força e as razões sinal-ruído Besdia6U

Ensaio	Vf (mm/min)	Ap (mm)	Força (N)	S/N
E1	250	0,05	33,82	-30,5830
E2	250	0,0875	80,60	-38,1271
E3	250	0,125	163,47	-44,2686
E4	500	0,05	42,78	-32,6240
E5	500	0,0875	102,64	-40,2263
E6	500	0,125	189,58	-45,5559
E7	750	0,05	62,26	-35,8842
E8	750	0,0875	138,10	-42,8037
E9	750	0,125	288,49	-49,2027

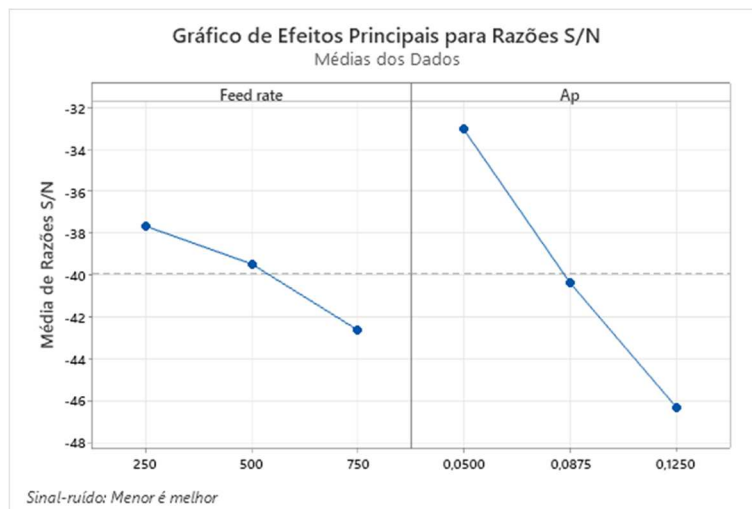


Gráfico curva de S/N para cada parâmetro para os ensaios de força resultante Besdia6U

Análise de variância da força Besdia6U

Fonte	GL	Soma dos quadrados	Quadrados médios	Valor F	Valor-P	Contribuição
Vf	2	7938	3968,8	5,54	0,070	14,71%
Ap	2	43169	21584,5	30,11	0,004	79,98%
Erro	2	2867	716,8			5,31%
Total	8	53974				100,00%

Força estimada método convencional Besdia6U

Resposta	Ajuste	EP do		
		Ajustado	IC de 95%	IP de 95%
Força	16,5	20,0	(-38,9; 71,9)	(-76,2; 109,2)

Rugosidade superficial Besdia6U

Relação entre a rugosidade superficial e as razões sinal-ruído Besdia6U

Ensaio	Vf (mm/min)	Ap (mm)	Ra (μm)	S/N
E1	250	0,05	1,311	-2,3507
E2	250	0,0875	1,443	-3,1841
E3	250	0,125	1,571	-3,9257
E4	500	0,05	2,002	-6,0301
E5	500	0,0875	2,924	-9,3184
E6	500	0,125	3,181	-10,0513
E7	750	0,05	3,262	-10,2691
E8	750	0,0875	3,019	-9,5978
E9	750	0,125	3,202	-10,1084

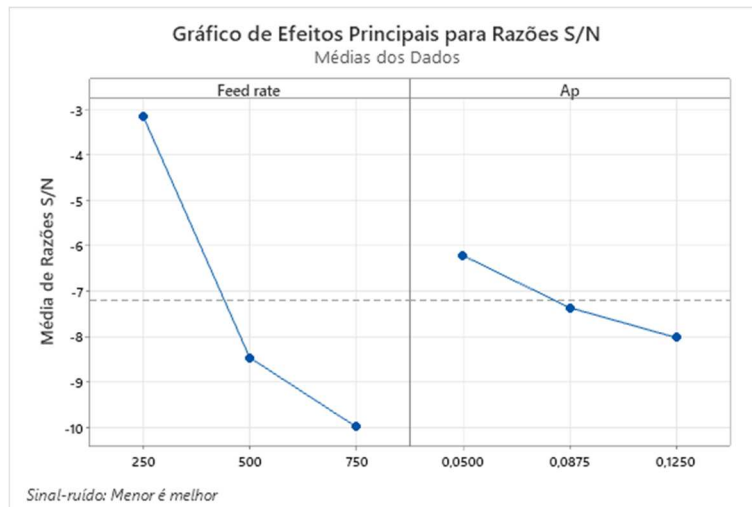


Gráfico Curva de S/N para cada parâmetro para rugosidade superficial Besdia6U

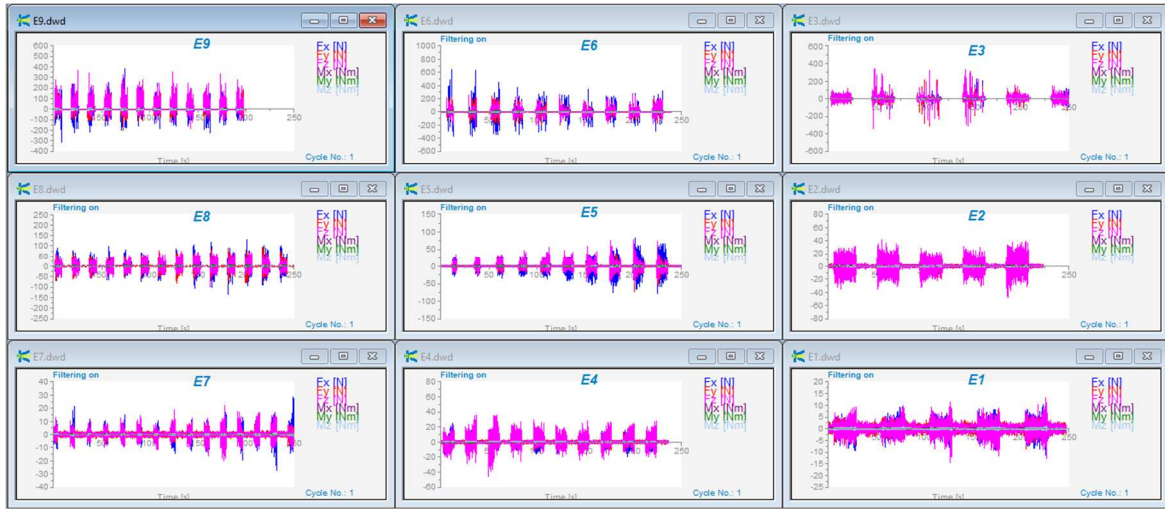
Análise de variância para rugosidade superficial Besdia6U

