

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

GIOVANNI FAUS SALUSSOLIA

Torneamento com ferramenta de CBN do aço ABNT 4340 endurecido

Guaratinguetá

2017

Giovanni Faus Salussolia

Torneamento com ferramenta de CBN do aço ABNT 4340 endurecido

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

Orientador: Prof^o Dr. Manoel Cleber de Sampaio
Alves

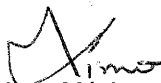
Guaratinguetá
2017

Salussolia, Giovanni Faus
S181t Torneamento com ferramenta de CBN do aço ABNT 4340 endurecido / Giovanni Faus Salussolia – Guaratinguetá, 2017.
75 f. : il.
Bibliografia: f. 72-75

Trabalho de Graduação em Engenharia de Materiais – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2013.
Orientador: Prof. Dr. Manoel Cleber de Sampaio Alves

1. Usinagem. 2. Aço – Análise. 3. Nitreto de boro. 4. Tornearia.
I. Título

CDU 621.9



Luciana Máximo

Bibliotecária/CRB-8 3595

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

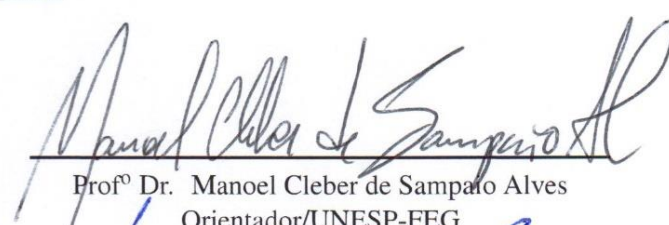
GIOVANNI FAUS SALUSSOLIA

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

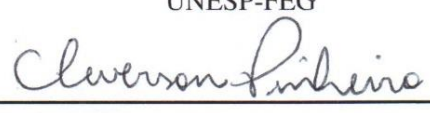
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE MATERIAIS


Profº Dr. MIGUEL ANGEL RAMIREZ GIL
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Profº Dr. Manoel Cleber de Sampaio Alves
Orientador/UNESP-FEG


Profº Titular Dr. Marcos Valério Ribeiro
UNESP-FEG


Profº Msc. Cleverson Pinheiro
Membro Externo

Dezembro , 2017

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

De forma especial ao meu orientador, Manoel, por todo o suporte e oportunidades durante o trabalho e a graduação de modo geral, sempre pronto para atender minhas dúvidas e me auxiliar onde fosse preciso no meu desenvolvimento acadêmico e profissional.

Aos colegas de pesquisa, Marcel e Cleverson, que em todos os momentos estiveram dispostos a me ajudar a crescer profissionalmente, e me incentivar no desenvolvimento da pesquisa.

A minha família e amigos, que estiveram ao meu lado me incentivando e suportando durante todos os momentos, e que sempre acreditaram no meu potencial.

Este trabalho contou com o apoio da seguinte entidade:

CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

*“Acredite que você pode, assim você já está no meio do caminho.”
(Theodore Roosevelt)*

RESUMO

Este trabalho visa estudar o comportamento do torneamento do aço ABNT 4340 no seu estado temperado e revenido, utilizando ferramentas de Nitreto Cúbico de Boro (CBN). Dessa forma, busca-se verificar a viabilidade do processo e encontrar as melhores condições para que tal processo seja utilizado pela indústria. Busca-se ainda obter elevada qualidade superficial, para que seja possível eliminar o processo de retificação que normalmente procede o torneamento. Entre os processos de usinagem, o torneamento é um dos mais utilizados e vem ganhando cada vez mais espaço no mercado com o desenvolvimento de novas ferramentas para usinagem de materiais com propriedades mais interessantes. Um destes materiais é o aço ABNT 4340, com excelentes propriedades para suportar elevadas solicitações mecânicas, que no entanto apresenta dificuldades na sua usinagem. Como uma solução para o torneamento de aços endurecidos, a ferramenta de CBN é muito utilizada devido as suas propriedades como elevada estabilidade química, tenacidade e dureza quando comparada com outros materiais de ferramentas de corte. Para verificar o comportamento durante os ensaio, foram verificados os sinais de emissão acústica, vibração e potência de corte. Além disso, também foram realizadas análises de parâmetros de rugosidade (R_a e R_t), desgaste das ferramentas e estudo dos cavacos formados. Foi desenvolvido um estudo fatorial completo, variando os parâmetros de velocidade de corte, avanço e profundidade de corte, e então realizada a análise estatística das variáveis por meio da análise de variância. Foi possível verificar a viabilidade do processo, além de encontrar as condições de corte que melhor satisfazem os parâmetros de rugosidade, emissão acústica e potência de corte, tendo a ferramenta de CBN apresentado um excelente desempenho. O desgaste observado foi desprezível, e não houve avarias nas ferramentas que afetassem o resultado final do processo. A análise dos cavacos concluiu que sua formação se deu por cisalhamento, e resultou na separação em três formas diferentes, que foram ainda associados aos parâmetros de corte utilizados, e problemas encontrados durante alguns ensaios.

PALAVRAS-CHAVE: Usinagem. Aço endurecido. Desgaste. Rugosidade. Monitoramento.

