

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO
SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

**Análise da integridade superficial no fresamento
de topo do aço 4340 utilizando pastilhas
convencionais e wiper**

Diego Carvalho dos Santos

Prof. Orientador: Tatiane de Campos Chuvas

**Rio de Janeiro
Novembro de 2018**

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO
SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

**Análise da integridade superficial no fresamento
de topo do aço 4340 utilizando pastilhas
convencionais e wiper**

Diego Carvalho dos Santos

Projeto final apresentado em cumprimento às
normas do Departamento de Educação Superior do
CEFET/RJ, como parte dos requisitos para obtenção
do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Prof. Orientador: Tatiane de Campos Chuvas

**Rio de Janeiro
Novembro de 2018**

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família, principalmente minha falecida avó Geralda, que sempre me apoiou em todas as escolhas da minha vida, inclusive na decisão de me tornar um engenheiro. Ao meu tio Francisco que sempre me ajudou nos estudos, sugerindo livros e acompanhando meu crescimento desde a escola.

Agradeço aos meus amigos do colégio, do curso técnico, da faculdade, e principalmente meus amigos aqui do bairro, que sempre tiveram paciência e entendiam minha ausência por conta de trabalho ou estudo, e que sempre me apoiaram e acreditaram na minha formatura em engenharia mecânica.

Agradeço aos técnicos do CEFET, em especial ao Hiron do Laboratório de Materiais (LAMAT), que me auxiliou em todo o processo de preparação de amostras e com a utilização do Microdurômetro; ao Leonardo do laboratório de fresagem, que foi o responsável pela usinagem ocorrida no presente trabalho; ao Breno, que me auxiliou com tudo que eu precisei no Laboratório de Pesquisa em Usinagem (LABUS) e ao estagiário Tharcyo do LABUS, que me ajudou em boa parte do ensaio de rugosidade das amostras.

Agradeço também aos professores do CEFET, Luiz Felipe, que me auxiliou com os ensaios de microdureza; e em especial a professora Tatiane Chuvas, minha orientadora, que apesar do meu horário muito apertado por conta do estágio, sempre esteve disponível para me atender, me apoiou e me ajudou em tudo que era necessário para o andamento do projeto.

RESUMO

A usinagem é um dos processos de fabricação mais utilizados na indústria devido a sua versatilidade e possibilidade de gerar peças das mais diferentes geometrias. Dentre esses processos, o fresamento é um tipo de usinagem que demonstra claramente sua versatilidade, principalmente por conta da possibilidade da utilização de ferramentas de diferente formatos e materiais, o que permite que sejam fabricadas peças com variadas características. Diversos parâmetros influenciam diretamente a qualidade superficial do componente usinado como a geometria da ferramenta de corte, a utilização de lubri-refrigeração ou não durante o processo e os parâmetros de corte. Quanto a geometria das ferramentas, a pastilha *wiper* vem sendo muito utilizada por conta da sua diferença em relação as pastilhas convencionais. Essa pastilha não possui um raio na ponta de corte como as pastilhas convencionais, e sim uma aresta plana de corte que gera melhorias na integridade superficial da peça usinada. O presente trabalho tem por objetivo analisar a influência da geometria da ferramenta de corte na integridade superficial do aço SAE 4340 durante o fresamento de topo com lubri-refrigeração, comparando ferramentas com geometria de corte convencional e *wiper* (também chamada de pastilha alisadora), sob diferentes parâmetros de corte. Os resultados mostraram que as superfícies usinadas por pastilhas *wiper* obtiveram melhor qualidade superficial, apresentando menores valores de rugosidade do que aquelas usinadas por pastilhas convencionais. Porém, a utilização das pastilhas alisadoras gerou maiores valores de microdureza na superfície usinada, devido a uma maior taxa de deformação do material, que pode ter causado algum tipo de encruamento superficial.

Palavras chaves: Fresamento, aço SAE 4340, integridade superficial.

ABSTRACT

Machining is one of the most widely used manufacturing processes in industry due to its versatility and the possibility of generating parts of the most different geometries. Among these processes, milling is a type of machining that clearly demonstrates its versatility, mainly because of the possibility for using tools of different formats and materials, which allows the manufacture of multiple characteristics parts. Several parameters directly influence the surface quality of the machined component such as the cutting tool geometry, the use of lubricants during the process and the cutting parameters. As for the geometry of the tools, the wiper insert has been widely used because of its difference from conventional inserts. This insert does not have a radius at the cutting tip like conventional inserts, but rather a flat cutting edge that generates improvements in the machined part surface integrity. The aim of the present work is to analyze the influence of cutting tool geometry on the surface integrity of SAE 4340 steel during top milling with lubrication, comparing tools with conventional and wiper geometry, under different cutting parameters. The results showed that surfaces machined by wiper inserts obtained better surface quality, presenting lower roughness values than those machined by conventional ones. However, the use of wiper inserts generated higher values of microhardness on machined surface due to a higher material deformation rate, which may have caused some type of surface hardening.

Key words: Milling, SAE 4340 steel, surface integrity.

SUMÁRIO

Capítulo 1.....	1
Introdução.....	1
Capítulo 2.....	3
Revisão bibliográfica.....	3
2.1. Usinagem.....	3
2.1.1. Fresamento.....	4
2.1.1.1. Parâmetro de Corte.....	6
2.2. Ferramentas de corte.....	9
2.3. Pastilhas Wiper.....	12
2.4. Integridade Superficial.....	14
2.4.1. Rugosidade Superficial.....	15
2.4.2. Microdureza.....	20
2.5. Aço 4340.....	24
2.5.1. Usinagem do aço 4340.....	25
Capítulo 3.....	27
Materiais e métodos.....	27
3.1. Material Utilizado.....	27
3.2. Preparação das Amostras para o Fresamento.....	27
3.3. Fresamento.....	30
3.4. Medição da Rugosidade.....	34
3.5. Medição da Microdureza.....	35
3.6. Macrografia.....	37
Capítulo 4.....	39
Resultados e discussão.....	39
4.1. Análise das rugosidades.....	39
4.1.1. Mapas de rugosidade.....	39
4.1.2. Médias de rugosidade.....	44
4.2. Análises de microdureza.....	48
4.2.1. Microdureza superficial.....	48
4.2.2. Microdureza em profundidade.....	50
4.3. Análise da macrografia.....	52
Capítulo 5.....	53

Conclusão	53
Sugestões para trabalhos futuros	54

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Tipos de superfícies geradas por usinagem	4
Figura 2.2: Variedade de tipos e formas de fresas.....	5
Figura 2.3: (a) Fresamento tangencial ; (b) Fresamento frontal.....	5
Figura 2.4: Parâmetros de corte no fresamento de topo.	7
Figura 2.5: a) Fresamento tangencial concordante. b) Fresamento tangencial discordante.....	7
Figura 2.6: Fresas de topo para usinagens de bolsões	8
Figura 2.7: Diferentes tipos de fresas de topo.	9
Figura 2.8: Ângulos de uma ferramenta de corte.	10
Figura 2.9: Arestas de corte e superfícies da parte de corte de uma fresa de topo.....	11
Figura 2.10: Efeito do raio da ferramenta na rugosidade superficial da peça usinada em diferentes velocidades de corte - a) 80 m/min b) 100 m/min c) 120 m/min.....	12
Figura 2.11: Principais geometrias das pastilhas de corte.....	13
Figura 2.12: Comparação da superfície gerada por pastilha com raio de ponta e pastilha com fase plana como aresta secundária.....	13
Figura 2.13: Comprimento <i>bs</i> da pastilha <i>wiper</i> e seu ajuste.	14
Figura 2.14: Representação do perfil de rugosidade <i>Ra</i>	17
Figura 2.15: Perfil de corte no fresamento de topo	18
Figura 2.16: Comparação dos principais parâmetros de corte analisados pela rugosidade gerada.....	19
Figura 2.17: Influência do raio da ferramenta e do avanço na rugosidade da peça usinada. ..	19
Figura 2.18: Ensaio de dureza Vickers.....	21
Figura 2.19: Perfis de microdureza após fresamento de aço AISI 1010 e AISI 4340,.....	22
Figura 2.20: Perfis de microdureza após fresamento de aço AISI 1010 e AISI 4340,.....	22
Figura 2.21: Relação da microdureza com o tipo de pastilha.....	23
Figura 2.22: Corpo de prova e posicionamento dos termopares.	25
Figura 2.23: Comportamento da rugosidade superficial	27
Figura 3.1: Barra de aço SAE 4340 de secção circular fornecida com sua geometria inicial (unidades em mm)	28
Figura 3.2: Sequência de preparação da geometria das amostras	29
Figura 3.3: Dimensões finais obtidas para a amostra (unidades em mm).	29
Figura 3.4: Curva de estabilização de temperatura do forno durante o TTAT.....	30
Figura 3.5: Fresadora Ferramenteira VEKER, modelo 420i.....	31

Figura 3.6: Pastilha convencional utilizada.....	33
Figura 3.7: Pastilha <i>wiper</i> utilizada.....	33
Figura 3.8: Rugosímetro portátil <i>Mitutoyo</i>	34
Figura 3.9: Dimensões da malha desenhada sobre a superfície da amostra (unidades em mm)	35
Figura 3.10: Marcação do corte inicial de preparação das amostras para o ensaio de microdureza em profundidade.....	36
Figura 3.11: Peças retangulares obtidas dos cortes das amostras.....	36
Figura 3.12: Amostra pronta para o ensaio de microdureza em profundidade.....	37
Figura 3.13: Posicionamento das indentações no ensaio de Microdureza em profundidade. .	37
Figura 4.1: Rugosidade R_a das superfícies usinadas: (a) C1, (b) C2 , (c) C3, (d) C4, (e) W1, (f) W3, (g) W5 e (h) W7.....	40
Figura 4.2: Rugosidade R_t das superfícies usinadas: (a) C1, (b) C2 , (c) C3, (d) C4, (e) W1, (f) W3, (g) W5, e (h) W7.....	43
Figura 4.3: Média dos valores de rugosidade R_a por condição de corte e pastilha utilizada. .	45
Figura 4.4: Média dos valores de rugosidade R_t por condição de corte e pastilha utilizada. .	47
Figura 4.5: Média dos valores de microdureza para cada condição e pastilha utilizada.....	49
Figura 4.6: Comparação da microdureza gerada no fresamento com lubri-refrigeração (CL) e sem lubri-refrigeração (SL).	50
Figura 4.7: Microdureza apresentada por distância da borda para cada condição e tipo de pastilha utilizada.	51
Figura 4.8: Imagens da macrografia com aumento de 1000x	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Alguns parâmetros de rugosidade.....	16
Tabela 2.2: Composição química do aço SAE 4340 (%)	24
Tabela 2.3: Dureza do microconstituente (HV)	25
Tabela 2.4: Parâmetros de corte do ensaio de fresamento.....	26
Tabela 3.1: Composição química do aço SAE 4340 (em % de peso)	27
Tabela 3.2: Condições de corte das amostras	31
Tabela 3.3: Condições de corte para cada amostra.....	32
Tabela 3.4: Apresentação de dados	32
Tabela 4.1: Média dos valores de rugosidade para cada condição de corte	45
Tabela 4.2: Média dos valores de microdureza para cada condição estudada.....	48

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 2.1	6
Equação 2.2	6
Equação 2.3	16
Equação 2.4	17
Equação 2.5	17
Equação 2.6	20

LISTA DE ABREVIATURAS

SAE - *Society of Automotive Engineers*

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AISI – *American Iron and Steel Institute*

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

TTAT – Tratamento térmico de alívio de tensões

MEV – Microscópio Eletrônico de Varredura

MO – Microscopia Ótica

f_n - Avanço

v_c – Velocidade de corte

a_p – Profundidade de Corte

d – Diâmetro da ferramenta

n – Número de rotações da ferramenta por minuto

z – Número de dentes da fresa

f_z – Avanço por dente

α_1 – Ângulo de folga

β_1 – Ângulo da cunha da ferramenta

γ_1 – Ângulo de saída

A_γ – Superfície de saída

A_α – Superfície principal de folga

S – Aresta principal de corte

r_ϵ – Raio da ponta da pastilha

b_s – Comprimento da fase plana como aresta secundária

R_a – Desvio aritmético médio

R_q – Desvio quadrático médio

R_t – Altura total do perfil

R_z – Altura máxima do perfil

R_{sk} - Fator de Assimetria do perfil (skewness)

R_{ku} – Fator de achatamento do perfil

L_m – Comprimento de amostragem

Y_i – Desvio vertical

HRC – Dureza Rockwell C

HV – Dureza *Vickers*

F – Carregamento aplicado no ensaio de dureza *Vickers*

D – Diagonal da marca da impressão do penetrador

CL – Com lubri-refrigeração

SL – Sem lubri-refrigeração

Capítulo 1

Introdução

Um dos processos de fabricação mais utilizados na indústria é a usinagem, que consiste na atuação de uma ferramenta mais dura e mais resistente provocando a remoção de material da superfície de um corpo de menor resistência. Nesse processo, normalmente executado em materiais metálicos, diversas propriedades devem ser levadas em consideração para que seja garantido uma boa qualidade superficial no componente usinado. Rugosidade, tensões residuais e dureza são exemplos de fatores que influenciam na vida útil do material e devem ser analisados para garantir a qualidade final do material usinado. (FREITAS JUNIOR, 2018; GROOVER, 2010)

A qualidade superficial de um componente usinado pode ser diretamente relacionada com a geometria da ferramenta de corte e os parâmetros utilizados no processo. Uma escolha incorreta desses fatores, pode resultar além das alterações na qualidade superficial, como também uma redução de produtividade, levando a um possível retrabalho. (MASMIATI *et al.*, 2016)

Com relação a geometria das ferramentas de corte, as pastilhas do tipo *wiper* se destacam principalmente pela melhor qualidade superficial da peça usinada, podendo gerar um acabamento de ótima qualidade se comparadas às pastilhas convencionais. Essa melhora é decorrente de uma geometria diferenciada com múltiplos raios na ponta da ferramenta, permitindo que os componentes usinados sejam submetidos a maiores velocidades de avanço sem que isso prejudique o acabamento, as pastilhas *wiper* se tornaram uma solução para fabricação de peças em menor de tempo. Entretanto, por ser um novo tipo de ferramenta, ainda existem poucos estudos sobre a influência da sua utilização na integridade superficial da peça usinada. (D'ADDONA & RAYKAR, 2016)

Assim, o presente trabalho, tem por objetivo analisar a influência da geometria da ferramenta de corte na integridade superficial do aço SAE 4340 após fresamento de topo, utilizando diferentes parâmetros de corte, comparando ferramentas com geometria de corte convencional e *wiper*.

Um fresamento de topo foi executado na fresadora ferramenteira VEKER, modelo 420i do laboratório de fresagem (LAFRE) do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET/RJ) com a utilização de uma emulsão como lubri-refrigerante, onde foram variadas a velocidade de corte e a profundidade de corte no processo.

Após a usinagem, na intenção de verificar a integridade superficial das peças obtidas, foram realizadas as medições de rugosidade (R_a e R_t), de microdureza, e foram obtidas as imagens microestruturais das superfícies usinadas. Dessa maneira foi possível observar que as usinagens com pastilha *wiper* resultaram em amostras de melhor qualidade superficial e que o parâmetro R_t para medidas de rugosidade se mostrou importante na identificação de irregularidades pontuais que não eram observadas pelo parâmetro R_a .

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1. Usinagem

A geometria de uma peça é uma das principais características que devem ser levadas em consideração no momento da fabricação, já que esse formato deve garantir o posicionamento correto da mesma em um conjunto, uma possível transmissão de movimentos entre componentes ou até mesmo garantir uma superfície final de boa qualidade no caso de um acabamento. O objetivo de chegar à geometria desejada pode ser alcançado através de diversos processos de fabricação: processos de conformação, como extrusão, laminação, trefilação e forjamento; processos de fundição; e também processos de retirada de material, que é o caso da usinagem. (GROOVER, 2010)

A usinagem é um processo de fabricação caracterizado pela utilização de uma ferramenta de um material mais duro do que aquele a ser usinado para executar um corte em uma peça, proporcionando na mesma, a geometria final desejada. Uma das suas principais características é a formação do cavaco, material que é removido da peça base pelo corte da ferramenta. Este processo é um dos mais versáteis, devido à grande variedade de geometrias que podem ser adquiridos nas peças usinadas, além disso, muitos dos processos de usinagem possuem uma ótima precisão, tornando isso um diferencial em relação a outros tipos de operações. (FERRARESI, 1977; GROOVER, 2010)

Essas operações de usinagem podem ser categorizadas segundo as geometrias geradas como rotacionais e não rotacionais. As rotacionais são caracterizadas pela geração de peças de formato normalmente cilíndrico, cônico ou também de disco, cuja geometria final é obtida através da rotação da peça usinada em torno do seu próprio eixo, enquanto a ferramenta de corte vai de encontro a peça a ser usinada por um movimento de translação, avançando em sua superfície, como pode ser observado nas Figuras 2.1 (a), (b) e (c), que apresentam operações rotacionais de torneamento. Por outro lado, as não rotacionais são aquelas que geram normalmente geometrias com formato de bloco, ou chapas, onde o corte é executado por uma ferramenta que gira em torno do próprio eixo, e o contato com a superfície a ser usinadas pode ocorrer devido ao movimento combinado de translação da ferramenta em direção a peça

imóvel, como acontece no fresamento tangencial ilustrado pela Figura 2.1 (e); ou devido ao movimento de translação da peça em direção a ferramenta, como no fresamento tangencial ilustrado pela Figura 2.1 (d). (GROOVER, 2010)

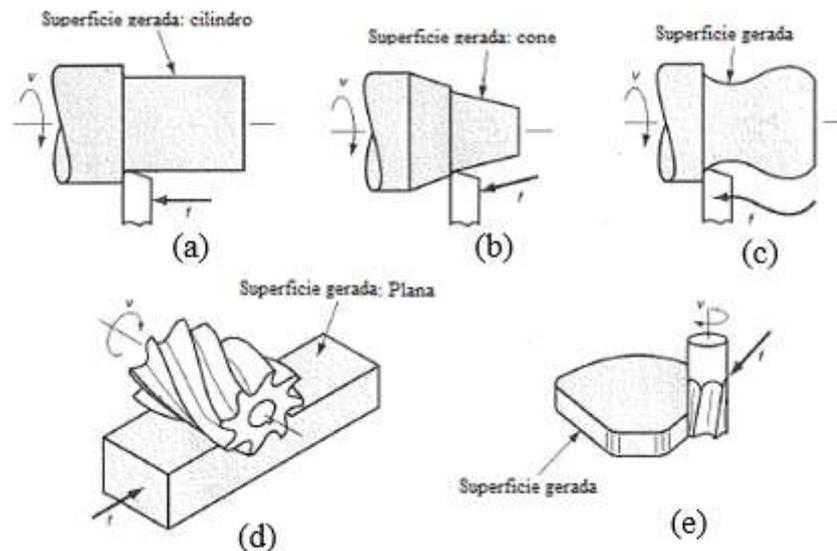


Figura 2.1: Tipos de superfícies geradas por usinagem
 Fonte: GROOVER (2010) modificado.