Fonte	GL	Soma dos quadrados	Quadrados médios	Valor F	Valor-P	Contribuição
Vf	2	4,7557	2,3778	18,52	0,010	85,08%
Ap	2	0,3205	0,1602	1,25	0,379	5,73%
Erro	2	0,5137	0,1284			9,19%
Total	8	5,5898				100,00%

Rugosidade estimada método convencional Besdia6U

Resposta	Ajuste	EP do		
		Ajustado	IC de 95%	IP de 95%
Ra	1,198	0,267	(0,457; 1,940)	(-0,043; 2,439)

Pferd10



Gráficos DynoWare para os diferentes ensaios fresa Pferd10

Análise comparativa das componentes mínimas de forças resultantes de corte Pferd10

Comparação das forças resultantes para as componentes negativas (N)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
	36,30	71,58	691,39	91,55	140,49	787,32	36,34	218,35	482,74
	35,07	73,78	695,94	83,46	160,75	801,19	36,68	223,04	483,31
	35,11	74,21	729,85	89,26	173,08	813,61	37,11	230,23	506,00
	32,72	74,62	740,17	93,98	211,37	827,63	37,32	234,63	577,86
	33,40	74,91	750,91	93,67	192,53	834,67	37,40	238,02	582,12
Média	34,52	73,82	721,65	90,38	175,64	812,88	36,97	228,86	526,41
Desvio Padrão	1,44	1,32	26,66	4,31	27,50	19,26	0,45	8,11	49,83

Análise comparativa das componentes máximas de forças resultantes de corte Pferd10

Comparação das forças resultantes para as componentes positivas (N)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
	49,26	67,67	753,96	127,46	194,21	659,90	40,66	250,44	498,76
	47,79	68,37	764,10	115,41	221,45	659,96	41,84	254,21	526,87
	47,98	70,10	780,63	123,88	240,86	668,90	42,18	261,98	526,89
	44,44	71,03	783,94	130,56	292,18	687,99	42,26	263,34	604,76
	45,44	72,09	812,68	130,12	265,34	693,95	42,72	280,32	649,01
Média	46,98	69,85	779,06	125,49	242,81	674,14	41,93	262,06	561,26
Desvio Padrão	1,98	1,83	22,42	6,23	37,97	15,93	0,78	11,53	62,97

Valores de Ra para cada um dos provetes Pferd10

Ra (µm)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
	1,354	1,478	2,279	1,898	2,315	3,359	2,184	2,15	2,88
	1,396	1,511	2,336	1,967	2,353	3,521	2,311	2,441	3,279
	1,430	1,541	2,418	1,981	2,402	3,581	2,369	2,541	3,291
	1,530	1,552	2,558	2,037	2,793	3,667	2,514	2,789	3,417
	1,575	1,681	2,632	2,059	3,005	3,791	2,576	3,23	3,455
Média	1,457	1,553	2,445	1,988	2,574	3,584	2,391	2,630	3,264
Desvio padrão	0,093	0,077	0,148	0,063	0,308	0,162	0,157	0,406	0,228

Valores de Rz para cada um dos provetes Pferd10

Rz (µm)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
	8,855	11,710	16,17	12,71	13,78	17,390	13,71	14,4	16,93
	9,417	9,632	14,290	13,32	13,290	19,14	13,550	16,790	19,32
	11,120	10,37	14,000	13,180	13,91	20,5	12,930	14,980	21,710
	10,380	11,89	14,660	12,68	18,350	20,41	15,39	18,48	19,540
	10,68	10,97	16,98	14,290	16,180	21,130	13,690	17,99	20,370
Média	10,09	10,91	15,22	13,24	15,10	19,71	13,85	16,53	19,57
Desvio padrão	0,93	0,94	1,29	0,65	2,13	1,49	0,92	1,80	1,75

Forças de corte Pferd10

Relação entre os ensaios de força e as razões sinal-ruído Pferd10

Ensaio	Vf (mm/min)	Ap (mm)	Força (N)	S/N
E1	250	0,05	46,981	-33,4447
E2	250	0,125	69,852	-36,8860
E3	250	0,2	779,061	-57,8343
E4	500	0,05	125,488	-41,9806
E5	500	0,125	242,806	-47,7893
E6	500	0,2	674,141	-56,5770
E7	750	0,05	41,932	-32,4521
E8	750	0,125	262,058	-48,3747
E9	750	0,2	561,260	-55,0268

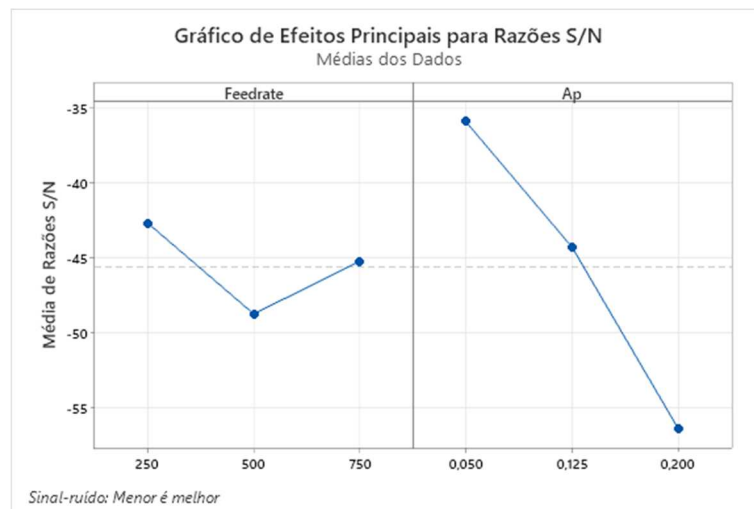


Gráfico curva de S/N de cada parâmetro para os ensaios de força resultante Pferd10