ABSTRACT

This work aims to study the behavior of the turning of ABNT 4340 steel in its hardened state, using cubic boron nitride (CBN) tools. In this way, it is sought to verify the viability of the process and to find the best conditions for such a process to be used by the industry. It is also sought to obtain high surface quality, in a way that is possible to eliminate the grinding process that normally precedes the turning. Among the machining processes, turning is one of the most used and has been gaining more and more space in the market with the development of new tools for machining new materials with more interesting properties. One of these materials is ABNT 4340 steel, which has excellent properties to withstand high mechanical stresses, however it presents difficulties in machining processes. As a solution for turning hardened steels, the tool made of CBN is widely used because of its properties as high chemical stability, toughness and hardness when compared to other materials used for cutting tools. To verify the behavior of the machining during the tests, were verified the acoustic emission, vibration and cutting power signals. In addition, analyzes of roughness parameters (R_a and R_t), tool wear and study of the chips were also performed. A complete factorial study was developed, varying the process parameters, such as cutting speed, feed rate and depth of cut, and then was performed the statistical analysis of the variables through analysis of variance. It was possible to verify that the process was feasible, besides finding the cutting conditions that best satisfy the parameters of roughness, acoustic emission and cutting power, and the CBN tool presented an excellent performance. The tool wear observed was negligible, and there were no tool failure that affected the final result of the process. The analysis of the chips concluded that it's formation occurred by shear processes and resulted in separation in three different shapes, which were also associated with the cutting parameters used, and problems encountered during some tests.

KEYWORDS: Machining. Hardened steel. Wear. Roughness. Monitoring.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Esquema da classificação dos aços.	16
Quadro 1	Composição química média do aço ABNT/AISI/SAE 4340 (%)	17
Figura 2	Diagrama TTT (tempo-temperatura-transformação) do aço ABNT 4340 com 0,42% C, 0,78% Mn, 1,79% Ni, 0,80% Cr e 0,33% Mo.	18
Figura 3	Tipos de torneamento	20
Figura 4	Esquema dos movimentos de corte, movimento de avanço, e movimento efetivo para o torneamento. Ângulos de direção de avanço ϕ , da direção efetiva η e plano de trabalho.	22
Figura 5	Exemplo de parâmetros de corte e superfícies de usinagem no torneamento . . .	24
Figura 6	Elementos da geometria da ferramenta e corte para torneamento.	25
Figura 7	Esquema dos principais tipos de desgaste: A - Desgaste de cratera; B - Desgaste de flanco; C e D - Desgaste de entalhe.	27
Figura 8	Diagrama esquemático da presença dos diferentes mecanismos de desgaste e sua relação com a temperatura de corte.	28
Figura 9	Classificação dos cavacos de acordo com a norma ISO 3685, de 1993	30
Figura 10	Relação da forma dos cavacos com a profundidade de corte e o avanço.	30
Figura 11	Perfil de rugosidade teórico obtido em um processo de torneamento.	31
Figura 12	Parâmetro de rugosidade R_a	32
Figura 13	Diferentes superfícies que apresentam o mesmo valor para o parâmetro R_a . . .	33
Figura 14	Forma de medição do parâmetro de rugosidade R_t	34
Figura 15	Caracterização de sinal de emissão acústica.	36
Figura 16	Transformador de corrente do tipo núcleo dividido	38
Figura 17	a) Exemplo de experimento fatorial sem interação entre os fatores A e B. b) Exemplo de experimento fatorial com interação entre os fatores.	38
Figura 18	Curva de revenimento, para têmpera a partir de 850°C.	41
Figura 19	Material antes da preparação (à esquerda), e material após a preparação (à direita). . .	41
Figura 20	Esquema do planejamento de experimentos fatorial completo 3^2 utilizado. . . .	42
Figura 21	Desenho (à esquerda) e fotografia (à direita) da ferramenta de corte de CBN utilizada, sendo $EPSR$ o ângulo de ponta, IC o diâmetro do círculo inscrito, l o comprimento teórico da aresta de corte, LE o comprimento efetivo da aresta de corte, RE o raio de ponta, e s a espessura da pastilha.	42
Figura 22	Centro de torneamento da ROMI, linha ROMI GL, modelo 240M do Laboratório de Estudo da Usinagem da Unesp, câmpus de Guaratinguetá.	43
Figura 23	Módulo de aquisição de dados, ao qual estavam conectados os sensores e a placa de aquisição de dados.	44
Figura 24	Tela do programa de aquisição de dados desenvolvido, onde podem ser observados a potência, vibração e emissão acústica durante o andamento do ensaio. . .	44