2.1.1. Fresamento

Uma das operações de usinagem que mais se destaca é o fresamento, caracterizado pela utilização de ferramentas, chamadas fresas, que possuem arestas cortantes dispostas em torno de um eixo. A rotação dessa ferramenta em torno de seu eixo é responsável pelo movimento de corte no processo, enquanto o movimento de avanço normalmente é feito pela própria peça que será usinada, que está fixada na mesa da máquina. A peça é levada de encontro à ferramenta em rotação e, de acordo com a posição em que ocorre esse encontro, as mais variadas formas e dimensões podem ser gerados no material usinado. (DINIZ *et al.*, 2013)

Há uma diversidade de tipos de ferramentas para fresamento demonstrando a versatilidade do processo. A Figura 2.2 demonstra alguns dos principais tipos de fresas: (a) fresa frontal de facear, (b) fresa de topo, (c) fresa cilíndrica de disco, (d) fresa cilíndrica helicoidal e (e) fresa de topo com arestas arredondadas. (DINIZ *et al.*, 2013)

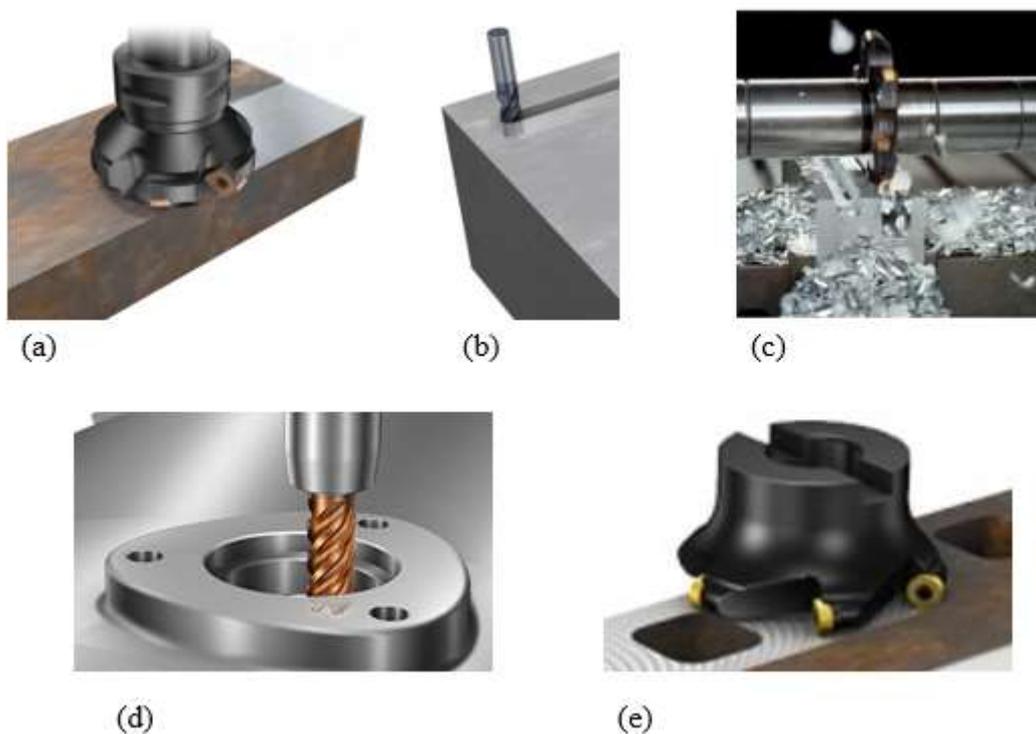


Figura 2.2: Variedade de tipos e formas de fresas
 Fonte: SANDVIK (2018) modificado

Segundo Dib, (2013) os principais tipos de fresamento são: tangencial e frontal (de topo), concordante ou discordante. O fresamento tangencial executa a usinagem na superfície cilíndrica da ferramenta e é ilustrado na Figura 2.3 (a), enquanto no fresamento de topo, essa usinagem ocorre na superfície frontal da mesma e está representado está representado pela Figura 2.3 (b).

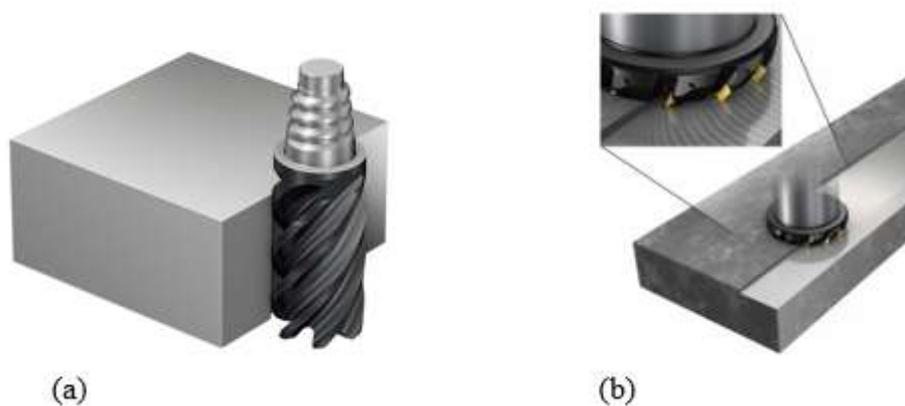


Figura 2.3: (a) Fresamento tangencial ; (b) Fresamento frontal.
 Fonte: SANDVIK (2018) modificado

2.1.1.1. Parâmetro de Corte

Os parâmetros de corte devem ser escolhidos no fresamento para que se possa definir a geometria a ser obtida na peça usinada e a qualidade superficial que se deseja obter. Através da escolha correta desses parâmetros, o fresamento pode gerar peças das mais variadas geometrias, com uma excelente precisão dimensional e qualidade superficial que pode alcançar valores de rugosidade muito baixos. (GROOVER, 2010)

Os principais parâmetros de corte são: avanço (f_n), a velocidade de corte (v_c) e a profundidade de corte (a_p), demonstrados na Figura 2.4. A velocidade de corte representa a velocidade tangencial instantânea obtida pela rotação da ferramenta em torno da peça e pode ser calculada através da Equação 2.1, onde d é o diâmetro da ferramenta em milímetros, n é o número de rotações da ferramenta por minuto. O avanço é representado pelo percurso alcançado a cada volta da ferramenta. Devido ao fato de normalmente as ferramentas possuírem mais de um dente de corte, o avanço deve ser calculado conforme a Equação 2.2, onde z é o número de dentes da fresa e f_z é o avanço por dente. Já a profundidade de corte, medida perpendicularmente ao plano de corte, representa a profundidade de penetração da ferramenta em relação à peça. (DINIZ *et al.*, 2013; GROOVER, 2010)

$$v_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \quad (2.1)$$

$$f_n = f_z \cdot z \quad (2.2)$$

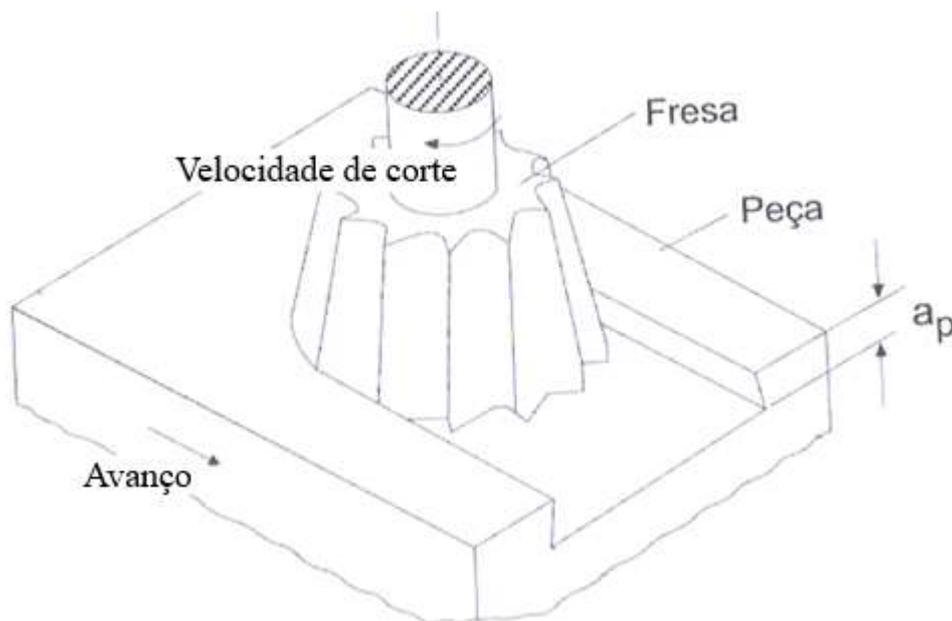


Figura 2.4: Parâmetros de corte no fresamento de topo.
 Fonte: DINIZ *et al.* (2013) modificado

O fresamento tangencial pode ser dividido em concordante e discordante. O fresamento tangencial concordante ocorre quando o movimento de avanço da peça a ser usinada tem o mesmo sentido da rotação da ferramenta. Já no fresamento tangencial discordante, o avanço da peça acontece no sentido contrário do sentido de rotação da fresa. (DIB, 2013) A Figura 2.5 ilustra a diferença entre esses dois tipos de corte:

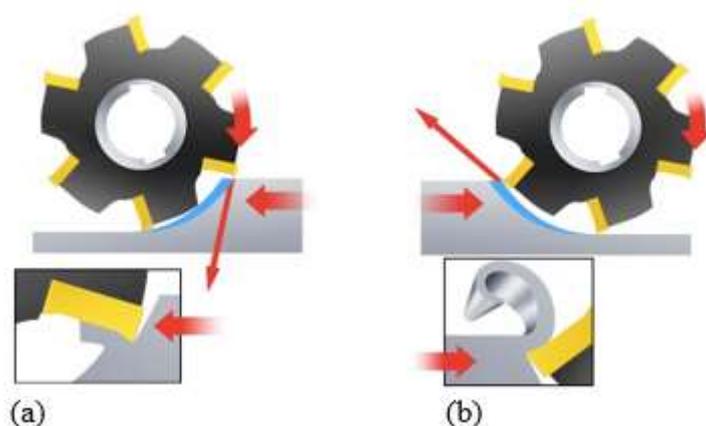


Figura 2.5: a) Fresamento tangencial concordante. b) Fresamento tangencial discordante.
 Fonte: SANDVIK (2018) modificado

No caso do fresamento concordante a espessura do cavaco é a máxima possível no início e a mínima no final de curso do dente da fresa. Enquanto no caso do fresamento discordante ocorre o inverso, a espessura vai aumentando do seu valor mínimo ao máximo ao longo do curso do dente da ferramenta.

O fresamento frontal ou de topo é caracterizado pelo eixo da fresa que se localiza perpendicularmente em relação à superfície usinada e pela utilização de ferramentas chamadas fresas frontais ou de topo. Os dentes ativos nessa operação se localizam na superfície frontal das ferramentas (Figura 2.6) e a superfície usinada resulta da ação conjunta das superfícies frontais e periféricas da fresa. (DINIZ *et al.*, 2013; POLLI, 2005)

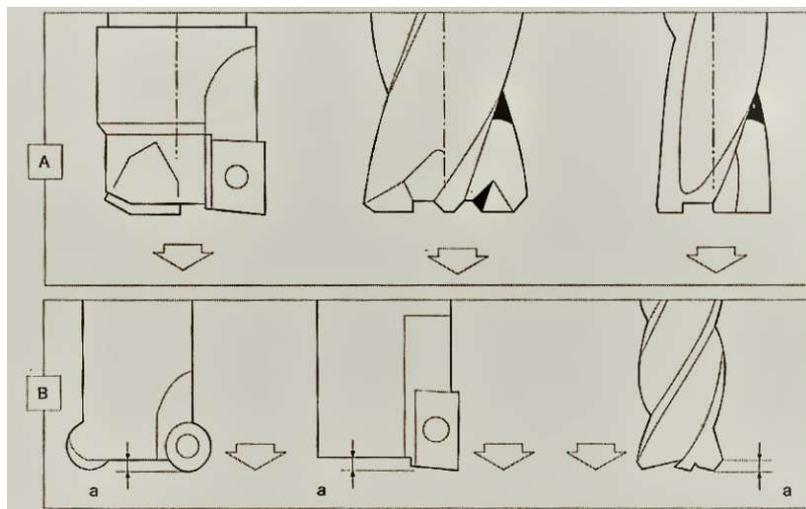


Figura 2.6: Fresas de topo para usinagens de bolsões
Fonte: DINIZ *et al.* (2013)

Esse tipo de ferramenta pode possuir o corpo cônico ou cilíndrico, topo simples ou duplo, de formato reto, semiesféricos ou toroidais, ter canais helicoidais ou retos. Quanto a sua construção, podem ser inteiriças, com insertos brasados ou insertos intercambiáveis. A Figura 2.7 ilustra alguns tipos de fresas de topo: (POLLI, 2005)

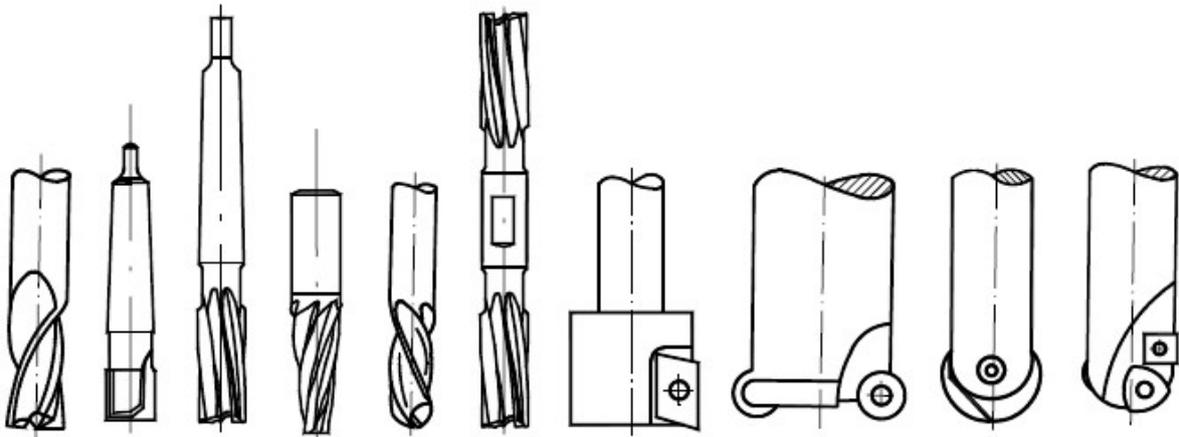


Figura 2.7: Diferentes tipos de fresas de topo.
Fonte: POLLI (2005).

2.2. Ferramentas de corte

Uma das principais características da usinagem é a utilização de uma ferramenta de corte, que durante o processo, ao entrar em contato com a peça a ser usinada, fica responsável pela retirada de material. A ferramenta de corte pode ter diversas características, variadas geometrias e materiais utilizados na fabricação da mesma, dependendo do tipo de processo de usinagem a ser realizado, e o formato que se deseja obter na peça usinada. (GROOVER, 2010)

No caso do fresamento a fresa é a ferramenta utilizada como ferramenta de corte e sua geometria é um dos fatores mais importantes para determinar a sua vida útil, a geometria e a qualidade superficial da peça fresada. Essa geometria das ferramentas de usinagem é composta basicamente por 3 ângulos principais (α_1 - ângulo de folga, β_1 - ângulo da cunha da ferramenta e γ_1 - ângulo de saída), ilustrados na Figura 2.8. A escolha desses ângulos influencia no processo de desgaste da ferramenta, modificando assim sua vida útil, além de ter consequências diretas na qualidade superficial da peça usinada. Utilizar uma ferramenta de corte bastante desgastada prejudica consideravelmente a qualidade superficial da peça. (GUTNICHENKO *et al.*, 2017)

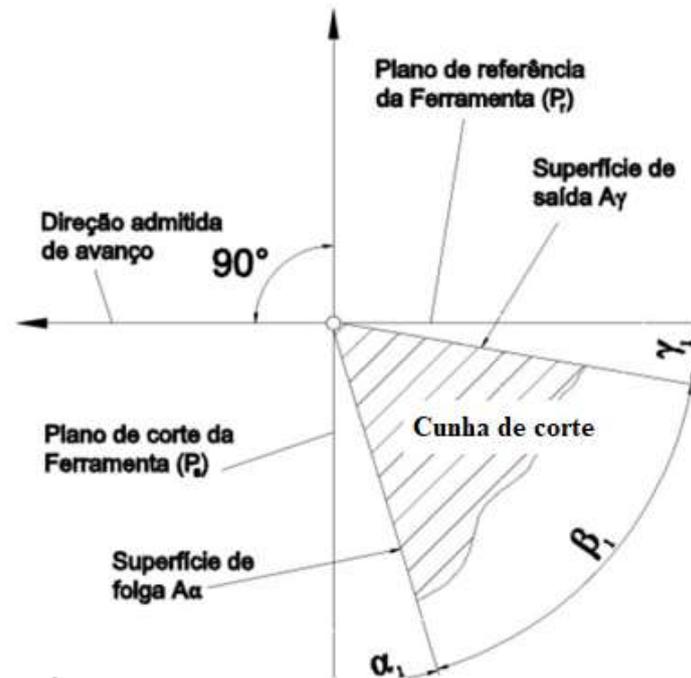


Figura 2.8: Ângulos de uma ferramenta de corte.
Fonte: FREITAS JUNIOR (2018)

Segundo DINIZ *et al.*, (2013), as ferramentas de corte costumam apresentar as principais partes construtivas:

- **Cunha de corte:** é formada pela intersecção das superfícies de saída e de folga da ferramenta, conforme mostrado na Figura 2.8.

- **Superfície de saída (A_γ):** é a superfície da cunha de corte por onde ocorre a formação e a saída do cavaco da região de corte.

- **Superfície principal de folga (A_α):** é a superfície da cunha de corte que contém a aresta principal de corte e que vai de encontro à superfície em usinagem principal, como indicado na Figura 2.9.

- **Aresta principal de corte (S):** é a aresta da cunha de corte formada pela intersecção das superfícies de saída e de folga principal. Responsável pela geração da superfície em usinagem principal da peça. Observar Figura 2.8 e Figura 2.9.

- **Ponta de corte:** é a parte da cunha de corte onde ocorre a intersecção ou a concordância por um arredondamento das arestas principal e secundária de corte, indicada na Figura 2.9.