Análise de variância da força Pferd10

Fonte	GL	Soma dos quadrados	Quadrados médios	Valor F	Valor-P	Contribuição
Vf	2	5979	2989	0,27	0,777	0,91%
Ap	2	604768	302384	27,15	0,005	92,29%
Erro	2	44550	11137			6,80%
Total	8	655296				100,00%

Força estimada método convencional Pferd10

Resposta	Ajuste	EP do Ajustado	IC de 95%	IP de 95%
Força	48,4	78,7	(-170,0; 266,8)	(-317,1; 413,8)

Rugosidade superficial Pferd10

Relação entre a rugosidade superficial e as razões sinal-ruído Pferd10

Ensaio	Vf (mm/min)	Ap (mm)	Ra (μm)	S/N
E1	250	0,05	1,457	-3,2692
E2	250	0,125	1,553	-3,8212
E3	250	0,2	2,445	-7,7642
E4	500	0,05	1,988	-5,9701
E5	500	0,125	2,574	-8,2108
E6	500	0,2	3,584	-11,0869
E7	750	0,05	2,391	-7,5709
E8	750	0,125	2,630	-8,3998
E9	750	0,2	3,264	-10,2761

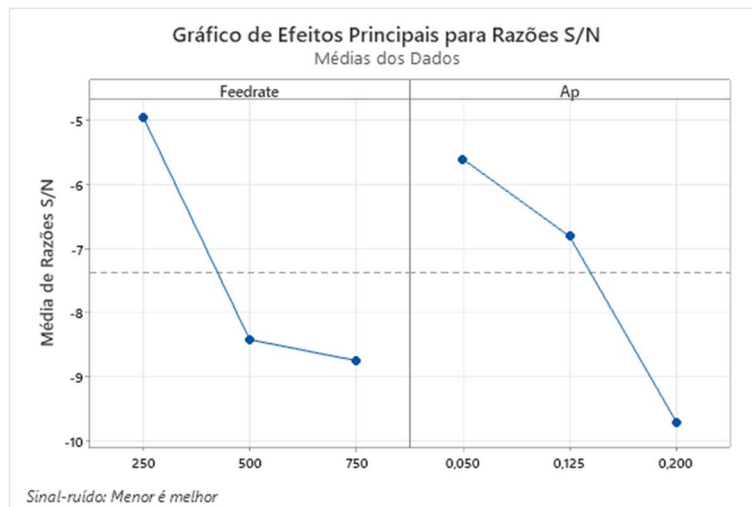


Gráfico Curva de S/N para cada parâmetro para rugosidade superficial Pferd10

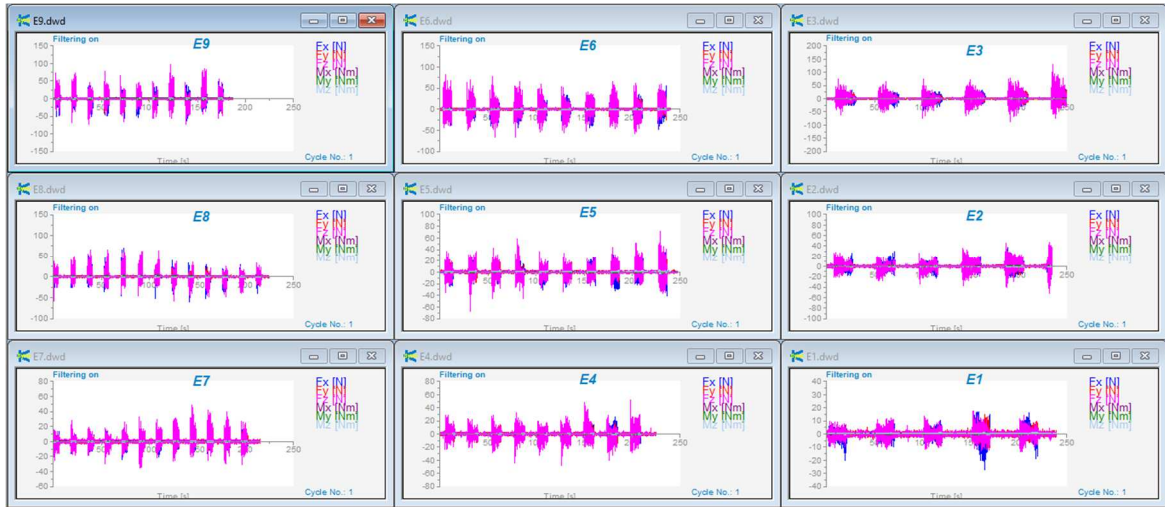
Análise de variância para rugosidade superficial Pferd10

Fonte	GL	Soma dos quadrados	Quadrados médios	Valor F	Valor-P	Contribuição
Vf	2	1,6978	0,84888	20,30	0,008	42,43%
Ap	2	2,1365	1,06823	25,55	0,005	53,39%
Erro	2	0,1672	0,04181			4,18%
Total	8	4,0015				100,00%

Rugosidade estimada método convencional Pferd10

Resposta	Ajuste	EP do		
		Ajustado	IC de 95%	IP de 95%
Ra	1,332	0,152	(0,909; 1,755)	(0,624; 2,040)