Figura 25	Sensor de vibração utilizado.	45
Figura 26	Módulo de emissão acústica utilizado, sendo 1) e 2) o sensor piezoelétrico, e 3) o amplificador de sinal.	45
Figura 27	Sensor de potência do tipo TC utilizado, montado no equipamento.	46
Figura 28	Rugosímetro da marca Mahr, modelo MarSurf M300 (a), e imagem da tela do rugosímetro durante ensaio (b).	46
Figura 29	Microscópio de medição da marca Mahr, modelo MarVision MM200.	47
Figura 30	Estereomicroscópio da marca Carl Zeiss, modelo Stemi 2000.	47
Figura 31	Exemplo do código utilizado para citar os ensaios.	49
Figura 32	Gráficos de efeitos principais para o parâmetro de rugosidade R_a (μm).	50
Figura 33	Gráficos de interação entre fatores para o parâmetro de rugosidade R_a (μm).	51
Figura 34	Gráfico de valores médios para R_a (μm), com desvio padrão amostral.	52
Figura 35	Gráficos de efeitos principais para o parâmetro de rugosidade R_t (μm).	53
Figura 36	Gráficos de interação entre fatores para o parâmetro de rugosidade R_t (μm).	54
Figura 37	Gráfico de valores médios para R_t (μm), com desvio padrão amostral.	55
Figura 38	Gráficos de efeitos principais para a vibração (mm/s).	56
Figura 39	Gráficos de interação entre fatores para a vibração (mm/s).	57
Figura 40	Gráfico de valores médios para vibração (mm/s), com desvio padrão amostral.	58
Figura 41	Gráficos de efeitos principais para a emissão acústica (RMS).	59
Figura 42	Gráficos de interação entre fatores para a emissão acústica (RMS).	60
Figura 43	Gráfico de valores médios para emissão acústica (RMS), com desvio padrão amostral.	60
Figura 44	Gráficos de efeitos principais para a potência de corte (kW).	62
Figura 45	Gráficos de interação entre fatores para a potência de corte (kW).	62
Figura 46	Gráfico de valores médios para potência de corte (kW), com desvio padrão amostral.	63
Figura 47	Resultados de sinal de potência para os ensaios 150.01.025.1, 150.1.025.2, 200.01.025.1 e 200.01.025.2, em kW.	64
Figura 48	Micrografia das ferramentas de corte utilizadas nos ensaios a) 200.01.050.2; e b) 200.02.050.1.	65
Figura 49	Micrografia do cavaco resultante do ensaio 150.02.025.2, com ampliação de 10x, demonstrando a presença das marcas de cisalhamento que caracterizam o tipo de cavaco formado.	65
Figura 50	Exemplos dos grupos de cavaco separados por análise visual macroscópica, sendo os cavacos resultantes dos ensaios 200.01.025.2, 150.02.025.1 e 150.02.050.2.	66
Figura 51	Relação entre os resultados de potência de corte média, em kW, e vibração máxima, em mm/s.	68
Figura 52	Relação entre os resultados de potência de corte média, em kW, e os cavacos gerados, por forma.	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Relação de artigos publicados e números de citações, no período de 2007 até abril de 2017, para busca com palavras-chave.	13
Tabela 2 – Composição química aproximada do aço ABNT 4340 utilizado	40
Tabela 3 – Análise de variância para parâmetro R_a de rugosidade.	50
Tabela 4 – Análise de variância para parâmetro R_t de rugosidade.	53
Tabela 5 – Análise de variância para vibração.	56
Tabela 6 – Análise de variância para emissão acústica.	59
Tabela 7 – Análise de variância para potência de corte.	61

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	15
2.1	OBJETIVOS GERAIS	15
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1	AÇOS	16
3.1.1	Aço ABNT 4340	17
3.1.2	Têmpera e Revenimento	18
3.2	USINAGEM	19
3.2.1	Torneamento	19
3.2.2	Grandezas Físicas no Processo de Corte	20
3.2.2.1	Monvimentos entre a peça e a ferramenta	21
3.2.2.2	Direções dos movimentos	22
3.2.2.3	Percursos da ferramenta em relação à peça	22
3.2.2.4	Velocidades	23
3.2.2.5	Grandezas de corte	23
3.2.3	Ferramentas de corte	24
3.2.3.1	Geometria das ferramentas	25
3.2.3.2	Ferramenta de CBN	26
3.2.3.3	Desgaste da ferramenta	26
3.2.4	Cavaco: tipos e formação	28
3.2.4.1	Mecanismo da formação do cavaco	28
3.2.4.2	Tipos de cavacos	29
3.2.4.3	Formas de cavacos	29
3.3	QUALIDADE SUPERFICIAL	31
3.3.1	Desvio aritmético médio (R_a)	32
3.3.2	Altura total do perfil (R_t)	33
3.4	VIBRAÇÃO	34
3.5	EMISSÃO ACÚSTICA (EA)	35
3.6	POTÊNCIA DE USINAGEM	36
3.7	PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS	38
3.7.1	Análise estatística	39
4	METODOLOGIA	40
4.1	PREPARAÇÃO DO CORPO DE PROVA	40
4.2	PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTO	41

4.3	FERRAMENTAS DE CORTE	42
4.4	PARÂMETROS DE USINAGEM E ENSAIOS	42
4.5	SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS	43
4.5.1	Vibração	44
4.5.2	Emissão Acústica	45
4.5.3	Potência de usinagem	45
4.6	RUGOSIDADE	46
4.7	DESGASTE DA FERRAMENTA	47
4.8	ANÁLISE DE CAVACO	47
4.9	TRATAMENTOS ESTATÍSTICOS	48
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
5.1	RUGOSIDADE (R_a)	50
5.2	RUGOSIDADE (R_t)	52
5.3	VIBRAÇÃO	55
5.4	EMIÇÃO ACÚSTICA	58
5.5	POTÊNCIA DE CORTE	61
5.6	DESGASTE DA FERRAMENTA	64
5.7	ANÁLISE DE CAVACO	65
5.8	RELAÇÕES ENTRE AS ANÁLISES INDIVIDUAIS	67
6	CONCLUSÃO	70
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	71
	REFERÊNCIAS	72

1 INTRODUÇÃO

Durante a evolução da humanidade, a usinagem esteve sempre presente na fabricação e no processamento de materiais, mostrando sua grande importância, que se mantém até os dias atuais.

De acordo com Machado et al.(2009), desde o trabalho com a madeira, que era o principal material usinado com ferramentas de aço-carbono até o século XVIII, passando pelo surgimento de máquinas-ferramenta no começo do século XIX, até mais recentemente, pode-se perceber que o processo de usinagem, assim como os materiais que dele participam, está em constante evolução, e assim criando diversos desafios para a comunidade acadêmica e industrial.

