

MARIANA MONTEIRO DOS SANTOS

**Estudo do Fresamento Frontal Assimétrico com Mínima Quantidade de Fluido
do Aço 4340 endurecido**

Guaratinguetá - SP
2018

Mariana Monteiro dos Santos

**Estudo do Fresamento Frontal Assimétrico com Mínima Quantidade de Fluido
do Aço 4340 endurecido**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Manoel Cleber de Sampaio Alves

Guaratinguetá - SP
2018

S237f	Santos, Mariana Monteiro dos Estudo do fresamento frontal assimétrico com mínima quantidade de fluido do aço 4340 endurecido / Mariana Monteiro dos Santos. – Guaratinguetá, 2018. 75 f : il. Bibliografia: f. 72-75 Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2018. Orientador: Prof. Dr. Manoel Cleber de Sampaio Alves 1. Usinagem. 2. Aspereza de superfície. 3. Ferramentas de corte 4. Aço de alta resistência I. Título CDU 621.9
-------	---

Pâmella Benevides Gonçalves
Bibliotecária/CRB-8/9203

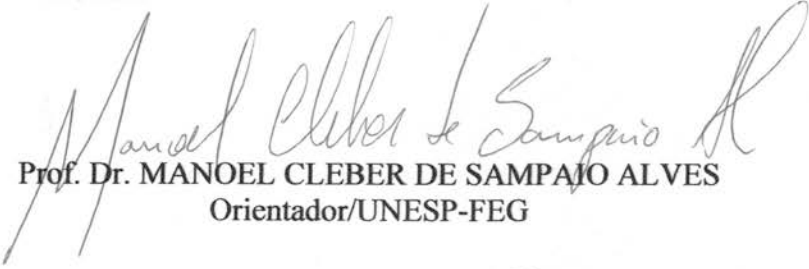
MARIANA MONTEIRO DOS SANTOS

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA


Prof. Dr. MARCELO SAMPAIO MARTINS
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. MANOEL CLEBER DE SAMPAIO ALVES
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. MARCOS VALÉRIO RIBEIRO
UNESP-FEG


Prof. MSc. MARCELO ANTUNES DE PAULA
Membro Externo

Dezembro 2018

Para meus pais.

“Quando a educação não é libertadora, o sonho do oprimido é ser o opressor.”

Paulo Freire

RESUMO

O desenvolvimento da usinagem de aços endurecidos é um fenômeno atual derivado de uma diretriz mercadológica de redução de custos e tempo de produção, atrelada ao desafio da sustentabilidade dos processos de fabricação em geral. Disto decorre a necessidade de desenvolvimento de máquinas de alta rigidez e acuracidade, ferramentas com elevada dureza e resistência ao desgaste em elevadas temperaturas, métodos de lubrificação e refrigeração eficazes, econômicos e de baixo impacto socioambiental, além da otimização dos parâmetros de corte, que têm significativa influência nos parâmetros de qualidade desejados. Isto posto, a proposta deste trabalho é estudar diferentes parâmetros de corte para combinação ideal de forma a se obter resultados satisfatórios no fresamento frontal assimétrico do aço ABNT 4340 endurecido, através do uso de mínima quantidade de fluido e ferramentas de metal duro revestido. Para tanto, foram realizados ensaios nos quais conjuntos de parâmetros de corte (velocidade de corte, avanço e largura de corte) variaram para duas condições de ferramentas de metal duro revestido (PVD-TiAlN e CVD- TiCN-Al₂O₃). A análise dos resultados partiu da avaliação dos ciclos de fresamento em relação a: rugosidade, potência de usinagem, emissão acústica, vibração, desgaste qualitativo da ferramenta e formato e tipo do cavaco. Concluiu-se que todos os parâmetros influenciam significativamente a qualidade superficial da peça usinada, de forma que a melhor condição para o fresamento frontal assimétrico com mínima quantidade de fluido do aço ABNT 4340 endurecido compreende: velocidade de corte de 200 [m/min], avanço de 0,1 [mm], largura de corte correspondente a $\frac{1}{4}$ do diâmetro da fresa e ferramenta de metal duro revestido por PVD-TiAlN. Além disso, observou-se que os valores de rugosidade média obtidos em todos os ensaios, e especialmente os resultantes das condições acima descritas, são comparáveis aos requeridos no processo de retificação ($0,2 < R_a < 0,8$ [μm]), o que demonstra a qualidade da superfície produzida e valida a usinagem do aço endurecido como uma alternativa processual economicamente viável e qualitativamente efetiva.

PALAVRAS-CHAVE: Usinagem. Rugosidade. Desgaste. Ferramenta de metal duro. Largura de corte.

ABSTRACT

The development of the machining of hardened steels is a current phenomenon derived from a marketing guideline of cost reduction and production time tied to the challenge of the sustainability of the manufacturing processes in general. This results in the need to develop machines with high rigidity and accuracy, tools with high hardness and wear resistance at high temperatures, efficient lubrication and cooling methods with low socio-environmental impact, as well as optimization of cutting parameters, which have significant influence on the desired quality parameters. This paper proposes to study different cutting parameters for optimum combination in order to obtain satisfactory results in the asymmetric front milling of AISI 4340 hardened steel through the use of minimum quantity lubrication and coated carbide tools. For this purpose, tests were performed in which sets of cutting parameters (cutting speed, feed rate and cutting width) varied for two conditions of coated carbide tools (PVD-TiAlN and CVD-TiCN-Al₂O₃). The analysis of the results was based on the evaluation of the milling cycles in relation to: roughness, machining power, acoustic emission, vibration, qualitative tool wear and chip shape and type. It was concluded that all parameters significantly influence the surface quality of the machined part, so that the best condition for asymmetric front milling with minimum quantity lubrication of the AISI 4340 hardened steel comprises: cutting speed of 200 [m / min], feed rate of 0.1 [mm], cutting width corresponding to $\frac{1}{4}$ of milling cutter diameter and PVD-TiAlN coated carbide tool. In addition, it has been found that the mean roughness values obtained in all the tests, and especially those resulting from the conditions described above, are comparable to those required in the grinding process ($0.2 < Ra < 0.8$ [μm]), which demonstrates the quality of the surface produced and validates the machining of hardened steel as an economically viable and qualitatively effective process alternative.

KEYWORDS: Machining. Roughness. Wear. Coated carbide tool. Cutting width.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Tipos de fresamento	17
Figura 2 – Tipos de fresamento frontal assimétrico	18
Figura 3 – Parâmetros de corte no fresamento frontal.....	19
Figura 4 – Custos de usinagem e custos com lubrificação tradicional	21
Figura 5 – Posicionamento ideal dos bicos no sistema MQF	22
Figura 6 – Formação do cavaco.....	24
Figura 7 – Efeito do avanço e da profundidade de corte na forma dos cavacos	27
Figura 8 – Diferentes formas de cavaco geradas no fresamento frontal	28
Figura 9 – Imagem microscópica de uma ferramenta de metal duro revestida com multicamadas	35
Figura 10 – Rugosidades	40
Figura 11 – Corpos de prova	46
Figura 12 – Centro de Usinagem DMG	47
Figura 13 – Representação esquemática das diferentes larguras de corte.....	48
Figura 14 – Pastilhas de metal duro revestido.....	49
Figura 15 – Sistema de lubrificação MQF	50
Figura 16 – Posicionamento dos bicos do sistema de lubrificação	50
Figura 17 – Rugosímetro	52
Figura 18 – Microscópio	53
Figura 19 – Representação esquemática dos efeitos das diferentes larguras de corte.....	58
Quadro 1 – Composição química do aço ABNT 4340.....	14
Quadro 2 – Classificação das ferramentas de metal duro conforme Norma ABNT NBR ISO 513 (2013)	31
Quadro 3 – Técnicas de Revestimento: CVD x PVD.....	33
Quadro 4 – Rugosidade R_a em função dos processos de usinagem	41
Quadro 5 – Conjuntos de parâmetros de corte para cada ensaio	48
Quadro 6 – Desgaste de ferramenta para condições com melhores resultados	61
Quadro 7 – Desgaste de ferramenta para condições com piores resultados.....	62
Quadro 8 – Cavacos para condições com melhores resultados	64
Quadro 9 – Cavacos para condições com piores resultados.....	65
Gráfico 1 – Principais efeitos para Rugosidade R_a	56
Gráfico 2 – Principais efeitos para Rugosidade R_t	57

Gráfico 3 – Principais efeitos para Potência.....	58
Gráfico 4 – Principais efeitos para Emissão Acústica.....	59
Gráfico 5 – Principais efeitos para Vibração.....	60
Gráfico 6 – Comparativo de desempenho por condição – Ferramenta CVD.....	66
Gráfico 7 – Comparativo de desempenho por condição – Ferramenta PVD	66
Gráfico 8 – Comparativo entre métodos de lubrificação – Parâmetro R_a	67
Gráfico 9 – Comparativo entre métodos de lubrificação – Parâmetro R_t	68

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVOS	12
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1	AÇOS	13
3.1.1	Aço ABNT 4340	13
3.2	PROCESSO DE USINAGEM	14
3.2.1	Usinagem de aços endurecidos	15
3.2.2	Fresamento	16
3.2.2.1	Fresamento frontal assimétrico	17
3.2.3	Parâmetros de corte para o processo de fresamento	19
3.2.4	Fluido de corte: vantagens e desvantagens	20
3.2.4.1	Usinagem com mínima quantidade de fluido	21
3.2.5	Mecanismos de formação do cavaco	24
3.2.5.1	Tipos e formas de cavaco	26
3.2.6	Materiais para ferramentas	28
3.2.6.1	Metal duro	30
3.2.6.2	Técnicas de Revestimento: CVD e PVD	32
3.2.6.3	Materiais de Revestimento: TiCN-Al ₂ O ₃ e TiAlN	33
3.2.7	Desgastes e avarias de ferramenta	36
3.3	RUGOSIDADE	38
3.4	POTÊNCIA DE USINAGEM	42
3.5	EMIÇÃO ACÚSTICA (EA)	43
3.6	VIBRAÇÃO	44
4	MATERIAIS E MÉTODOS	46
4.1	CORPO DE PROVA	46
4.2	PROCESSO DE USINAGEM	46
4.2.1	Fresamento	47
4.2.1.1	Fresa	49
4.2.1.2	Sistema MQF	49
4.2.2	Sistema de aquisição de dados	50
4.2.2.1	Potência de corte	51
4.2.2.2	Emissão acústica	51

4.2.2.3	Vibração	51
4.2.3	Integridade superficial	51
4.2.4	Desgaste da ferramenta	52
4.2.5	Tipos e formas dos cavacos	53
4.3	DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E TRATAMENTO ESTATÍSTICO.....	53
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
5.1	RUGOSIDADE MÉDIA (R_a).....	55
5.2	RUGOSIDADE TOTAL (R_t).....	56
5.3	POTENCIA CONSUMIDA	57
5.4	EMIÇÃO ACÚSTICA.....	59
5.5	VIBRAÇÃO	59
5.6	DESGASTE DA FERRAMENTA.....	60
5.7	TIPOS E FORMAS DOS CAVACOS	64
5.8	COMPARATIVO DE DESEMPENHO POR CONDIÇÃO.....	66
5.9	ENSAIOS À SECO	67
6	CONCLUSÃO	70
	REFERÊNCIAS	72

1 INTRODUÇÃO

Considerando o complexo de processos de fabricação, a usinagem tem sua reconhecida importância em razão de seu largo emprego na indústria metalmeccânica.

Isto se dá, entre outros fatores, devido à sua capacidade de produzir produtos (peças, elementos e conjuntos mecânicos) que combinam boa tolerância dimensional e qualidade superficial.

Os processos de usinagem em geral, incluindo o fresamento, têm tido uma nova e relevante demanda, decorrente da diretriz mercadológica de redução de custos e tempo de produção: a usinagem de aços endurecidos.

Desta demanda deriva a necessidade de desenvolvimento de máquinas de alta rigidez e acuracidade, ferramentas com elevada dureza e resistência ao desgaste em elevadas temperaturas, e métodos de lubrificação e refrigeração eficazes, econômicos e de baixo impacto socioambiental.

Além disso, e diante do premente desafio da sustentabilidade nos processos industriais, é inconteste a necessidade da busca e aperfeiçoamento de novas tecnologias que viabilizem social, ambiental e economicamente a usinagem de metais.

Neste contexto, a técnica da Mínima Quantidade de Fluido é um instrumento real, acessível e eficaz na implementação da produção mais limpa aplicada à gestão ambiental.

É sabido, entretanto, que a qualidade requerida para sua aplicação industrial está condicionada ao conjunto de parâmetros de corte previamente seleccionados para o processo de usinagem; velocidade, avanço e largura de corte têm significativa influência nos parâmetros de qualidade desejados.

Isto posto, a proposta deste trabalho foi estudar diferentes parâmetros de corte para combinação ideal de forma a se obter resultados satisfatórios no fresamento frontal assimétrico do aço ABNT 4340 endurecido, através do uso de mínima quantidade de fluido e pastilhas de metal duro revestido.

2 OBJETIVOS

Este trabalho objetiva verificar a influência dos parâmetros de corte no fresamento frontal assimétrico com mínima quantidade de fluido e pastilhas de metal duro revestido do aço ABNT 4340 endurecido.

Especificamente, busca analisar os efeitos da variação da velocidade de corte, do avanço e da largura de corte no fresamento assimétrico, sob a condição de mínima lubrificação, de forma a verificar a viabilidade da utilização da Mínima Quantidade de Fluido (MQF) no fresamento de aços endurecidos com ferramentas de metal duro revestido.

Além disso, pretende discutir os efeitos de diferentes materiais ($\text{TiCN-Al}_2\text{O}_3$ e TiAlN) e técnicas (PVD e CVD) de revestimento da ferramenta, e de diferentes condições de assimetria da ferramenta no fresamento, dadas as solicitações mecânicas e térmicas próprias deste processo.

Por fim, tenciona observar as características derivadas dos conjuntos de parâmetros de corte seleccionados para cada ensaio em relação ao acabamento superficial, à potência consumida, à vibração, ao desgaste de ferramentas, e aos tipos e formas de cavacos.

E, desta análise, obter um conjunto ótimo de parâmetros de corte para o qual o fresamento frontal assimétrico do aço ABNT 4340, com mínima quantidade de fluido e pastilhas de metal duro revestido, apresente resultados suficientemente bons para validar a aplicação industrial deste processo.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 AÇOS

Aços são uma liga ferro-carbono e outros elementos. Tais elementos e suas quantidades, bem como os tratamentos térmicos aplicáveis, geram possibilidades de combinações ideais conforme as propriedades desejadas, originando uma enorme gama de ligas diferentes (CALLISTER JR; RETHWISCH, 2013).

Estas ligas podem ser classificadas quanto aos elementos de sua composição em: comuns, que contém concentrações residuais de impurezas e outros elementos; e especiais, que contém elementos com concentrações específicas e intencionalmente adicionados (CHIAVERINI, 1986). Fundamentalmente, o objetivo da adição de elementos é alterar as propriedades do material produzido a fim de lhe conferir, por exemplo, maior usinabilidade, temperabilidade, dureza à quente, resistência ao desgaste e à oxidação (ROMEIRO, 1997).

Podem ainda ser classificadas quanto à quantidade de carbono presente em sua composição, em: baixo carbono, aquelas nas quais o teor deste elemento está abaixo de 0,25%; médio carbono, em que o teor está entre 0,25 e 0,60%; e alto carbono, com valores de 0,60 a 1,40% de C. Este elemento confere ao aço maior dureza e resistência, além de responder melhor a determinados processos de tratamento térmico, a depender de sua concentração (CALLISTER JR; RETHWISCH, 2013).

3.1.1 Aço ABNT 4340

De acordo com Chiaverini (1986), o aço ABNT 4340 é classificado como um aço super-resistente, pois tem médio teor carbono e elementos de liga com concentrações específicas, que aumentam sua temperabilidade.

Entre os elementos de sua composição, especificados no Quadro 1 conforme a ABNT NBR NM 87 (1996), destacam-se o cromo (Cr), cuja função é aumentar a temperabilidade, a resistência à corrosão e à abrasão; o níquel (Ni), adicionado para garantir boa resistência ao impacto, e o molibdênio (Mo), utilizado como catalizador no processo de têmpera e para conferir resistência em altas temperaturas (CALLISTER JR; RETHWISCH, 2013).

Quadro 1: Composição química do aço ABNT 4340

COMPOSIÇÃO QUÍMICA [%] - SAE 4340							
C	Mn	P_{máx.}	S_{máx.}	Si	Ni	Cr	Mo
0,38 - 0,43	0,60 - 0,80	0,03	0,04	0,15 - 0,35	1,65 - 2,00	0,70 - 0,90	0,20 - 0,30

Fonte: Adaptado de ABNT NBR NM 87 (1996).

Em razão disso, o aço ABNT 4340 tem destaque devido às propriedades de boa resistência à fadiga em elevadas temperaturas, resistência à tração e ao impacto, apesar da baixa soldabilidade e usinabilidade.

Dadas as propriedades descritas, é um aço com abrangente campo de aplicação, especialmente em situações de alta solicitação e confiabilidade, como a indústria aeronáutica, peças automobilísticas e de máquinas (eixos, engrenagens, pinhões e acoplamentos); e estruturas críticas: vasos de pressão e componentes de construção (BHATTACHARYA *et al*, 2011).

3.2 PROCESSO DE USINAGEM

O processo de usinagem é aquele no qual um material é trabalhado a fim de adquirir determinada forma, através da remoção de cavaco (FERRARESI, 1977). Operações de corte sucessivas removem excessos de um material bruto com auxílio de uma ferramenta, resultando em um componente mecânico acabado ou semi-acabado, que será parte de um bem durável.

Nos processos de usinagem convencionais, a remoção do material é feita pelo emprego de energia mecânica nas operações de corte, especialmente por cisalhamento, no contato físico da ferramenta com a peça (SOUZA, 2011).

Muito empregados na fabricação de componentes que requerem alta qualidade superficial e elevada precisão, são exemplos dos processos de usinagem mais utilizados na indústria metalmeccânica o torneamento, o fresamento e a retificação (MACHADO *et al*, 2009).

É indiscutível a importância da produtividade nos processos de usinagem, obtida com o corte da maior quantidade de material no menor período de tempo, através do uso de ferramentas com a vida mais longa, por exemplo. Combinar todos os parâmetros envolvidos no processo de usinagem para maximizar a produtividade é, no entanto, uma tarefa muito complexa e se torna muito mais difícil quando se trabalha com corte de alta velocidade em aços endurecidos.

Uma propriedade desejável nos aços é a usinabilidade. Tal característica do material é definida em termos de três fatores: forças / potência de usinagem, desgaste da ferramenta e integridade superficial. Mandal *et al* (2011) afirmam que um material com boa usinabilidade é vantajoso por seu baixo consumo de energia, baixo desgaste da ferramenta e boa qualidade de acabamento superficial.