Pferd10U



DynoWare para os diferentes ensaios fresa Pferd10U

Análise comparativa das componentes mínimas de forças resultantes de corte Pferd10U

Comparação das forças resultantes para as componentes negativas (N)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
	20,95	54,03	108,91	22,22	77,17	157,20	31,80	83,30	67,31
	21,01	58,91	114,32	22,40	87,25	158,10	33,16	86,21	82,91
	21,04	63,40	116,15	23,21	91,01	162,77	33,28	89,41	82,95
	21,33	65,71	117,90	23,79	94,79	162,86	33,82	92,38	83,17
	22,14	68,87	132,44	23,79	96,65	165,94	34,27	93,44	90,69
Média	21,29	62,18	117,94	23,08	89,37	161,37	33,27	88,95	81,41
Desvio Padrão	0,50	5,83	8,78	0,75	7,72	3,65	0,93	4,23	8,55

Análise comparativa das componentes máximas de forças resultantes de corte Pferd10U

Comparação das forças resultantes para as componentes positivas (N)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
	20,58	54,70	116,27	25,21	70,89	154,24	36,25	77,77	96,13
	21,12	59,30	118,24	25,69	78,91	157,11	36,54	78,06	96,75
	21,29	67,06	126,06	26,12	87,47	158,12	36,84	78,16	110,33
	21,30	72,10	130,85	26,17	99,63	160,85	36,89	78,20	112,96
	22,45	74,77	133,41	26,50	100,52	161,20	38,96	81,62	117,48
Média	21,35	65,59	124,97	25,94	87,48	158,30	37,10	78,76	106,73
Desvio Padrão	0,68	8,47	7,55	0,50	12,91	2,87	1,07	1,61	9,74

Valores de Ra para cada um dos provetes Pferd10U

Ra (µm)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
	1,152	1,497	1,554	1,962	2,113	2,144	2,122	2,343	2,057
	1,160	1,594	1,568	2,066	2,194	2,189	2,158	2,426	2,078
	1,191	1,606	1,569	2,078	2,203	2,277	2,167	2,456	2,117
	1,211	1,612	1,651	2,090	2,324	2,302	2,271	2,576	2,176
	1,260	1,639	1,708	2,163	2,325	2,458	2,330	2,627	2,248
Média	1,195	1,590	1,610	2,072	2,232	2,274	2,210	2,486	2,135
Desvio padrão	0,044	0,054	0,067	0,072	0,092	0,121	0,087	0,115	0,078

Valores de Rz para cada um dos provetes Pferd10U

Rz (µm)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
	8,53	11,14	11,15	12,08	12,63	12,93	13,90	15,78	15,65
	7,46	10,54	11,60	13,05	14,00	14,22	12,33	12,76	13,72
	8,38	12,38	10,76	12,87	14,59	12,51	12,70	16,55	12,80
	7,66	12,51	11,17	12,48	15,87	13,91	14,26	14,77	15,40
	8,89	11,05	9,99	12,21	14,14	13,61	14,83	16,90	14,55
Média	8,18	11,52	10,93	12,54	14,25	13,44	13,60	15,35	14,42
Desvio padrão	0,60	0,87	0,61	0,42	1,17	0,70	1,06	1,66	1,18

Força de corte Pferd10U

Relação entre os ensaios de força e as razões sinal-ruído Pferd10U

Ensaio	Vf (mm/min)	Ap (mm)	Força (N)	S/N
E1	250	0,05	21,35	-26,5871
E2	250	0,125	65,59	-36,3362
E3	250	0,2	124,97	-41,9358
E4	500	0,05	25,94	-28,2787
E5	500	0,125	87,48	-38,8386
E6	500	0,2	158,30	-43,9898
E7	750	0,05	37,10	-31,3865
E8	750	0,125	78,76	-37,9263
E9	750	0,2	106,73	-40,5657

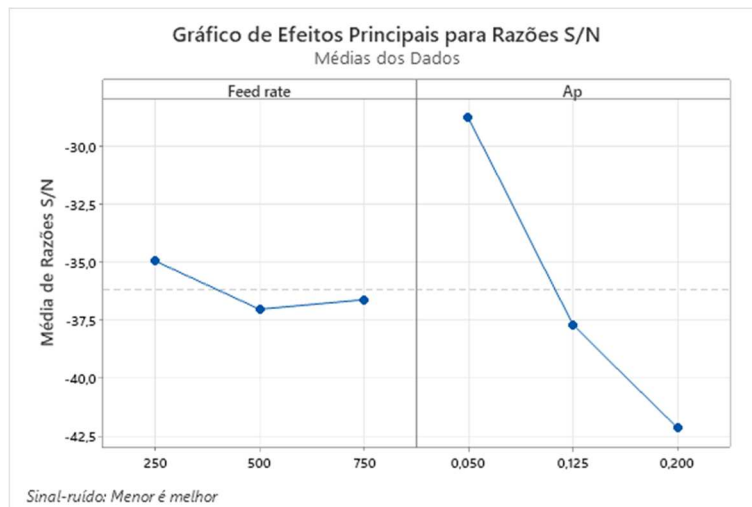


Gráfico curva de S/N para cada parâmetro para os ensaios de força resultante Pferd10U

Análise de variância da força Pferd10U

Fonte	GL	Soma dos quadrados	Quadrados médios	Valor F	Valor-P	Contribuição
Vf	2	678,7	339,3	1,28	0,373	3,92%
Ap	2	15573,4	7786,7	29,29	0,004	89,94%
Erro	2	1063,5	265,9			6,14%
Total	8	17315,6				100,00%

Força estimada método convencional Pferd10U

Resposta	Ajuste	EP do Ajustado	IC de 95%	IP de 95%
Força	20,3	12,2	(-13,5; 54,0)	(-36,2; 76,8)