A partir do século XX a grande gama de produtos e materiais cada vez com propriedades mais extremas exigiu também um conjunto avanço da usinagem, tanto no quesito maquinário com metodologias e ferramentas. Entre as ferramentas que surgiram nessa época pode-se citar, como as mais marcantes e duradouras, as de aço rápido, carboneto de tungstênio (metal duro), cermets, cerâmicas, e finalmente o nitreto cúbico de boro, ou CBN (MACHADO et al., 2011).

O avanço em materiais com melhores propriedades mecânicas como dureza e resistência também foi muito expressivo no último século. Segundo Alves, Bianchi e Aguiar (2012), devido a suas características como elevada resistência mecânica e tenacidade o aço classificado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) como 4340 é um material que apresenta grandes dificuldades em usinabilidade. Apesar disso, de acordo com Kondo (2015), este material é de grande importância para as indústrias automobilística, aeronáutica, de máquinas e equipamentos, principalmente na sua forma endurecida, por têmpera e revenimento.

De acordo com a base de artigos Web of Science, é possível observar o número de publicações de artigos que contém certas palavras no título. Na Tabela 1, foram consolidados dados para busca com palavras que representam o assunto deste trabalho.

Tabela 1 – Relação de artigos publicados e números de citações, no período de 2007 até abril de 2017, para busca com palavras-chave.

Termo de busca	Número de artigos publicados	Número de citações
ABNT 4340 steel	1	0
AISI 4340 steel	383	2788
Turning of 4340 steel	102	775
CBN machining tool	354	2655
Acoustic emission on machining	637	3933
Vibration on machining	7500	37573
Cutting power in machining	1322	7579

Fonte: Elaborada pelo autor, com dados extraídos da base Web of Science.

O elevado número de publicações e citações para os assuntos especificados que ocorrem principalmente a partir de 2007, assim como a necessidade da indústria de processar cada vez mais rápido, materiais mais complexos e alcançando uma maior qualidade no produto final, demonstra a necessidade crescente de estudá-los melhor. Nesse contexto de dificuldade da indústria no beneficiamento desses materiais e crescente relevância dos tópicos abordados, é proposto o estudo da influência de parâmetros

de corte, e do comportamento dos materiais envolvidos, no torneamento do aço ABNT 4340 temperado e revenido, com ferramenta de corte de CBN. Assim sendo, foram estudados como parâmetros de influência do torneamento, a velocidades de corte (V_C), profundidade de corte (a_p) e avanço (f). Para esta avaliação, as variáveis de saída analisadas foram parâmetros de rugosidade, emissão acústica, vibração e potência de corte, além de análise visual de cavaco.

2 OBJETIVOS

De forma a orientar este trabalho, foram definidos os seguintes objetivos.

2.1 OBJETIVOS GERAIS

Estudar o processo de torneamento do aço ABNT 4340 endurecido, quando usinado com ferramenta de CBN, ao variar as condições de corte.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar o processo por meio de técnicas não destrutivas, como estudo de vibrações mecânicas, potência de corte, e emissão acústica;
- Utilizar técnicas de análise de qualidade superficial (rugosidade) e desgaste das ferramentas;
- Estudar o processo de torneamento de um aço com elevada dureza e tenacidade;
- Realizar análise de cavacos, a fim de visualizar informações do processo de torneamento;
- Buscar a eliminação do processo de retificação, por meio de um processo de torneamento que resulte na qualidade superficial adequada;
- Propor estudos futuros, relacionados aos materiais utilizados no trabalho.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

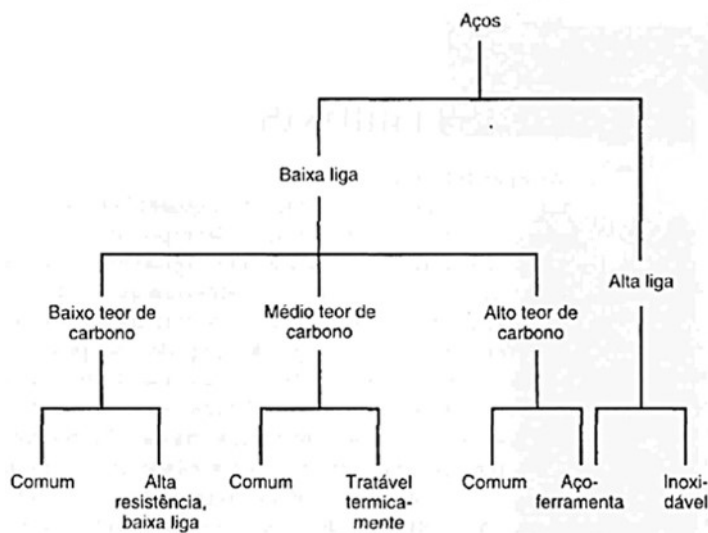
3.1 AÇOS

Desde 1591, quando foi iniciada a primeira usina siderúrgica reconhecida no Brasil, até atualmente, a demanda e a produção de aços vem aumentando continuamente. No período de 1995 a 2000, por exemplo, o crescimento da produção mundial de aço bruto foi de 12%, sendo que a produção brasileira acompanhou esse avanço, crescendo 11%. Já entre 2000 e 2008, a produção mundial avançou 56% (NEVES; CAMISASCA, 2013).