Neste contexto, a usinagem de aços endurecidos surge como uma alternativa à necessidade do aumento da produtividade nos processos de usinagem tradicionais. Porém, uma vez que tais aços não têm boa usinabilidade, outros fatores devem ser trabalhados para viabilizar tal aplicação.

3.2.1 Usinagem de aços endurecidos

Neste contexto de manufatura sustentável, as demandas por processos mais rápidos, econômicos e ecologicamente viáveis estão aumentando. Assim, o objetivo da usinagem é fabricar produtos de alta precisão dimensional e bom acabamento, em pouco tempo, com baixo custo e poucos impactos decorrentes do uso de fluidos lubrificantes.

Por esta razão, é grande a tendência de desenvolvimento da usinagem de aços endurecidos, usinagem de alta velocidade e usinagem à seco.

De acordo com Chincharikar e Choudhury (2015), o conceito de usinagem em aços endurecidos ganhou considerável atenção no desenvolvimento dos processos de corte de metal, uma vez que propõe substituir o ciclo de processo tradicional, que compreende a usinagem de desbaste, seguida do tratamento térmico e da retificação. Os autores afirmam que, a fim de aumentar a flexibilidade do processo e a capacidade de fabricar geometrias complexas, a usinagem em aços endurecidos foi introduzida onde a necessidade da etapa de retificação pode ser eliminada, e a matéria-prima é fornecida já tratada termicamente (45–65 HRC).

Segundo Aneiro, Coelho e Brandão (2008), a usinagem de aços endurecidos usando ferramentas de metal duro revestido em altas velocidades de corte apresenta algumas vantagens em comparação com a tradicional sequência de usinagem dos processos (usinagem de desbaste, tratamento térmico e retificação), como: menores forças de corte e tensão residual, tempo de ciclo reduzido e principalmente baixo consumo de energia.

Devido especialmente à maior flexibilidade na produção de formas geométricas complexas, a usinagem de aços endurecidos está sendo amplamente aplicada em ramos industriais como o automotivo, o de equipamentos hidráulicos e a indústria de moldes e

matrizes; além da fabricação de engrenagens, anéis de rolamentos, eixos e outros elementos mecânicos (SAHOO; SAHOO, 2012).

Porém, este tipo especial de usinagem exige o desenvolvimento de máquinas-ferramenta rígidas e com potência adequada, ferramentas com elevada rigidez e acuracidade geométrica, porta-ferramentas com alta rigidez e condições de corte apropriadas, para que possa ser seriamente considerado como uma alternativa às operações de acabamento por retificação (CHINCHANIKAR; CHOUDHURY, 2015).

Sahoo e Sahoo (2012) e outros autores, baseados na análise de estudos, citam as principais vantagens deste processo em comparação com o processo tradicional, que incluem: redução do custo, do tempo de preparação e tempo de usinagem por produto, alta flexibilidade do processo, alta taxa de remoção de material, bom acabamento superficial, e capacidade de fabricar peças com geometrias complexas. Além disso, a substituição do processo de retificação por processos com geometria definida permite que o uso abundante refrigerantes sejam evitados e, assim, os significativos benefícios de custo e ecologia também podem ser considerados.

De outro lado, Neslusan *et al* (2015) apontam algumas desvantagens deste tipo de usinagem, como a dependência das condições de corte (notadamente o avanço) para obtenção de uma alta qualidade superficial, e o alto risco de falha catastrófica da ferramenta (avaria) após a fase normal de desgaste (principalmente associado à aplicação de ferramentas cerâmicas).

3.2.2 Fresamento

O fresamento é um processo mecânico de usinagem que consiste na retirada do excesso de material ou sobrematerial da superfície de uma peça através de ferramentas multicortantes, com a finalidade de construir superfícies planas retilíneas ou com uma determinada forma e acabamento desejados. Para tanto, a ferramenta gira e a peça ou a ferramenta se deslocam segundo uma trajetória qualquer (FERRARESI, 1977).

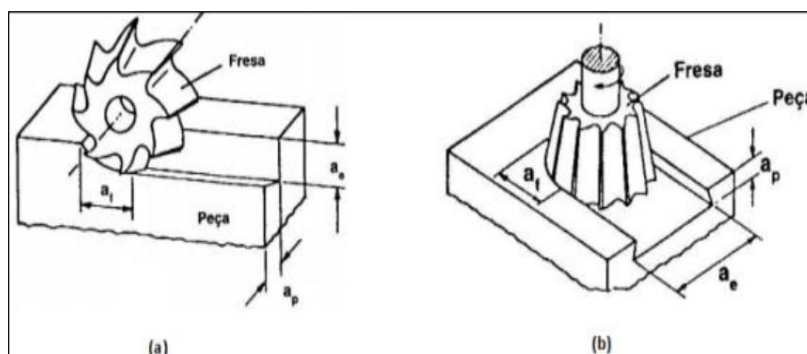
Neste processo, portanto, a remoção do sobrematerial da peça é feita pela combinação de dois movimentos, efetuados ao mesmo tempo: (1) movimento de rotação da ferramenta ao redor do seu eixo, e (2) movimento relativo entre a mesa da máquina, onde é fixada a peça a ser usinada, e a ferramenta. É este último, chamado de movimento de avanço, que leva a peça até a ferramenta de corte e torna possível a operação de usinagem.

A ferramenta, denominada fresa, é provida de arestas cortantes dispostas simetricamente em torno de um eixo, e pode se apresentar sob as mais diferentes formas, conferindo a esta operação um caráter de versatilidade em termos de geometrias possíveis de serem geradas (STEMMER, 2005)

Como ensina Souza (2011), as superfícies planas de não-revolução podem ser executadas por vários processos além do fresamento, como o aplainamento, o brochamento externo e a retificação; porém, boa parte das superfícies não-planas e de não-revolução de peças e/ou componentes mecânicos somente pode ser gerada por fresamento, o que justifica a relevância deste processo entre os processos de usinagem.

É classificado em dois tipos básicos, referentes à posição da ferramenta em relação à peça durante o movimento de desbaste. São: o fresamento cilíndrico tangencial, e o fresamento frontal (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013), ilustrados na Figura 1.

Figura 1: Tipos de fresamento: a) tangencial e b) frontal



Fonte: Diniz, Marcondes e Coppini (2013).

Este último, também chamado de fresamento de topo, é destinado à obtenção de uma superfície plana perpendicular ao eixo de rotação da ferramenta. É comumente realizado em fresadoras verticais e as ferramentas de corte são chamadas de fresas de topo ou fresas frontais.

Pode ser subdividido em simétrico e assimétrico, quanto à concordância entre os eixos de simetria da peça e da ferramenta, no plano de trabalho.

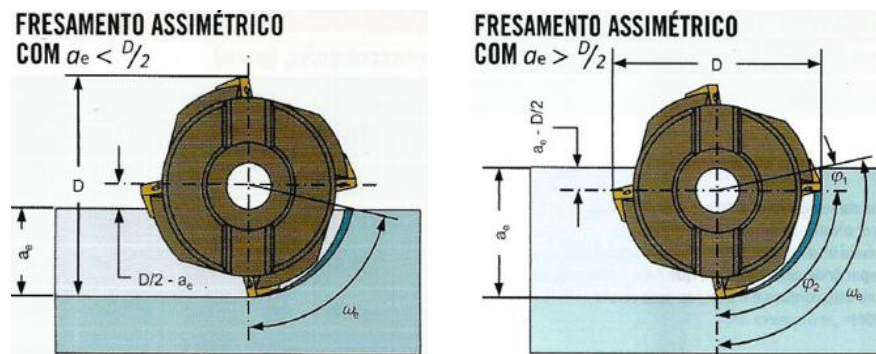
3.2.2.1 Fresamento frontal assimétrico

O fresamento frontal assimétrico pode ser concordante, quando o sentido de rotação da fresa é o mesmo do avanço da peça no ponto de contato e a espessura do cavaco é

decrecente; ou discordante, quando o sentido de rotação da fresa é contrário ao sentido de avanço da peça no ponto de contato e a espessura do cavaco é crescente.

Pode ainda ser explorado com vários graus de assimetria, que serão: menores que o raio da ferramenta ($a_e < D/2$) ou maiores que o raio da ferramenta ($a_e > D/2$), conforme demonstrado na Figura 2.

Figura 2: Tipos de fresamento frontal assimétrico



Fonte: SECO TOOLS AB, 2016.

Segundo Stemmer (2005), o fresamento frontal assimétrico com largura de corte maior que o raio da ferramenta é vantajoso quando o diâmetro da fresa é grande em relação à largura da peça, pois, neste caso, tem-se um maior número de dentes simultaneamente no corte, gerando menores esforços de corte por dente e, portanto, um corte mais suave.

Além disso, quando o corte é assimétrico, existe uma menor tendência à vibração devido à variação da direção da componente radial da força de usinagem ser bem menor que no corte simétrico.

Importante observar que, quanto menor a largura de corte ($a_e < D/2$), menor o choque da ferramenta com a peça ao tocá-la a cada volta, e menores as chances de falha da mesma devido a avarias (trincas mecânicas). Isto se dá porque, para larguras de corte maiores ($a_e > D/2$), aumenta a espessura de corte na entrada do dente atuante, ampliando a energia do choque.

No caso de ferramentas tenazes o suficiente para resistir a altas energias de choque, esta variação da largura não tem grande relevância; porém, neste caso, é recomendável o corte simétrico, uma vez que contato ferramenta-peça é menor e, conseqüentemente, o desgaste também (SOUZA, 2011).

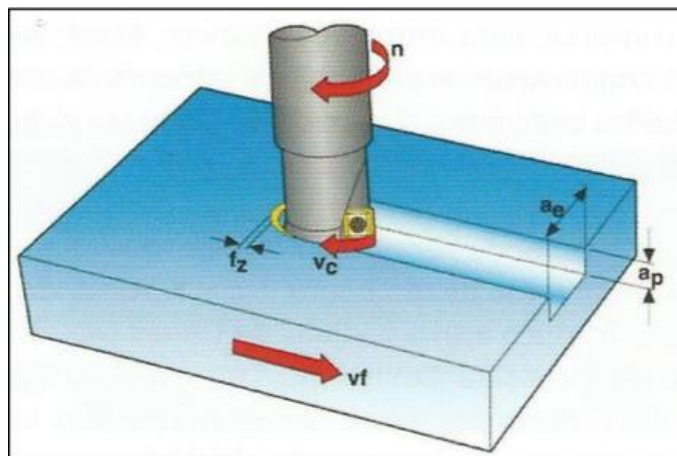
3.2.3 Parâmetros de corte para o processo de fresamento

Em qualquer operação de usinagem, todos os movimentos são importantes. O próprio processo depende do movimento relativo adequado entre a ferramenta e a peça. Por isso, a todos eles estão associadas direções, sentidos, velocidades e percursos.

Os parâmetros de corte são, portanto, essenciais aos resultados do processo, e devem ser direcionadamente determinados antes do processo de usinagem (CHINCHANIKAR; CHOUDHURY, 2015).

Suresh, Basavarajappa e Samuel (2012) afirmam que tanto a qualidade das superfícies usinadas quanto desempenho ideal das ferramentas de corte (de metal duro revestido ou cerâmicas) são altamente dependentes dos parâmetros de corte (velocidade, avanço e profundidade de corte), bem como da geometria da ferramenta.

Figura 3: Parâmetros de corte no fresamento frontal



Fonte: SECO TOOLS AB, 2016.

Conforme ilustrado na Figura 3, os parâmetros de corte utilizados no fresamento são:

- Velocidade de corte (V_c), entendida como a velocidade tangencial instantânea resultante da rotação n da ferramenta com diâmetro D em um ponto de contato com a peça. Sua determinação tem influência direta na taxa de desgaste da ferramenta, uma vez que gera o aumento da temperatura de corte e da força de impacto entre a aresta de corte e a peça (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013; SURESH; BASAVARAJAPPA; SAMUEL, 2012).

- Avanço por volta (f), que é o percurso linear percorrido a cada volta da ferramenta. Na escolha deste parâmetro deve-se considerar o tipo de fresa, a potência da máquina e o material da ferramenta (MACHADO *et al*, 2009). De modo análogo, o avanço por dente (f_z) é o

percurso de avanço a cada dente e corresponde à distância percorrida entre duas superfícies em usinagem consecutiva.

- Largura de corte (a_e), definida, no fresamento frontal, como a penetração da ferramenta em relação à peça, medida no plano de trabalho, perpendicularmente à direção de avanço. (FERRARESI, 1977). É substancialmente maior que a profundidade de corte (a_p) e objeto de estudo, mormente em relação ao desgaste provocado na ferramenta, devido à região da pastilha que toca na peça, que pode aumentar ou diminuir a energia proveniente do choque (STEMMER, 2005).

- Profundidade de corte (a_p), conceituada, no fresamento frontal, como a penetração da ferramenta na peça, medida perpendicularmente ao plano de trabalho. Pouco influencia no desgaste da fresa e seu aumento provoca um incremento proporcional na remoção de material, de forma que se deve utilizar a maior profundidade de corte possível (STEMMER, 2005).

3.2.4 Fluido de corte: vantagens e desvantagens

Em experimentos narrados há vários anos observou-se que, ao se aplicar grandes quantidades de água na região de corte, a velocidade de corte poderia ser aumentada 33% sem reduzir a vida da ferramenta. Desde então, os fluidos de corte foram desenvolvidos e hoje resultam em uma extensa gama de produtos, com diferentes propriedades e que atendem positivamente a maioria dos materiais e operações de usinagem (ÁVILA; ABRÃO, 2001).

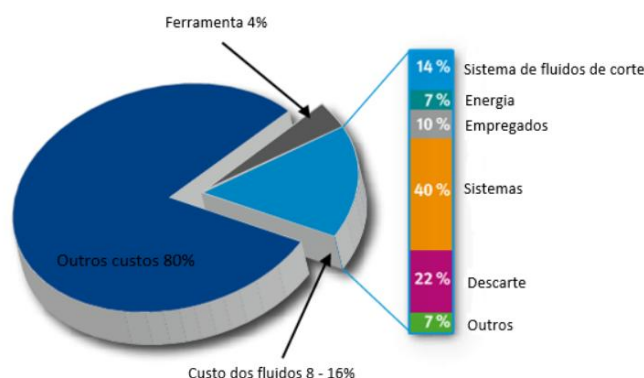
Ainda segundo Ávila e Abrão (2001), a seleção do fluido que melhor responde às necessidades de cada tipo de processo ocorre em função de vários parâmetros, dentre os quais a velocidade, o avanço e profundidade de corte, os materiais da peça e da ferramenta, as tolerâncias e a integridade superficial do componente usinado.

De modo geral, os fluidos de corte têm funções bastante relevantes no processo de usinagem, além do aumento da vida ferramenta, como: remoção do cavaco da região de corte, redução do atrito nas interfaces peça-ferramenta e cavaco-ferramenta, resfriamento da peça e da ferramenta, e proteção da peça contra a oxidação (MACHADO *et al*, 2009). Tais funções variam em importância dependendo das solicitações próprias de cada processo, a exemplo da refrigeração, que é mais relevante para processos com altas velocidades de corte e corte contínuo, e da lubrificação, que importa mais em condições de baixas velocidades de corte a fim de evitar a formação da aresta postiça de corte (GINTING; NOUARI, 2007).

No entanto, sua utilização gera custos diretos, estimados em 8 a 16% dos custos totais de usinagem e associados à aquisição, ao armazenamento, ao preparo, ao controle em serviço

e ao descarte, conforme ilustrado na Figura 4. E custos indiretos, porém correlacionados, como a degradação do maquinário, contaminação do cavaco (que dificulta seu transporte e descarte e inviabiliza sua reutilização), impacto ecológico derivado da poluição ambiental (tanto pela emissão de poluentes como pelas quantidades descartadas), e prejuízos à saúde humana, tanto em razão da exposição e como do manuseio pelo operador (WALKER, 2013).

Figura 4: Custos de usinagem e custos com lubrificação tradicional



Fonte: Adaptado de Walker (2013).

3.2.4.1 Usinagem com mínima quantidade de fluido

Chinchankar e Choudhury (2015) afirmam que, a partir deste século, o “corte verde” será uma importante tendência nos processos de usinagem, sobretudo devido à conscientização voltada à preservação ambiental e a consequente legislação referente ao tema.

Entendem por “tecnologia de corte verde” as técnicas de corte à seco, corte com mínima quantidade de fluido (MQF – também denominada mínima quantidade de lubrificante: MQL), lubrificação e resfriamento por névoa, resfriamento a ar comprimido, tecnologia de resfriamento por nitrogênio líquido e uso de gases. Associado a elas, citam o desenvolvimento de novos materiais e técnicas de revestimento para ferramenta de corte.

Os mesmos autores, em outra oportunidade, descreveram que vários estudos foram realizados no intuito de comparar o desempenho da usinagem sob MQF com a usinagem à seco e com a usinagem sob lubrificação abundante, e a maioria dos pesquisadores observou melhor desempenho na condição MQF em relação às demais condições (CHINCHANIKAR; CHOUDHURY, 2014).

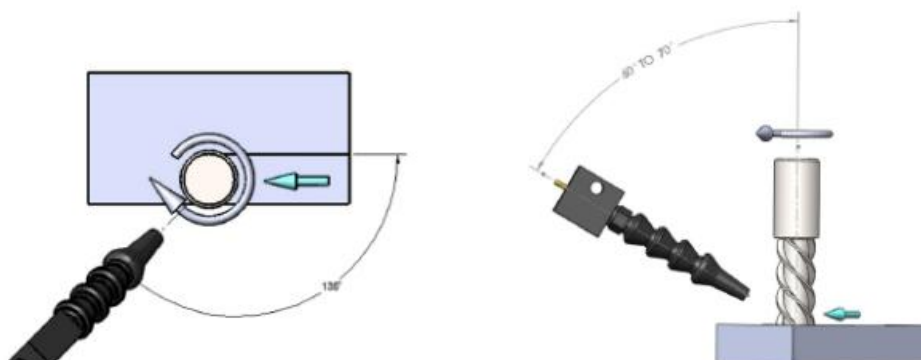
Logo, entendendo a técnica de lubrificação com mínima quantidade de fluido como uma alternativa ao uso da lubrificação abundante, é necessário compreender o princípio que rege sua aplicação.

Uma pequena quantidade de fluido de corte, associada a ar comprimido, é aplicada diretamente nas zonas de contato entre a ferramenta e o cavaco e entre a ferramenta e a peça (GARCIA, 2015).

O calor gerado devido à quebra das ligações moleculares durante a deformação plástica e remoção de sobremetal não pode ser evitado; porém, o fluido aspergido nesta região garante que a maior parte do calor fique retido no cavaco e que seu atrito com a ferramenta na face de saída seja menor. A outra região para a qual se deve direcionar o fluido, chamada zona de cisalhamento secundário, é aquela em que há maior concentração de energia derivada do atrito entre a ferramenta e a peça; o calor gerado nesta zona é um dos maiores contribuintes para o desgaste prematuro da ferramenta (WALKER, 2013).