Rugosidade superficial Pferd10U

Relação entre a rugosidade superficial e as razões sinal-ruído Pferd10U

Ensaio	Vf (mm/min)	Ap (mm)	Ra (µm)	S/N
E1	250	0,05	1,1950	-1,54736
E2	250	0,125	1,5896	-4,02576
E3	250	0,2	1,6100	-4,13652
E4	500	0,05	2,0718	-6,32696
E5	500	0,125	2,2318	-6,97311
E6	500	0,2	2,2740	-7,13581
E7	750	0,05	2,2096	-6,88627
E8	750	0,125	2,4856	-7,90862
E9	750	0,2	2,1352	-6,58877

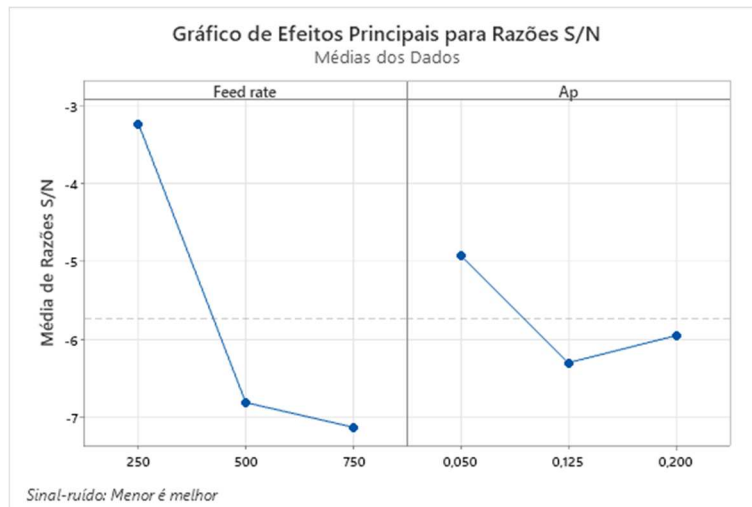


Gráfico Curva de S/N para cada parâmetro para rugosidade superficial Pferd10U

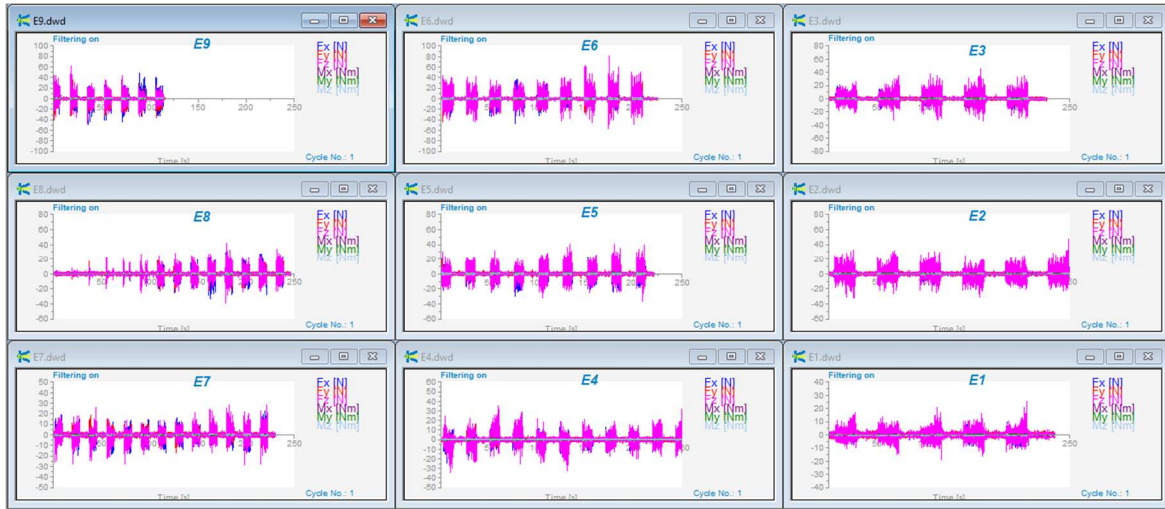
Análise de variância para rugosidade superficial Pferd10U

Fonte	GL	Soma dos quadrados	Quadrados médios	Valor F	Valor-P	Contribuição
Vf	2	1,19584	0,59792	29,25	0,004	85,65%
Ap	2	0,11860	0,05930	2,90	0,167	8,49%
Erro	2	0,08177	0,02044			5,86%
Total	8	1,39620				100,00%

Rugosidade estimada método convencional Pferd10U

Resposta	Ajuste	EP do Ajustado	IC de 95%	IP de 95%
Ra	1,312	0,107	(1,016; 1,608)	(0,817; 1,807)

Pferd6



Gráficos DynoWare para os diferentes ensaios fresa Pferd6

Análise comparativa das componentes mínimas de forças resultantes de corte Pferd6

Comparação das forças resultantes para as componentes negativas (N)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
	33,25	59,42	68,14	47,17	58,51	90,29	49,54	67,55	96,57
	33,41	59,85	68,36	47,17	60,81	93,95	54,39	68,53	96,98
	34,70	60,69	69,57	49,02	61,38	93,95	51,24	68,96	98,59
	34,99	61,02	69,64	49,21	65,63	98,51	54,34	69,78	99,58
	35,40	62,15	70,23	50,42	66,41	98,51	60,56	70,35	101,49
Média	34,35	60,63	69,19	48,60	62,55	95,04	54,01	69,03	98,64
Desvio Padrão	0,97	1,07	0,90	1,41	3,36	3,50	4,21	1,09	2,00

Análise comparativa das componentes máximas de forças resultantes de corte Pferd6