Aços são ligas ferro-carbono, sendo que existem milhares de aços que se diferem pelas concentrações de carbono e outros elementos de liga que podem ser adicionados, ou pela forma como foram tratados termicamente, e assim podem variar largamente suas propriedades como resistência, dureza, tenacidade e ductilidade, possibilitando uma enorme diversidade de aplicações distintas (CALLISTER JÚNIOR, 1999).

Normalmente, o teor de carbono no aço não ultrapassa 1% em peso, e sua variação causa grandes mudanças nas propriedades do material. Por esse motivo a maioria das classificações utiliza o teor de carbono e de elementos de liga como base para diferenciar os tipos de aços, como pode ser visto de forma esquemática na Figura 1 (CALLISTER JÚNIOR; RETHWISCH, 2007).

Figura 1 – Esquema da classificação dos aços.



Fonte: adaptado de Callister Jr. (1999)

Os aços de alta liga são aqueles que possuem elementos de liga adicionados em maiores quantidades, a fim de modificar as propriedades do material. Já os aços de baixa liga possuem outros elementos além do ferro e carbono apenas em pequenas quantidades, sendo influenciados principalmente pela quantidade de carbono (CALLISTER JÚNIOR, 1999).

De forma geral, pode-se considerar os aços com baixo teor de carbono, quando possuem menos de 0,25% de carbono em massa; aços com médio teor de carbono, entre 0,25% e 0,60%; e aços

com alto teor de carbono, quando possuem entre 0,60% e 1,40% de carbono em massa. Quando maior a quantidade de carbono na estrutura, maior também a capacidade de alterar propriedades com tratamentos térmicos, a dureza e a resistência mecânica, mas ocorre uma diminuição na ductilidade e tenacidade (CALLISTER JÚNIOR, 1999).

3.1.1 Aço ABNT 4340

Segundo Alves, Bianchi e Aguiar (2011), entre os aços de construção mecânica, o aço ABNT 4340 ganha destaque por ter a mais alta temperabilidade e boa forjabilidade. Por um lado, isso confere ao material uma combinação adequada de resistência e tenacidade após os processos de têmpera e revenimento. No entanto, essas boas propriedades mecânicas também influenciam no seu processamento, uma vez que este aço é de difícil usinabilidade e soldabilidade.

O aço ABNT 4340 é um aço de baixa liga, e médio teor de carbono (LEE; SU, mar. 1999). A nomenclatura 4340 deriva da composição química deste aço, que pode ser observada no Quadro 1, sendo o 43 correspondente a classe de aços ligados Ni-Cr-Mo na proporção aproximada do Quadro 1, e o 40 aos aproximados 0,40% de carbono (NOGUEIRA, 2013).

Quadro 1 – Composição química média do aço ABNT/AISI/SAE 4340 (%)

Elemento	Composição (%)
C	0,41
Mn	0,70
Si	0,25
Cr	0,80
Ni	1,80
Mo	0,25
P	0,035
S	0,04

Fonte: Zhirafar, Rezaeian e Pugh (2007)

As excelentes propriedades que este material apresenta provêm, principalmente, da correta adição dos elementos de liga, que são responsáveis por melhorar certas características. Por exemplo, o molibdênio confere uma diminuição na possibilidade do material se fragilizar quando revenido, além de melhorar a propriedade de resistência mecânica (CHIAVERINI, 1986).

A principal contribuição do manganês nas propriedades do aço, se dá na estabilização da austenita, impedindo que esta se transforme rapidamente em outra fase durante o resfriamento do aço após a austenitização (LIMA, 2011). Essa estabilização ocorre com uma diminuição do coeficiente de difusão do carbono, e aumentando sua solubilidade na austenita, tornando o manganês um dos principais elementos de liga quando se necessita aumentar a temperabilidade (MATTAR JÚNIOR, 2009).

Depois do manganês, o níquel é o elemento de liga que mais influencia na temperabilidade do aço. Já o cromo atua como elemento melhorador da resistência à corrosão, além da formação de carbonetos que, assim como o vanádio e o silício, aumentam a dureza do material (MATTAR JÚNIOR, 2009).

Devido às propriedades que apresenta, os usos para este aço vão desde virabrequins para aviões e tratores, até engrenagens e eixos submetidos a elevadas solicitações mecânicas (ALVES; BIANCHI; AGUIAR, 2011).