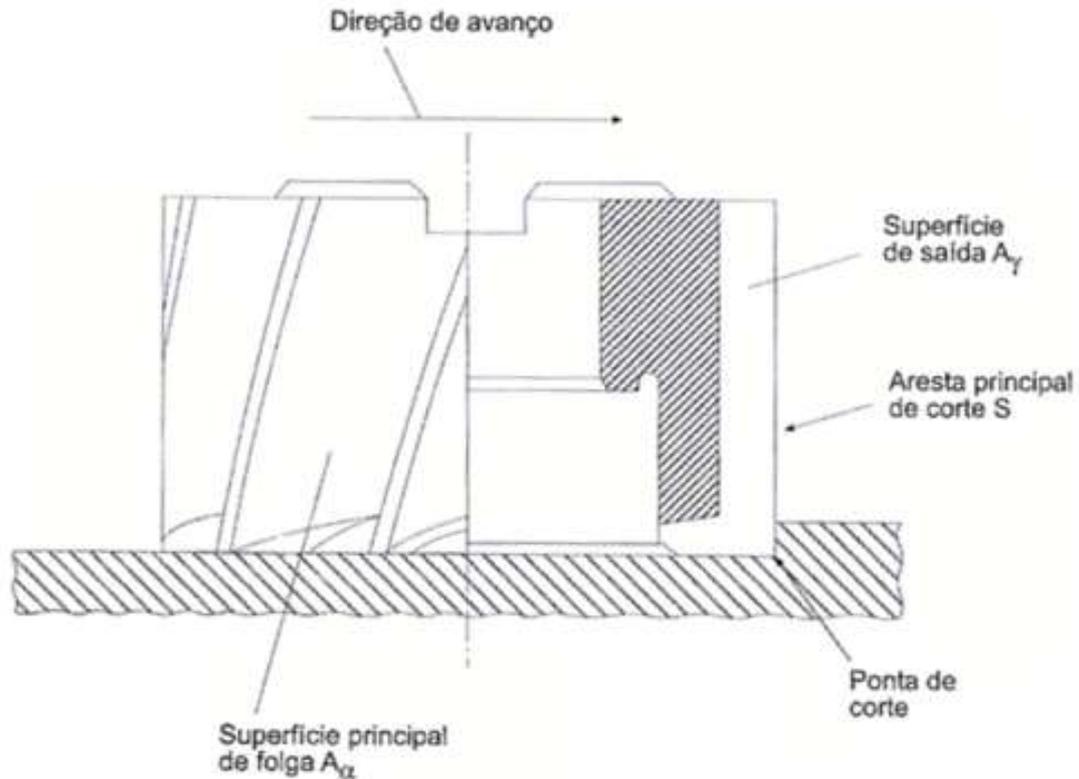


Figura 2.9: Arestas de corte e superfícies da parte de corte de uma fresa de topo.
Fonte: DINIZ *et al.* (2013)

Diversos estudos demonstraram como o raio da ferramenta de corte tem uma grande influência na integridade superficial da peça usinada. Dentre eles, o experimento de HUA & LIU, (2018), que consistiu na análise da influência dos parâmetros de corte na integridade superficial de um torneamento de Inconel 718, indicou que um aumento no raio da ferramenta de corte propicia uma diminuição na rugosidade da superfície usinada. Conforme indicado na Figura 2.10, mesmo com o aumento da velocidade de corte, sempre que a ferramenta com maior raio foi utilizada, a rugosidade diminuiu consideravelmente. Apenas quando o avanço era muito pequeno, o raio da ferramenta não provocou grandes mudanças na rugosidade da peça.

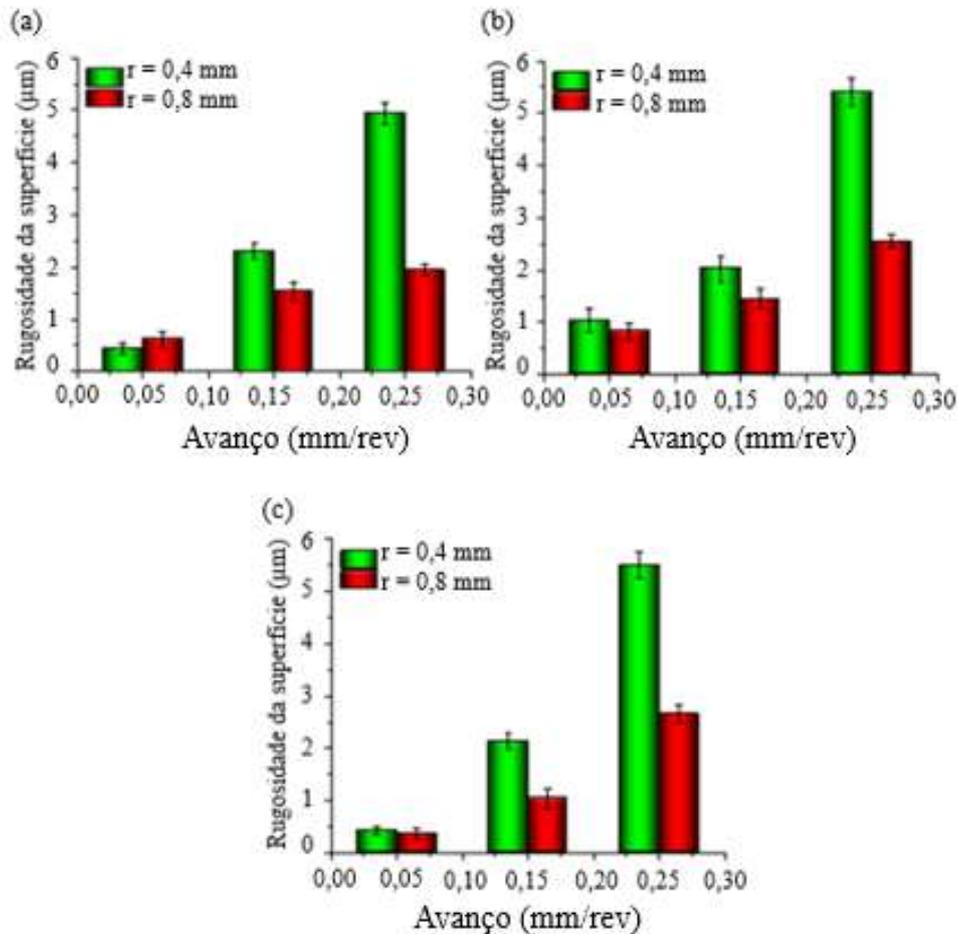


Figura 2.10: Efeito do raio da ferramenta na rugosidade superficial da peça usinada em diferentes velocidades de corte - a) 80 m/min b) 100 m/min c) 120 m/min.

Fonte: HUA & LIU (2018) modificado

2.3. Pastilhas Wiper

Avanços na tecnologia da usinagem vem acontecendo ao longo dos anos. Pesquisadores e utilizadores de ferramentas de corte buscam sempre encontrar uma melhor forma de melhorar a produtividade, a integridade superficial da peça usinada e diminuir os custos de uma operação de usinagem. Essa busca é feita através da tentativa de otimizar a geometria da ferramenta, a vida útil e os parâmetros da usinagem. (SOUZA *et al.*, 2003)

A utilização de ferramentas inteiriças é mais comum para fresas que possuem menor diâmetro. Para a redução dos custos de produção da ferramenta, no caso de fresas com diâmetro maior, é mais comum a utilização de ferramentas com corpo de aço carbono (material de menor custo) e região de corte de metal duro (material de maior custo). E com a chegada das

ferramentas de pastilhas intercambiáveis, isso se torna ainda mais eficiente, já que apenas a pastilha é fabricada com um material mais caro, de maior dureza. (DINIZ *et al.*, 2013)

As pastilhas (também chamadas de insertos) comuns utilizadas no fresamento podem ser de diferentes materiais e geometrias, portanto, uma combinação na escolha dos parâmetros de usinagem e da geometria, como o raio da ponta da pastilha (r_e) e o avanço por dente (f_z), tem um efeito muito significativo na integridade superficial da peça usinada. A Figura 2.11 mostra algumas geometrias das pastilhas. (RICHT; DINIZ *et al.*, 2013)



Figura 2.11: Principais geometrias das pastilhas de corte.
Fonte: SANDVIK (2018)

De acordo com DINIZ *et al.*, (2013) para se obter um melhor acabamento na superfície usinada em relação à pastilhas que possuem raio (r_e) de ponta, são utilizadas pastilhas que têm uma fase plana como aresta secundária e deve ter um comprimento (b_s) de 3 a 10 vezes o avanço por dente. Dessa maneira, é garantido que as partes da peça que já foram usinadas serão alisadas pelos dentes subsequentes àquele que realizou o corte. A Figura 2.12 demonstra a diferença entre a superfície gerada por esses dois tipos de pastilha.

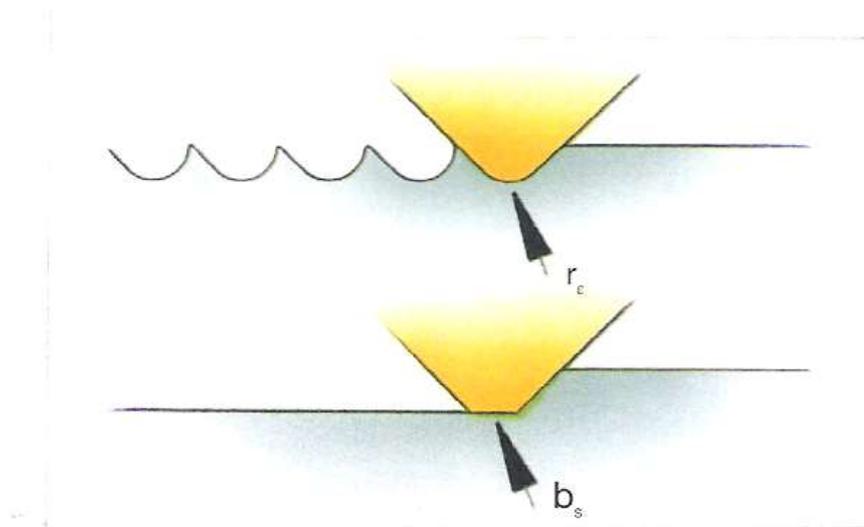


Figura 2.12: Comparação da superfície gerada por pastilha com raio de ponta e pastilha com fase plana como aresta secundária.
Fonte: SANDVICK (2005)

As pastilhas *wiper* são conhecidas como pastilhas alisadoras justamente por conta de seu grande comprimento (b_s). Em pastilhas comuns b_s varia de 1 a 2,5, podendo chegar a 4 mm e em pastilhas *wiper* o valor típico é de 10 mm. Dessa maneira, excelentes acabamentos superficiais podem ser obtidos com a utilização dessas pastilhas alisadoras, podendo ainda trabalhar com valores mais altos de avanço, sem que haja prejuízo na integridade superficial da peça usinada. (DINIZ *et al.*, 2013; SANDVICK, 2005)

A tolerância das pastilhas, a folga nos mancais do eixo-árvore e as rebarbas ou defeitos de fixação das pastilhas na fresa, são fatores que podem fazer com que as arestas de corte da fresa de topo não estejam todas em um mesmo plano, podendo assim causar um prejuízo na qualidade superficial da peça usinada. Por conta disso, a pastilha *wiper* deve ser ajustada levemente abaixo das outras pastilhas, garantindo assim o alisamento das regiões já usinadas. (DINIZ *et al.*, 2013; SANDVICK, 2005). A Figura 2.13 ilustra o posicionamento da pastilha *wiper* e o seu grande comprimento b_s , que nesse caso foi exemplificado com o valor de 8,2 mm.

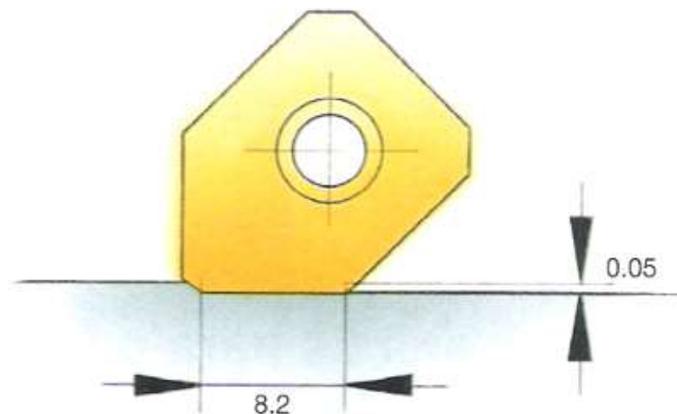


Figura 2.13: Comprimento b_s da pastilha *wiper* e seu ajuste.
Fonte: SANDVICK (2005)

2.4. Integridade Superficial

A integridade superficial pode ser definida como uma medida de qualidade das superfícies usinadas, baseada nas características da estrutura da superfície e do substrato do material. Normalmente as propriedades metalúrgicas, químicas e topológicas da superfície do material, como rugosidade superficial, dureza, alterações microestruturais e tensões residuais são responsáveis pela definição dessa medida de qualidade superficial. Através da análise

dessas propriedades é possível verificar se houve algum tipo de alteração na superfície durante a usinagem e que poderia causar um comprometimento da integridade superficial da peça usinada (BORDINASSI, 2006; LIMA, 2002).

2.4.1. Rugosidade Superficial

A rugosidade superficial pode ser definida como o conjunto de irregularidades formadas por sulcos ou marcas deixadas pela ferramenta que atuou sobre a superfície da peça, e pode ser medida através da utilização de uma grande variedade de aparelhos e, dentre eles, o rugosímetro é o dispositivo mais utilizado. A dimensão e a distribuição dessas irregularidades são fundamentais para caracterizar o desempenho de peças e equipamentos, devido ao fato de afetarem diretamente o ajuste entre peças e componentes. (NOVASKI,1994; MACHADO, 2010)

A norma ABNT NBR ISO 4287 (2002) utiliza diversos parâmetros para que se possa quantificar a rugosidade de uma superfície usinada. Dessa maneira é possível examinar se as tolerâncias especificadas no projeto estão sendo cumpridas. A Tabela 2.1 exemplifica os principais parâmetros identificados na norma. (MACHADO *et al*, 2009)

Tabela 2.1: Alguns parâmetros de rugosidade

Símbolo	Nome	Definição
R_a	Desvio aritmético médio	Média aritmética dos valores absolutos das ordenadas no comprimento de amostragem.
R_q	Desvio médio quadrático	Raiz quadrada da média dos valores das ordenadas no comprimento de amostragem.
R_t	Altura total do perfil	Soma da maior altura de pico do perfil e da maior profundidade de vale do perfil no comprimento de avaliação.
R_z	Altura máxima do perfil	Soma da altura máxima dos picos e a maior das profundidades dos vales do perfil no comprimento de amostragem.
R_{sk}	Fator de Assimetria do perfil (skewness)	Coefficiente entre o valor médio dos valores das ordenadas e R_q ao cubo, no comprimento de amostragem.
R_{ku}	Fator de achatamento do perfil	Coefficiente entre a média dos valores das ordenadas à quarta potência e o valor de R_q à quarta potência no comprimento de amostragem.

Fonte: MACHADO *et al.* (2009)

O desvio aritmético médio (R_a) é um dos parâmetros mais utilizados mundialmente e pode ser obtido através da média aritmética entre os valores absolutos de afastamento dos pontos do perfil superficial até a linha média, como indicado na Equação 2.3 e na Figura 2.14, na qual L_m representa o comprimento de amostragem e Y_i representa o desvio vertical. (MACHADO,2010)

$$R_a = \int_0^{L_m} \frac{|Y_i|}{L_m} dx \quad (2.3)$$

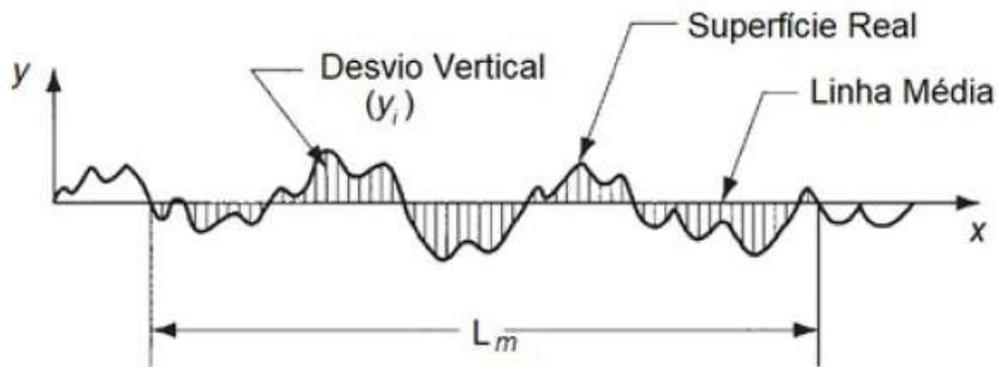


Figura 2.14: Representação do perfil de rugosidade R_a .
Fonte: FREITAS JUNIOR (2018)

A geometria da ferramenta de corte tem influência direta nas características da superfície da peça usinada e, segundo MACHADO *et al.*, (2009), a Equação 2.4 deve ser utilizada para calcular e estimar teoricamente a influência do raio da ferramenta de corte e do avanço na rugosidade da peça.

$$R_a = \frac{r_\varepsilon - \sqrt{r_\varepsilon^2 - \left(\frac{f_z}{2}\right)^2}}{2} \quad (2.4)$$

A altura total do perfil (R_t) é definida como a soma da maior altura de pico do perfil e da maior profundidade de vale do perfil no comprimento de avaliação. Esse é um importante parâmetro de medida de rugosidade devido ao fato de ser um parâmetro que possibilita a avaliação de irregularidades extremas ao longo de todo o comprimento de avaliação, mesmo quando essas não são identificadas pelas medidas obtidas de desvio aritmético médio (R_a). Por ser uma medida de uma média aritmética, esses valores extremos de rugosidade acabam sendo absorvidos. A Equação 2.5 deve ser utilizada para estimar teoricamente o valor desse parâmetro de acordo com a geometria da ferramenta utilizada onde a simbologia é apresentada na Figura 2.15. (MACHADO *et al.*, 2009)

$$R_t = \frac{f_z}{\tan C + \cot D} \quad (2.5)$$

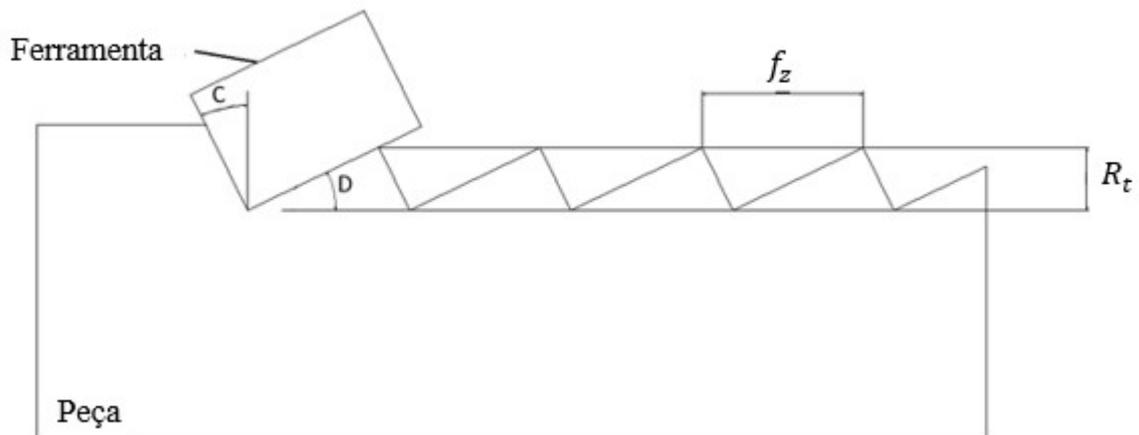


Figura 2.15: Perfil de corte no fresamento de topo
Fonte: MACHADO *et al.* (2009) modificado

Na intenção de verificar a influência da utilização de pastilhas *wiper* na usinagem, D'ADDONA & RAYKAR (2016) executaram um experimento baseado no desvio aritmético médio, promovendo a usinagem de um aço endurecido, comparando a rugosidade (R_a) verificada na peça usinada com pastilhas de geometria comum em relação ao mesmo procedimento de usinagem feito com pastilhas de geometria *wiper*. Os resultados obtidos no experimento demonstraram que mesmo com um avanço maior, o fato da ferramenta *wiper* possuir um raio complementar, aumentando a superfície de contato com a peça, permitiu que a peça mantivesse uma rugosidade menor, em relação aquelas usinadas com ferramentas comuns, como pode ser observado nas Figuras 2.16 e 2.17.