Comparação das forças resultantes para as componentes positivas (N)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
	33,29	63,48	69,40	51,36	64,70	103,75	54,03	75,43	105,61
	33,93	64,59	72,72	51,44	66,57	103,75	54,81	76,03	107,85
	34,16	65,32	73,10	51,44	67,90	110,59	54,46	76,28	111,42
	35,70	68,39	73,70	52,10	68,43	113,67	55,78	76,41	113,77
	37,29	68,74	73,95	55,07	73,73	114,42	58,20	76,85	114,55
Média	34,87	66,10	72,57	52,28	68,27	109,24	55,46	76,20	110,64
Desvio Padrão	1,61	2,34	1,84	1,59	3,38	5,21	1,66	0,52	3,83

Valores de Ra para cada um dos provetes Pferd6

Ra (µm)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
	1,085	1,048	1,254	1,654	1,719	2,382	2,205	2,263	2,432
	1,198	1,080	1,401	1,745	1,725	2,441	2,311	2,304	2,550
	1,152	1,095	1,459	1,804	2,047	2,572	2,317	2,410	2,646
	0,992	1,149	1,481	1,815	2,162	2,654	2,552	2,457	2,752
	1,045	1,225	1,599	1,859	2,192	2,739	2,569	2,517	2,843
Média	1,094	1,119	1,439	1,775	1,969	2,558	2,391	2,390	2,645
Desvio padrão	0,082	0,069	0,126	0,079	0,232	0,147	0,161	0,106	0,162

Valores de Rz para cada um dos provetes Pferd6

Rz (µm)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
	9,07	8,48	8,59	10,78	12,68	15,57	12,83	13,07	14,22
	8,15	8,08	11,87	11,57	12,80	15,19	14,09	13,91	17,00
	10,25	8,55	11,97	12,24	13,40	18,84	14,38	15,57	18,47
	8,10	10,00	11,48	11,82	14,60	14,38	15,39	15,61	13,09
	7,75	9,52	11,25	14,05	16,21	16,04	13,83	14,76	16,12
Média	8,66	8,93	11,03	12,09	13,94	16,00	14,10	14,58	15,78
Desvio padrão	1,01	0,80	1,39	1,22	1,48	1,70	0,93	1,10	2,15

Forças de corte Pferd6

Relação entre os ensaios de força e as razões sinal-ruído Pferd6

Ensaio	Vf (mm/min)	Ap (mm)	Força (N)	S/N
E1	250	0,05	34,87	-30,8500
E2	250	0,0875	66,10	-36,4046
E3	250	0,125	72,57	-37,2156
E4	500	0,05	52,28	-34,3670
E5	500	0,0875	68,27	-36,6841
E6	500	0,125	109,24	-40,7673
E7	750	0,05	55,46	-34,8790
E8	750	0,0875	76,20	-37,6391
E9	750	0,125	110,64	-40,8782

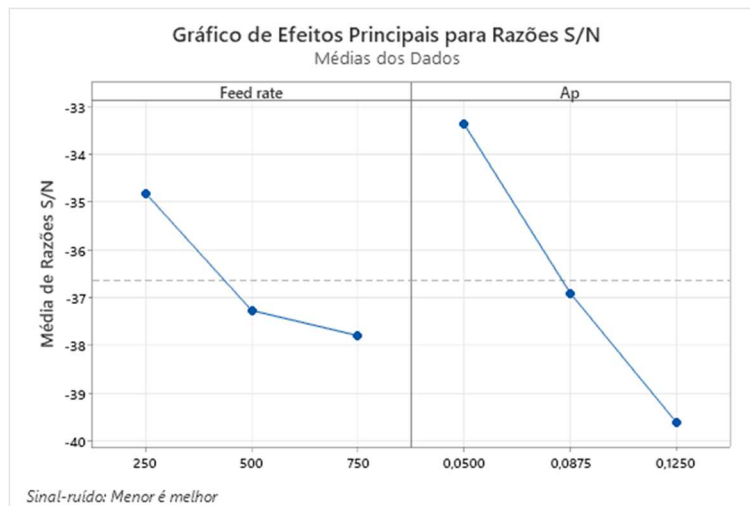


Gráfico curva de S/N de cada parâmetro para os ensaios de força resultante Pferd6

Análise de variância da força Pferd6

Fonte	GL	Soma dos quadrados	Quadrados médios	Valor F	Valor-P	Contribuição
Vf	2	893,8	446,91	5,26	0,076	17,92%
Ap	2	3752,7	1876,34	22,08	0,007	75,26%
Erro	2	340,0	84,99			6,82%
Total	8	4986,5				100,00%

Força estimada método convencional Pferd6

Resposta	Ajuste	EP do Ajustado	IC de 95%	IP de 95%
Força	33,65	6,87	(14,57; 52,73)	(1,73; 65,58)

Rugosidade superficial Pferd6

Relação entre a rugosidade superficial e as razões sinal-ruído Pferd6

Ensaio	Vf (mm/min)	Ap (mm)	Ra (µm)	S/N
E1	250	0,05	1,094	-0,78352
E2	250	0,0875	1,119	-0,97971
E3	250	0,125	1,439	-3,16001
E4	500	0,05	1,775	-4,98592
E5	500	0,0875	1,969	-5,88491
E6	500	0,125	2,558	-8,15665
E7	750	0,05	2,391	-7,57086
E8	750	0,0875	2,390	-7,56868
E9	750	0,125	2,645	-8,44720