É recomendável que os bicos de aplicação estejam o mais próximo possível da região a ser pulverizada (Figura 5), e que o fluxo de ar seja cuidadosamente ajustado, a fim de evitar a geração de uma névoa indesejada.

Figura 5: Posicionamento dos bicos no sistema MQF



Fonte: Adaptado de Walker (2013).

A quantidade de fluido pode chegar a 1/10.000 da quantidade de fluido usado na lubrificação abundante; porém, dependerá muito dos materiais da peça e da ferramenta, bem como do processo de usinagem. Isto porque alguns materiais têm mais lubrificação natural, alguns processos são mais aptos a transportar o fluido para o lugar adequado, e ferramentas maiores precisam de mais lubrificante, por exemplo (WALKER, 2013).

Estudos demonstram que existe um conjunto de parâmetros de corte com os quais o MQF funciona bem e os melhores resultados são alcançados. Muitos destes parâmetros são vantajosos também na aplicação da técnica de lubrificação tradicional; porém, pode-se destacar: (i) a velocidade de corte ideal, na qual uma camada de óxido estável pode ser formada a fim de criar uma barreira à transferência de calor para a ferramenta (LIAO; LIN,

2007); (ii) maiores avanços, pois o aumento do avanço geralmente forma cavacos maiores que, por sua vez, retêm mais calor do corte; (iii) maiores velocidades, que, e em operações de corte interrompido, garantem que a ferramenta ficará mais fria devido ao tempo de transferência da energia térmica para a ferramenta em relação ao tempo em corte (WALKER, 2013).

Além disso, fabricantes têm trabalhado continuamente no desenvolvimento de ferramentas com revestimentos e geometrias especialmente projetados para trabalhar em temperaturas mais altas e manter a energia térmica no cavaco. Assim, desde que a ferramenta trabalhe dentro da faixa de temperatura para a qual foi projetada, tenha a geometria apropriada e seja usada em um material adequado, continuará a ter um bom desempenho, independente do método lubrificador utilizado (CHINCHANIKAR; CHOUDHURY, 2015).

Ao ser corretamente empregada, a técnica MQF oferece inúmeros benefícios, sobretudo econômicos. Embora os fluidos MQF custem mais por galão, a quantidade utilizada é mínima, estimada em [ml/h], o que faz o custo por volume usinado ser substancialmente menor. Além disso, por ser um processo quase à seco, com menos de 2% do fluido aderido ao cavaco, elimina também os investimentos em reservatórios, recicladores, bombas e dispositivos de filtragem, bem como os custos para limpar e secar o cavaco antes de descartá-lo ou reutilizá-lo. Uma vez que o fluido do MQF não se espalha pela área de trabalho, não penetra nos componentes elétricos da máquina, nem dissolve a tinta das superfícies, prolongando a vida do maquinário (CHINCHANIKAR; CHOUDHURY, 2014).

Outra vantagem de grande impacto é a considerável redução dos riscos à saúde causados pelas emissões de fluidos de corte, tanto no ar quanto diretamente na pele dos operadores (SIMUNOVIC; SIMUNOVIC; SARIC, 2015). Em particular, quando o MQF é feito com óleos à base de vegetais, é ainda maior a segurança ocupacional, pois além de serem mais facilmente expectorados do organismo, ao contrário das emulsões, não demandam a adição de limpadores de sistemas, biocidas e fungicidas que sejam prejudiciais à pele e à saúde em geral (WALKER, 2013).

No MQF, uma parte do calor é removida pela vaporização do fluido de corte e outra se dá através da transferência convectiva como o ar que é soprado no momento da aspersão. Esta quantidade, porém, é cerca de metade do resfriamento produzido pela técnica de lubrificação tradicional. O gerenciamento do calor realizado pelo MQF (ao invés da total remoção, proposta pela lubrificação abundante), resulta em uma maior vida da ferramenta, uma vez que esta não sofrerá a ação drástica dos ciclos térmicos de aquecimento e refrigeração forçados, e

poderá ainda se valer dos aspectos benéficos do calor controlado, como a maior maleabilidade do material a ser usinado (DHAR; KAMRUZZAMAN; AHMED, 2006).

Por fim, relativamente à técnica de lubrificação tradicional, o MQF torna o processo mais ecológico, uma vez que promove a redução da emissão de poluentes e simultaneamente da quantidade de fluido a ser descartado (SAHOO; SAHOO, 2012).

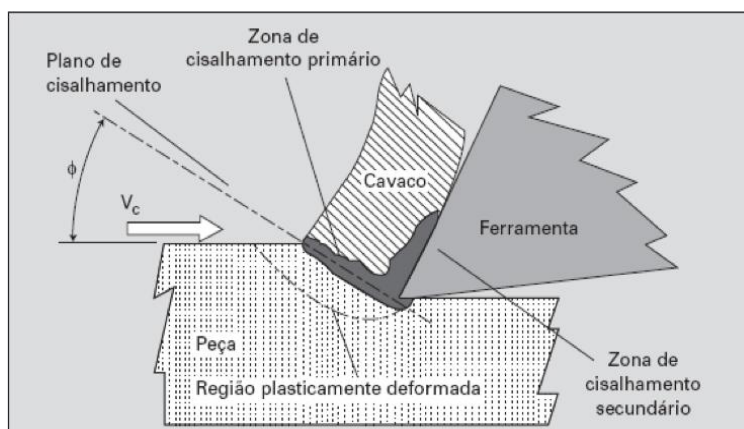
3.2.5 Mecanismos de formação do cavaco

O cavaco é subproduto do processo de usinagem e, conquanto acarrete problemas, por exemplo, em relação ao efeito sobre a superfície usinada e seu descarte, desempenha importante função na remoção da energia em forma de calor gerada durante o corte.

O mecanismo de formação do cavaco é aquele através do qual a ferramenta deforma plasticamente o material usinado, removendo dele algumas partes.

Segundo Coelho, Ng e Elbestawi (2007) o processo de formação de cavacos exige uma quantidade significativa de energia para deformar o material plasticamente, quebrá-lo, remover os cavacos vencendo o atrito na interface cavaco-ferramenta, e no contato entre a superfície de saída da ferramenta e a nova superfície usinada. Logo, existem várias fontes diferentes de geração de calor, tanto na região de formação de cavacos: zonas de cisalhamento primário e secundário, nas quais o material da peça sofre grandes esforços de deformação plástica, quanto pelo atrito de deslizamento na interface cavaco-ferramenta e na superfície de folga.

Figura 6: Formação do cavaco



Fonte: Diniz, Marcondes e Coppini (2013).

No processo de usinagem, o sobremetal é removido da peça usinada pela aresta de corte de uma ferramenta. A energia usada na deformação do metal é liberada, principalmente na forma de calor, nas zonas de cisalhamento primárias e secundárias, conforme ilustrado na Figura 6 (WALKER, 2013).

Walker (2013) ensina que a energia liberada na zona primária de cisalhamento é resultado das ligações moleculares sendo quebradas na peça usinada e não pode ser evitada; parte do calor gerado nesta região vai para a peça e o restante para o cavaco. Já o atrito entre a ferramenta e o cavaco na zona de cisalhamento secundário faz com que tanto a ferramenta quanto o cavaco aqueçam, e o calor nesta zona é um dos maiores contribuintes para o desgaste prematuro da ferramenta. Por esta razão é tão relevante a escolha e utilização adequada da técnica de refrigeração.

Detalhadamente, o mecanismo de formação de cavacos pode ser descrito nas seguintes etapas (MACHADO *et al*, 2009):

- Recalque inicial: fase na qual uma pequena fração do material, ainda unida à peça, é pressionada contra a aresta de corte da ferramenta devido ao impacto da cunha cortante neste material;
- Deformação e ruptura: após o recalque, o material sofre inicialmente uma deformação elástica, seguida de uma deformação plástica, que aumenta progressivamente até que as tensões de cisalhamento se apresentam elevadas o bastante para iniciar o deslizamento no plano de cisalhamento primário (entre a peça e o cavaco), formado entre a direção da velocidade de corte (V_c) e o plano de cisalhamento;
- Deslizamento das lamelas: de acordo com a penetração da ferramenta na peça, ocorre a ruptura total ou parcial do cavaco, a depender da extensão da propagação da trinca, na região de cisalhamento. Contribuem para a quebra do cavaco, neste momento, além das propriedades do material e dos parâmetros de corte, a geometria da ferramenta e os esforços próprios a cada tipo de processo;
- Saída do cavaco: na última etapa do ciclo, se dá o escorregamento do cavaco devido ao movimento relativo ferramenta-peça, enquanto uma nova porção de material está sendo recalçada e reiniciando o processo de corte.

Diniz, Marcondes e Coppini (2013) ensinam que, em materiais dúcteis, as quatro fases descritas são bem definidas, uma vez que eles apresentam uma extensa zona de deformação plástica e, portanto, se deformam bastante antes de ocorrer a ruptura. Já nos materiais frágeis, que pouco deformam antes de romperem, o primeiro e o segundo evento são curtos, o terceiro

compreende a ruptura total do cavaco e o quarto é inexistente, dado que o cavaco de pequena dimensão é rapidamente extraído da região de corte.

No mesmo sentido, Neslusan *et al* (2015) explicam que, devido à baixa plasticidade, alta dureza e resistência do aço endurecido, durante sua usinagem, são produzidos os cavacos segmentados. E ainda acrescenta que, enquanto o mecanismo de encruamento predomina durante a usinagem de aços convencionais, na usinagem de aços endurecidos ocorre uma diminuição na tensão de corte devido à ação da energia térmica na região de corte.

3.2.5.1 Tipos e formas de cavaco

O controle do cavaco (tipo e principalmente forma) pode ser imprescindível para a produtividade da empresa, quando nela existirem determinados processos de usinagem que utilizam corte contínuo em materiais dúcteis, como por exemplo, o torneamento de aços baixo carbono. Esta necessidade se agrava na medida em que o surgimento de ferramentas mais resistentes ao desgaste viabiliza o uso de altas velocidades de corte em máquinas CNC, em sistemas produtivos altamente automatizados e com mínima supervisão humana (SOUZA, 2011).

Isto porque a forma e o tipo do cavaco influenciam diversos fatores ligados à usinagem, tais como o os esforços de corte, o calor gerado na usinagem, o desgaste da ferramenta, e a penetração do meio lubrificador. Assim, estão envolvidos com o processo de formação do cavaco aspectos econômicos e de qualidade da peça, a segurança do operador, a utilização adequada da máquina-ferramenta, entre outros (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Analizando os tipos de cavacos formados em usinagem, verifica-se que os mesmos podem apresentar aspectos distintos, dependendo das variáveis independentes de entrada.

Neste sentido, Ferraresi (1977) classifica os cavacos quanto ao tipo em:

- Cavaco contínuo: formado por lamelas justapostas numa disposição contínua e agrupadas em grupos lamelares. Ocorre na usinagem de materiais dúcteis e homogêneos, a médias e altas velocidades, com pequeno e médio avanço;

- Cavaco de cisalhamento: constitui-se de grupos lamelares bem distintos e justapostos, formados por elementos de cavaco cisalhados na região de cisalhamento e parcialmente soldados em seguida. Ocorre quando há diminuição da resistência do material no plano de cisalhamento, em decorrência do aumento da deformação, da heterogeneidade da estrutura metalográfica, ou de fatores externos que provocam variações da espessura de cavaco não pertinentes ao processo; e

– Cavaco de ruptura: formado por fragmentos arrancados da peça usinada, uma vez que ocorre a ruptura completa do material em grupos lamelares, que permanecem separados. É característico de materiais frágeis.

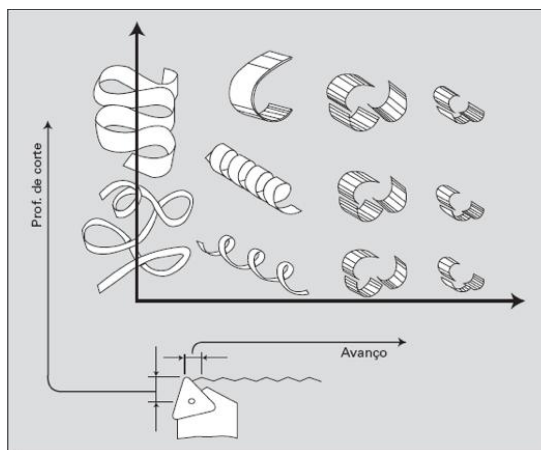
Diniz, Marcondes e Coppini (2013) destacam ainda um quarto tipo de cavaco, próprio da usinagem de aços endurecidos. Denominado cavaco segmentado, ocorre devido a grandes tensões de compressão na ferramenta e na peça, que promovem a formação de trincas ao invés de deformação plástica.

Os cavacos de cisalhamento e contínuos não apresentam uma distinção perfeitamente nítida e pode-se passar de um tipo a outro dependendo das condições de usinagem. Eles são ainda subclassificados quanto à forma: em fita, helicoidais, em espiral, em lascas ou pedaços, que são detalhadamente descritas na norma ISO 3685 (1993).

Apesar do baixo coeficiente de atrito entre a ferramenta e o cavaco e de sua aceitação em termos de bom acabamento superficial, o cavaco contínuo, quando em fita, apresenta as desvantagens de alta possibilidade de acidentes, ocupar muito espaço e dificuldade de ser transportado. Por isto, entende-se que a forma de cavaco mais conveniente é a helicoidal, sendo o cavaco em lascas preferido somente quando houver pouco espaço disponível, ou quando sua remoção deva ser por fluido refrigerante (FERRARESI, 1977).

Os parâmetros de corte que mais influenciam na forma do cavaco são a velocidade de corte (V_c), o avanço (f) e a profundidade de corte (a_p). Na Figura 7 é mostrado como esta influência ocorre.

Figura 7: Efeito do avanço e da profundidade de corte na forma dos cavacos



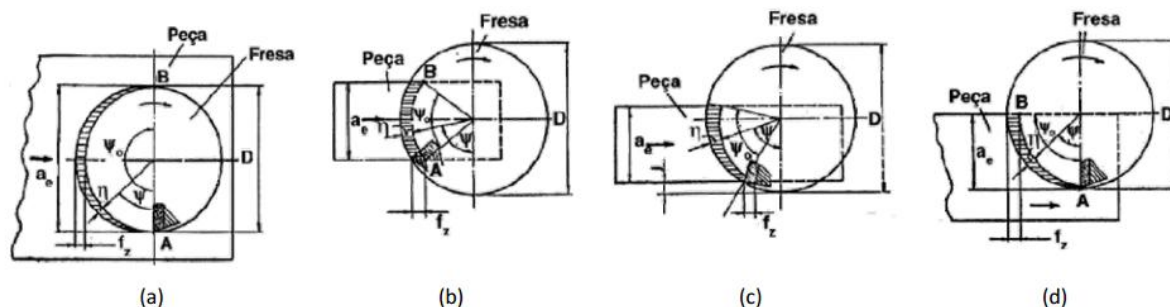
Fonte: Machado *et al* (2009).

Importante notar que, no processo de fresamento, devido ao corte interrompido (atuação intermitente da ferramenta na peça), os cavacos são curtos e de segmentos descontínuos.

No fresamento frontal, especificamente, a forma do cavaco é diferente conforme a simetria de penetração da ferramenta de corte na peça. Conforme se observa na Figura 8, no fresamento frontal simétrico, em que a fresa se desloca sobre o eixo de simetria da peça, tem-se o início do cavaco com uma espessura, chegando a um máximo no eixo de simetria da peça, e terminando com a espessura inicial. No fresamento frontal assimétrico, a espessura de corte se inicia em um mínimo e aumenta progressivamente até o fim (STEMMER, 2005).

Figura 8: Diferentes formas de cavaco geradas no fresamento frontal:

- a) simétrico tipo rasgo; b) simétrico tipo faceamento; c) assimétrico com toda a superfície sendo fresada; d) assimétrico com parte da superfície sendo fresada



Fonte: Souza (2011).

3.2.6 Materiais para ferramentas

Os materiais comumente utilizados para ferramentas são fruto de pesquisas que buscam continuamente o melhor desempenho e eficiência das mesmas. Isto porque o aumento do desempenho dinâmico das máquinas-ferramentas modernas, associados à sua elevada rigidez e potência, deve corresponder a um proporcional aprimoramento das propriedades das ferramentas de corte, especialmente em suas superfícies. A principal questão para os fabricantes de ferramentas e para os usuários está na correlação entre as características químicas, físicas e mecânicas das ferramentas de corte e seus desempenhos nas operações de corte.

Como visto anteriormente, o processo de usinagem baseia-se na remoção de material, devendo-se utilizar na ferramenta um material mais duro e mecanicamente mais resistente que o material da peça. No entanto, como ensina Ferraresi, (1977), as propriedades requeridas na ferramenta derivam não só do material a ser usinado, mas das condições gerais do processo,

como a geometria própria da operação de usinagem, os parâmetros de corte e as características da máquina-ferramenta. Por isso, a seleção de um material para ferramenta que apresente propriedades suficientes a um desempenho desejável em todas essas condições ainda é um desafio.

O corte de materiais frágeis ou as operações de corte descontínuo, por exemplo, exigem materiais tenazes o suficiente para suportar os choques e impactos inerentes à geometria do processo. Sendo dureza e tenacidade, geralmente, propriedades antagônicas (alta tenacidade corresponde à baixa dureza e vice-versa), o equilíbrio destas propriedades nos materiais de ferramentas de corte é obtido com a combinação de diferentes composições químicas, refinamento dos grãos, controle dos processos de fabricação e do tratamento térmico, o que lhes confere graus compatíveis de pureza e qualidade (SOUZA, 2011).

Além disso, dado o notável crescimento da demanda por aços extremamente resistentes e duros e seu consequente reflexo na necessidade de desenvolvimento de ferramentas de corte de alto desempenho, desenvolveu-se uma vasta gama de revestimentos, influentes nos fenômenos tribológicos. Sua escolha, tanto do material quanto da técnica, também deve estar sintonizada com as exigências específicas derivadas do material da peça e das condições do processo. Assim, a capacidade de prever, simular e avaliar o desempenho de corte deve estar inserida no roteiro de otimização para tecnologia de corte (CHINCHANIKAR; CHOUDHURY, 2015).

Uma ferramenta de corte ideal, portanto, pressupõe a combinação de muitas propriedades mecânicas (alta dureza; suficiente tenacidade para evitar falha por fratura; alta resistência ao desgaste abrasivo, à compressão e ao cisalhamento) e termoquímicas (boas propriedades térmicas e mecânicas em altas temperaturas; alta resistência ao choque térmico; ser quimicamente inerte), além de uma viabilidade econômica (SAHOO; SAHOO, 2012). Na ausência dessa possibilidade, procura-se priorizar algumas propriedades a depender da utilização da ferramenta.

Neste sentido, os materiais mais utilizados são o aço-rápido e o metal-duro, que juntos somam 90% das aplicações na indústria moderna. Detêm 10% das aplicações os materiais avançados como: nitreto de boro cúbico (CBN – *cubic boron nitride*), cerâmica e diamantes (SOUZA, 2011).