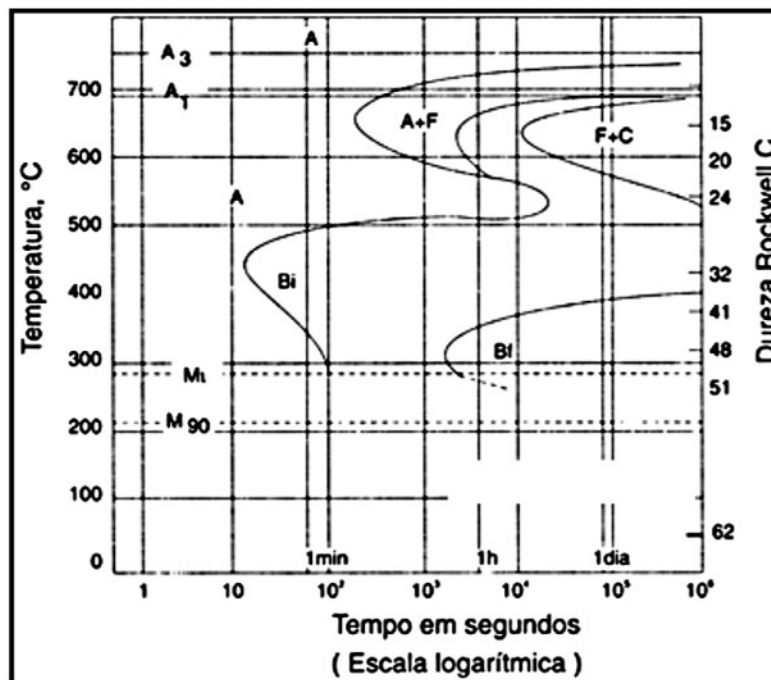
3.1.2 Têmpera e Revenimento

Dentre os tratamentos térmicos que podem ser realizados para melhorar propriedades em metais, a têmpera é o mais importante para os aços, e consiste basicamente na formação de um elevado teor da fase martensita na microestrutura daquele material. Isso é normalmente realizado com o aquecimento do material, tornando-o austenitizado, seguido do resfriamento a uma taxa elevada, em um meio de resfriamento adequado (CALLISTER JÚNIOR, 1999; CHIAVERINI, 1986).

As modificações da microestrutura resultantes da têmpera alteram significativamente as propriedades do aço, como dureza, resistência ao desgaste e à tração (CHIAVERINI, 1986). Entretanto, da têmpera do aço ABNT 4340 decorrem alguns efeitos que podem ser prejudiciais a aplicação, como diminuição da tenacidade e ductilidade, com redução da capacidade de alongamento e estrição, e também o aparecimento de tensões internas de considerável intensidade. No entanto, esses problemas podem ser contornados, ou pelo menos atenuados, com o processo de revenimento (CARDOSO, 2011).

A influência que a rota executada no tratamento térmico tem sobre as propriedades finais pode ser observada com relação à dureza em diagramas de transformação isotérmica TTT, como o exposto na Figura 2.

Figura 2 – Diagrama TTT (tempo-temperatura-transformação) do aço ABNT 4340 com 0,42% C, 0,78% Mn, 1,79% Ni, 0,80% Cr e 0,33% Mo.



Fonte: Anazawa et al. (2010)

No processo de têmpera, por exemplo, deve-se manter o aço na região da fase austenita estável, que no diagrama TTT da Figura 2 está na região superior, acima da linha de temperatura simbolizada

por A_3 para depois resfriá-lo rapidamente. Caso adentrasse a curva de transformação por meio de um resfriamento lento têm início a formação de outras fases no aço como ferrita e bainita, que irão representar maior ou menor parte da microestrutura dependendo da região em que ocorrer o resfriamento, sendo que isso pode ser controlado pelo tempo do processo. Porém, ao resfriar rapidamente o material, da região de austenita estável, até abaixo da linha de transformação da martensita simbolizada por M_{90} (corresponde a 90% de transformação de austenita em martensita), fases como ferrita, perlita e bainita não são formadas e tem-se um processo de têmpera que irá gerar uma microestrutura predominantemente martensítica, e com grande aumento de dureza.

Imediatamente após a têmpera é executado o processo de revenimento. Este consiste em modificar a estrutura formada com a têmpera, à uma temperatura mais baixa que as linhas de transformação do aço, de forma a reduzir valores de dureza e resistência à tração, mas melhorar a ductilidade e aliviar as tensões internas formadas na estrutura (CHIAVERINI, 1986).

Apesar do alívio de tensões pelo revenimento, a estrutura característica da têmpera continua presente no material. Dessa forma, é resultante uma microestrutura de solução sólida de ferro, com saturação de carbono que deforma a rede estrutural do ferro, gerando um grande aumento de dureza e resistência mecânica (CARDOSO, 2011).

3.2 USINAGEM

O conceito de usinagem, como coloca Ferraresi (1977), estabelece que qualquer processo que dê a uma peça um formato específico, uma dimensão ou um acabamento, por meio da remoção de material na forma de cavaco com uma ferramenta de corte, pode ser classificado como um processo de usinagem.

Para se ter uma ideia da importância da usinagem, segundo Trent e Wright (2000) aproximadamente 10% de todo o metal produzido no mundo é transformado em cavaco em processos de usinagem. Para a economia, isso significa um gasto de aproximadamente U\$ 300 bilhões em mão de obra, e mais de U\$ 10 bilhões com maquinários e matérias primas consumíveis.

3.2.1 Torneamento

O torneamento consiste no processo em que a peça é fixada na máquina e gira em torno de seu eixo de rotação, ao mesmo tempo em que a ferramenta se desloca longitudinalmente e/ou transversalmente, sendo que o processo de torneamento ainda pode ser dividido em pelo menos 10 processos que se diferenciam pela da trajetória da ferramenta e objetivo específico (MACHADO et al., 2011).

De acordo com Trent e Wright (2000), dentro os processos de usinagem o torneamento é o mais utilizado no corte de materiais metálicos.

Com esse processo, são obtidas superfícies de revolução, através da remoção de material por uma ferramenta de corte monocortante, ou seja, de apenas uma aresta cortante (FERRARESI, 1977).