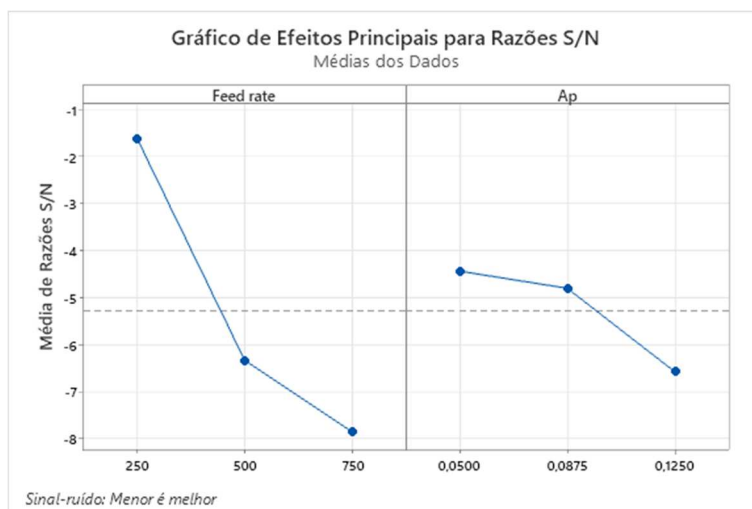


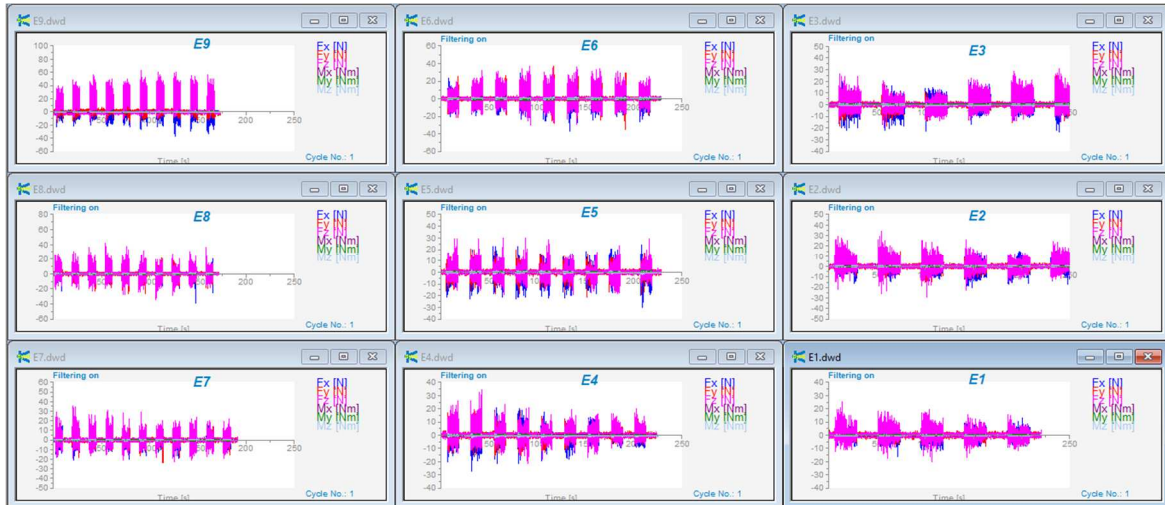
Gráfico Curva de S/N para cada parâmetro para rugosidade superficial Pferd6
Análise de variância para rugosidade superficial Pferd6

Fonte	GL	Soma dos quadrados	Quadrados médios	Valor F	Valor-P	Contribuição
Vf	2	2,50193	1,25096	61,33	0,001	84,79%
Ap	2	0,36713	0,18357	9,00	0,033	12,44%
Erro	2	0,08158	0,02040			2,76%
Total	8	2,95064				100,00%

Rugosidade estimada método convencional Pferd6

Resposta	Ajuste	EP do Ajustado	IC de 95%	IP de 95%
Ra	1,040	0,106	(0,744; 1,335)	(0,545; 1,534)

Pferd6U



DynoWare para os diferentes ensaios fresa Pferd6U

Análise comparativa das componentes mínimas de forças resultantes de corte Pferd6U

Comparação das forças resultantes para as componentes negativas (N)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
	33,24	45,53	45,91	36,76	50,18	63,55	47,73	58,77	60,42
	34,61	45,53	46,11	46,30	52,52	64,27	48,18	59,38	61,57
	36,12	48,82	46,16	46,89	52,77	64,34	48,35	61,34	62,53
	36,17	48,82	47,48	47,04	53,92	66,56	49,31	61,61	63,38
	36,23	50,31	48,31	49,44	53,96	68,58	51,40	62,46	64,00
Média	35,27	47,80	46,79	45,29	52,67	65,46	48,99	60,71	62,38
Desvio Padrão	1,32	2,16	1,05	4,91	1,54	2,08	1,46	1,57	1,43

Análise comparativa das componentes máximas de forças resultantes de corte Pferd6U

Comparação das forças resultantes para as componentes positiva (N)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
	37,15	54,15	60,95	41,01	57,37	78,50	54,18	64,92	78,48
	38,30	54,19	63,43	47,95	58,08	80,57	55,15	64,94	78,52
	38,75	54,23	64,00	50,07	59,60	80,77	55,69	66,09	78,56
	39,28	54,23	64,32	53,08	61,53	81,24	56,39	71,01	79,30
	40,65	54,49	64,67	54,86	62,37	83,00	57,91	71,97	82,06
Média	38,83	54,26	63,47	49,39	59,79	80,82	55,86	67,79	79,38
Desvio Padrão	1,29	0,13	1,48	5,39	2,15	1,61	1,40	3,43	1,53

Valores de Ra para cada um dos provetes Pferd6U

Ra (µm)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
	1,486	1,859	1,809	1,584	1,897	1,963	2,049	2,266	2,494
	1,606	1,931	1,830	1,598	1,952	2,019	2,059	2,317	2,583
	1,658	1,948	1,860	1,702	1,958	2,126	2,210	2,489	2,791
	1,714	2,003	1,942	1,826	1,983	2,189	2,224	2,530	2,829
	1,866	2,039	2,058	1,851	2,025	2,221	2,349	2,588	2,850
Média	1,666	1,956	1,900	1,712	1,963	2,104	2,178	2,438	2,709
Desvio padrão	0,140	0,069	0,102	0,124	0,047	0,110	0,126	0,139	0,161