3.2.6.1 Metal duro

Atendendo às principais propriedades desejáveis em uma ferramenta de corte, o metal duro é utilizado em cerca de 50% das aplicações. Economicamente viável, apresenta elevada dureza à temperatura ambiente e à quente, resistência ao desgaste e tenacidade, podendo ser aplicado também em altas velocidades de corte (SOUZA, 2011).

Isto é possível porque este material é um composto de carbetos de tungstênio (WC), principal componente que determina sua dureza, e cobalto (Co), fase aglomerante que proporciona tenacidade. Carbonetos cúbicos como o carbetos de tântalo (TaC), carbetos de titânio (TiC) e o carbetos de nióbio (NbC) são adicionados com o objetivo de aumentar a dureza à quente, a resistência à deformação e a resistência química (SECO TOOLS AB, 2018).

Além disso, seu processo de fabricação contribui sobremaneira para obtenção das propriedades conforme desejadas. São fabricados pela chamada metalurgia do pó, em que partículas duras de carbetos de metais refratários são finamente divididas e sinterizadas com um ou mais elementos aglomerantes do grupo do ferro (ferro, níquel ou, mais comumente, cobalto), a fim de formar um corpo de alta dureza e resistência à compressão. Uma característica importante é o tamanho de grão das partículas duras: partículas grandes, especialmente de carbetos de tântalo (TaC) e de nióbio (NbC), produzem maior tenacidade, enquanto as pequenas auxiliam na obtenção de um material mais duro e resistente (COSTA, 2016).

É fornecido na forma de pastilhas intercambiáveis fixadas mecanicamente a seus suportes, o que facilita o processo de substituição de uma ferramenta desgastada por uma nova.

A Norma ABNT NBR ISO 513 (2013) traz uma classificação de grupos de ferramentas, através de letras e números (Quadro 2). A letra de designação da classe é sempre seguida de um número, representativo da tenacidade e da resistência ao desgaste da ferramenta, que são inversamente proporcionais. Quanto maior o número, maior a tenacidade e menor a resistência ao desgaste.

A subdivisão dentro de cada classe de metal-duro (P, M, K, N, S, H), recomendáveis para diferentes materiais a serem usinados, depende principalmente de duas características: (i) a composição química do material da ferramenta, especialmente quanto à qualidade e quantidade de carbonetos; e (ii) o tamanho dos grãos de carboneto: quanto mais finos, menor a tenacidade da ferramenta, associada a uma maior dureza média (DINIZ; MARCONDES;

COPPINI, 2013).

Quadro 2: Classificação das ferramentas de metal duro conforme Norma ABNT NBR ISO 513 (2013)

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

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

b – Aumento do avanço, aumento da tenacidade do material da ferramenta.

Fonte: Adaptado de Sandvik (2005).

Segundo Souza (2011), a grande vantagem do metal duro, decorrente das propriedades já citadas, é a capacidade de manter o corte da ferramenta vivo por muito mais tempo, mesmo quando submetido a elevadas temperaturas geradas por energias provenientes de altas velocidades de corte, aumentando consideravelmente a produtividade nos processos de usinagem.

O desenvolvimento contínuo de materiais que atendam às exigências de um processo de alta performance fez surgir a possibilidade de se revestir a superfície das pastilhas com finas camadas de materiais duros, resistentes à abrasão, com baixo coeficiente de atrito, estabilidade química e baixa condutibilidade térmica, aumentando significativamente a vida da ferramenta e a qualidade superficial da peça usinada (SURESH; BASAVARAJAPPA; SAMUEL, 2012).

O revestimento é feito através de camadas extrafinas, medindo de 3 a 5 [µm] de

espessura, que proporcionam maior durabilidade à aresta de corte, uma vez que permitem à pastilha suportar maiores esforços de corte, em operações de desbaste, e maiores velocidades, em operações de acabamento, graças a sua elevada dureza, associada à matriz tenaz da ferramenta de metal duro.

A tecnologia do revestimento evoluiu até as pastilhas multirrevestidas, com camadas sobrepostas, onde cada uma delas exerce uma função específica a fim de conter os diferentes processos de desgaste que se desenvolvem durante a usinagem.

3.2.6.2 Técnicas de Revestimento: CVD e PVD

Classes mais modernas de ferramentas de metal duro são revestidas por técnicas CVD (*Chemical Vapor Deposition*) ou PVD (*Physical Vapor Deposition*).

Como o próprio nome sugere, a cobertura pelo processo CVD é feita por meio de reações químicas de diferentes gases. Durante o processo, a formação do revestimento se dá através de reações químicas do elemento a ser depositado com o substrato. Tanto a cobertura única quanto a multicamadas ocorrem a uma temperatura de aproximadamente 1.000°C.

O material do revestimento, composto por várias substâncias que reagem quimicamente entre si para formar outros componentes, provém de um gás, de uma mistura de gases ou pelo contato com sólidos. É injetado dentro de um forno, onde também são colocadas as pastilhas que serão revestidas e mantido em uma condição de subpressão durante várias horas (oito a dezesseis horas dependendo da classe), até que as camadas se formem (COSTA, 2016).

Durante o processo de cobertura, o controle da quantidade de gás, da temperatura e da pressão é de extrema importância para garantir a qualidade do revestimento.

A espessura das coberturas em pastilhas intercambiáveis varia entre 2 a 12 [µm].

Classes CVD são indicadas para os processos de torneamento, mandrilhamento e aplicações severas, com altos avanços e velocidades de corte de moderada a elevada (SECO TOOLS AB, 2018).

A outra técnica de revestimento é a Deposição Física de Vapores (PVD), que produz camadas mais finas e por isso mantém a tenacidade e a geometria da aresta de corte da ferramenta (COELHO; NG; ELBESTAWI, 2007). É realizada a uma temperatura de aproximadamente metade (500° C) daquela usada na técnica CVD (1.000°C).

Nela, o material de revestimento sólido de alta pureza é evaporado pelo calor ou bombardeado com íons (pulverização catódica), ao mesmo tempo em que no forno é

introduzido um gás reativo que forma um composto com o vapor metálico e se deposita nas ferramentas ou nos componentes na forma de um revestimento fino e altamente aderente.

Para atingir uma espessura de revestimento uniforme, as peças devem girar várias vezes a uma velocidade constante.

Classes cobertas por PVD são indicadas para os processos de fresamento, roscamento e furação, além de aplicações com baixos avanços, onde a alta tenacidade é necessária; são recomendadas para velocidades de corte de moderadas a baixas. (SECO TOOLS AB, 2018)

A combinação do substrato enriquecido e intencionalmente tratado, e o processo CVD/PVD de recobrimento resulta na atual geração de pastilhas de metal duro revestido para torneamento, fresamento e furação.

O Quadro 3 traz as principais diferenças entre as técnicas de revestimento e serve, principalmente, para nortear a escolha daquela que melhor atende às necessidades próprias de cada processo e material a ser usinado.

Quadro 3: Técnicas de Revestimento: CVD x PVD

	CVD Deposição química de vapor	PVD Deposição física de vapor
Temperatura de revestimento	Aproximadamente 1.000 °C	Aproximadamente 500 °C
Tenacidade	Reduzida	Não é afetada
Aresta de corte	Arredondamento requerido	Pode ser quina viva
Espessura do revestimento	Até 12 [µm]	Até 4 [µm]
Camadas	Multicamadas TiC-TiN, TiN-TiCN-TiN, TiC-Al ₂ C ₃	TiN, TiCN, TiAl
Principais aplicações	Torneamento e mandrilhamento	Fresamento, roscamento e furação
Vantagens	> resistência ao desgaste > resistência à craterização grande vida da ferramenta	= tenacidade = configuração de aresta = precisão reduz APC > vida da ferramenta

Fonte: Adaptado de Diniz, Marcondes e Coppini (2013).

3.2.6.3 Materiais de Revestimento: TiCN-Al₂O₃ e TiAlN

Idealmente, o material de uma ferramenta de corte deve combinar alta dureza e resistência ao desgaste com boa tenacidade e estabilidade química; porém, na ausência da

possibilidade da combinação de todas essas propriedades em um único material, a alternativa encontrada foi o revestimento das ferramentas com materiais mais adequados para resistir às condições de corte na zona de cisalhamento secundário. Assim, melhores propriedades adicionadas na superfície, associadas a um substrato adequado oferecem à ferramenta maior dureza a altas temperaturas, boas estabilidade química e propriedades térmicas, além propriedades lubrificantes, garantindo uma vida mais longa, com melhores resultados de qualidade superficial da peça e maior produtividade nas operações de corte (COELHO; NG; ELBESTAWI, 2007).

Para obter as referidas propriedades, os revestimentos, aplicados por deposição química de vapor (CVD) ou deposição física de vapor (PVD) são, geralmente, baseados em TiN, TiC e Ti (C, N). O TiN é quimicamente mais estável que o TiC (possui menor tendência à difusão em aços), porém é mais susceptível ao desgaste abrasivo.

No entanto, os melhores resultados foram alcançados pela suplementação da fase metálica com Al ou Cr. TiAlN e AlCrN, por exemplo, apresentaram grandes vantagens sobre outros revestimentos, uma vez que o alumínio pode reagir com o oxigênio, formando Al_2O_3 , cujas propriedades isolantes são uma barreira térmica para o calor gerado na interface cavaco-ferramenta, e por isso tendem a aumentar a vida da ferramenta. (KÖNIG *et al*¹, 2002 *apud* COELHO; NG; ELBESTAWI, 2007). Embora as camadas de revestimento não sejam capazes de bloquear completamente a energia térmica proveniente da quebra molecular e do atrito, uma "resistência térmica" pode ser colocada entre o cavaco e o substrato, resultando em mais calor dissipado através daquele e menores prejuízos à ferramenta. Além disso, trabalhos teóricos e experimentais demonstraram que o fluxo de calor é menor quando se utilizam camadas de revestimento e o valor é fortemente influenciado por suas propriedades (RECH; KUSIAK; BATTAGLIA, 2004).

Como exemplificado no Quadro 3, muitas são as possibilidades de materiais de revestimento, especialmente no caso de multicamadas. Uma maneira alternativa de estender a vida da ferramenta é a sobreposição de vários revestimentos, oferecendo uma combinação de propriedades do material.

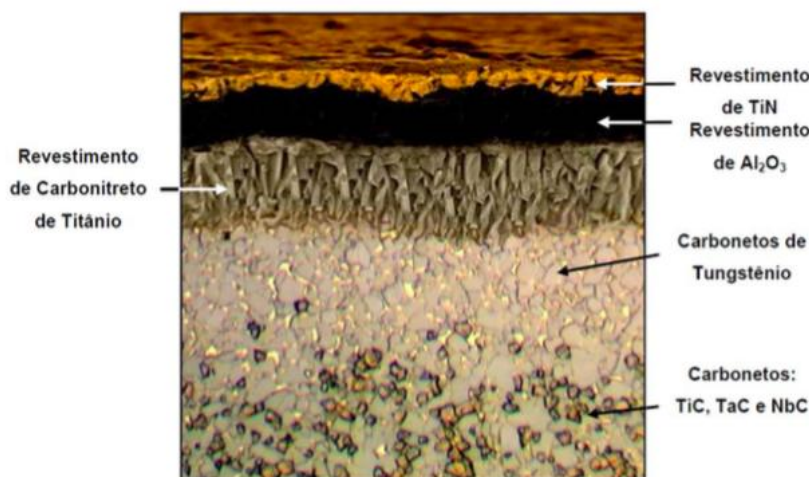
Neste caso, geralmente se tem um revestimento com 3 camadas: TiC/TiCN/TiN ou TiC/ Al_2O_3 /TiN. Entretanto, Diniz, Marcondes e Coppini (2013).citam a possibilidade de

¹ KÖNIG, W.; FRITSCH, R.; KAMMERMEIER, D. New approaches to characterizing the performance of coated cutting tools, **Annals of CIRP** 41/1. p. 49-54, 2002 *apud* COELHO, R. T.; NG, E.G.; ELBESTAWI, M. A. Tool wear when turning hardened AISI 4340 with coated PCBN tools using finishing cutting conditions. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, n. 47, p. 263–272, 2007.

revestimentos com até doze camadas de diferentes, onde cada camada tem uma função particular, e a sua associação permite oferecer um material com todas as vantagens possíveis de se obter com a técnica. Desta forma, uma única pastilha pode ser aplicável em diferentes fases da usinagem de metais, reduzindo as fases de corte e otimizando o processo como um todo.

Como se pode observar na imagem microscópica da Figura 9, à estrutura do metal duro com o substrato de carboneto de tungstênio e um ligante metálico de cobalto, está sobreposta a 1ª camada, normalmente de TiC ou TiCN, que garante uma coesão muito boa com o substrato. Nesta camada, o TiCN oferece elevada resistência ao desgaste, pois é um dos mais duros revestimentos utilizados. Em seguida está o Al_2O_3 , um revestimento intermediário altamente empregado pela sua inércia química, sua dureza, e sua baixa condutividade térmica a altas temperaturas. E na superfície, em contato direto com o material usinado, o TiN proporciona baixos coeficientes de atrito entre a ferramenta e o cavaco e entre a ferramenta e a peça (SOUZA, 2011).

Figura 9: Imagem microscópica de uma ferramenta de metal duro revestida com multicamadas



Fonte: Sandvik (2005).

Especificamente em relação à usinagem de aços endurecidos, à seco ou com mínima quantidade de fluido, Chinchani e Choudhury (2014) narram, baseados em numerosos estudos, que os revestimentos multicamadas com alto teor de alumínio (como TiAlN ou AlTiN) podem fornecer maior dureza, maior estabilidade térmica e maior resistência à oxidação do que revestimentos simples de nitretos ou carboneto (como CrN, TiN e TiC). Consequentemente, segundo os mesmos autores, a aplicação industrial de revestimentos

monocamada e multicamadas baseados em TiAlN, depositados usando a técnica de PVD, aumentou consideravelmente durante os últimos anos.

No mesmo sentido, Suresh, Basavarajappa e Samuel (2012), afirmam que a usinagem de aços endurecidos com pastilhas de TiCN / Al₂O₃ / TiN tende a ser mais produtiva, exatamente em razão da combinação de camadas no revestimento. O bom desempenho destas ferramentas se dá devido à sua melhor resistência ao desgaste, atribuída às propriedades de dureza das multicamadas, e à estabilidade térmica aumentada. Além disso, a falha no filme lubrificante após o início da fratura do revestimento foi menos intensa no caso das multicamadas, devido à desaceleração da potencial propagação de trincas no interior da estrutura TiN / TiAlN em camadas. Segundo eles, a idéia fundamental por trás da introdução da ferramenta de metal duro com múltiplas camadas é utilizar uma maior velocidade de corte para obter maiores taxas de remoção de material, sem, no entanto, deixar de produzir um bom acabamento superficial, durante a usinagem de ligas endurecidas.

Como consequência das características descritas, Sahoo e Sahoo (2012) concluíram, a partir de seus estudos, que a economia nos custos de usinagem com pastilhas TiN multicamadas é de 93,4% em comparação com o metal duro não revestido e de 40% em relação ao metal duro revestido com ZrCN, quando utilizadas na usinagem de aço endurecido.

3.2.7 Desgastes e avarias de ferramenta

Em razão das solicitações e condições de corte durante o processo de usinagem, a ferramenta fica sujeita a uma combinação de fatores de origem térmica, mecânica e química que induzem uma deterioração rápida e, naturalmente, indesejável. Uma vez que o material da peça e o da ferramenta de corte são heterogêneos, desgastes e avarias de diferentes origens podem ser percebidos na ferramenta durante seu uso.

Majoritariamente, os desgastes se apresentam como falhas contínuas (com comportamento determinístico ao longo de sua progressão), até a deterioração completa da ferramenta. Podendo ser modeladas matematicamente, existe uma maior previsibilidade e controle de seu fim de vida (FERRARESI, 1977).

Porém, ocorrem ainda as avarias: falhas transitórias que acontecem aleatoriamente e levam a ferramenta ao colapso (quebra total). Frequentemente, são detectadas somente após o ocorrido (MACHADO *et al*, 2009). No lascamento da aresta cortante, por exemplo, a superfície usinada pode sofrer danos consideráveis, e a ferramenta pode chegar à quebra, que acarretaria danos irreversíveis à peça.

Segundo Stemmer (1993), diversos mecanismos de falhas em ferramentas de corte agem simultaneamente, de modo que seu efeito pode dar causa a outro tipo de falha e assim sucessivamente, até o desgaste completo e inutilização da ferramenta. Ainda que todos os mecanismos sejam perceptíveis na prática, um deles prevalecerá sobre os demais, a depender principalmente do material da peça e da ferramenta, da operação de usinagem, das condições de corte, da geometria da ferramenta de corte e o do emprego do meio lubrificante. Por esta razão, conhecer os mecanismos de desgaste é relevante, pois permite uma seleção criteriosa da ferramenta mais indicada e das condições mais apropriadas de usinagem.

A maioria dos trabalhos existentes aponta ao menos 4 diferentes mecanismos de falha, a saber: adesão, abrasão, difusão e oxidação (FERRARESI, 1977).

O mecanismo de adesão ocorre em processos de usinagem contínua, limitando-se a baixas velocidades de corte e causando a formação da aresta postiça de corte. Já a abrasão mecânica, decorrente do atrito inerente ao processo de remoção de material, ocorre em praticamente todas as situações as quais é submetida uma ferramenta de corte. Os mecanismos de difusão e oxidação só ocorrem de forma acentuada quando há elevadas temperaturas, notadamente em casos altas velocidades de corte (SOUZA, 2011).

Durante a usinagem dos metais, a deformação plástica e o atrito, próprios à ação de corte, geram altas temperaturas na interface peça-ferramenta, reduzindo consideravelmente a resistência ao desgaste desta última e alterando-a quanto à forma (geometria) e ao tamanho. Os desgastes progressivos no flanco (superfície de incidência) e na face (superfície de saída) da ferramenta, decorrentes das alterações geométricas narradas, correspondem a uma redução da capacidade de corte e a um consequente aumento na força de corte e potência consumida, aquecendo mais a região de corte e acelerando o desgaste. (MACHADO *et al*, 2009).

Assim, Diniz, Marcondes e Coppini (2013), apontam como desgastes típicos o desgaste de cratera na face, a marca de desgaste no flanco e o entalhe.

O desgaste de cratera decorre da afinidade química entre o cavaco e a superfície de saída da ferramenta de corte, e, portanto, do mecanismo de difusão. Pode ser mitigado utilizando-se uma classe de ferramenta que possua revestimento de Al_2O_3 (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

O desgaste de flanco, por sua vez, é resultado do atrito entre a peça e a superfície de folga da ferramenta de corte; ou seja, da abrasão mecânica, e pode ser reduzido utilizando-se uma classe de ferramenta mais dura e resistente ao desgaste, como as de metal duro revestido, detalhadas anteriormente (KALPAKJIAN; SCHIMID, 2009).