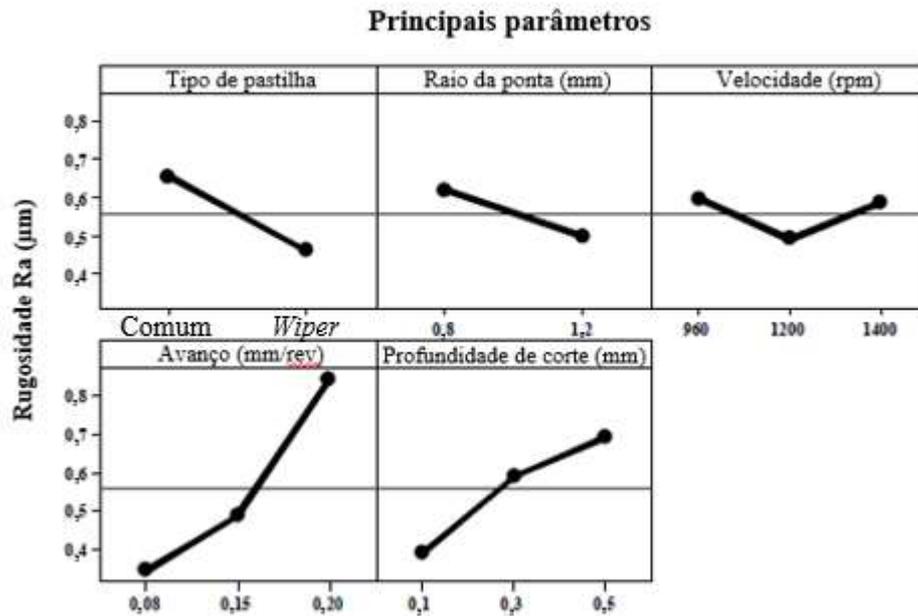


Figura 2.16: Comparação dos principais parâmetros de corte analisados pela rugosidade gerada.

Fonte: D'ADDONA & RAYKAR (2016) modificado

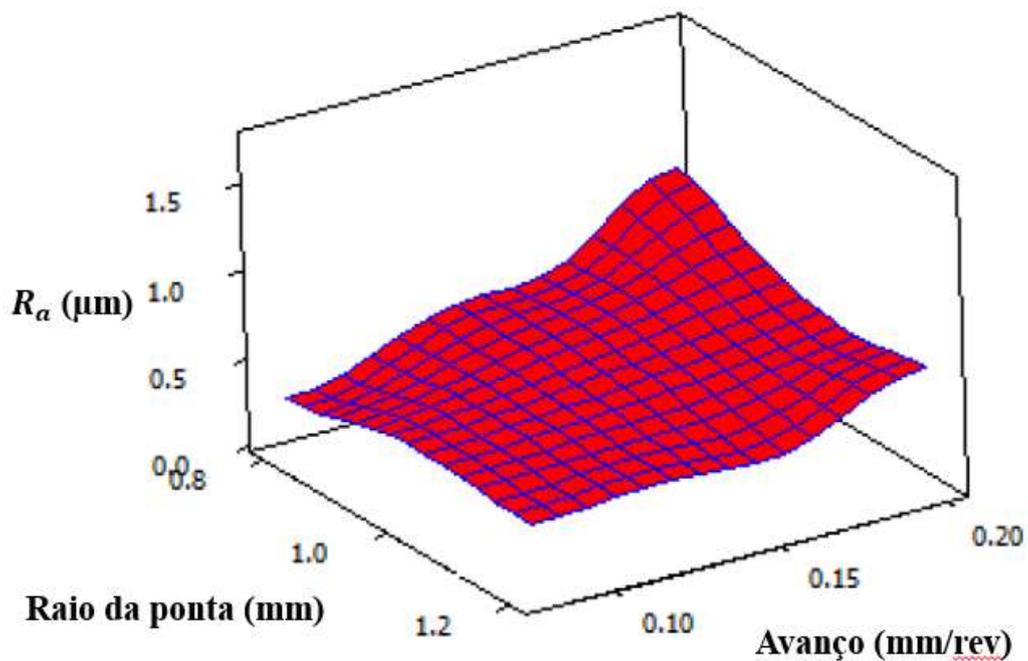


Figura 2.17: Influência do raio da ferramenta e do avanço na rugosidade da peça usinada.

Fonte: D'ADDONA & RAYKAR (2016) modificado

2.4.2. Microdureza

A dureza de um material pode ser definida como a sua resistência a indentações permanentes. Um alto valor de dureza geralmente representa que esse material possui alta resistência a arranhões e desgaste. Diversos experimentos confirmaram o fato de que a dureza superficial de uma peça pode ser alterada após a usinagem. Um aumento na dureza na superfície pode ser provocado por um severo endurecimento induzido pelas deformações plásticas durante a usinagem, esse fenômeno é conhecido como encruamento. (GROOVER, 2010; WANG *et al.*,2014)

Devido à grande importância desse tipo de características do material na engenharia, por exemplo, onde materiais com alto valor de dureza podem ser utilizados na fabricação de ferramentas de corte, existem uma série de ensaios para medir e quantificar o nível de dureza dessas peças. Dentre os principais tipos de ensaios, pode-se citar: Brinell, Rockwell, Knoop e Vickers. (GROOVER, 2010)

O método Vickers é baseado na utilização de um penetrador de diamante, com formato piramidal de base quadrada, com um ângulo de 136° entre suas faces, onde a carga para a medição é aplicada. (LIMA, 2008) O princípio desse teste é o fato de que a marca de impressão deixada pelo penetrador na peça é geometricamente semelhante, independentemente da carga aplicada no ensaio. Dessa maneira, diversos valores de carga (de 1 a 120 kgf aproximadamente) podem ser aplicados, dependendo da dureza do material a ser ensaiado. A dureza Vickers (HV) pode ser determinada então a partir da utilização da Equação 2.6.

$$HV = \frac{1,854 F}{D^2} \quad (2.6)$$

onde F representa o carregamento aplicado em quilogramas, e D representa a diagonal da marca de impressão do penetrador em milímetros, conforme indicado na Figura 2.18. Esse ensaio é amplamente utilizado pelo fato de poder ser usado pra todos os metais e possui uma das escalas mais abrangentes dentre os outros. (GROOVER, 2010)

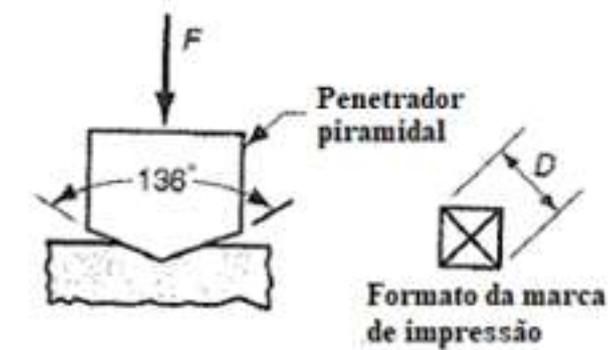


Figura 2.18: Ensaio de dureza Vickers
 Fonte: GROOVER (2010) modificado

Segundo FUNDAÇÃO ROBERTO MARINHO, (2000) no caso de aplicações específicas, focadas principalmente em superfícies que sofreram tratamentos térmicos, como carbonetação e têmpera, ou para determinação da dureza de microconstituintes individuais de uma microestrutura, é utilizado o ensaio de microdureza Vickers. Esse tipo de ensaio envolve o mesmo procedimento prático que o ensaio Vickers, só que utiliza cargas menores que 1 kgf. Dessa maneira, pelo fato da carga aplicada ser muito pequena, a impressão produzida é microscópica.

Muitos trabalhos vêm demonstrando a influência dos parâmetros de corte da usinagem na microdureza superficial da peça usinada, como PEREIRA *et al.* (2017), que verificaram as alterações na microdureza dos aços AISI 1010 e AISI 4340 de acordo com a variação dos principais parâmetros de corte no fresamento (velocidade de corte, avanço por dente, profundidade de corte), além do uso de fluido de corte. Seus resultados mostraram que o aumento da velocidade de corte, provocou um aumento considerável da dureza na superfície do aço AISI 4340, diferentemente do aço AISI 1010 que não sofreu alteração considerável. O que pode ser explicado pela diferença de temperabilidade entre esses aços, no caso do AISI 4340, que possui maior teor de C, pode ter ocorrido a formação de uma camada de martensita não temperada transformada de austenita, conforme pode ser verificado na comparação das Figuras 2.19 e 2.20.

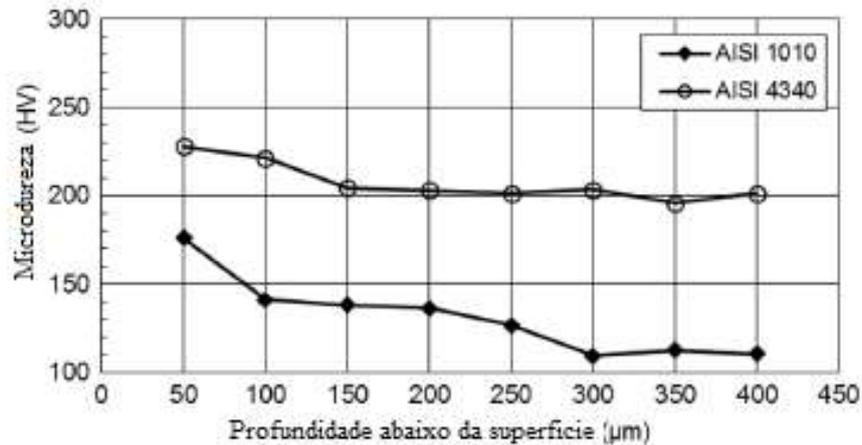


Figura 2.19: Perfis de microdureza após fresamento de aço AISI 1010 e AISI 4340, $v_c = 100$ m/min, $f_z = 0,05$ mm/dente e $a_p = 0,5$ mm. Sem fluido de corte.
Fonte: PEREIRA *et al.* (2017) modificado.

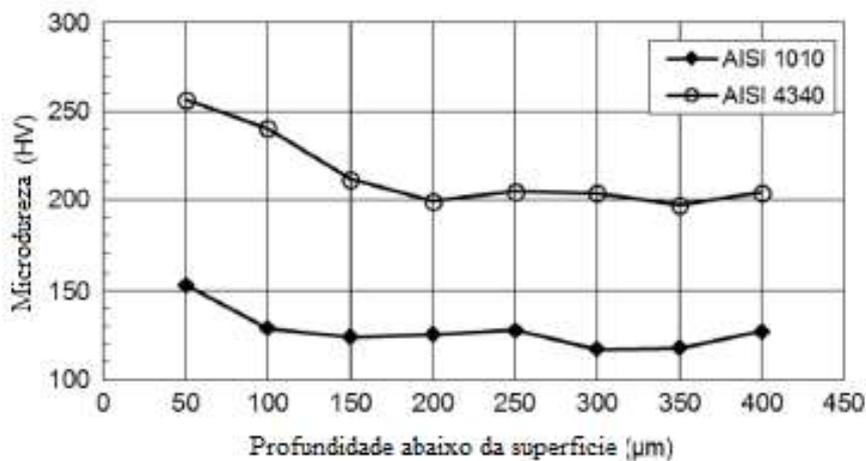


Figura 2.20: Perfis de microdureza após fresamento de aço AISI 1010 e AISI 4340, $v_c = 300$ m/min, $f_z = 0,05$ mm/dente e $a_p = 0,5$ mm. Sem fluido de corte.
Fonte: PEREIRA *et al.* (2017) modificado.

O fresamento de topo a seco executado por FREITAS JUNIOR, (2018) em um aço 4340 é mais um trabalho que teve o objetivo de demonstrar a influência dos parâmetros de corte na integridade superficial da peça usinada, analisando resultados relacionados a microdureza Vickers, rugosidade R_a e tensões residuais geradas nas amostras usinadas. As usinagens ocorreram com a variação dos seguintes parâmetros: velocidade de corte (170 m/min e 210 m/min), profundidade de corte (0,4 mm e 0,6 mm) e geometria da pastilha (convencional e *Wiper*), criando dessa maneira quatro condições de corte distintas para cada geometria de pastilha ao combinar esses parâmetros. Os resultados obtidos em relação a microdureza são

apresentados no gráfico da Figura 2.21 através das médias e desvios-padrões por condição e pastilha utilizada.

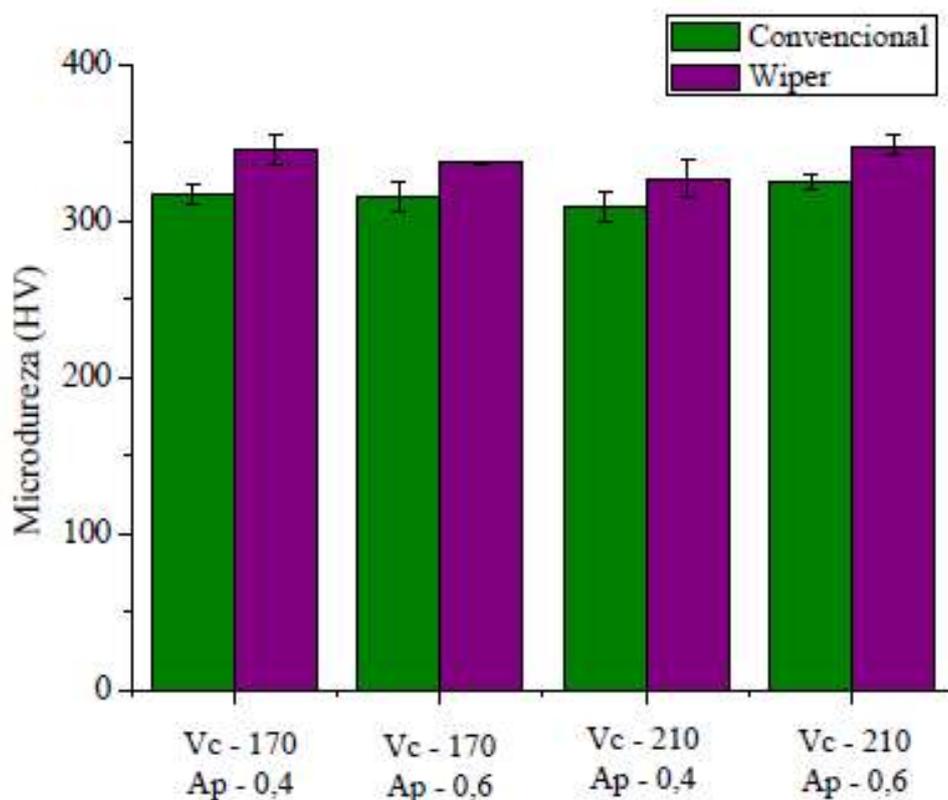


Figura 2.21: Relação da microdureza com o tipo de pastilha.
Fonte: FREITAS JUNIOR (2018)

Os resultados de FREITAS JUNIOR, (2018) mostraram que apesar de uma pequena diferença entre os valores de microdureza encontrados para cada tipo de ferramenta, ficou evidente uma maior magnitude de microdureza gerada pelo fresamento por pastilha *wiper* do que por pastilhas convencionais. Em relação aos outros parâmetros de corte estudados, foi possível verificar que a profundidade de corte teve pouca influência nos valores de microdureza gerados; por outro lado, a velocidade de corte apresentou um comportamento diferente para cada profundidade de corte. Ao fixar a profundidade de corte em 0,6 mm, um aumento de velocidade de corte gerou um aumento na microdureza gerada, ao contrário do que aconteceu ao fixar a profundidade de corte em 0,4 mm, que ao aumentar a velocidade de corte provocou um comportamento inverso, gerando valores menores de microdureza na superfície da peça usinada.

2.5. Aço 4340

O aço 4340 é caracterizado por sua elevada temperabilidade e boa forjabilidade, porém, possui uma baixa usinabilidade (quando temperado). Dependendo de seu teor de carbono, na condição temperada, esse material pode chegar a valores de dureza na faixa de 54 a 59 HRC. Devido as suas boas propriedades mecânicas, o aço 4340 é amplamente utilizado em componentes e eixos muito solicitados, virabrequins de aviões, tratores e veículos em geral (GERDAU, 2018). Baseada na norma SAE J404:2000, sua composição química é apresentada na Tabela 2.2:

Tabela 2.2: Composição química do aço SAE 4340 (%)

SAE/AISI	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	P
4340	0,38-0,43	0,60-0,80	0,15-0,35	0,70-0,90	1,65-2,00	0,20-0,30	0,030máx

Fonte: Norma SAE J404:2000

O aço 4340 pode apresentar diversas estruturas, como bainita, ferrita, martensita e austenita, e cada uma delas confere ao material diferentes propriedades mecânicas. A obtenção dessas fases e constituintes, a quantidade e morfologia que podem se apresentar no aço depende diretamente da forma como ocorre o resfriamento desse aço avaliado a partir de sua região austenítica. O principal fator que influencia nesse processo é a velocidade de resfriamento do material. (LEE & SU, 1999)

Os efeitos de diferentes velocidades de resfriamento sobre as mudanças microestruturais no aço 4340 foram analisados por XAVIER *et al*, (2014). O experimento se baseou no aquecimento do aço até sua completa austenitização e a utilização do Ensaio Jominy para registrar os ciclos térmicos em diferentes posições do corpo de prova. A Figura 2.22 representa o corpo de prova utilizado no experimento e o posicionamento dos termopares.