Valores de Rz para cada um dos provetes Pferd6U

Rz (µm)									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
	8,75	11,83	12,32	10,97	12,85	13,36	15,56	14,71	15,83
	11,82	12,51	12,96	9,42	12,46	14,04	13,67	13,65	15,03
	12,43	13,66	11,27	11,30	13,41	12,84	13,94	14,73	15,92
	10,44	12,92	12,53	11,44	11,95	13,25	12,95	15,76	18,36
	11,72	11,78	13,49	12,08	12,52	12,08	15,55	15,70	18,75
Média	11,03	12,54	12,51	11,04	12,64	13,11	14,33	14,91	16,78
Desvio padrão	1,47	0,79	0,83	0,99	0,54	0,72	1,17	0,87	1,66

Força de corte Pferd6U

Relação entre os ensaios de força e as razões sinal-ruído Pferd6U

Ensaio	Vf (mm/min)	Ap (mm)	Força (N)	S/N
E1	250	0,05	38,826	-31,7825
E2	250	0,0875	54,258	-34,6893
E3	250	0,125	63,474	-36,0519
E4	500	0,05	49,394	-33,8735
E5	500	0,0875	59,790	-35,5326
E6	500	0,125	80,816	-38,1499
E7	750	0,05	55,864	-34,9426
E8	750	0,0875	67,786	-36,6228
E9	750	0,125	79,384	-37,9947

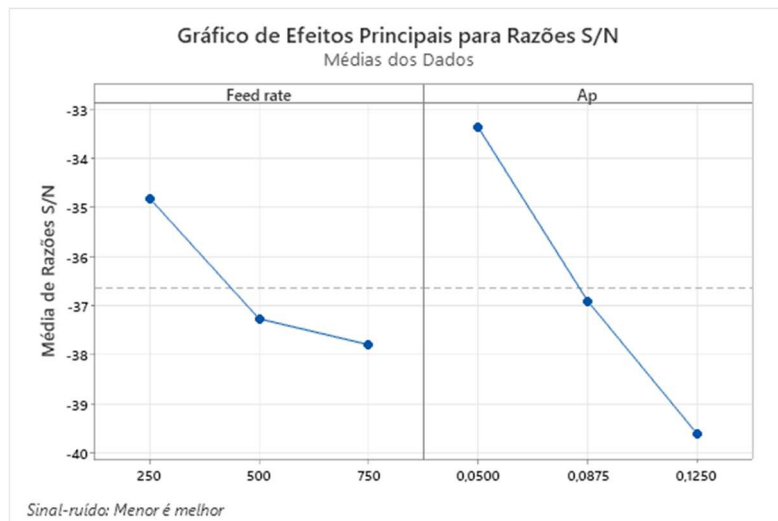


Gráfico curva de S/N para cada parâmetro para os ensaios de força resultante Pferd6U

Análise de variância da força Pferd6U

Fonte	GL	Soma dos quadrados	Quadrados médios	Valor F	Valor-P	Contribuição
Vf	2	383,14	191,57	17,98	0,010	25,84%
Ap	2	1056,69	528,35	49,58	0,002	71,28%
Erro	2	42,63	10,66			2,88%
Total	8	1482,46				100,00%

Força estimada método convencional Pferd6U

Resposta	Ajuste	EP do Ajustado	IC de 95%	IP de 95%
força	39,15	2,43	(32,39; 45,90)	(27,84; 50,45)

Rugosidade superficial Pferd6U

Relação entre a rugosidade superficial e as razões sinal-ruído Pferd6U

Ensaio	Vf (mm/min)	Ap (mm)	Ra (µm)	S/N
E1	250	0,05	1,666	-4,43350
E2	250	0,0875	1,956	-5,82738
E3	250	0,125	1,900	-5,57416
E4	500	0,05	1,712	-4,67109
E5	500	0,0875	1,963	-5,85841
E6	500	0,125	2,104	-6,45926
E7	750	0,05	2,178	-6,76196
E8	750	0,0875	2,438	-7,74067
E9	750	0,125	2,709	-8,65746

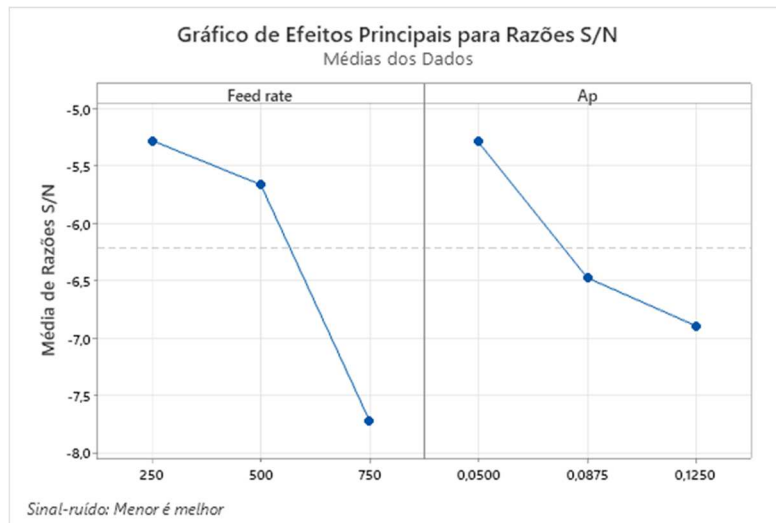


Gráfico Curva de S/N para cada parâmetro para rugosidade superficial Pferd6U

Análise de variância para rugosidade superficial Pferd6U

Fonte	GL	Soma dos quadrados	Quadrados médios	Valor F	Valor-P	Contribuição
Vf	2	0,63470	0,317352	38,27	0,002	70,39%
Ap	2	0,23387	0,116934	14,10	0,015	25,94%
Erro	2	0,03317	0,008292			3,68%
Total	8	0,90174				100,00%

Rugosidade estimada método convencional Pferd6U

Resposta	Ajuste	EP do Ajustado	IC de 95%	IP de 95%
Ra	1,6232	0,0679	(1,4347; 1,8116)	(1,3078; 1,9385)