Estes mesmos autores apontam a classificação comumente empregada para as avarias, a

saber: deformações plásticas, trincas e fraturas (lascamentos e quebra).

A deformação plástica decorre da presença simultânea de altas pressões e altas temperaturas na região de corte. É reduzida com a seleção de uma classe de ferramenta com maior dureza a quente (MACHADO *et al*, 2009).

As trincas de origem mecânica surgem devido a variações excessivas dos esforços (choques mecânicos) na região de corte, mormente a baixas velocidades. As de origem térmica, por sua vez, são a maior causa das falhas da ferramenta em altas velocidades de corte, e se devem ao aumento do gradiente de temperatura a cada entrada da ferramenta na peça. Para minimizar as trincas de ambos os tipos, indica-se a utilização de uma classe de ferramenta mais tenaz (FERRARESI, 1977).

O lascamento é uma falha acidental e prematura, consequência da propagação das referidas trincas. Ocorre quando a ferramenta é pouco resistente (pastilha muito dura e pouco tenaz) e sofre sobresolicitações de origem mecânica (impactos ferramenta-peça, peça com inclusões duras e vibrações) ou térmica (aquecimento e resfriamento bruscos). Já a quebra é ocasionada pela ação de grandes forças de usinagem, e é definida como a ruptura da aresta de corte (MACHADO *et al*, 2009).

No processo de fresamento, existem algumas características particulares que intensificam o processo de falha da ferramenta, como as variações de temperatura e dos esforços mecânicos próprios da usinagem descontínua, que inferem ao material esforços cíclicos e consequentes trincas por fadiga, microlascamentos e quebra (STEMMER, 1993).

3.3 RUGOSIDADE

Um dos fatores que justificam a ampla utilização dos processos de usinagem na fabricação de peças, na atualidade, é a possibilidade de se obter uma superfície técnica que apresente fatores superficiais e sub-superficiais suficientemente bons para garantir segurança, confiabilidade e longa vida ao componente fabricado. Por esta razão, a rigorosidade quanto à qualidade superficial de um produto aumenta à medida que crescem as exigências do projeto. Pode-se, por exemplo, garantir menores atritos a superfícies de componentes deslizantes; o que corresponde, naturalmente, a custos de fabricação mais elevados.

Segundo Souza (2011), qualidade de uma superfície usinada não está estritamente ligada à textura ou padrão característico da superfície técnica, nem a valores específicos de rugosidade. No entanto, associa-se um “bom” acabamento a baixos valores de rugosidade, de modo a validar este parâmetro como critério suficiente. Consequentemente, a capacidade de

um processo de usinagem de produzir um acabamento específico está relacionada às características da ferramenta, da peça, da máquina e da operação.

As irregularidades inerentes aos processos de fabricação mecânica determinam diferentes acabamentos, e compreendem dois grupos de erros: erros macrogeométricos e erros microgeométricos (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Conforme estes mesmos autores, em usinagem, os primeiros são desvios geométricos (ovalização, retilineidade, ondulação, planicidade, circularidade etc.) que afetam as dimensões nominais das peças. Decorrem de diversos fatores, dentre os quais: material da peça (usinabilidade, conformação ou dureza); máquina-ferramenta (ferramenta de corte, suportes e componentes, erros de posicionamento); método (processo de fabricação adequado, parâmetros de corte); medição (acuracidade e adequação do instrumento); mão de obra (erros de interpretação, inabilidade) e meio ambiente (variação de temperatura, limpeza do local de trabalho). Estes erros são verificados por meio de instrumentos convencionais de medição tais como micrômetros, relógios comparadores, projetores de perfis etc.

Já os erros microgeométricos, conhecidos como rugosidade, são um parâmetro de qualidade superficial baseado nas irregularidades (saliências e reentrâncias) ou desvios microgeométricos existentes em uma superfície devido ao processo de corte. São avaliados por meio de aparelhos eletrônicos, a exemplo do rugosímetro.

Smith e Hashemi (2012) ensinam que a rugosidade tem significativa influência na confiabilidade dos componentes mecânicos. Menores rugosidades correspondem a maiores qualidade de deslizamento, possibilidade de ajuste do acoplamento forçado, qualidade de superfícies ópticas, resistência à corrosão e à fadiga e vedação, além de melhor aparência do produto usinado; ao mesmo tempo, contribuem para menores resistência ao desgaste e resistência oferecida pela superfície ao escoamento de fluidos e lubrificantes, transferência de calor mais baixa e alta qualidade de aderência da estrutura às camadas protetoras.

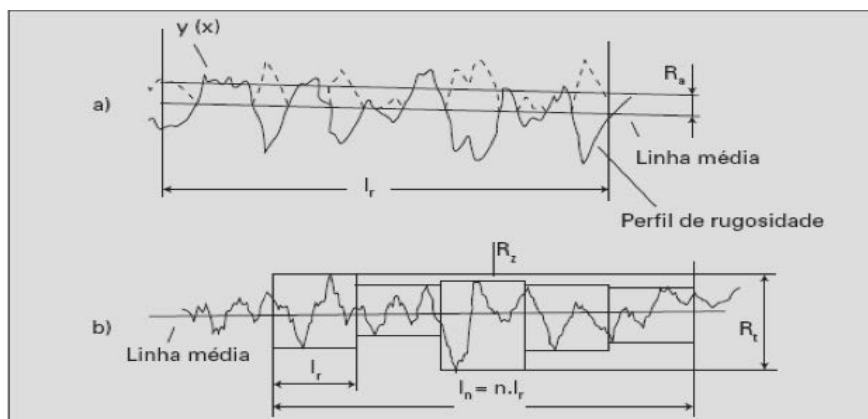
Um acabamento adequado à superfície da peça está, portanto, relacionado a seu uso; e para padronizá-lo deve-se adotar um parâmetro que permita avaliar a rugosidade. O parâmetro de medição aplicável à maioria dos processos de fabricação baseia-se nas medidas de profundidade da rugosidade: R_a (*roughness average*) (SOUZA, 2011).

Rugosidade R_a é conceituada como o desvio médio aritmético dos valores absolutos de amplitude dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, dentro do percurso de medição (l_m) (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Além deste parâmetro, outro comumente utilizado é a rugosidade total (R_t), definida como o desvio total entre os valores absolutos de amplitude do maior ponto do perfil de rugosidade em relação ao ponto extremamente oposto, dentro do percurso de medição (l_m) (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Ambos os parâmetros estão representados na Figura 10.

Figura 10: Rugosidades: a) R_a e b) R_t



Fonte: Diniz, Marcondes e Coppini (2013).

A técnica utilizada para definição dos parâmetros e especificações de coleta dos valores de rugosidade é o método do perfil, amplamente detalhado nas normas ABNT NBR ISO 4287 (2002) e ABNT NBR ISO 4288 (2008).

Pode-se perceber no Quadro 4 que há uma relação entre a rugosidade e o processo de usinagem empregado na peça. A melhor ou pior qualidade decorre não só do processo, mas de um conjunto de fatores que será tratado em seguida.

Quadro 4: Rugosidade R_a em função dos processos de usinagem

R_a [μm]	51	25,4	12,7	6,3	3,2	1,6	0,8	0,4	0,2	0,1	0,05	0,025	0,013
Corte por chama													
Moldagem em areia													
Laminação à quente													
Forjamento													
Corte de serra													
Furação													
Usinagem química													
Fresamento													
Torneamento													
Moldagem de precisão													
Laminação à frio													
Retífica													
Espelhamento													
Polimento													

Fonte: Adaptado de Seco Tools AB (2016).

Há diversos fatores que influenciam o acabamento superficial de uma peça. É notável a influência dos parâmetros de corte, como o avanço (f – a altura dos picos e a profundidade dos vales das marcas de avanço são proporcionais ao quadrado desse avanço), a profundidade de corte (a_p – seu aumento promove um acréscimo nas forças, podendo incrementar as vibrações e, por consequência, gerar superfícies mais rugosas) e a velocidade de corte (V_c – cujo aumento evita o aparecimento da aresta postiça de corte) (STEMMER, 1993).

Além disso, também influenciam na qualidade superficial as condições da ferramenta, como o raio de ponta da aresta de corte, tolerâncias de fabricação, desgastes e formação de arestas postiça, a facilidade de escoamento do cavaco, a rigidez e acuracidade do maquinário, etc (COSTA, 2016).

Ainda que a textura ou rugosidade seja apenas um dos critérios para se avaliar a real qualidade de uma superfície usinada, ela tem sido aceita como parâmetro suficiente, uma vez que, por si, tem relação comprovada e direta com a tribologia, capacidade de carga, transferência de calor etc. No entanto, a título informativo, é importante salientar que

alterações de natureza mecânica ou metalúrgica abaixo da camada mais externa da superfície também exercem importante influência sobre o desempenho do material. A resistência à fluência, dentre outras propriedades mecânicas, podem ser afetadas pelas condições das camadas subsuperficiais; e, em situações em que a peça usinada é solicitada a altas tensões (em particular, tensões alternadas) ou ambientes severos (sob altas temperaturas ou ambientes corrosivos), isto exerce uma significativa influência no padrão de qualidade desejado (SOUZA, 2011)

3.4 POTÊNCIA DE USINAGEM

Nos processos de usinagem, o conceito de energia de corte está associado aos mecanismos de deformação plástica e rupturas inerentes à remoção de material. No entanto, nem toda energia consumida está vinculada ao corte: no corte com ferramentas de geometria definida, cerca de 3/4 da energia total é de fato utilizada na formação do cavaco através do cisalhamento, na zona de deformação primária. Enquanto o 1/4 restante está associado ao atrito proveniente do contato nas zonas secundária e terciária, correspondentes às interfaces cavaco-face da ferramenta e peça-flanco da ferramenta, respectivamente (SOUZA, 2011).

A energia mecânica consumida no corte transforma-se, essencialmente, em energia térmica. A altas velocidades de corte ($V_c > 100$ [m/min]), o calor gerado é transferido principalmente para o cavaco (80% a 90%), para a peça (9% a 15%) e uma pequena, porém relevante quantidade, à ferramenta (1% a 5%) (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

A força efetiva empregada no processo de usinagem é uma grandeza vetorial composta pelas forças de avanço e de corte (ABNT NBR 12545, 1991). A potência de usinagem, por sua vez, resulta do produto das componentes da força de usinagem com as respectivas componentes de velocidade (FERRARESI, 1977).

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2013), os fatores que influenciam a energia de corte, aumentando, em consequência, a potência consumida, são: material da peça; material e geometria da ferramenta; parâmetros de corte; meio lubrificante e estado da ferramenta.

3.5 EMISSÃO ACÚSTICA (EA)

As técnicas de captação de emissão acústica permitem a investigação de eventos que ocorrem a uma frequência superior a vários MHz, muito maior que as frequências típicas de vibração da máquina e de ruídos ambientais. Neslusan *et al* (2015) afirmam que é um dos métodos mais eficazes para monitoramento de processos.

Emissão acústica é o conjunto de ondas de energia produzidas quando um material sofre solicitações estruturais como resultado de forças externas. Tais ondas são geradas a partir da rápida emissão de energia proveniente de um pequeno deslocamento de superfície do material (Neslusan *et al*, 2015).

Ainda segundo Neslusan *et al* (2015), as fontes de EA consistem em movimentos de deslocamento, microdeformações, microfraturas de inclusão e propagação de trinca. A técnica não destrutiva EA converte as ondas elásticas de alta frequência em sinais elétricos.

Segundo Inasaki² (1998 *apud* Neslusan *et al*, 2015), os sinais de emissão acústica podem ser classificados como sinais de tipo contínuo ou sinais de tipo instantâneo (ou de ruptura). Na usinagem de aços dúcteis, é possível distinguí-los nitidamente, associando os sinais contínuos ao cisalhamento na zona primária e nas interfaces cavaco-ferramenta e peça-ferramenta, e os sinais tipo instantâneo ao crescimento de trinca no material, fratura da ferramenta ou quebra do cavaco.

Dolinšek e Kopac³ (1999 *apud* Neslusan *et al*, 2015) investigaram os sinais de emissão acústica durante o processo de usinagem e notaram que o desgaste da ferramenta é um dos fatores mais influentes no aumento da energia deste sinal. Além disso, os mesmos autores citam as conclusões de Uehara⁴ (1974) no sentido de que os sinais de emissão acústica gerados durante a formação de cavaco segmentado têm um padrão bem definido, e a amplitude das referidas emissões varia de acordo com as mudanças periódicas na força de corte.

² INASAKI, I. Application of acoustic emission sensor monitoring machining process. **Ultrasonic**, n. 36, p. 273-281, 1998 *apud* NESLUSAN, M. *et al*. Detection of tool breakage during hard turning through acoustic emission at low removal rates. **Journal of the International Measurement Confederation**, v. 70, p. 1-13, 2015.

³ DOLINŠEK, S; KOPAC, J. Acoustic emission signals for tool wear identification. **Wear**, p. 295-303, 1999 *apud* NESLUSAN, M. *et al*. Detection of tool breakage during hard turning through acoustic emission at low removal rates. **Journal of the International Measurement Confederation**, v. 70, p. 1-13, 2015.

⁴ UEHARA, K. Identification of chip formation mechanism through acoustic emission measurements. **CIRP** 33, p. 71-74, 1974 *apud* NESLUSAN, M. *et al*. Detection of tool breakage during hard turning through acoustic emission at low removal rates. **Journal of the International Measurement Confederation**, v. 70, p. 1-13, 2015.

Especificamente na usinagem de aços endurecidos, Guo e Amula (2005) afirmam que os sinais EA podem ser usados para monitorar a integridade da superfície, uma vez que este sinal no formato RMS é sensível ao desgaste da ferramenta e à rugosidade da superfície correspondente.

3.6 VIBRAÇÃO

Vibração é a medida do deslocamento linear do conjunto máquina – ferramenta – peça, ao ser submetido às forças provenientes da dinâmica da operação de corte. Este conjunto apresenta características de rigidez e de amortecimento de vibrações que são essenciais no processo de usinagem, a exemplo da vibração relativa entre a ferramenta e a peça, que exerce grande influência sobre a qualidade final do trabalho.

No entanto, vibrações excessivas no sistema são indesejáveis, uma vez que são causa de desgaste prematuro e avarias na ferramenta de corte; deterioração da qualidade superficial e perda de precisão dimensional das peças; danos aos componentes da máquina; ruídos, além de aumento no consumo de energia elétrica (WEREMCZUK; RUSINEK; WARMINSKI, 2015).

A análise da vibração de um sistema é o estudo do movimento de oscilação de um corpo em torno de uma posição de equilíbrio, bem como das forças e/ou momentos a ele associadas. Movimentos oscilatórios são aqueles que se repetem indefinidamente a cada período de tempo, e ocorrem sempre que um corpo rígido seja capaz de armazenar energia cinética, tenha certa elasticidade e sofra excitação de uma fonte externa. Por esta razão, é praticamente impossível evitar que o movimento ondulatório se propague através dos materiais sólidos, e, portanto, que exista vibração sempre onde houver uma fonte excitadora.

No processo de usinagem, as vibrações mecânicas resultantes das variações cíclicas das parcelas dinâmicas geram movimentos periódicos na estrutura da máquina-ferramenta, e são divididas em vibrações forçadas e trepidações. Porém, podem derivar também de comportamentos aleatórios, dependentes das condições de corte, das propriedades do material e até de distúrbios ambientais (SOUZA, 2011).

Kalpakjian e Schmid (2009) ensinam que vibrações forçadas durante as operações de corte estão associadas com as forças periódicas resultantes de erros de precisão em alguns componentes mecânicos, de deslocamento da máquina, do desbalanceamento de peças rotativas, ou simplesmente da ação intermitente de ferramentas multicortantes na peça, a exemplo do que ocorre nas operações de fresamento.

Já as trepidações são resultado de um mecanismo de auto-excitação na formação do

cavaco, e podem eventualmente atingir uma ou outra frequência natural do sistema dinâmico, causando trepidações intensas e comprometendo o acabamento superficial da peça usinada. São geralmente associadas a um aumento nas taxas de remoção de material, à sua dureza, ao tipo de cavaco produzido e à deficiência de lubrificação na região de corte (KALPAKJIAN; SCHIMID, 2009).

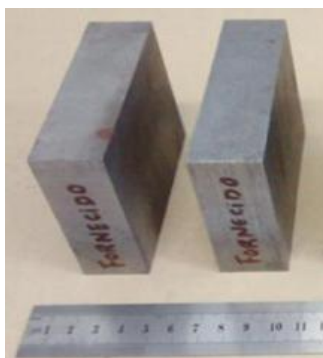
4 MATERIAIS E MÉTODOS

Em seguida são apresentadas as etapas de desenvolvimento da pesquisa: o material e os equipamentos utilizados nos ensaios, os sistemas de aquisição de dados, o método do delineamento experimental e a forma de análise dos resultados.

4.1 CORPO DE PROVA

O material utilizado nos ensaios deste trabalho foi o aço ABNT 4340⁵ temperado e revenido (56HRC), na forma de um corpo de prova previamente usinado, de dimensões aproximadas de 25x75x100 [mm] (Figura 11).

Figura 11: Corpos de prova



Fonte: Autoria própria.

4.2 PROCESSO DE USINAGEM

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Estudo da Usinagem no Departamento de Materiais e Tecnologia na Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, utilizando um Centro de Usinagem da marca DMG modelo DMU50ECO série DMG Ecoline, com 17 [kW] de potência e rotação máxima do fuso de 8.000 [rpm] (Figura 12). Acoplado ao mesmo utilizou-se um dispositivo de lubrificação com mínima quantidade de fluido, bem como um sistema de aquisição de dados de potência, emissão acústica e vibração, conforme descrição detalhada nos itens 4.2.1.2 a 4.2.2.3.

⁵ Composição química certificada: Fe (95,92), C (0,40), Si (0,22), Mn (0,63), Cr (0,73), Ni (1,66), Mo (0,22), P (0,015), S (0,014), Cu (0,15) e Al (0,037).

Figura 12: Centro de Usinagem DMG



Fonte: Autoria própria.

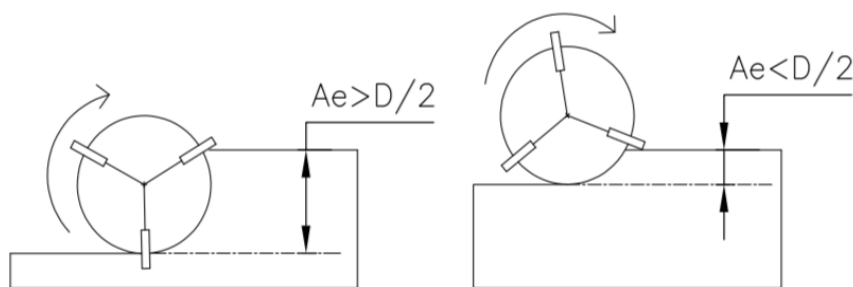
4.2.1 Fresamento

O processo de usinagem realizado nesta pesquisa foi o fresamento frontal assimétrico discordante com mínima quantidade de fluido.