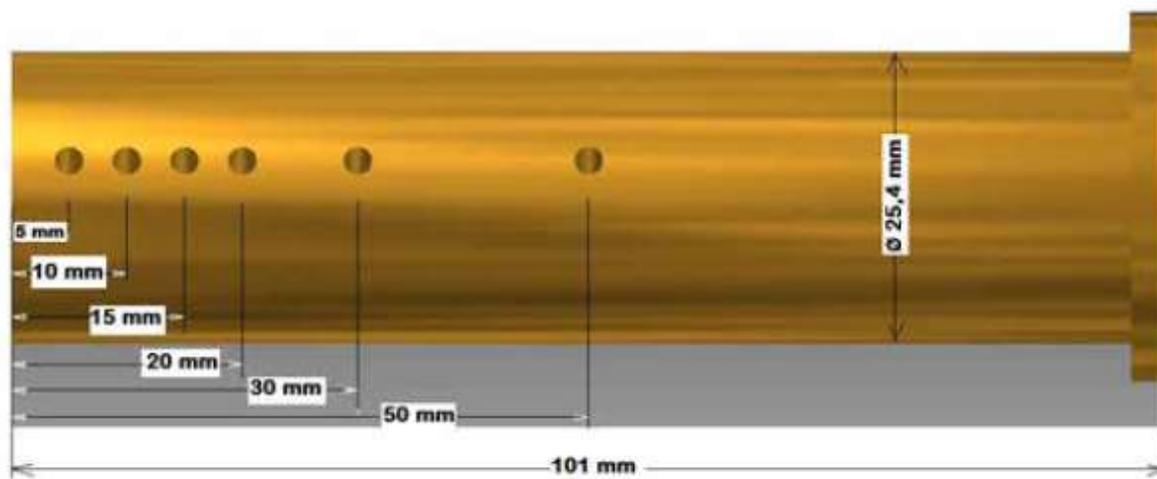


Figura 2.22: Corpo de prova e posicionamento dos termopares.
Fonte: XAVIER *et al.* (2014)

Uma análise de dureza também foi efetuada nesse experimento, conforme indicado na Tabela 2.3. Os resultados mostraram que ao reduzir a velocidade de resfriamento, ocorreu também uma redução na dureza apresentada pela bainita, por outro lado, no caso da martensita, essa diferença de velocidade no resfriamento quase não teve influência em sua dureza. O que pode ser justificado pelo fato de que o principal fator responsável por uma alteração na dureza da martensita, seja o seu teor de carbono. (XAVIER *et al.*, 2014)

Tabela 2.3: Dureza do microconstituente (HV)

Microconstituente	Posição					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Bainita	*	562	477	380	356	367
Martensita	763	748	769	760	735	749

Fonte: XAVIER *et al.* (2014)

2.5.1. Usinagem do aço 4340

Alguns autores vêm estudando a usinagem do aço 4340, como LIMA, (2008), que na intenção de identificar os efeitos gerados pelos parâmetros de corte, na integridade superficial e subsuperficial de peças desse material, executou os seguintes processos de usinagem:

retificação cilíndrica, torneamento, fresamento de topo e furação. As usinagens aconteceram a partir da variação dos parâmetros de corte (V_c , a_p , f_n , f_z , com e sem lubri-refrigeração) possibilitando assim, verificar qual ou quais desses parâmetros promovem maiores alterações na integridade superficial das peças usinadas. Para o fresamento de topo realizado no experimento foram analisados apenas os parâmetros apresentados na Tabela 2.4, velocidade de corte (V_c), avanço por dente (f_z) e profundidade de corte (a_p).

Tabela 2.4: Parâmetros de corte do ensaio de fresamento

V _c 01	80 m/min	f _z 01	0,100 mm/volta	a _p 1	0,75 mm
V _c 02	100 m/min	f _z 02	0,083 mm/volta	a _p 2	0,50 mm
V _c 03	120 m/min	f _z 03	0,050 mm/volta		

Fonte: LIMA (2008)

Após o fresamento, foram realizadas as análises dos resultados da rugosidade superficial e da dureza obtidos nas amostras. Os resultados obtidos da análise de rugosidade são apresentados nos gráficos da Figura 2.23, que indica os valores de rugosidade R_a para 2 velocidades de corte, uma em cada gráfico, combinadas com 3 avanços por dentes e 2 profundidades de corte. Os resultados não apresentaram um comportamento padronizado em geral, pode-se observar que uma redução no avanço por dente, por vezes causou um aumento na rugosidade da peça usinada, e outras vezes obteve um comportamento inverso. No caso da profundidade de corte foi verificado que uma redução dos valores desse parâmetro gera uma redução também nos valores de rugosidade obtidos. Por fim, analisando a influência da velocidade de corte foi possível perceber uma tendência de que o aumento dos valores desse parâmetro gera uma redução nos valores de rugosidade obtidos, já que esse comportamento pôde ser observado para a maioria das amostras. (LIMA, 2008)

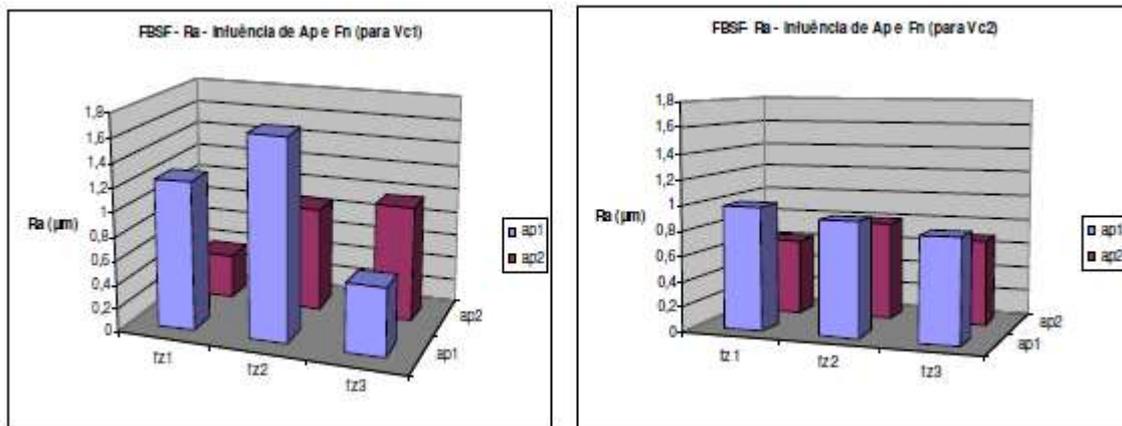


Figura 2.23: Comportamento da rugosidade superficial
Fonte: LIMA (2008)

Capítulo 3

Materiais e Métodos

3.1. Material Utilizado

O material utilizado no presente trabalho foi o aço SAE 4340, laminado bruto, com tratamento térmico de alívio de tensões e com dureza de 270 HV, de acordo com o certificado de qualidade fornecido pelo fabricante. Ainda de acordo com o certificado, a Tabela 3.1 a seguir, apresenta a composição química do material utilizado.

Tabela 3.1: Composição química do aço SAE 4340 (em % de peso)

C	Mn	Si	P	S	Cr
0,39	0,72	0,25	0,01	0,025	0,75
Ni	Mo	V	Co	Al	Cu
1,72	0,24	0,01	0,01	0,05	0,04

3.2. Preparação das Amostras para o Fresamento

As amostras de aço 4340 foram obtidas a partir de uma barra de seção circular de aço SAE 4340, que possuía as dimensões iniciais de 51 mm de diâmetro e 262 mm de comprimento quando foi fornecida, como mostrado na Figura 3.1. Em seguida, a barra foi cortada em 3 partes semelhantes e foi executado um faceamento de suas superfícies, formando assim 3 barras cilíndricas de comprimento de 63 mm. A próxima etapa foi o fresamento das peças, de maneira que ficassem com uma seção quadrada de aproximadamente 35 x 35 mm. Essas barras foram serradas ao meio, ao longo de seus comprimentos, com a utilização de uma serra de fita vertical, e foram fresadas ao longo das superfícies cortadas para melhorar o acabamento das mesmas. A Figura 3.2 ilustra a sequência de preparação. Dessa maneira foram obtidas 6 peças retangulares, conforme a Figura 3.3, com as seguintes medidas: 16 mm de altura, 35 mm de largura e 63 mm de comprimento. As duas faces de maior área de cada peça, foram utilizadas como amostras para o experimento, dessa maneira, apesar de serem apenas 6 peças, 12 amostras foram utilizadas.

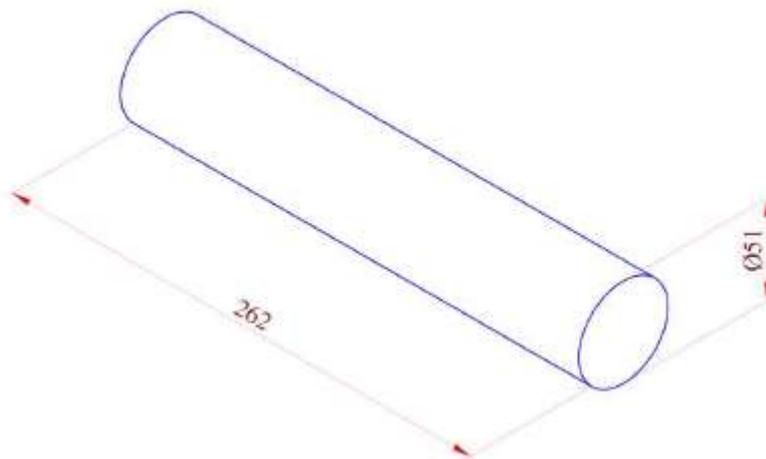


Figura 3.1: Barra de aço SAE 4340 de seção circular fornecida com sua geometria inicial (unidades em mm)

Fonte: FREITAS JUNIOR (2018)

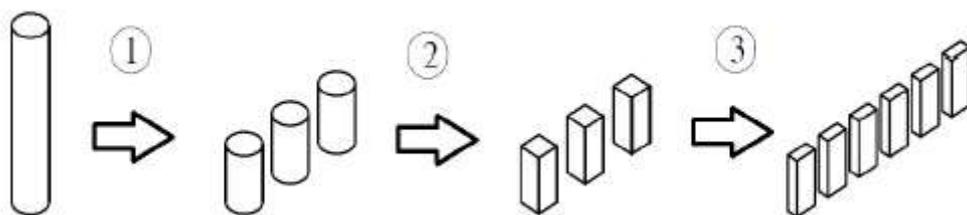


Figura 3.2: Sequência de preparação da geometria das amostras
Fonte: FREITAS JUNIOR (2018)

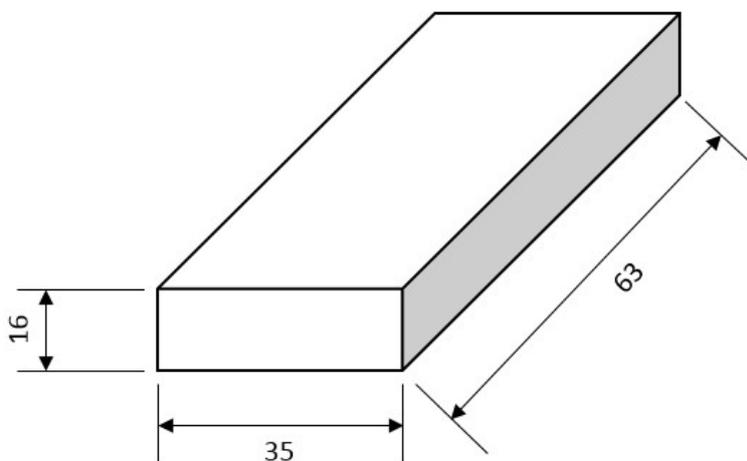


Figura 3.3: Dimensões finais obtidas para a amostra (unidades em mm).

Após a preparação da geometria das amostras é esperado que o material apresente tensões residuais causadas pela usinagem do mesmo, para reduzir o aparecimento dessas tensões residuais foi realizado um tratamento térmico de alívio de tensões (TTAT) a 600°C durante 30 min. O tratamento térmico foi realizado no Laboratório de Soldagem (LASOL) onde, antes de serem levadas ao forno, as amostras foram posicionadas dentro de um cadinho e cobertas por carvão para evitar a decarbonetação ao longo do tratamento térmico. A Figura 3.4 demonstra a taxa de aquecimento com a qual o forno foi aquecido até encontrar a estabilidade em 600°C. As amostras permaneceram sujeitas a essa temperatura por 30 minutos, até que o forno foi desligado para o resfriamento das mesmas.

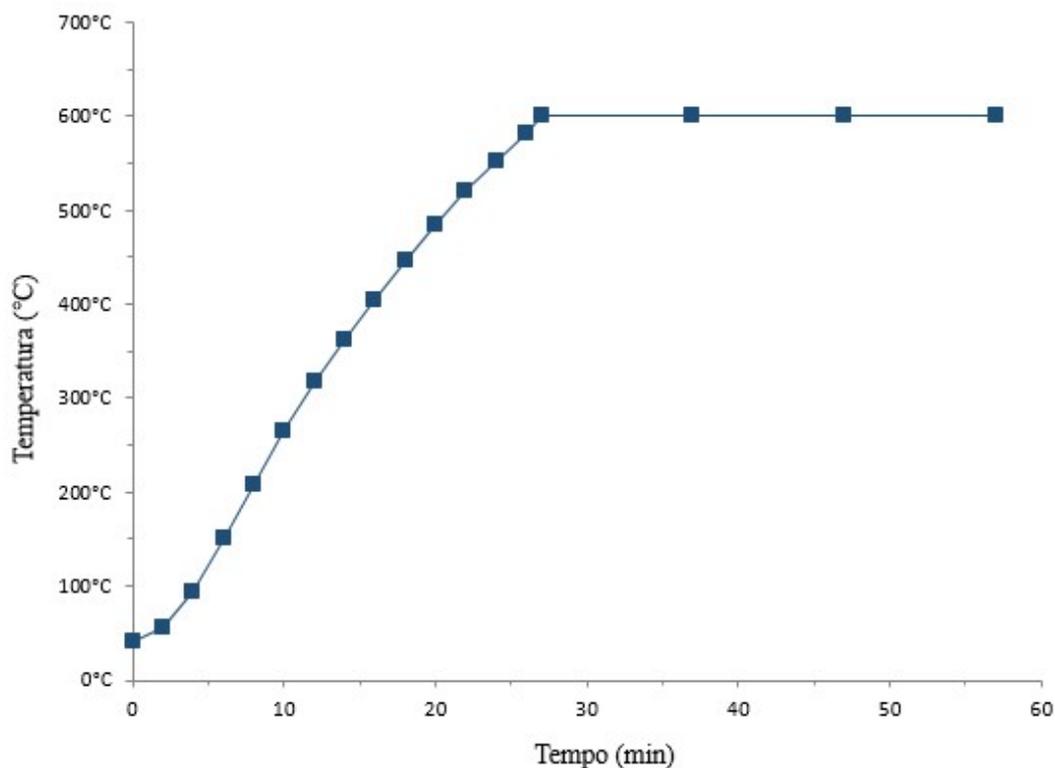


Figura 3.4: Curva de estabilização de temperatura do forno durante o TTAT

Após o tratamento térmico de alívio de tensões, as amostras foram sujeitas a um ensaio de dureza. A média dos valores de dureza verificada após o tratamento térmico de alívio de tensões foi de 265 HV.

3.3. Fresamento

A usinagem das amostras foi realizada na fresadora ferramenteira VEKER, modelo 420i do laboratório de fresagem (LAFRE) do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Sukow da Fonseca (CEFET/RJ) ilustrada na Figura 3.5. Nesse experimento a usinagem realizada foi um fresamento de topo com utilização de uma emulsão como lubrificante a uma vazão de 1,54 L/min.



Figura 3.5: Fresadora Ferramenteira VEKER, modelo 420i

Os parâmetros estudados foram a velocidade de corte e a profundidade de corte, enquanto o avanço por dente foi fixado em 0,1 mm/dente, totalizando assim 4 condições de corte para cada tipo de ferramenta, conforme indicado na Tabela 3.2. A Tabela 3.3 demonstra as combinações dos parâmetros estudados, na qual o sinal positivo (+) indica o valor máximo para aquele parâmetro, enquanto o sinal negativo (-) indica o valor mínimo para o parâmetro. Para cada combinação de parâmetros foram usinadas uma amostra com pastilhas convencionais (C) e duas amostras com pastilhas *wiper* (W). A Tabela 3.4 representa como os dados foram analisados, onde W1-2 indica a média aritmética dos resultados de W1 e W2 da mesma forma que ocorre na análise das outras condições.

Tabela 3.2: Condições de corte das amostras

Condição	V_c [m/min]	a_p [mm]
1	170	0,4
2	170	0,6
3	210	0,4
4	210	0,6

Tabela 3.3: Condições de corte para cada amostra

Amostra	V_c	a_p
C1	-	-
C2	-	+
C3	+	-
C4	+	+
W1	-	-
W2	-	-
W3	-	+
W4	-	+
W5	+	-
W6	+	-
W7	+	+
W8	+	+

Tabela 3.4: Apresentação de dados

Condição	Geometria da Ferramenta	V_c	A_p
1	C1	-	-
	W1-2		
2	C2	-	+
	W3-4		
3	C3	+	-
	W5-6		
4	C4	+	+
	W7-8		

A fresa utilizada para usinagem das amostras foi a fresa intercambiável da Sandvik 345-040Q22-13L com 40 mm de diâmetro e capacidade para três arestas de corte. A pastilha convencional utilizada no experimento foi 345R-1305M-PM 4240 de dimensões $iC = 13,0$ mm, $B_s = 2,0$ mm, $I_a = 8,8$ mm, $S = 5,6$ mm, e $r_\epsilon = 0,8$ mm, conforme ilustrado na Figura 3.6.

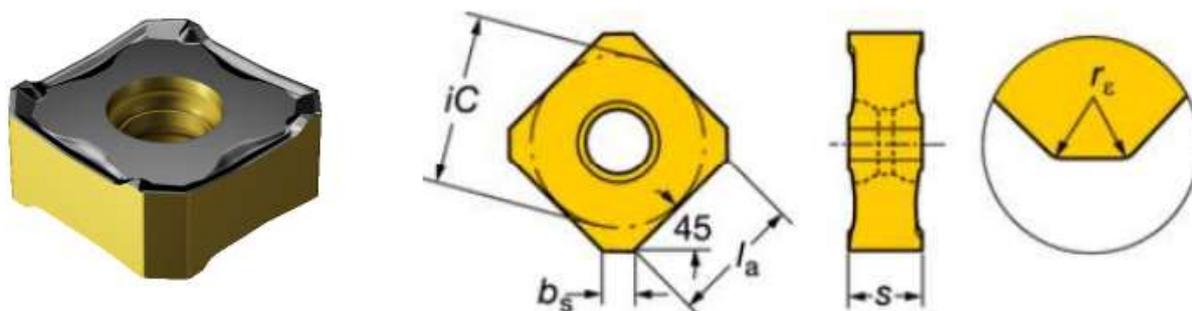


Figura 3.6: Pastilha convencional utilizada
Fonte: SANDVIK (2018) modificado

A pastilha *wiper* utilizada foi 345N-1305E-PW5 4230, ilustrada na Figura 3.7, com geometria com as seguintes dimensões $iC = 13,0$ mm, $B_s = 5,0$ mm, $I_a = 8,8$ mm, $S = 5,6$ mm, e $r_e = 1,0$ mm. No experimento, foi utilizada apenas uma pastilha *wiper*, conhecida como pastilha alisadora, e outras duas pastilhas convencionais. Todos os tipos de ferramenta usados no experimento foram de metal duro revestidos com $Ti(C,N) + Al_2O_3 + TiN$. Esse revestimento combina as características do carbonteto de titânio [$Ti(C,N)$], cuja dureza oferece resistência ao desgaste por abrasão; do óxido de alumínio (Al_2O_3), que por ser quimicamente inerte com baixa condutividade térmica, resiste melhor a craterizações, e também atua como uma barreira térmica para melhorar a resistência à deformação plástica; e por fim do nitreto de titânio (TiN), que melhora a resistência ao desgaste e é utilizada para identificar possíveis desgastes. (SANDVIK, 2018)

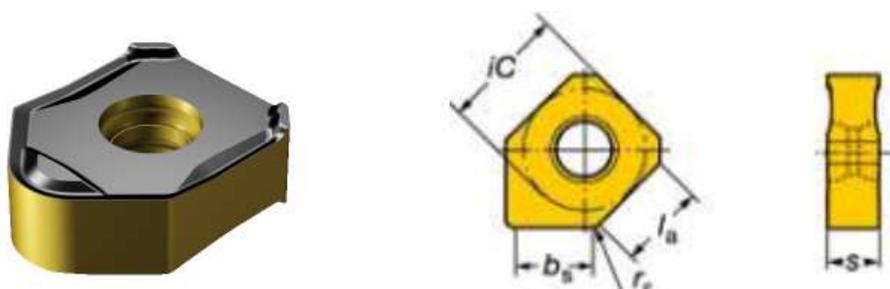


Figura 3.7: Pastilha *wiper* utilizada
Fonte: SANDVIK (2018) modificado

As arestas de corte das ferramentas utilizadas eram substituídas a cada condição de usinagem, evitando assim a influência do desgaste da ferramenta na integridade superficial das

amostras. Após o fresamento, foram medidas a rugosidade, a microdureza superficial e em profundidade das amostras.