As condições de usinagem variáveis foram: 4 velocidades de corte (150, 200, 250 e 300 [m/min]), e 2 avanços (0,1 e 0,2 [mm/volta]).

Objetivando-se estudar as consequências nas variáveis de saída do fresamento assimétrico, foram utilizadas duas condições de assimetria da fresa em relação à peça, a saber: largura de usinagem menor que a metade do diâmetro da fresa (1/4 do diâmetro da ferramenta), e largura de usinagem maior que a metade do diâmetro da fresa (3/4 do diâmetro da ferramenta). Isto porque, conforme se observa na Figura 13, a profundidade de penetração da ferramenta na peça modifica consideravelmente a posição de toque da aresta de corte de cada uma das pastilhas na superfície a ser usinada, bem como o número de pastilhas que atuam no corte simultaneamente; o que deve influenciar significativamente nos parâmetros de qualidade.

Figura 13: Representação esquemática das diferentes larguras de corte



Fonte: Autoria própria.

Com o intuito de analisar o comportamento de diferentes materiais e técnicas de revestimento das ferramentas de metal duro, associadas à lubrificação com mínima quantidade de fluido, foram utilizados dois tipos de revestimento nas pastilhas, a saber: TiCN-Al₂O₃ depositado através de CVD e TiAlN depositado através de PVD.

Os ensaios foram realizados com repetibilidade de 2 ciclos de fresamento para cada conjunto de parâmetros de entrada. Em cada conjunto variou-se a velocidade, o avanço ou a largura de corte, conforme uma matriz L8 (Quadro 5). Desta forma, realizou-se o total de 16 ensaios.

Quadro 5: Conjuntos de parâmetros de corte para cada ensaio

ENSAIO	FERRAMENTA metal duro	ASSIMETRIA [mm]	V _c [m/min]	f [mm/volta]	CONDIÇÃO
1	PVD	6,25	150	0,1	PVD-6,25-150-0,1
2	PVD	6,25	150	0,1	PVD-6,25-150-0,1
3	PVD	6,25	300	0,2	PVD-6,25-300-0,2
4	PVD	6,25	300	0,2	PVD-6,25-300-0,2
5	CVD	6,25	200	0,1	CVD-6,25-200-0,1
6	CVD	6,25	200	0,1	CVD-6,25-200-0,1
7	CVD	6,25	250	0,2	CVD-6,25-250-0,2
8	CVD	6,25	250	0,2	CVD-6,25-250-0,2
9	CVD	18,75	150	0,2	CVD-18,75-150-0,2
10	CVD	18,75	150	0,2	CVD-18,75-150-0,2
11	PVD	18,75	200	0,2	PVD-18,75-200-0,2
12	PVD	18,75	200	0,2	PVD-18,75-200-0,2
13	PVD	18,75	250	0,1	PVD-18,75-250-0,1
14	PVD	18,75	250	0,1	PVD-18,75-250-0,1
15	CVD	18,75	300	0,1	CVD-18,75-300-0,1
16	CVD	18,75	300	0,1	CVD-18,75-300-0,1

Fonte: Autoria própria.

Após cada ciclo mediu-se a rugosidade da peça e coletou-se os cavacos para análise posterior.

Ao final, a título de comparação e seguindo a mesma metodologia, foram selecionados os 2 conjuntos de condições (velocidade, avanço e largura de corte) com melhores resultados quanto à rugosidade, para cada tipo de ferramenta, e repetidos os ensaios à seco. Nesta etapa foram realizados mais 4 ensaios.

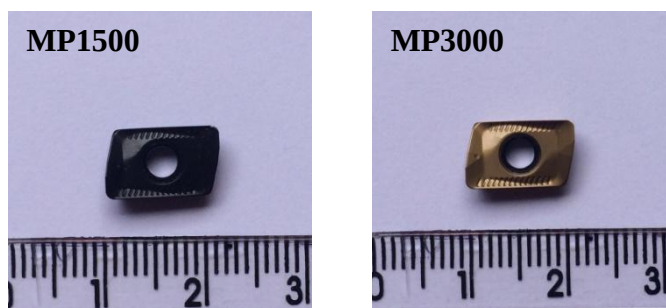
4.2.1.1 Fresa

As ferramentas de corte utilizadas nesta pesquisa foram fornecidas pela empresa Seco Tools.

As pastilhas (Figura 14) foram de metal duro revestido com $\text{TiCN-Al}_2\text{O}_3$ depositado através de CVD (MP1500), e metal duro revestido com TiAlN depositado através de PVD (MP3000); ambas do tipo inserto intercambiável em fresa de 3 dentes, modelo XOMX10T308TR-ME07.

Utilizou-se ainda o suporte SECO R217 69-1225.RE-10-3A, e um porta pinça SECO-EPB E3476 5820 1260.

Figura 14: Pastilhas de metal duro revestido



Fonte: Autoria própria.

4.2.1.2 Sistema MQF

O experimento com mínima quantidade de fluido (MQF) utilizou um sistema comercial da marca ITW, modelo Accu-lube, com aplicador ITW 79053D, e lubrificante ITW LB-1100. O sistema está representado na Figura 15.

Os bicos foram posicionados de forma que um deles aspergisse o fluido na ferramenta antes do corte (bico amarelo), e o outro, durante o corte (bico laranja), conforme Figura 16. A vazão de fluido praticada foi de aproximadamente 93 [ml/h].

Figura 15: Sistema de lubrificação MQF



Fonte: Autoria própria.

Figura 16: Posicionamento dos bicos do sistema de lubrificação



Fonte: Autoria própria.

4.2.2 Sistema de aquisição de dados

Os dados derivados do processo (potência de corte, emissão acústica e vibração) foram coletados por um sistema que permite a obtenção de variáveis físicas e, através de sensores e transdutores apropriados, os converte em sinais elétricos proporcionais.

A placa de aquisição de dados tem a função de receber os sinais analógicos dos sensores e transformá-los em sinais digitais; foi utilizada uma placa da marca National Instruments, modelo NI PCI 6220. A interpretação dos sinais é feita por um software, LabView® 7.1 da National Instruments, através de um programa especialmente desenvolvido.

4.2.2.1 Potência de corte

A aquisição da potência consumida pelo motor do centro de usinagem foi feita através de um sensor transdutor de corrente, marca LEM, modelo AT 100 B10.

O sensor, em função da corrente elétrica utilizada no motor, gera um sinal proporcional, em Volts, que é captado pela placa de aquisição de dados e armazenado durante a execução dos ensaios. O software faz as conversões necessárias e fornece os valores correspondentes de potência consumida, em Watts.

4.2.2.2 Emissão acústica

Para captação de emissão acústica utilizou-se um sistema da marca PHYSICAL ACOUSTICS CORPORATION, com sensor R15A e amplificador de sinal 1272-1000, com saída retificada em RMS (valor quadrático médio).

O sinal elétrico retificado corresponde à unidade VCC (Volts corrente contínua) e é empregado nesta mesma grandeza para expressar a emissão acústica.

4.2.2.3 Vibração

A vibração foi captada utilizando-se um módulo de vibração, composto por um sensor piezelétrico (acelerômetro) e um amplificador de sinal com saída retificada em RMS, marca VIBRO CONTROL, modelo TV100.

Os valores obtidos em VCC foram convertidos pelo software citado para valores de velocidade em [mm/s].

4.2.3 Integridade superficial

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2013), a integridade superficial pode ser avaliada levando-se em conta (i) alterações subsuperficiais, dentre as quais existem fatores metalúrgicos e fatores mecânicos, e (ii) o acabamento da peça, por sua vez subdividido em: erros macrogeométricos e erros microgeométricos ou rugosidade.

No âmbito deste estudo, ao fim de cada ciclo de usinagem, a integridade superficial da peça foi avaliada através da medida de rugosidade.

A rugosidade foi analisada através dos parâmetros R_a (rugosidade média) e R_t (rugosidade total). O comprimento de amostragem (*cut-off*) adotado foi de 0,250 [mm] e o percurso de medição (l_m), de 1,25 [mm], conforme recomendações da norma ABNT NBR ISO 4288 (2008).

Estes parâmetros foram obtidos utilizando-se um rugosímetro da marca Mahr, modelo Marsurf M300/RD18, com ponta apalpadora de diamante na haste de medição em formato de cone esférico e raio de ponta de 2 [μm] (Figura 17). Cada amostra foi medida três vezes, na peça ainda fixa no suporte, a fim de garantir o paralelismo entre a mesma e o equipamento de medição.

Figura 17: Rugosímetro



Fonte: Autoria própria.

4.2.4 Desgaste da ferramenta

O desgaste da ferramenta foi analisado e identificado quanto ao tipo ao final dos ensaios, de forma qualitativa, através de análise microscópica. A análise quantitativa foi descartada devido à metodologia de ciclos únicos para cada aresta de ferramenta.

O equipamento utilizado foi um microscópio óptico da marca Zeiss, modelo STEMI 2000 (Figura 18).

Figura 18: Microscópio



Fonte: Autoria própria.

4.2.5 Tipos e formas dos cavacos

Os cavacos gerados em cada ciclo de usinagem foram coletados e armazenados para análise macro e microscópica.

As imagens para análise microscópica foram capturadas com o microscópio óptico da marca Zeiss, modelo STEMI 2000 (Figura 18).

Eles foram classificados segundo sua morfologia (contínuos, descontínuos ou segmentados) e formato (fita, helicoidal, espiral ou lascas), conforme recomendações da norma ISO 3685 (1993).

4.3 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E TRATAMENTO ESTATÍSTICO

O delineamento experimental, no formato L8 e com repetibilidade de 2 vezes, foi desenvolvido pelo método Taguchi.

Segundo Suresh, Basavarajappa e Samuel (2012), esta técnica tem sido amplamente utilizada na análise de engenharia como uma alternativa à matriz fatorial de arranjo de dados, pois permite definir planos de experimentos com o objetivo de adquirir dados de maneira controlada.

Também conhecido como Design Robusto, este é um método de arranjo de fatores através do qual se obtém uma combinação de parâmetros suficientemente representativa para posterior análise da influência de cada um deles, independentemente, nos resultados do processo.

Após os ensaios, os dados coletados (rugosidade média e total, potência de corte, emissão acústica e vibração) foram trabalhados através da técnica de análise de variância a fim de obter uma correlação válida e eficaz entre estes e os parâmetros de corte (velocidade, avanço, largura de corte e material da ferramenta), de forma a concluir e prever as condições ideais de usinagem para este aço.

Para tanto, utilizou-se o software Minitab-16, versão trial.

A análise de variância é um método que avalia a hipótese de que as médias de duas ou mais populações sejam iguais; ou seja, testa a influência de um ou mais fatores (parâmetros de corte) comparando as médias de variáveis de resposta (resultados de qualidade) nos diferentes níveis de cada fator. A hipótese nula (H_0) afirma que todas as médias de população (médias de nível de fator) são iguais - logo, os parâmetros de corte não influenciam diretamente em quaisquer resultados; enquanto a hipótese alternativa afirma que pelo menos uma média é diferente: algum dos parâmetros de corte influencia significativamente os resultados de qualidade.

O procedimento de análise de variância funciona através da comparação da variância (erro) entre as médias de grupos *versus* a variância dentro dos grupos como uma maneira de determinar se os grupos são todos parte de uma população maior, de forma que suas características particulares não os distinguem suficientemente, ou são populações distintas com características diferentes (MINITAB, 2018).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em seguida apresentam-se os resultados obtidos a partir dos ensaios e tratamentos estatísticos, bem como sua análise e discussão.

5.1 RUGOSIDADE MÉDIA (R_a)

A rugosidade de uma superfície determina não apenas a precisão dimensional das peças usinadas, mas também suas propriedades. Ela é, além de um parâmetro de qualidade, um fator muito relevante na avaliação do desempenho das ferramentas de corte.

Mais amplamente, a irregularidade de uma superfície usinada é resultado de todo o processo de usinagem, incluindo a seleção dos parâmetros de corte, de lubrificação e condições ambientais e de maquinário (SURESH; BASAVARAJAPPA; SAMUEL, 2012).

Coerentemente, nos ensaios realizados neste trabalho e apresentados no Gráfico 1, a rugosidade média foi o único parâmetro de qualidade que apresentou influência significativa de todos os parâmetros de corte. A saber: a velocidade de corte, parâmetro com influência menos significativa ($F=4,63$), gerou melhores resultados ao valor de 200 [m/min].

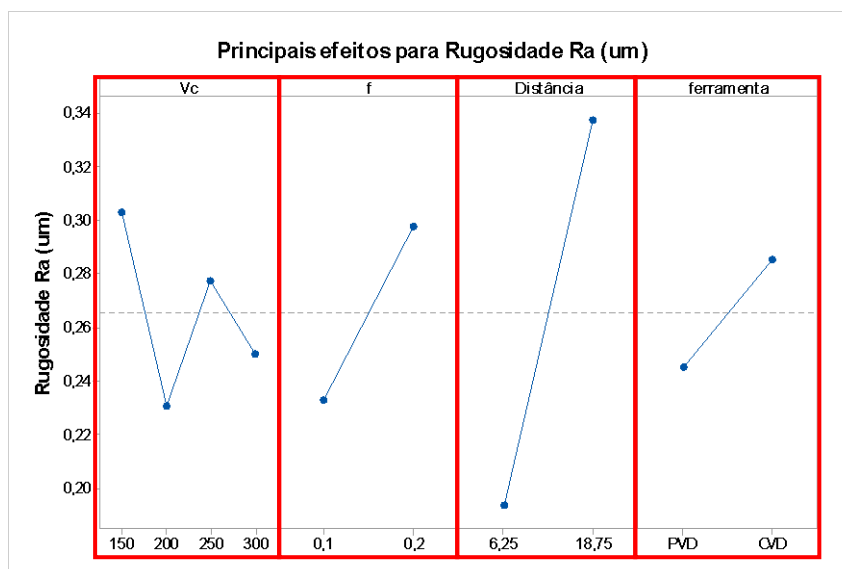
Neste sentido, pode-se afirmar que tais resultados são diretamente influenciados pelo método MQF de lubrificação, uma vez que este fornece oxigênio extra para promover a formação de uma camada protetora de óxido na interface cavaco-ferramenta, que atua como uma barreira contra a difusão. Estudos concluíram que existe uma velocidade de corte ótima na qual uma camada protetora de óxido estável pode ser formada, aumentando significativamente a vida da ferramenta (LIAO; LIN, 2007).

Em seguida ($F=7,44$), gerou melhores resultados a ferramenta revestida com TiAlN através de PVD.

Com maior significância ($F=19,55$), o avanço de corte de 0,1 [mm] influenciou positivamente os resultados em comparação com o avanço de 0,2 [mm].

E por fim ($F=95,46$) a menor largura de corte, correspondente a $\frac{1}{4}$ do diâmetro da ferramenta, foi significantemente melhor para a qualidade do produto que a outra largura de corte ensaiada, de 18,75 [mm].

Os três últimos parâmetros serão melhor discutidos à frente.

Gráfico 1: Principais efeitos para Rugosidade R_a 

Fonte: Autoria própria

5.2 RUGOSIDADE TOTAL (R_t)

A rugosidade total, por sua vez, teve influência significativa de dois parâmetros de corte, representados nos Gráfico 2.

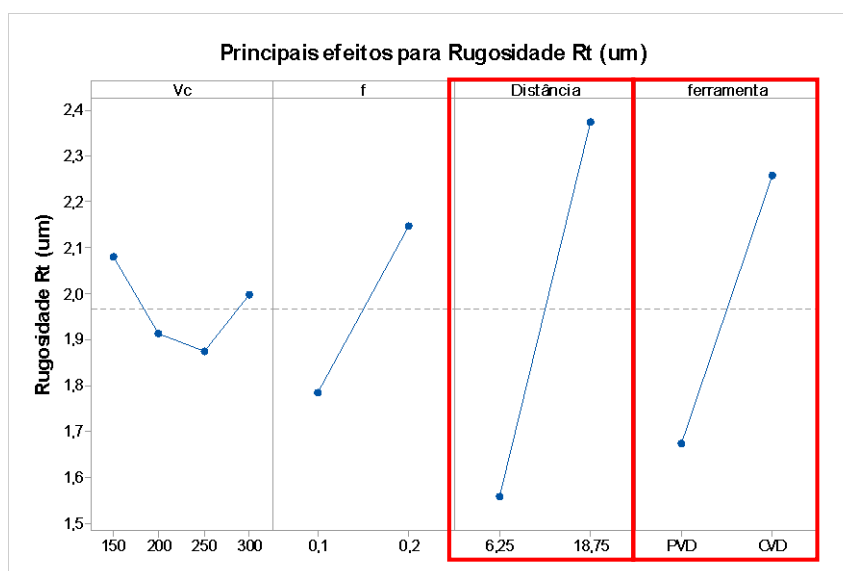
O tipo de ferramenta ($F=8,73$) responsável por melhores resultados de rugosidade total foi igualmente a ferramenta revestida com PVD. Sahoo e Sahoo (2012), através de seus estudos, evidenciam que uma combinação adequada entre velocidade de corte, avanço e largura de corte produzirá bons resultados, em especial com a utilização de ferramentas revestidas com TiN, que apresenta desgaste uniforme e vida mais longa.

No caso em análise, com material de revestimento TiAlN, as vantagens são decorrentes sobretudo de sua elevada resistência ao desgaste e à oxidação, e de baixos coeficientes de atrito entre a ferramenta e o material usinado (CHINCHANIKAR; CHOUDHURY, 2014). Além disso, Coelho, Ng e Elbestawi (2007) afirmam que a suplementação da fase metálica com Al ou Cr (formando TiAlN e AlCrN, por exemplo) apresentaram grandes vantagens sobre outros revestimentos, uma vez que o alumínio pode reagir com o oxigênio, formando Al_2O_3 , cujas propriedades isolantes são uma barreira térmica para o calor gerado na interface cavaco-ferramenta, e por isso tendem a aumentar a vida da ferramenta.

Ademais, o revestimento PVD é indicado para o processo de fresamento, tanto em razão de sua tenacidade, que resiste bem aos esforços cíclicos de fadiga aos quais ferramenta é submetida, quanto em razão da aresta de corte com aresta viva, que garante a geometria de projeto e a precisão de corte (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Também a largura de corte influenciou os resultados de rugosidade total, sendo a largura de 6,25 [mm] significativamente melhor para a qualidade do produto que a largura de $\frac{3}{4}$ do diâmetro da ferramenta.