3.4. Medição da Rugosidade

As medições de rugosidade foram realizadas no Laboratório de Pesquisa em Usinagem (LABUS) do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET/RJ), com a utilização do rugosímetro portátil *Mitutoyo*, modelo SJ-210 (Figura 3.8), cujo raio da ponta do apalpador é de 0,5 μm e resolução é de 0,002 μm .



Figura 3.8: Rugosímetro portátil *Mitutoyo*

As amostras foram delimitadas através do desenho de uma malha, dividindo a superfície das mesmas em 49 partes iguais conforme indicado na Figura 3.9, na intenção de obter o mapeamento da rugosidade ao longo de toda superfície usinada. As medições de rugosidade foram realizadas nessas regiões indicadas pela malha em cada amostra, obtendo os valores dos seguintes parâmetros para cada região: R_a e R_t . A partir dos dados obtidos, foram calculados média e desvio padrão para R_a e R_t de cada condição analisada.

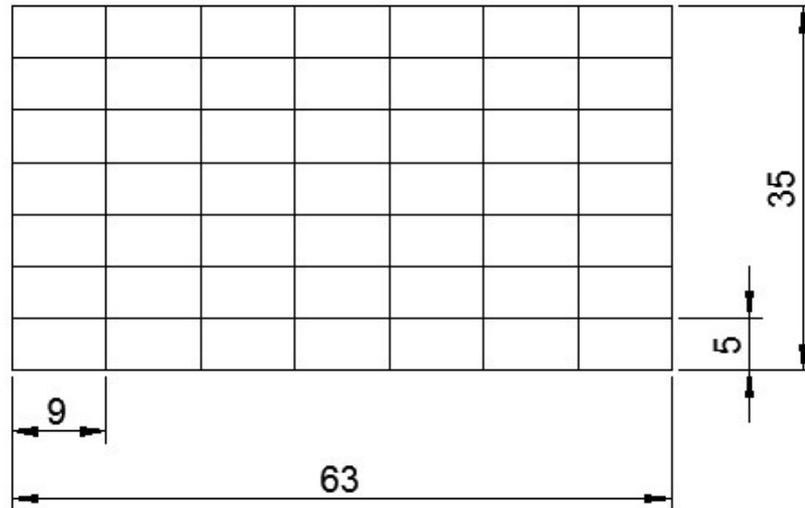


Figura 3.9: Dimensões da malha desenhada sobre a superfície da amostra (unidades em mm)

3.5. Medição da Microdureza

Os ensaios de microdureza foram realizados no Laboratório de Materiais (LAMAT) do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET/RJ) com a utilização do Microdurômetro Vickers / Knoop da marca Instron-Wilson, modelo 422 MVD.

A realização dos ensaios ocorreu em duas etapas, inicialmente, para verificar a microdureza superficial das amostras, foram realizadas 5 indentações em posições aleatórias da superfície de cada amostra com carga aplicada de 1 Kg. A partir dos resultados obtidos foram calculadas a média e o desvio padrão para cada condição de corte.

A segunda etapa da medição da microdureza foi obtida ao longo da profundidade abaixo da superfície de cada amostra. Para que esse ensaio acontecesse, foi necessária uma nova preparação das amostras. As peças foram cortadas inicialmente, conforme a Figura 3.10, e após esse corte inicial as pequenas peças obtidas foram cortadas ao meio, gerando 6 pedaços retangulares, como indicado na Figura 3.11.



Figura 3.10: Marcação do corte inicial de preparação das amostras para o ensaio de microdureza em profundidade



Figura 3.11: Peças retangulares obtidas dos cortes das amostras

Em seguida, as amostras foram embutidas em baquelite através da utilização da prensa de embutimento Arotec PRE-30 com uma carga de 150 kgf/cm^2 , foram lixadas e polidas na lixadeira Aropol 2V, também da marca Arotec. Dessa maneira as amostras obtidas estavam prontas para o ensaio, conforme ilustrado na Figura 3.12.

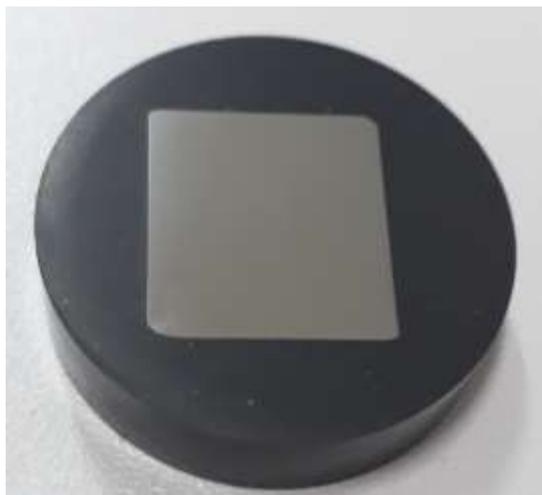


Figura 3.12: Amostra pronta para o ensaio de microdureza em profundidade

O ensaio de microdureza em profundidade foi realizado no mesmo microdurômetro do ensaio anterior. Foram feitas 4 indentações ao longo de uma reta que seguia de cada superfície usinada até uma profundidade de aproximadamente 1 mm no interior da peça com uma carga de 1 Kg. Essas 4 indentações foram realizadas com espaçamento de aproximadamente 0,25 mm, conforme mostrado na Figura 42.

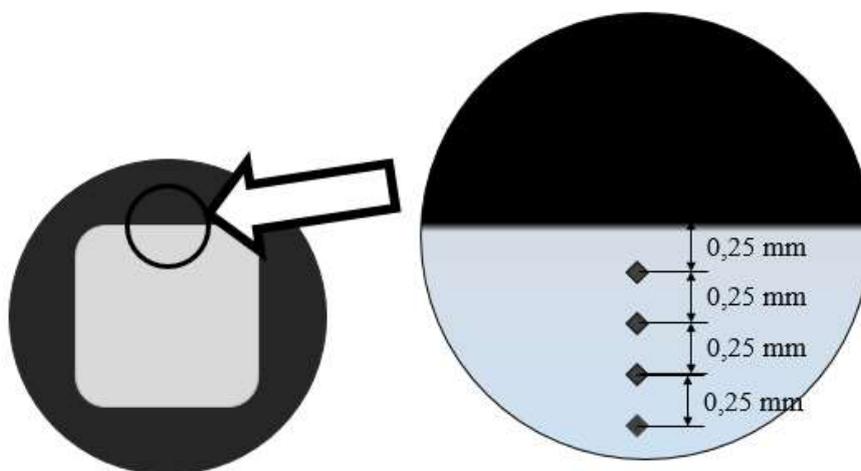


Figura 3.13: Posicionamento das indentações no ensaio de Microdureza em profundidade.

3.6. Macrografia

A macrografia foi realizada no Laboratório de Materiais (LAMAT) do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Sukow da Fonseca (CEFET/RJ) com a utilização do microscópio modelo BX60M com câmera de vídeo. Um ataque químico por nital a 2% foi

realizado nas amostras logo após o polimento das mesmas, na intenção de permitir a visualização de características macrográficas das condições de usinagem.

As amostras foram levadas ao microscópio, onde foram obtidas imagens da região onde ocorreram as usinagens com aumento de 500x e 1000x, totalizando em 24 imagens, duas para cada superfície usinada, onde foi possível verificar a existência ou não de deformação plástica na região analisada. Por conta da obtenção de imagens muito semelhantes, apenas 2 dessas imagens estão apresentadas no trabalho, servindo de exemplo pra demonstrar os resultados obtidos.

Capítulo 4

Resultados e discussão

4.7. Análise das rugosidades

Os resultados das análises de rugosidade nos parâmetros R_a e R_t das amostras foram representados de duas maneiras: nas Figuras 4.1 e 4.2, através de mapas de rugosidade, onde é possível analisar a homogeneidade superficial ou a falta da mesma em cada amostra; e através da média e desvio-padrão desses parâmetros que foram comparados com as suas rugosidades teóricas calculadas. Assim é possível verificar quais são as melhores condições de corte, visando a diminuição da rugosidade.

4.7.1. Mapas de rugosidade

A Figura 4.1 apresenta os mapas de rugosidade das amostras após o fresamento das mesmas. Os mesmos foram separados por condição de corte (uma condição em cada linha) e por pastilha utilizada (uma coluna para pastilhas convencionais e a outra para pastilha *wiper*). Na representação por cores, os tons de azul e roxo indicam uma superfície com melhor acabamento devido aos baixos valores de rugosidade, enquanto as cores laranja e vermelha indicam um maior valor de rugosidade, conseqüentemente uma pior qualidade de acabamento superficial.

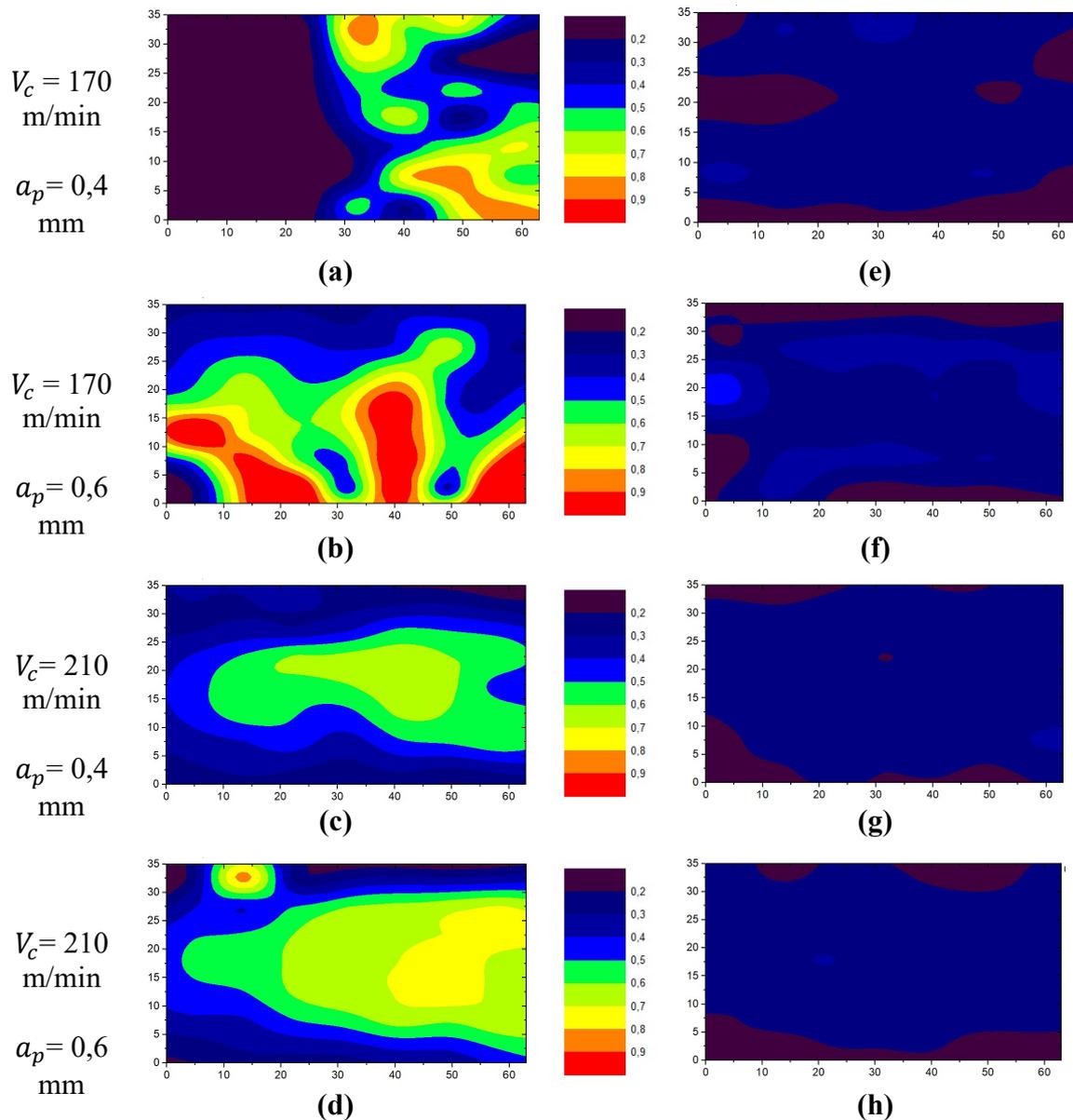


Figura 4.1: Rugosidade R_a das superfícies usinadas: (a) C1, (b) C2, (c) C3, (d) C4, (e) W1, (f) W3, (g) W5 e (h) W7

No caso das Figuras 4.1 (a) e (b), que representam as superfícies C1 e C2 usinada por pastilhas convencionais, foram verificadas regiões com grande variação de cores, demonstrando muitas irregularidades superficiais. Esse resultado já era esperado, por conta de um erro operacional que ocorreu antes da usinagem dessas amostras que causou uma irregularidade no corte. As superfícies W1 e W3 representadas pelas Figuras 4.1 (e) e 4.1 (f)

que foram usinadas com a utilização de pastilhas *wiper* apresentaram uma maior homogeneidade nos resultados, indicando uma usinagem mais uniforme.

Com relação a velocidade de 170 m/min , a superfície usinada com profundidade de corte de $0,4\text{ mm}$ apresentou uma região central de até $0,4\text{ }\mu\text{m}$ de rugosidade, e uma região mais próxima da borda de até $0,2\text{ }\mu\text{m}$. Já a superfície usinada com $0,6\text{ mm}$ de profundidade de corte, apesar de ter um resultado semelhante, apresentou em sua região central, alguns pontos com rugosidade próxima a $0,5\text{ }\mu\text{m}$. Sabe-se que o aumento da profundidade de corte pode causar maiores vibrações durante o corte, o que pode resultar em um aumento dos valores de rugosidade. Analisando os dados é possível notar que houve essa tendência, ou seja, o aumento da profundidade de corte piora a qualidade superficial no âmbito da rugosidade média R_a para pastilhas de geometria convencional.

A seguir, analisando as superfícies que foram usinadas com uma velocidade de corte de 210 m/min , pode-se verificar que a superfície C3 representada na Figura 4.1 (c), possui uma região central de maior rugosidade, na faixa de $0,7\text{ }\mu\text{m}$ enquanto a região próxima à sua borda chega a ter rugosidades de até no mínimo $0,2\text{ }\mu\text{m}$ aproximadamente. Comportamento semelhante a superfície C4 indicada na Figura 4.1 (d), que também apresentou altos valores de rugosidade em sua região central, alcançando a faixa de $0,8\text{ }\mu\text{m}$. Uma região inconsistente foi observada na parte superior da superfície C4, alcançando valores de rugosidade de quase $0,9\text{ }\mu\text{m}$ indicados em laranja, talvez causada por imperfeições na usinagem, como vibrações resultantes de uma fixação ruim da amostra. Por outro lado, as superfícies W5 e W7, usinadas com pastilha *wiper* tiveram comportamento muito semelhantes, como está representado nas Figuras 4.1 (g) e (h), uma grande região central em azul, e bordas laterais em roxo, caracterizando rugosidades de até $0,3\text{ }\mu\text{m}$ no centro e até $0,2\text{ }\mu\text{m}$ nas regiões laterais.

Ao comparar as superfícies, W5 e W7 com as superfícies, C3 e C4, percebe-se que a utilização de pastilhas *wiper* gera um aumento considerável na qualidade da superfície usinada, já que essas amostras apresentaram um menor valor de rugosidade em relação as amostras usinadas por pastilhas convencionais, mesmo com o aumento da profundidade de corte.

As superfícies W1 e W3 quando comparadas com as superfícies W5 e W7, indicaram claramente que o aumento da velocidade de corte gerou uma melhora no acabamento superficial. Enquanto as superfícies que foram usinadas a 170 m/min (W1 e W3) de velocidade de corte obtinham valores de rugosidade de até $0,5\text{ }\mu\text{m}$, aquelas superfícies usinadas a 210 m/min (W5 e W7) quase não ultrapassaram o valor de $0,3\text{ }\mu\text{m}$.

Devido ao problema ocorrido na usinagem das superfícies C1 e C2, estas não foram comparadas as outras superfícies para que não fossem tiradas conclusões incoerentes.

Verificando os mapas de rugosidade R_a , foi possível concluir que aumentar a velocidade de corte gera uma melhoria no acabamento da superfície usinada, além disso, a utilização de pastilha alisadora *wiper* também reduz consideravelmente os valores de rugosidade da superfície usinada, resultado esse que já era previsto e confirma o que foi verificado por muitos autores. (LIMA, 2008; D'ADDONA & RAYKAR, 2016)

Os mapas de rugosidade R_t também foram apresentados seguindo o mesmo padrão de cores utilizados para os mapas de rugosidade R_a , onde as menores rugosidades são caracterizadas por tonalidades de roxo e azul demonstrando uma melhor qualidade de acabamento, enquanto as cores laranja e vermelho indicam maiores valores de rugosidade, consequentemente, indicando irregularidades superficiais.

A análise dos resultados do parâmetro de rugosidade R_t também será iniciado pelos mapas de rugosidade das amostras usinadas a 170 *m/min*. As superfícies C1 e C2 representadas nas Figuras 4.2 (a) e (b) respectivamente, apresentaram inconsistências semelhantes às encontradas nos mapas de rugosidade R_a das mesmas, o que corrobora com a hipótese de que as irregularidades nessas superfícies possam ter sido geradas pelo erro operacional ocorrido durante a usinagem.

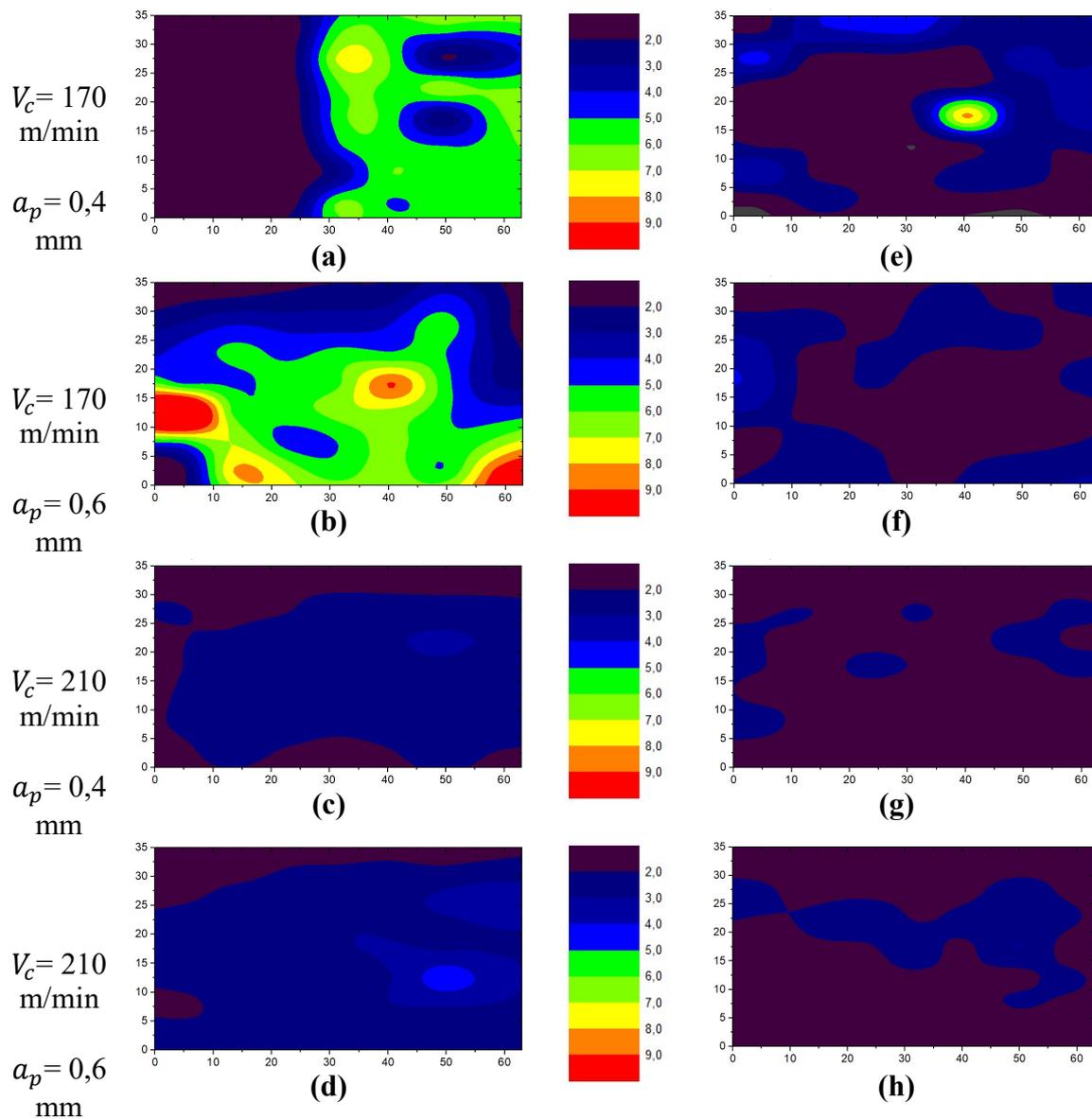


Figura 4.2: Rugosidade R_t das superfícies usinadas: (a) C1, (b) C2, (c) C3, (d) C4, (e) W1, (f) W3, (g) W5, e (h) W7

Em geral, os mapas de rugosidade R_t confirmam os resultados obtidos pelo parâmetro R_a , as Figuras 4.2 (e) e (f) que representam as superfícies W1 e W3 indicam baixos valores de rugosidade R_t , como também foram apontados nas Figuras 4.1 (e) e (f), baixos valores de rugosidade R_a . Porém, é possível identificar uma pequena região com altos valores de rugosidade R_t que chegam a $9,0 \mu\text{m}$ na parte central da superfície W1. Essa irregularidade não foi identificada no mapa de rugosidade R_a da mesma superfície, o que pode ser explicado pelo fato de o parâmetro R_a se tratar de uma média aritmética, dessa maneira acabou suavizando os

valores pontuais dessa irregularidade superficial, impossibilitando assim de visualizá-la no mapa de rugosidade R_a dessa superfície.

Ao analisar as superfícies que foram usinadas a uma velocidade de corte de 210 m/min , percebe-se que aquelas usinadas com pastilhas convencionais C3 e C4 representadas pelas Figuras 4.2 (c) e (d) respectivamente apresentaram um mapa de rugosidade R_t homogêneo com valores de rugosidade na faixa de até 3,0 μm em suas regiões centrais e valores de até 2,0 μm nas suas bordas. Por outro lado, as superfícies usinadas com pastilhas *wiper* W5 e W7 representadas pelas Figuras 4.2 (g) e (h) respectivamente apresentaram valores de rugosidade ainda mais baixos, na faixa de até 2,0 μm em quase toda superfície.

Os mapas de rugosidade R_t confirmaram o que foi verificado nos mapas de rugosidade R_a , apontando melhores acabamentos nas superfícies usinadas com a utilização de pastilhas *wiper* em relação àquelas com pastilha convencional. Ao comparar as superfícies W1 e W3 com as superfícies W5 e W7, mais uma vez foi possível verificar que o aumento da velocidade gerou uma usinagem mais homogênea com um melhor acabamento superficial, por outro lado, o aumento da profundidade de corte não gerou alterações consideráveis neste parâmetro.

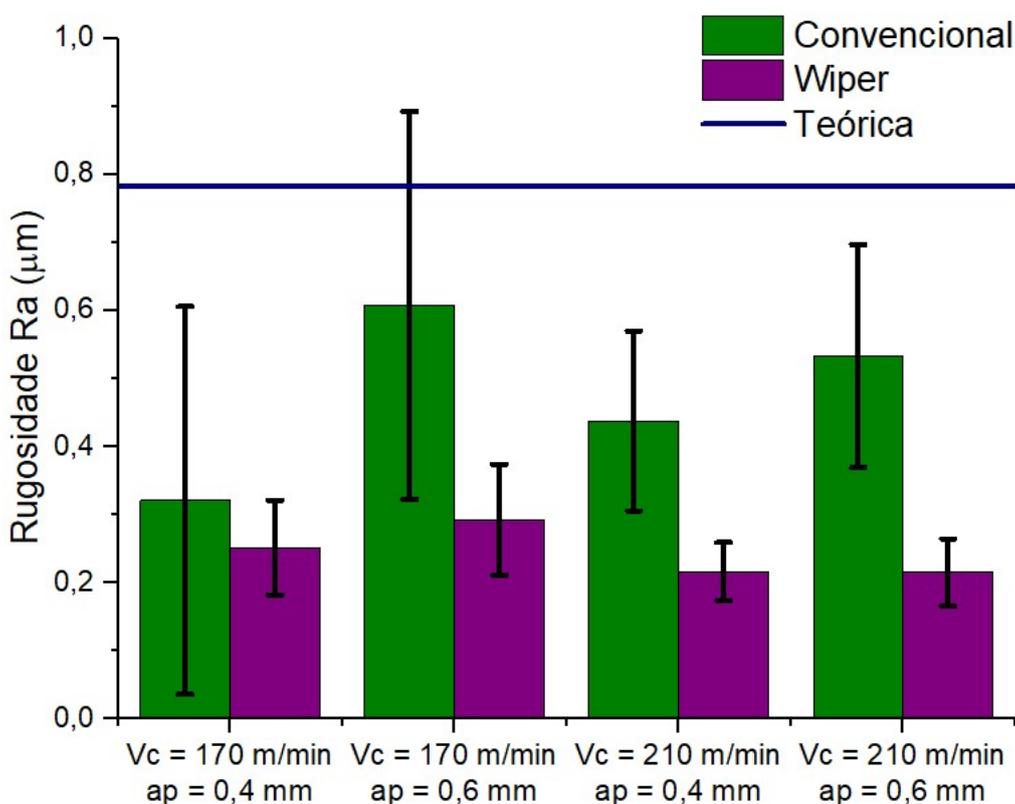
4.7.2. Médias de rugosidade

As rugosidades teóricas, tanto do parâmetro R_a , quanto R_t , foram calculadas a partir das equações 2.4 e 2.5 na intenção de prever os resultados, possibilitando assim a regulação dos parâmetros a serem utilizados no rugosímetro durante as medições. Os dados utilizados para esses cálculos foram baseados na geometria das pastilhas convencionais, já que a literatura não apresenta equações para prever a rugosidade obtida no fresamento com pastilhas *wiper*. Dessa maneira, foram obtidos valores teóricos de rugosidade R_a e R_t de 0,782 μm e de 50,0 μm respectivamente.

A média dos valores de rugosidade R_a e R_t com desvio-padrão obtidos após a usinagem, estão apresentados na Tabela 4.1 e respectivamente nas Figuras 4.3 e 4.4, que também apresentam os valores teóricos de rugosidade calculados.

Tabela 4.1: Média dos valores de rugosidade para cada condição de corte

Condição	R_a (μm)		R_t (μm)	
	Convencional	Wiper	Convencional	Wiper
1	$0,32 \pm 0,29$	$0,25 \pm 0,07$	$3,30 \pm 2,41$	$2,54 \pm 1,30$
2	$0,61 \pm 0,29$	$0,29 \pm 0,08$	$5,04 \pm 2,20$	$2,62 \pm 1,17$
3	$0,44 \pm 0,13$	$0,22 \pm 0,04$	$2,29 \pm 0,44$	$1,66 \pm 0,38$
4	$0,53 \pm 0,16$	$0,22 \pm 0,05$	$2,54 \pm 0,54$	$1,82 \pm 0,51$

**Figura 4.3:** Média dos valores de rugosidade R_a por condição de corte e pastilha utilizada.

Segundo a literatura, a utilização de baixos avanços favorece um melhor acabamento na superfície usinada (MACHADO *et al.*, 2015), o que pode ser confirmado analisando a Tabela 4.1 e o gráfico da Figura 4.3, onde todas as médias dos valores de rugosidade R_a foram abaixo de $0,8 \mu\text{m}$, inclusive abaixo do valor de $0,782 \mu\text{m}$ calculado teoricamente, tanto para amostras usinadas com pastilhas *wiper* quanto convencionais. Apesar dos dados apresentarem grandes valores de desvio-padrão, foi possível perceber uma melhor qualidade de acabamento nas superfícies usinadas com pastilha *wiper*, que apresentaram menores valores de rugosidade R_a em relação àquelas usinadas com pastilhas convencionais, o que já era esperado.

As amostras fresadas com pastilha convencional, nas condições 1 e 2, apresentaram um grande desvio-padrão, o que já era esperado, devido ao erro operacional ocorrido no fresamento das mesmas. DINIZ *et al.* (2013) confirma que esses e outros fatores podem influenciar nos resultados obtidos de rugosidade, como condições operacionais da máquina-ferramenta e a fixação deficiente da peça, que pode gerar vibrações, prejudicando assim o acabamento superficial.

Conforme foi observado no experimento de HUA & LIU (2018), cujos resultados foram apresentados na Figura 2.10, a diferença entre a rugosidade gerada na usinagem por pastilhas com raios menores (caso das pastilhas convencionais) e pastilhas com raios maiores (caso da pastilha *wiper*) é menos evidente para baixos valores de avanço, comportamento esse que também foi observado no presente trabalho.

A literatura prevê que um aumento na velocidade de corte melhora o acabamento da superfície usinada, tendência que não se concretizou no presente estudo, já que houve um grande desvio-padrão nas médias de rugosidade obtidas nas condições 1 e 2 de menor velocidade para usinagem com pastilha convencional, não possibilitando assim visualizar uma melhora na qualidade superficial com o aumento da velocidade de corte. Enquanto para os valores obtidos para as usinagens com pastilha *wiper*, quase não apresentaram variação com o aumento da velocidade de corte.

Analisando a Figura 4.3, pode-se perceber que não houve uma diferença considerável nos valores de rugosidade obtidos com o aumento da profundidade de corte, apesar do aumento significativo no valor da média de rugosidade R_a apresentado entre a condição 1 e 2, também foi identificado um grande desvio-padrão, impedindo assim que se confirme uma tendência.

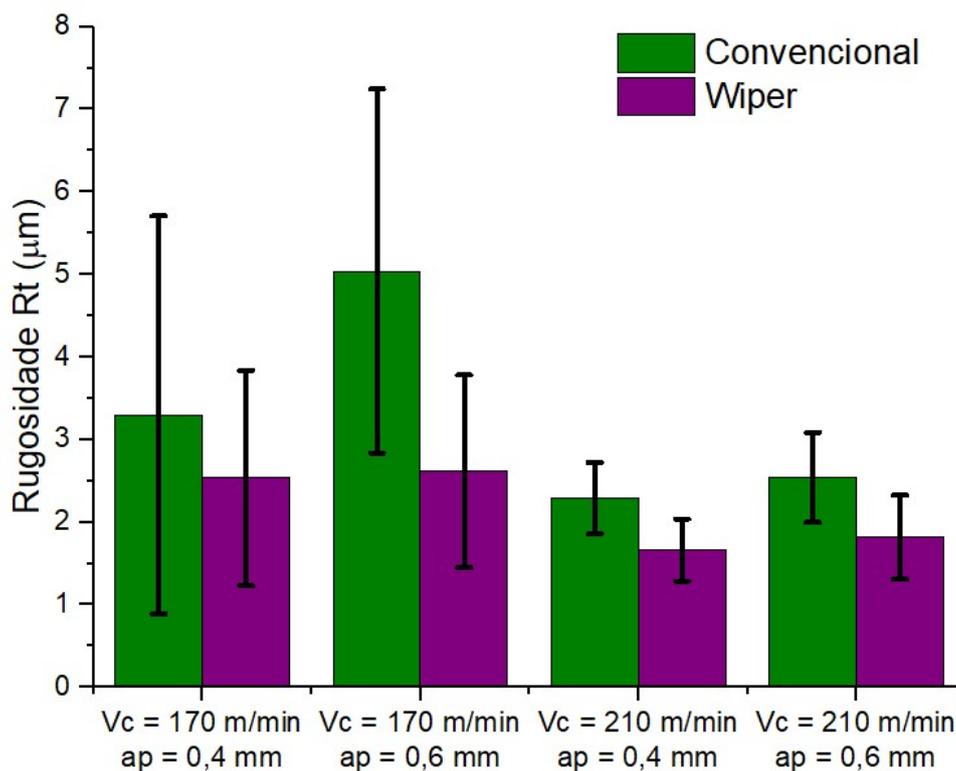


Figura 4.4: Média dos valores de rugosidade R_t por condição de corte e pastilha utilizada.

O gráfico da Figura 4.4 que representa os resultados obtidos da rugosidade R_t apresentou valores de rugosidade sempre menores que $8 \mu\text{m}$, muito abaixo do que o de $50 \mu\text{m}$ calculado teoricamente e teve um comportamento muito semelhante aos resultados obtidos para a rugosidade R_a . Porém, apesar de grandes desvios-padrões serem visualizados, verificando os valores médios de rugosidade R_t , ficou mais evidente a influência da velocidade de corte na qualidade superficial da peça usinada, já que foi possível observar uma significativa redução na rugosidade com o aumento da velocidade de corte.

Ainda de acordo com o comportamento apresentado na análise da rugosidade R_a , também ficou claro que a utilização da pastilha *wiper* gera superfícies com melhor qualidade de acabamento, conforme pode ser observado pelos valores médios de rugosidade R_t mais baixos para a usinagem com pastilha *wiper* do que com pastilhas convencionais.

4.8. Análises de microdureza

Os resultados das análises de microdureza foram apresentados de duas maneiras: através da média e desvios-padrões verificados na superfície das amostras, sendo possível dessa maneira analisar a influência dos parâmetros de corte na microdureza superficial das amostras; e através da análise em profundidade, onde foi possível verificar o comportamento da microdureza do material em sua camada subsuperficial, de acordo com a distância em relação a borda da amostra.

4.8.1. Microdureza superficial

A microdureza superficial das amostras foi analisada através das médias e desvios-padrões dos resultados obtidos no ensaio de microdureza Vickers e comparadas com o valor de referência de 265 HV obtido após o TTAT. A Tabela 4.2 e a Figura 4.5 apresentam os resultados obtidos.

Tabela 4.2: Média dos valores de microdureza para cada condição estudada

Amostra	Microdureza (HV)
C1	320 ± 17
C2	301 ± 22
C3	311 ± 13
C4	326 ± 10
W1-2	331 ± 17
W3-4	330 ± 15
W5-6	320 ± 4
W7-8	330 ± 14

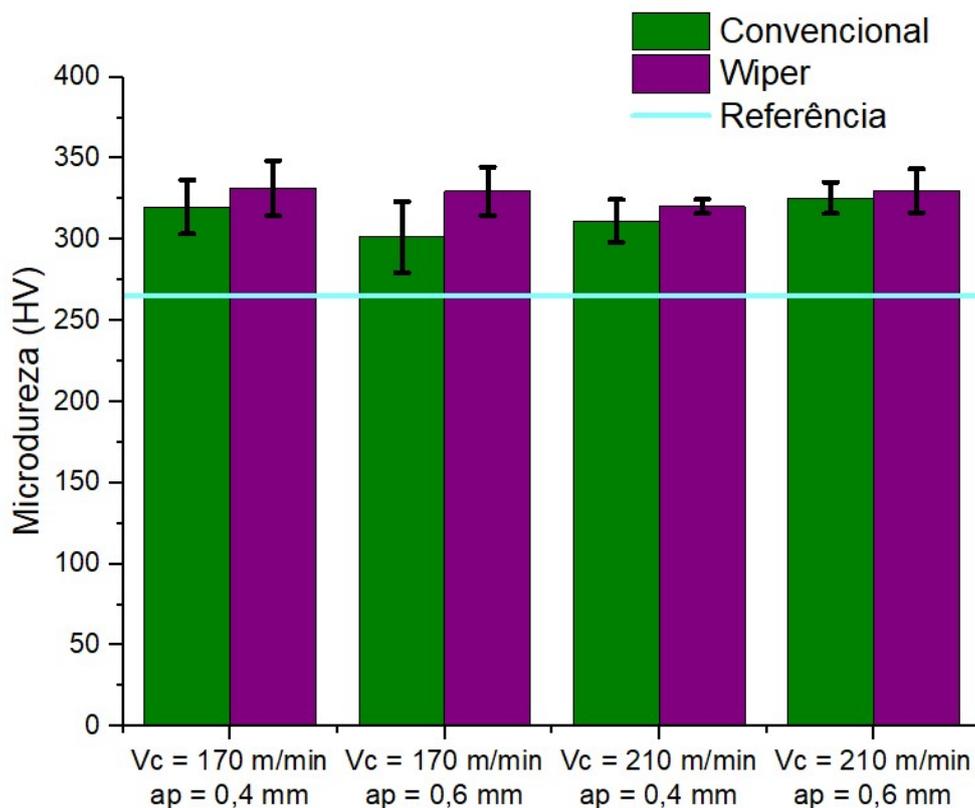


Figura 4.5: Média dos valores de microdureza para cada condição e pastilha utilizada

Os resultados apontam que apesar de haver apenas uma pequena diferença entre as microdurezas geradas para cada tipo de pastilha, a usinagem com *wiper* gerou maiores valores de microdureza do que a usinagem com pastilhas convencionais. Esse comportamento está de acordo com o que foi verificado por FREITAS JUNIOR (2018) em seu experimento e corrobora com sua hipótese de que uma maior taxa de deformação no material pode ter ocasionado um tipo de encruamento na superfície.