Gráfico 2: Principais efeitos para Rugosidade R_t



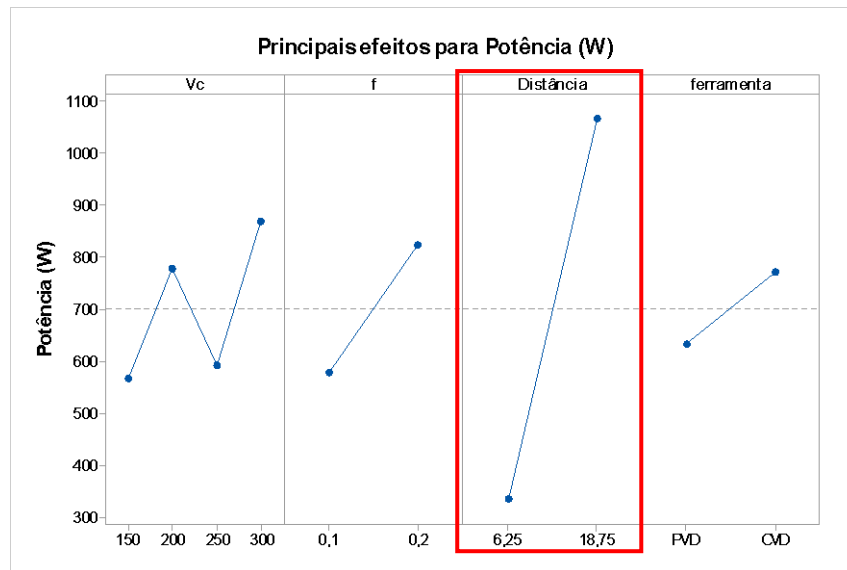
Fonte: Autoria própria

5.3 POTÊNCIA CONSUMIDA

Suresh, Basavarajappa e Samuel (2012) concluíram que, com o aumento da velocidade, há uma significativa redução nas forças de corte, possivelmente devido ao aumento da temperatura na área do plano de cisalhamento, que resulta em uma redução na resistência ao cisalhamento do material.

No entanto, os ensaios deste trabalho, em relação à potência consumida (Gráfico 3), somente tiveram influência significativa da largura da ferramenta ($F=7,53$), ratificando os resultados dos parâmetros anteriores, com melhores comportamentos à largura correspondente à $\frac{1}{4}$ do diâmetro da ferramenta.

Gráfico 3: Principais efeitos para Potência

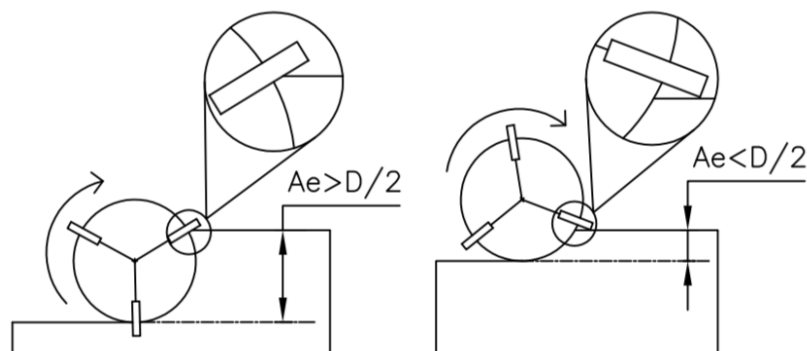


Fonte: Autoria própria

Compreende-se que a unanimidade de resultados positivos em relação à largura de corte de 6,25 [mm] ocorre porque larguras de corte menores que o raio da ferramenta garantem que a pastilha tocará a peça com a ponta da aresta de corte, minimizando a energia proveniente do choque com a peça e utilizando de forma mais eficaz a geometria para isto projetada, conforme representação esquemática (Figura 19).

Stemmer (2005) explica que, para larguras de corte maiores ($a_e > D/2$), a espessura de corte na entrada do dente atuante (com a face da ferramenta, e não mais com a aresta de corte) aumenta, ampliando a energia do choque.

Figura 19: Representação esquemática dos efeitos das diferentes larguras de corte

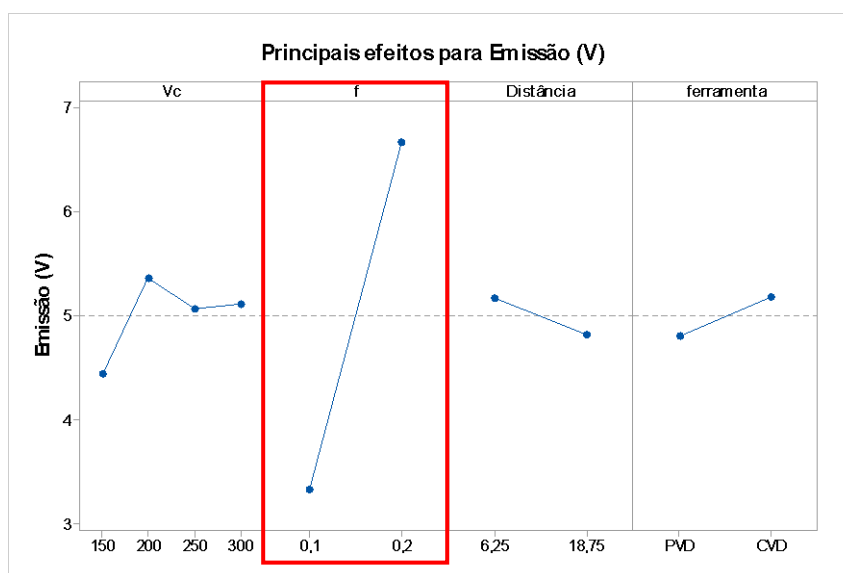


Fonte: Autoria própria.

5.4 EMISSÃO ACÚSTICA

A emissão acústica foi significativamente influenciada somente pelo avanço ($F=5,51$), sendo o menor avanço aquele que gerou melhores resultados (Gráfico 4).

Gráfico 4: Principais efeitos para Emissão Acústica



Fonte: Autoria própria

5.5 VIBRAÇÃO

Da mesma forma, a vibração teve influência significativa ($F=5,51$) somente do avanço (Gráfico 5), onde 0,1 [mm] gerou melhores resultados que 0,2 [mm]; como inclusive se observou em relação à rugosidade média.

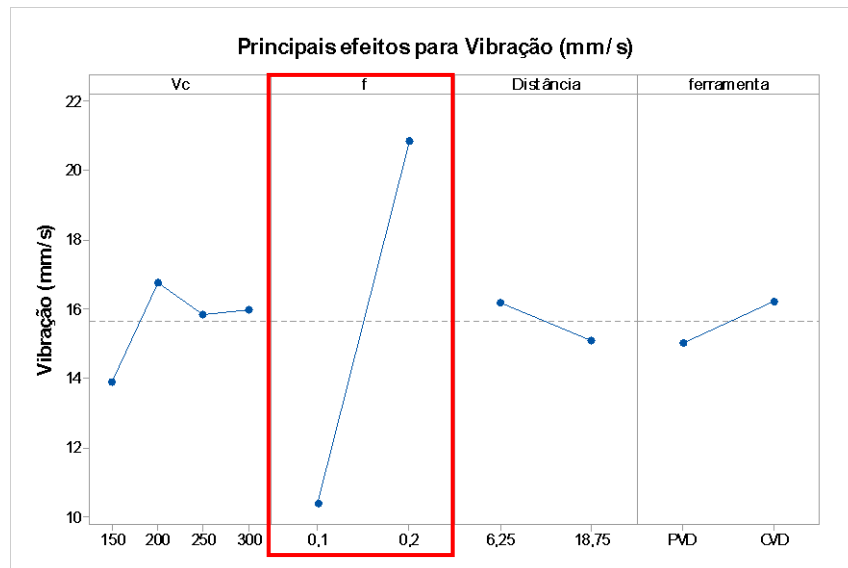
Suresh, Basavarajappa e Samuel (2012) obtiveram resultados semelhantes no processo de torneamento, e afirmaram que, sendo a deformação plástica proporcional à geração de calor na região de corte, é esperado que maiores avanços gerem maiores valores de rugosidade, devido tanto às maiores forças de corte envolvidas, quanto à reprodução do perfil da ferramenta na superfície da peça.

Já Kalpakjian e Schmid (2009) associam as vibrações forçadas às forças periódicas resultantes da ação intermitente das ferramentas multicortantes na peça, típicas do fresamento; e as trepidações ao aumento nas taxas de remoção de material, à sua dureza e ao tipo de cavaco produzido.

O avanço, portanto, demonstrou ter influência direta sobre a qualidade superficial, emissão acústica e vibração, pois maiores avanços geram maiores forças de corte, resultando

em maiores energias dissipadas em forma térmica, sonora e de deslocamento, e reduzindo a vida da ferramenta.

Gráfico 5: Principais efeitos para Vibração



Fonte: Autoria própria

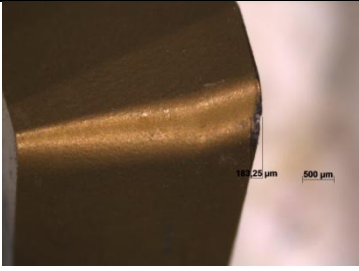
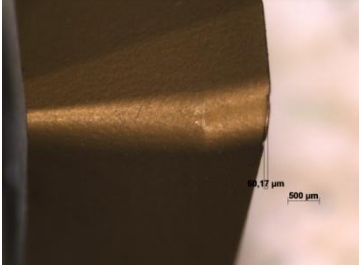
5.6 DESGASTE DA FERRAMENTA

A vida da ferramenta é considerada o fator mais importante para o estudo do aspecto econômico da usinagem de aços endurecidos.

Para representar os resultados significativos em relação ao desgaste da ferramenta, o Quadro 6 traz imagens microscópicas referentes a uma das três pastilhas utilizadas em cada um dos três melhores conjuntos de condições, tendo por base o parâmetro de rugosidade média, uma vez que este foi o único significativamente influenciado por todos os parâmetros de corte.

Nota-se que a ferramenta CVD, ao fim do ensaio, não apresentou desgaste perceptível, enquanto as ferramentas com revestimento PVD apresentaram avarias frontais microscópicas de lascamento. Figuram entre os melhores resultados a largura de corte de 6,5 [mm], a velocidade de corte de 200 [m/min] e o avanço de 0,1 [mm/volta].

Quadro 6: Desgaste de ferramenta para condições com melhores resultados

Condição	Ferramenta	Observação
CVD-6,25-200-0,1		Não apresenta desgaste perceptível
PVD-6,25-300-0,2		Apresenta microlascamento: 183,25 [µm]
PVD-6,25-150-0,1		Apresenta abrasão e pequeno entalhe: 60,17 [µm]

Fonte: Autoria própria

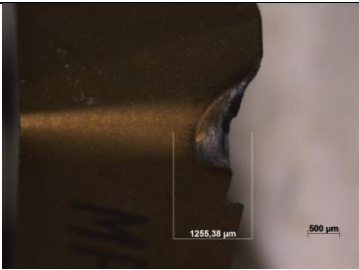
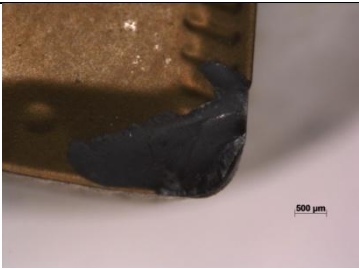
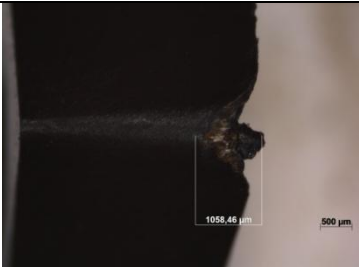
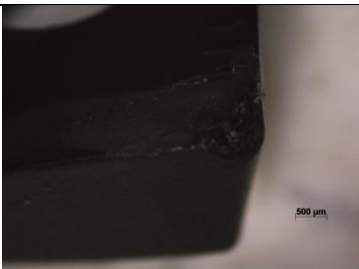
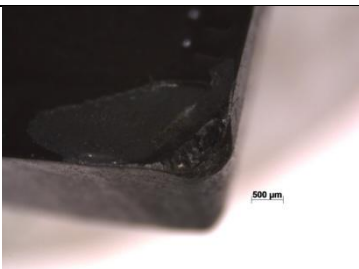
No outro extremo, apresentam-se imagens das avarias geradas nas pastilhas sob condições com piores resultados, ainda tendo como base a rugosidade média (Quadro 7).

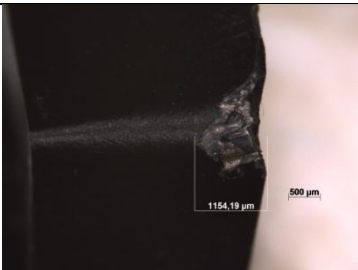
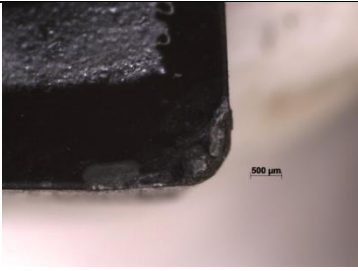
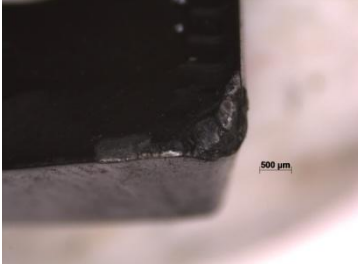
É possível observar que as avarias mais representativas são as quebras por fadiga, de tamanho milimétrico e portanto visíveis a olho nu, decorrentes dos esforços particulares do processo de fresamento, que infere solicitações cíclicas, térmicas (aquecimento progressivo e resfriamento) e mecânicas (choque, força de cisalhamento e vazio), às pastilhas de corte.

Para minimizar o surgimento de trincas (e posterior lascamento e quebra) de origem térmica e mecânica recomenda-se a utilização de uma classe de ferramenta mais tenaz, a exemplo das revestidas com PVD.

Tanto assim que as falhas de quebra correram nas condições de ferramenta CVD, avanço = 0,2 [mm/volta] e largura de corte de 18,75 [mm], como preconiza a literatura.

Quadro 7: Desgaste de ferramenta para condições com piores resultados

Condição	Ferramenta	Observação
PVD-18,75-200-0,2		Apresenta quebra: 1,25 [mm], com perda significativa do revestimento e exposição do substrato.
		
		
CVD-18,75-150-0,2		Apresenta quebra: 1,06 [mm], com perda significativa do revestimento e exposição do substrato.
		
		

Condição	Ferramenta	Observação
CDV-18,75-300-0,1		Apresenta quebra: 1,15 [mm], com perda significativa do revestimento e exposição do substrato.
		
		

Fonte: Autoria própria

Sahoo e Sahoo (2012) entendem que o desgaste frontal é devido primordialmente às ações abrasivas da martensita presente na liga AISI 4340 endurecida; e, no caso do torneamento, também devido à adesão.

De modo geral, pastilhas revestidas têm melhor desempenho que pastilhas não revestidas, seja pela capacidade lubrificante de alguns materiais de revestimento (como TiN e TiAlN), pela baixa condutibilidade térmica e resistência à oxidação do Al_2O_3 (utilizado na pastilha MP1500), ou pela resistência ao desgaste da camada mais interna de TiCN (também presente na pastilha MP1500).

Mais especificamente, estes e outros autores por eles citados (SAHOO; SAHOO, 2012) comprovaram que, na usinagem com MQF do aço ABNT 4340 endurecido, as ferramentas revestidas com TiAlN apresentam melhores resultados (maior qualidade superficial da peça usinada e menor desgaste da ferramenta) devido especialmente às propriedades lubrificantes deste material.

Tais afirmações corroboram com os resultados expostos, que apontam a ferramenta PVD (TiAlN) como mais adequada ao fresamento frontal assimétrico com mínima quantidade de fluido.

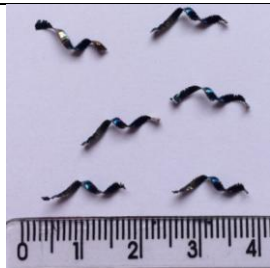
Além do tipo de ferramenta, outros parâmetros de corte podem ser destacados por seu melhor desempenho: avanço de 0,1 [mm/volta] e largura de corte de 6,25 [mm].

5.7 TIPOS E FORMAS DOS CAVACOS

A morfologia dos cavacos é um relevante indicador do parâmetro de usinabilidade na usinagem de metais (SAHOO; SAHOO, 2012). Neste estudo, os cavacos foram coletados após cada ciclo de fresamento e examinados seus tipo e forma através de microscópio óptico para identificar uma possível variação decorrente das variáveis de entrada do processo (velocidade, avanço, largura de corte e tipo da ferramenta) ou do método de lubrificação.

As imagens obtidas constam nos Quadros 8 e 9.

Quadro 8: Cavacos para condições com melhores resultados

Condição	Tipo	Forma
CVD-6,25-200-0,1		
PVD-6,25-300-0,2		
PVD-6,25-150-0,1		

Fonte: Autoria própria

Quadro 9: Cavacos para condições com piores resultados

Condição	Tipo	Forma
CVD-18,75-150-0,2		
CDV-18,75-300-0,1		
PVD-18,75-200-0,2		

Fonte: Autoria própria

Neste contexto, os conjuntos de condições com melhores resultados para rugosidade média (R_a) geraram cavacos do tipo cisalhado, que no processo de fresamento é chamado de dente de serra em remissão ao seu aspecto quando analisado microscopicamente; e em forma de lascas (curtos e descontínuos).

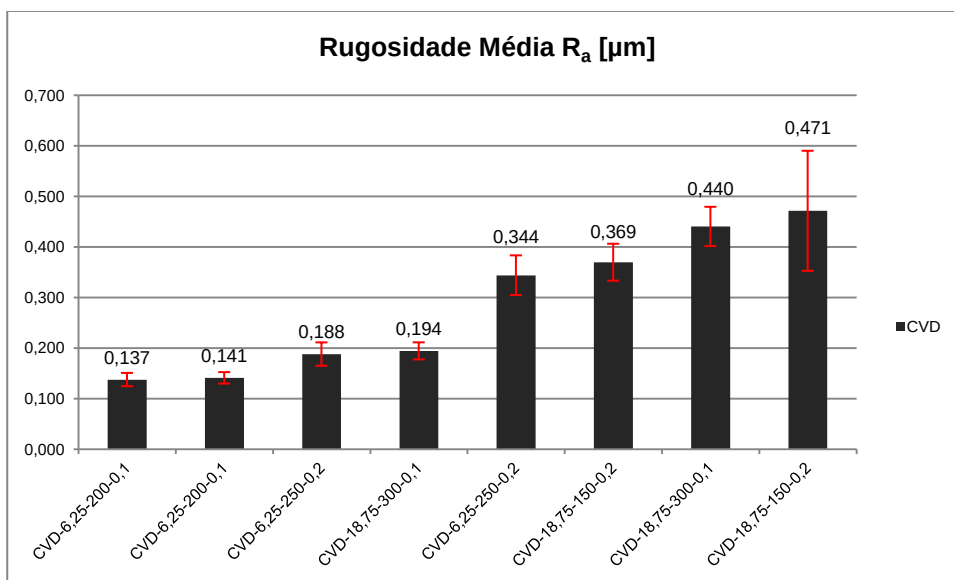
Já em relação aos conjuntos de condições com piores resultados, obtiveram-se cavacos também do tipo dente de serra, porém com aspecto menos uniforme de cisalhamento, e em forma de lascas com tendência helicoidal.