Observando a Figura 4.5 e a Tabela 4.2 é possível perceber que a profundidade de corte teve pouca influência na geração de microdureza. Foi possível notar que para a profundidade de corte de 0,6 mm, um aumento de velocidade de corte gerou um aumento de microdureza apenas para a usinagem por pastilha convencional. Diferente do que ocorreu na usinagem com pastilha *wiper*, que não apresentou variação no valor da microdureza.

Por outro lado, o comportamento observado para a profundidade de corte de 0,4 mm foi o mesmo, tanto para a pastilha *wiper* quanto para a convencional, apresentando uma diminuição de microdureza com o aumento da velocidade, talvez causado por uma interação de parâmetros.

Analisando o gráfico da Figura 4.6, que compara as médias e desvios-padrões obtidos por FREITAS JUNIOR, (2018) no fresamento sem lubri-refrigeração (SL) com os obtidos no presente trabalho - com lubri-refrigeração (CL), foi possível perceber que para as pastilhas *wiper*, a adição de fluido de corte tende a diminuir os valores médios de dureza. Contudo, os valores de desvio padrão não permitem concluir que tais valores são realmente diferentes.

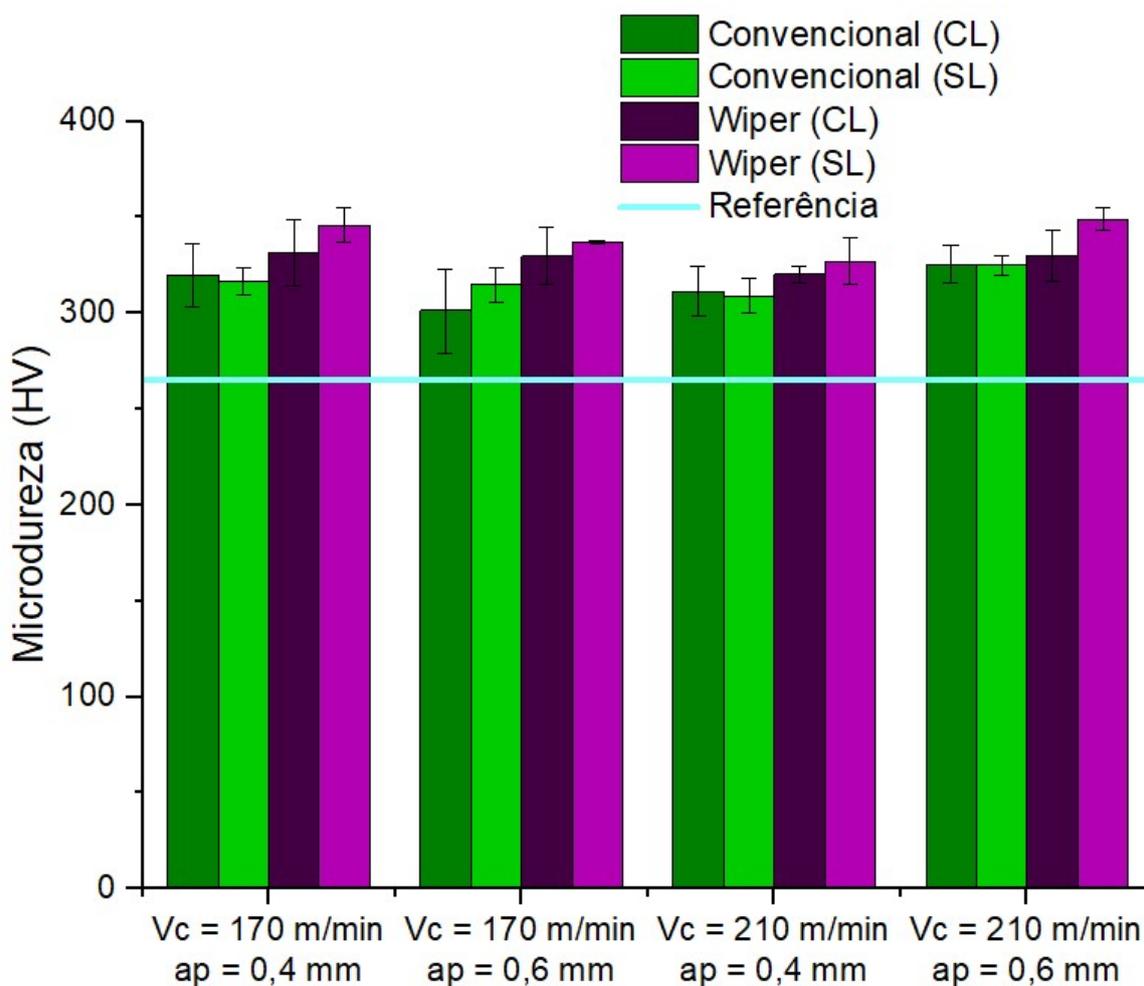


Figura 4.6: Comparação da microdureza gerada no fresamento com lubri-refrigeração (CL) e sem lubri-refrigeração (SL).

4.8.2. Microdureza em profundidade

O gráfico da Figura 4.7 apresenta os resultados obtidos na análise de microdureza em profundidade, da superfície até o valor de 1 mm de distância da superfície usinada de cada amostra, onde o resultado de cada condição e tipo de pastilha utilizado é representado por uma cor diferente, conforme identificado na legenda.

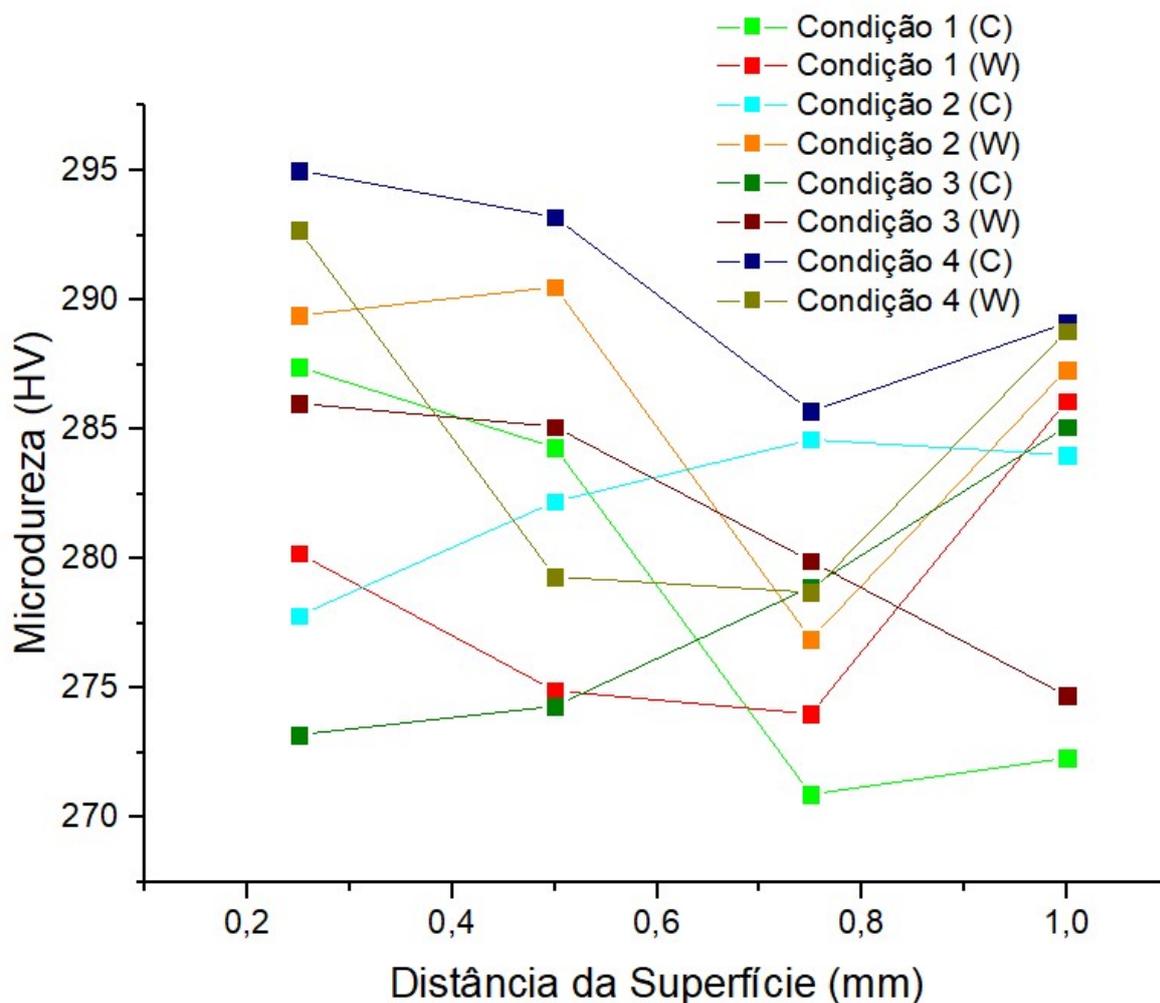


Figura 4.7: Microdureza apresentada por distância da borda para cada condição e tipo de pastilha utilizada.

A literatura (PEREIRA *et al.*,2017) prevê que ao longo da profundidade do material, quanto mais se afastar da borda menor será o valor de microdureza verificado, até chegar ao valor de microdureza do núcleo do material. Analisando as linhas do gráfico, não foi possível identificar uma tendência nos valores gerados, algumas condições apresentaram quedas nos valores de microdureza, como as amostras usinadas na condição 1 por pastilha convencional e 3 por pastilha *wiper*; outras apresentaram aumento nesse valor, como as amostras usinadas nas condições 2 e 3 por pastilha convencional.

4.9. Análise microestrutural

A macrografia foi realizada com a intenção de verificar as possíveis deformações plásticas ocorridas na camada subsuperficial das amostras, e a expectativa de resultado era que os aumentos de 500x e 1000x do microscópio óptico (capacidade máxima de aumento possível do equipamento) fossem o suficiente para tal observação.

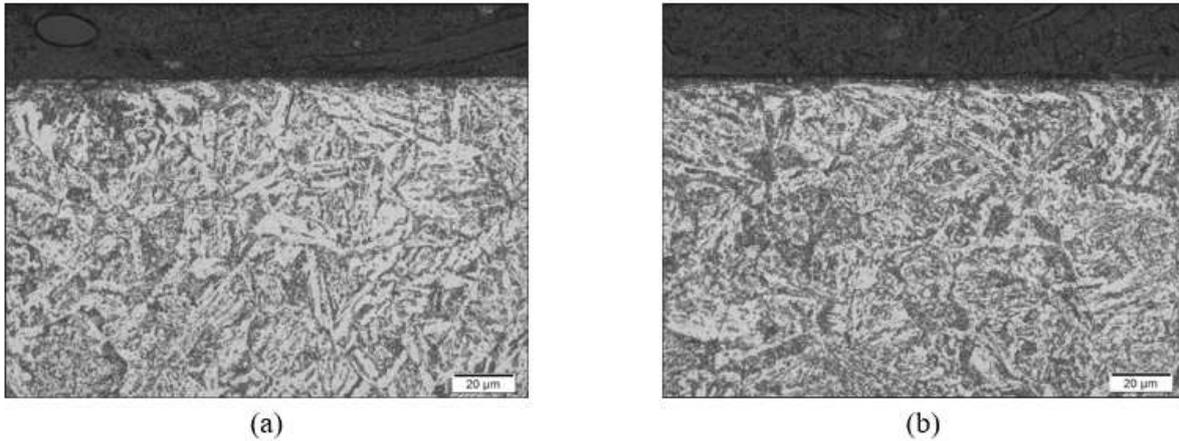


Figura 4.8: Imagens da macrografia com aumento de 1000x
(a) amostra C1; (b) amostra W1

Verificando as imagens obtidas pelo microscópio óptico para as amostras C1 e W1 com aumento de 1000x, exemplificadas respectivamente nas Figuras 4.8 (a) e (b), percebe-se que a espessura da camada subsuperficial que pode ter sofrido uma deformação plástica é tão pequena que não permite uma boa visualização para aumentos dessa magnitude. Para que seja possível uma análise mais acurada, seria interessante que essas amostras fossem verificadas com a utilização de um microscópio eletrônico de varredura (MEV).

Capítulo 5

Conclusões

O presente trabalho, que teve por objetivo analisar a influência da geometria da ferramenta de corte na integridade superficial do aço SAE 4340 após fresamento de topo com lubri-refrigeração permite as seguintes conclusões:

1. As usinagens com pastilhas *wiper* resultaram em amostras de melhor qualidade superficial, apresentando valores mais baixos tanto de rugosidade R_a quanto para rugosidade R_t .
2. A avaliação do parâmetro de rugosidade R_t possibilitou a identificação de irregularidades pontuais, que não foram observadas através do parâmetro R_a , descrevendo melhor as superfícies usinadas.
3. Uma maior profundidade de corte gerou um aumento nos valores médios de rugosidade provavelmente por gerar mais vibrações. Esse comportamento foi mais evidente nas amostras usinadas por pastilhas convencionais do que naquelas por pastilha *wiper*.
4. Com base nos resultados obtidos foi possível verificar que a qualidade superficial obtida com usinagem com pastilhas *wiper* se mostrou superior no âmbito da rugosidade superficial, sem perda na produtividade do processo.

Sugestões para trabalhos futuros

1. Usinar novamente as amostras nas condições 1 e 2 com pastilhas convencionais, tomando o cuidado de verificar todos os parâmetros e ajustes da fresadora.
2. Realizar uma micrografia nas amostras com a utilização de um microscópio eletrônico de varredura (MEV)
3. Executar mais indentações no ensaio de microdureza em profundidade nas amostras para verificar e talvez comprovar o comportamento aleatório que foi observado.
4. Analisar o desgaste das ferramentas de corte.
5. Refazer o estudo variando diferentes parâmetros de corte, como o avanço por dente.
6. Comparar a influencia na integridade superficial do fresamento do aço 4340 com a de um outro material com diferente teor de carbono em sua composição química.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM – American Society for Testing and Materials, *ASTM A506 - Standard Specification for Alloy and Structural Alloy Steel, Sheet and Strip, Hot-Rolled and Cold-Rolled*, 2016.

BORDINASSI, E. C. *Contribuição da Integridade Superficial de um aço inoxidável Super-Duplex Após Usinagem*. Tese de doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. SP, Brasil, 2006.

DIB, M.H.M., *Fundamentos do Fresamento: uma aplicação em microfresamento*, Dissertação de M.Sc., EESC/USP, São Carlos, SP, Brasil, 2013.

DINIZ, A.E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L.; *Tecnologia da usinagem dos materiais*, 8ª Ed., São Paulo, Artliber Editora, 2013.

D'ADDONA, D. M.; RAYKAR, S. J. “Analysis of surface roughness in hard turning using wiper insert geometry”, *48th CIRP Conference on Manufacturing Systems*, v. 41, p. 841–846, 2016.

FERRARESI, D., *Fundamentos da usinagem dos metais*, São Paulo: Edgard Blucher, 1977.

FREITAS JUNIOR, P.C., *Análise da Integridade Superficial e das Tensões Residuais Geradas no Fresamento de Aço SAE 4340 Utilizando Pastilhas Wiper*, Dissertação de M. Sc., CEFET/RJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2018.

FUNDAÇÃO ROBERTO MARINHO, *Telecurso 2000 profissionalizante: mecânica: ensaios de materiais*, São Paulo, Editora Globo, 2000.

GERDAL, “Catálogo Aços Longos e Especiais”, Disponível em: <<https://www.gerdau.com/pt/produtos/gerdau-4340>>, Acesso em: 20 de Setembro de 2018.

GROOVER, M. P., *Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes and systems*, 4º Ed., Nova Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2010.

GUTNICHENKO, O.; AGIC, A.; STÄHL, J.-E. “Modeling of force build-up process and optimization of tool geometry when intermitente turning”, *16th CIRP Conference on Modelling of Machining Operations*, v. 58, p. 393–398, 2017.

HUA, Y.; LIU, Z. “Effects of cutting parameters and tool nose radius on surface roughness and work hardening during dry turning Inconel 718”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 96, p. 2421-2430.

LEE, W. S.; SU, T. T., “Mechanical properties and microstructural features of AISI 4340 high-strength alloy steel under quenched and tempered conditions,” *Materials Processing Technology*, 1999.

LIMA, A. *Estudo Dos Macro D Micro Determinantes De Qualidade (MmdQ) De Peças Em Processo De Furação Otimizado*, Dissertação De Graduação; UNIMEP, Santa Bárbara d’Oeste, SP, Brasil, 2002.

LIMA, A. *Análise dos Efeitos gerados pelos Parâmetros de Corte em Processos de Usinagem sobre a Integridade Superficial das Peças em Aço ABNT 4340*, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção; da Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo da UNIMEP, Santa Bárbara d’Oeste, SP, Brasil, 2008.

MACHADO, B. S. *Caracterização da rugosidade em superfícies nitretadas a plasma da liga Ti6Al4V-ELI*, Dissertação De Graduação; UFSM, Santa Maria, RS, Brasil, 2010.

MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; SILVA, M.B. *Teoria da usinagem dos materiais*, 1ª Ed, São Paulo, Editora Blucher, 2009.

MASMIATI, N.; SARHAN, A. A. D.; HASSAN, M. A. N.; HAMDI, M. “Optimization of cutting conditions for minimum residual stress, cutting force and surface roughness in end milling of S50C medium carbon steel”, *Internacional Journal of Measurement*, v. 86, p. 253–265, 2016.

NOVASKI, O. J. *Introdução à Engenharia de Fabricação Mecânica*. 2ª Ed., São Paulo, Edgard Blucher, 1994.

PEREIRA, J. C. C.; RODRIGUES, P. C. M.; ABRÃO. A. M. *The surface integrity of AISI 1010 and AISI 4340 steels subjected to face milling*. In: DOI 10.1007. The Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2017.

POLLI, M. L., *Análise da estabilidade dinâmica do processo de fresamento a altas velocidades de corte*, Dissertação de Doutorado., UFSC, Florianópolis, SC, Brasil, 2005.

RICHT, C. “*Best of Both Worlds*”, Disponível em: <<https://www.productionmachining.com/articles/best-of-both-worlds>>, Acesso em: 09 de setembro de 2018.

SANDVIK COROMANT, *Manual Técnico de Usinagem*, São Paulo, 2005.

SANDVIK COROMANT, “*Finishing with wiper inserts*” Disponível em: <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/milling/application_overview/face_milling/finishing_with_wiper_inserts>, Acesso em: 09 de setembro de 2018.

SOUZA, A.M.; SALES, W. F.; SANTOS, S. C.; MACHADO, A. R., “Performance of single Si₃N₄ and mixed Si₃N₄CPCBN wiper cutting tools applied to high speed face milling of cast iron”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v. 45, pp. 335-344, 2005.

WANG, F.; ZHAO, J.; LI, A.; ZHANG, H., “Effects of cutting conditions on microhardness and microstructure in high-speed milling of H13 tool steel”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 73, pp. 137-146, 2014.

XAVIER, C. R.; DIAS, E. D.; MARCELO, C. J.; DELGADO, H. G. J.; CASTRO, J. A. “Efeito da velocidade de resfriamento sobre a transformação da austenita em aço baixa liga”, *Cadernos UniFOA*, Volta Redonda-RJ, n. 26, p. 37–45, 2014.