Importante salientar que, embora o formato de lascas seja típico do processo de fresamento, também contribui para esse resultado o material usinado, aço ABNT 4340 endurecido, que, devido a sua elevada dureza, não tem suficiente ductilidade para produzir cavacos mais longos e contínuos.

5.8 COMPARATIVO DE DESEMPENHO POR CONDIÇÃO

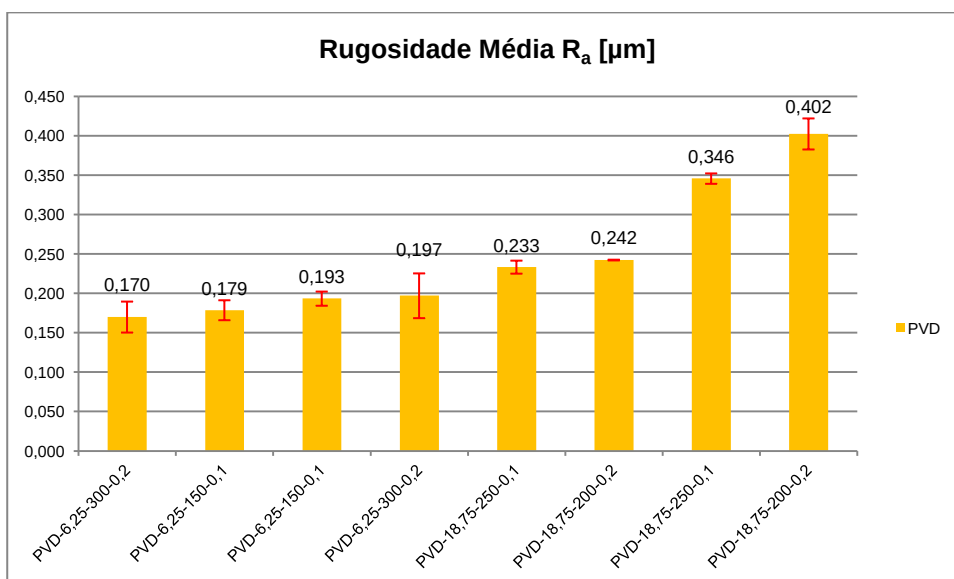
Num gráfico comparativo de desempenho por condição, novamente utilizando os resultados relativos à rugosidade média, observamos que, para ferramenta CVD (Gráfico 6), a melhor condição é aquela com menores larguras de corte e avanço, e velocidade de 200 [m/min], apresentando valores de R_a médio de 0,139 [μm]. Enquanto para a ferramenta de PVD (Gráfico 7), a melhor condição é com menor largura de corte, maior avanço e velocidade de corte de 300 [m/min], apresentando valores de R_a médio de 0,183 [μm].

Gráfico 6: Comparativo de desempenho por condição – Ferramenta CVD



Fonte: Autoria própria

Gráfico 7: Comparativo de desempenho por condição – Ferramenta PVD



Fonte: Autoria própria

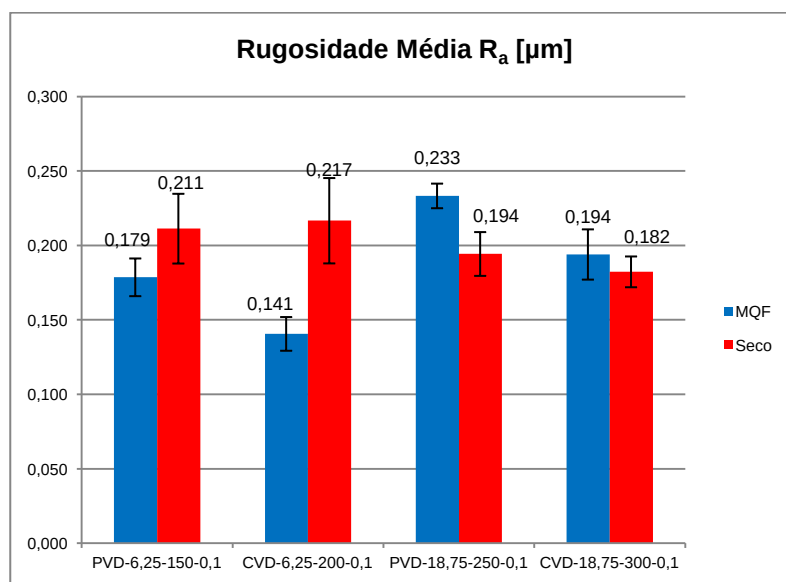
Observa-se que os valores de rugosidade média R_a obtidos com o fresamento em todas as condições de teste estiveram abaixo de $0,5 \text{ } [\mu\text{m}]$, enquanto valores esperados para o processo de retificação encontram-se entre $0,2$ e $1,6 \text{ } [\mu\text{m}]$, conforme Quadro 4 (item 3.3, página 41). Banin Jr (2009), ao estudar as influências dos parâmetros de corte do fresamento de topo na integridade superficial do aço ABNT 4340 endurecido, utilizando ferramentas de metal duro revestido com óxido de alumínio, chegou às mesmas conclusões.

Para as condições com melhores resultados, os valores são ainda menores, estando abaixo de $0,2 \text{ } [\mu\text{m}]$, o que demonstra a qualidade da superfície produzida e valida a usinagem do aço duro como uma alternativa processual economicamente viável e qualitativamente efetiva.

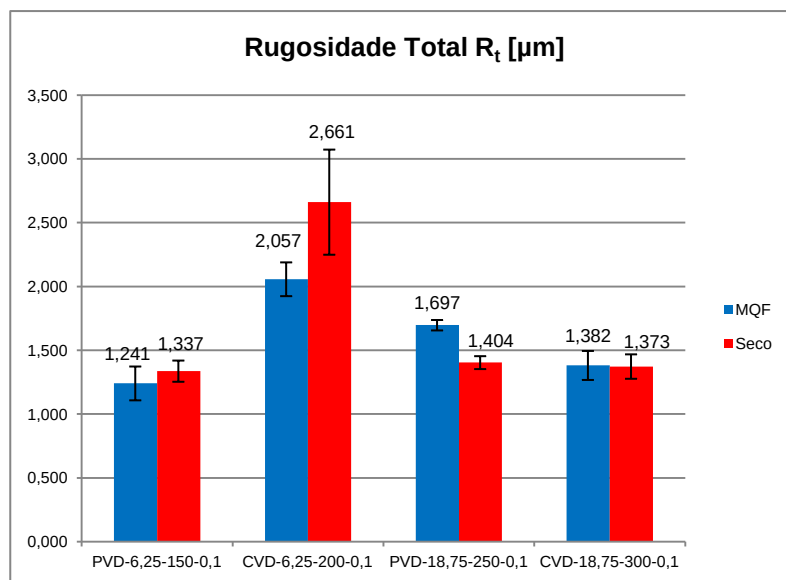
5.9 ENSAIOS À SECO

Ao final, a título ilustrativo e com intuito meramente comparativo, realizaram-se alguns ensaios na condição à seco, conforme Gráficos 8 e 9.

Gráfico 8: Comparativo entre métodos de lubrificação – Parâmetro R_a



Fonte: Autoria própria

Gráfico 9: Comparativo entre métodos de lubrificação – Parâmetro R_t 

Fonte: Autoria própria

Os resultados em relação aos parâmetros R_a e R_t permitem observar que fresamentos com velocidades de corte mais altas não são favorecidos pela técnica MQF; enquanto velocidades mais baixas, sim.

Conforme tratado anteriormente e defendido por Liao e Lin (2007), no fresamento de aço endurecido, a técnica de MQF fornece à região de corte uma quantidade de oxigênio extra que, associada a uma velocidade de corte ótima (compreendida, segundo os experimentos, entre 150 e 200 [m/min]), forma uma camada de óxido estável que impede a difusão e cria uma barreira térmica que dificulta a passagem do calor para a ferramenta, aumentando sua vida e impactando positivamente na integridade da superfície usinada. Ultrapassada esta velocidade, a camada protetora não se forma, e as trincas térmicas tendem a ocorrer na aresta de corte devido à grande variação de temperatura.

Varadarajan, Philip e Ramamoorthy (2002) descreveram que, na usinagem de aço duro, o desempenho geral em termos de força de corte, vida da ferramenta, acabamento superficial, e outros parâmetros, com o MQF, é superior ao desempenho com lubrificação abundante ou à seco. No mesmo sentido, Kishawy *et al* (2005) concluíram que a tecnologia MQF pode ser uma alternativa viável à lubrificação convencional; enquanto Dhar, Kamruzzaman e Ahmed (2006) observaram uma redução significativa no desgaste da ferramenta e na rugosidade sob o MQF, especialmente em razão da redução da temperatura da zona de corte e do atrito entre peça, ferramenta e cavaco.

Ademais, há de se salientar que a otimização dos parâmetros de corte (velocidade, avanço e largura de corte), de forma a se obter uma combinação ideal deles para a condição inicial proposta, é decisiva para potencializar os benefícios desta técnica de lubrificação refrigerada.

6 CONCLUSÃO

Nota-se, a partir de todo o exposto e mormente da análise dos resultados significativos, que o conjunto de parâmetros de corte (velocidade, avanço e largura de corte) é o principal elemento preponderante para bons resultados na usinagem do aço duro com mínima quantidade de fluido e ferramenta de metal duro revestido.

Assim sendo, e com base nos experimentos realizados neste estudo, é possível afirmar que, no fresamento assimétrico do aço ABNT 4340 endurecido, os parâmetros de usinagem que produzem melhores resultados para o processo e o produto são:

- Ferramenta revestida através de PVD, dadas as indicações específicas desta técnica de revestimento para o processo de fresamento (pelas características de elevada tenacidade e aresta de corte acentuada, por exemplo); também em razão do material de revestimento (TiAlN), com propriedades diretamente associadas à maior vida da ferramenta, como maior dureza e resistência ao desgaste e baixo coeficiente de atrito;

- Largura de corte de aproximadamente 6,25 [mm], uma vez que larguras de corte menores que o raio da ferramenta garantem que a pastilha tocará a peça com a ponta da aresta de corte, minimizando a energia proveniente do choque com a peça e utilizando de forma mais eficaz a geometria para isto projetada;

- Velocidade de corte de 200 [m/min], em que há a hipótese de formação de uma camada de óxido estável, que impede a difusão e cria uma barreira térmica, dificultando a passagem do calor para a ferramenta, aumentando sua vida e impactando positivamente na integridade da superfície usinada; e

- Avanço de corte de 0,1 [mm/volta], pois menores avanços geram menores forças de corte, resultando em menores energias dissipadas em forma térmica, sonora e de deslocamento, e prolongando a vida da ferramenta.

Além disso, deve-se salientar que os valores de rugosidade média obtidos em todos os ensaios, e especialmente os resultantes das melhores condições descritas, são comparáveis aos requeridos no processo de retificação ($0,2 < R_a < 1,6$ [μm]), o que demonstra a qualidade da superfície produzida e valida a usinagem do aço endurecido como uma alternativa de processo economicamente viável e qualitativamente efetiva.

Afirma-se, por fim, que os objetivos deste trabalho foram alcançados, uma vez que os ensaios trouxeram resultados coerentes ao estudo bibliográfico, de forma a validar a pesquisa quanto à compreensão dos efeitos do conjunto de parâmetros de usinagem sobre os padrões de qualidade do processo e do produto.

REFERÊNCIAS

- ANEIRO, F.M.; COELHO, R.T; BRANDÃO, L.C. Turning hardened steel using coated carbide at high cutting speeds. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, Rio de Janeiro, v. 30, n. 2, p. 104 – 109, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 87**: Aço carbono e ligados para construção mecânica - Designação e composição química. Rio de Janeiro, 1996.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12545**: Conceitos da técnica de usinagem - Forças, energia, trabalho e potências - Terminologia. Rio de Janeiro, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 4287**: Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade. Rio de Janeiro, 2002.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 4288**: Especificações geométricas de produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Regras e procedimentos para avaliação de rugosidade. Rio de Janeiro, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 513**: Classificação e aplicação de metais duros para a usinagem com arestas de corte definidas – Designação dos grupos principais e grupos de aplicação. Rio de Janeiro, 2013.
- ÁVILA, R. F.; ABRÃO, A. M. The effect of cutting fluids on the machining of hardened AISI 4340 steel. **Journal of Materials Processing Technology**, Lausanne, v. 119, p. 21–26, 2001.
- BANIN JR, J. R. **Análise de tensões residuais, integridade superficial e forças de usinagem no fresamento de topo de aço SAE 4340 endurecido**. 2009. 115 f. Dissertação (Mestrado em Materiais e Processos) – Centro Universitário da FEI de São Bernardo do Campo, 2009.
- BHATTACHARYA, S. *et al.* Microstructural evolution of AISI 4340 steel during Direct Metal Deposition process. **Materials Science and Engineering A**, Lausanne, v. 528, n. 6, p. 2309-2318, 2011.
- CALLISTER JR, W D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia dos materiais**: Uma introdução. 8 ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora SA (LTC), 2013.
- CHIAVERINI, V. **Tecnologia mecânica**: Materiais de construção mecânica. 2. ed. McGraw-Hill, 1986. v. 3.
- CHINCHANIKAR S.; CHOUDHURY, S. K. Hard turning using HiPIMS-coated carbide tools: Wear behavior under dry and minimum quantity lubrication (MQL). **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Oxford, n. 55, p. 536-548, 2014.

CHINCHANIKAR S.; CHOUDHURY, S. K. Machining of hardened steel – Experimental investigations, performance modeling and cooling techniques: A review. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Oxford, n. 89, p. 95-109, 2015.

CIMM. **Variáveis e parâmetros de corte**. Disponível em: <http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/4861-variaveis-e-parametros-de-corte#.V21C6PkrLIV>. Acesso em: 03 jul. 2018.

COELHO, R. T.; NG, E.G.; ELBESTAWI, M. A. Tool wear when turning hardened AISI 4340 with coated PCBN tools using finishing cutting conditions. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Oxford, n. 47, p. 263–272, 2007.

COSTA, A. F. **Análise comparativa de ferramentas revestidas por PVD e CVD no torneamento do aço ABNT 8620**. 2016. 132f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

DHAR, N. R.; KAMRUZZAMAN, M.; AHMED, M. Effect of minimum quantity lubrication (MQL) on tool wear and surface roughness in turning AISI-4340 steel. **Journal of Materials Processing Technology**, Lausanne, v. 172, n. 2, p. 299–304, 2006.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 8. ed. São Paulo: Art Liber, 2013.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. 16ª reimpressão. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1977.

GARCIA, U. **Estudo da aplicação de mínima quantidade de fluido no fresamento de acabamento da liga Ti-6Al-4V**. 2015. 178 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

GINTING, A.; NOUARI, M. Optimal cutting conditions when dry end milling the aeroengine material Ti-6242S. **Journal of Materials Processing Technology**, Lausanne, v. 184, n. 1-3, p. 319–324, 2007.

GUO, Y. B.; AMMULA, S. C. Real-time acoustic emission monitoring for surface damage in hard machining. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Oxford, v. 45, n. 14, p. 1622–1627, 2005.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **3685: Tool-life testing with single-point turning tools**, 1993.

KALPAKJIAN, S; SCHMID, S. **Manufacturing, engineering and technology**. Londres: Pearson Education, 2009.

KISHAWY, H. A. *et al.* Effect of coolant strategy on tool performance, chip morphology and surface quality during high-speed machining of A356 aluminum alloy. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Oxford, v. 45, p. 219-227, 2005.

LIAO, Y. S.; LIN, H. M. Mechanism of minimum quantity lubrication in high-speed milling of hardened steel. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Oxford, v. 47, p. 1660-1666, 2007.

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

MANDAL, N. *et al.* Optimization of flank wear using zirconia toughened alumina (ZTA) cutting tool: Taguchi method and regression analysis. **Journal of the International Measurement Confederation**, Oxford, v. 44, p. 2149–2155, 2011.

MINITAB® 18. **O que é ANOVA?**. Disponível em: <<https://support.minitab.com/pt-br/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/anova/supporting-topics/basics/what-is-anova/>>. Acesso em: 10 ago. 2018.

NESLUSAN, M. *et al.* Detection of tool breakage during hard turning through acoustic emission at low removal rates. **Journal of the International Measurement Confederation**, Oxford, v. 70, p. 1-13, 2015.

RECH, J.; KUSIAK, A.; BATTAGLIA, J. L. Tribological and thermal functions of cutting tool coatings. **Surface Coatings & Technology**, n. 186, p. 364-371, 2004.

ROMEIRO, S. B. B. **Química na siderurgia**. Porto Alegre: UFRGS, 1997.

SAHOO, A. K.; SAHOO, B. Experimental investigations on machinability aspects in finish hard turning of AISI 4340 steel using uncoated and multilayer coated carbide inserts. **Journal of the International Measurement Confederation**, Oxford, v. 45, n. 8, p. 2153–2165, 2012.

SANDVIK. **Manual técnico de usinagem: torneamento, fresamento, furação, mandrilamento, sistema de fixação**. Sandviken: AB Sandvik Coromant, 2005.

SECO TOOLS AB. **Tecnologia de fresamento**. Sorocaba, 2016.

SECO TOOLS AB. **Catálogo e guia técnico 2018.2**. Disponível em: <<http://www.secotools.com/#article/84570>>. Acesso em: 07 ago. 2018.

SMITH, W. F.; HASHEMI, J. **Fundamentos de engenharia e ciência dos materiais**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2012. 734 p.

SIMUNOVIC, K.; SIMUNOVIC, G.; SARIC, T. Single and multiple goal optimization of structural steel face milling process considering different methods of cooling / lubricating. **Journal of Cleaner Production**, Oxford, v. 94, p. 1–9, 2015.

SOUZA, A. J. **Processos de fabricação por usinagem**. Partes 1 e 2. Porto Alegre: Escola de Engenharia da UFRGS, 2011.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte I**. 3 ed. Florianópolis: editora da UFSC, 1993, 249 p.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte II**. 3 ed. Florianópolis: editora da UFSC, 2005, 314 p.

SURESH, R.; BASAVARAJAPPA, S.; SAMUEL, G. L. Some studies on hard turning of AISI 4340 steel using multilayer coated carbide tool. **Journal of the International Measurement Confederation**, Oxford, v. 45, n. 7, p. 1872–1884, 2012.

VARADARAJAN, A. S.; PHILIP, P. K.; RAMAMOORTHY, B. Investigations on hard turning with minimal cutting fluid application (HTMF) and its comparison with dry and wet turning. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Oxford, v. 42, p. 193–200, 2002.

WALKER, T. **The MQL handbook**. Unist, 2013.

WEREMCZUK, A.; RUSINEK, R.; WARMINSKI, J. The Concept of Active Elimination of Vibrations in Milling Process. **Procedia CIRP**, v. 31, p. 82–87, 2015.