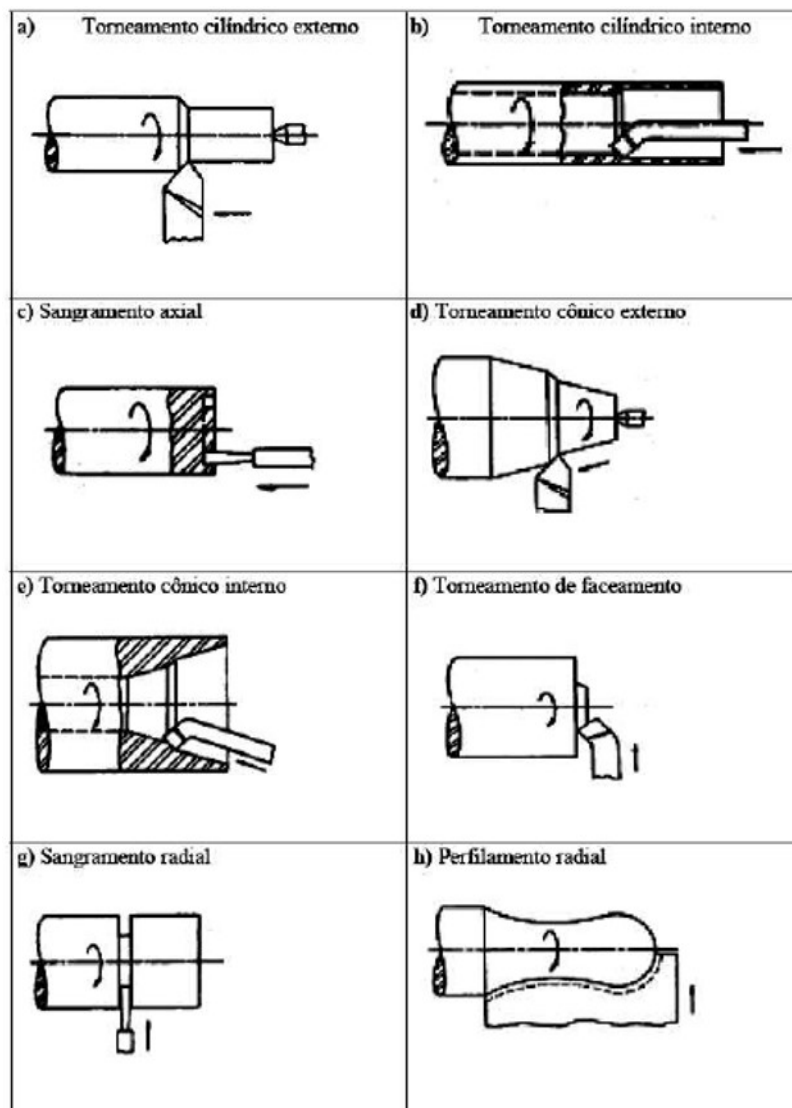
De acordo com Amorim (2002), algumas características podem destacar o processo de torneamento de muitos outros processos de usinagem, como o corte contínuo, enquanto em muito outros processos ocorre o corte interrompido. Outra característica é a movimentação simultânea da peça, em movimento de rotação, e da ferramenta, executando movimento de translação.

De forma mais abrangente, existem dois tipos de torneamento que se diferenciam pela sua trajetória de ferramenta, sendo o torneamento retilíneo quando a ferramenta se desloca por uma trajetória retilínea, e o torneamento curvilíneo para processos onde a ferramenta desenvolve uma trajetória curvilínea. Dentro dos processos de torneamento retilíneo ainda pode-se apontar os processos de torneamento cilíndrico, torneamento cônico, torneamento radial e perfilamento (FERRARESI, 1977).

De acordo com Ferraresi (1924), segundo a finalidade ou objetivo, a divisão que se tem é entre torneamento de desbaste e torneamento de acabamento.

Esquemas de alguns dos principais tipos de torneamento podem ser observados na Figura 3.

Figura 3 – Tipos de torneamento



Fonte: Ferraresi (1977)

3.2.2 Grandezas Físicas no Processo de Corte

Para que seja realizado o estudo de um processo de usinagem é necessária a definição de grandezas físicas que possibilitem uma análise dos movimentos relativos no processo. Dessa forma, a ABNT normalizou essas grandezas em 1989, com a NBR 6162 - Movimentos e Relações Geométricas na

Usinagem dos Metais: Terminologia, e mais recentemente em 2013 com a norma ABNT NBR ISO 3002-1 - Grandezas básicas em usinagem e retificação.

3.2.2.1 Movimentos entre a peça e a ferramenta

Os movimentos que regem o processo de torneamento, assim como qualquer processo de usinagem, são descritos a partir do movimento da ferramenta em relação a peça, ou seja, considerando a peça parada (MACHADO et al., 2011).

De acordo com Ferraresi (1977), deve-se distinguir os movimentos que ocasionam a retirada de cavaco dos movimentos que estão envolvidos no processo mas não originam a retirada de material diretamente. Dessa forma, segundo Machado (2011) e Ferraresi (1977), pode-se detalhar os movimentos da seguinte forma:

Movimentos que originam cavaco diretamente:

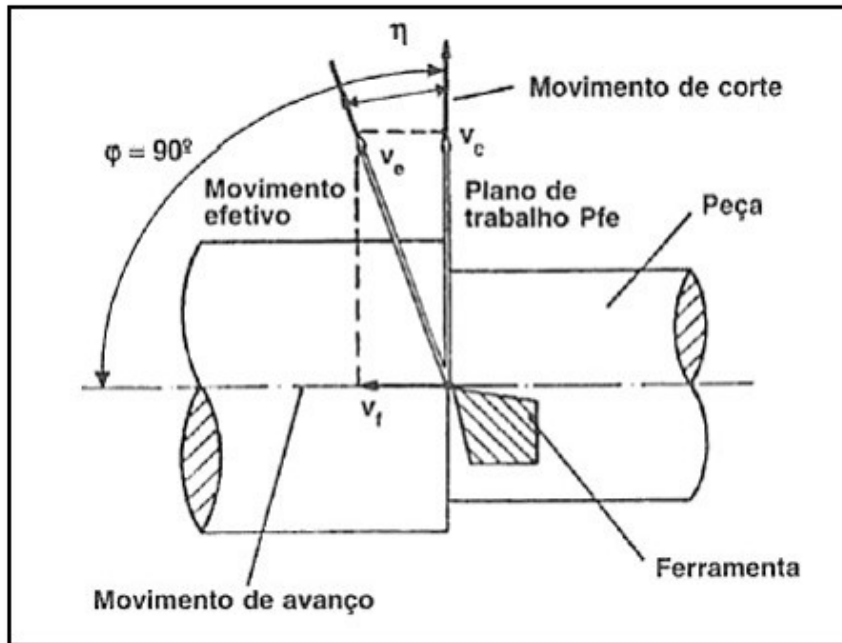
- Movimento de corte: parte do movimento de retirada de cavaco que, sem o movimento de avanço, ocasiona apenas uma única retirada de material na forma de cavaco.
- Movimento de avanço: parte do movimento de retirada de cavaco que, sem o movimento de corte, ocasiona uma retirada repetida ou contínua de material na forma de cavaco.
- Movimento efetivo de corte: este é o movimento de retirada de cavaco, resultante dos efeitos do movimento de corte e de avanço, quando executados ao mesmo tempo.

Movimentos que não originam cavaco diretamente:

- Movimento de aproximação: é o movimento que, antes de se iniciar o processo de corte, leva a ferramenta até a superfície da peça a ser usinada.
- Movimento de profundidade: é o movimento que determina a profundidade do corte, ou seja, a espessura de material que irá ser eliminado na forma de cavaco.
- Movimento de correção: utilizado para ajustar a distância entre a peça e a ferramenta, que pode variar devido a fenômenos como desgaste, ou variações térmicas, por exemplo.
- Movimento de recuo: finaliza o processo de usinagem, distanciando novamente a ferramenta da superfície usinada.

Um esquema dos movimentos previamente detalhados pode ser observado na Figura 4. Também consta o plano de trabalho que, segundo Machado et al. (2011), é o plano que passa pelo ponto de referência adotado, e que contém ambas direções de corte e de avanço, sendo o espaço onde ocorrem os movimentos que ocasionam a formação do cavaco.

Figura 4 – Equema dos movimentos de corte, movimento de avanço, e movimento efetivo para o torneamento. Ângulos de direção de avanço ϕ , da direção efetiva η e plano de trabalho.



Fonte: Diniz, Marcondes e Coppini. (2006)

3.2.2.2 Direções dos movimentos

Para que os movimentos efetivamente realizem o corte do material, é necessário associá-los à direções e sentidos de corte, assim como desenvolver velocidades e percursos. Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2006), quando consideramos a direção instantânea de um movimento de corte, essa é adotada como a direção de corte, diferentemente do sentido que corte, que é definido como o sentido resultante do movimento da ferramenta em relação a uma peça parada. A velocidade desenvolvida é uma medida da rapidez do movimento.

Dessa forma, também é necessário distinguir as diferentes direções presentes no torneamento (MACHADO et al., 2011):

- Direção de corte: se refere a direção instantânea associada ao movimento de corte.
- Direção de avanço: se refere a direção instantânea associada ao movimento de avanço
- Direção efetiva: se refere a direção instantânea associada ao movimento efetivo de corte

3.2.2.3 Percursos da ferramenta em relação à peça

Analogamente, pode-se definir os percursos envolvidos (MACHADO et al., 2011):

- Percurso de corte (L_c): é definido como o espaço que o ponto de referência na aresta cortante da ferramenta percorre, de forma paralela à direção de corte.

- Percurso de avanço (L_f): é definido como o espaço que o ponto de referência na aresta cortante da ferramenta percorre, de forma paralela à direção de avanço. Este ainda pode ser dividido em duas componentes, quando ocorrer tanto movimento de avanço principal como lateral.
- Percurso efetivo (L_e): é definido como o espaço que o ponto de referência na aresta cortante da ferramenta percorre, de forma paralela à direção efetiva do corte.

3.2.2.4 Velocidades

Em relação as velocidades que podem ser definidas, distinguem-se como envolvidas efetivamente na formação de cavaco a velocidade de corte, de avanço e velocidade efetiva de corte. Segundo Machado (2009), ainda pode-se controlar a velocidade de aproximação, de ajuste, de correção e de recuo, importantes para o processo de usinagem, mas que não estão diretamente envolvidas na formação de cavaco.

A velocidade de corte (v_c), ainda tomando como base o ponto de referência da aresta de corte da ferramenta, é a velocidade no instante analisado, que segue a direção e o sentido de corte. Matematicamente, ela pode ser definida como (MACHADO et al., 2011):

$$v_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \quad [m/min] \quad (1)$$

Onde d é diâmetro do objeto que executa a rotação (peça ou ferramenta) em mm, e n é o número de rotações por minuto (rpm).

Da mesma forma que a velocidade de corte, a velocidade de avanço (v_f) é a velocidade instantânea, mas equivalente a direção e ao sentido de avanço, e é dada pela Equação 2 (MACHADO et al., 2011).

$$v_f = f \cdot n \quad [mm/min] \quad (2)$$

Onde f é o avanço, dado em milímetros por revolução, e n é o número de revoluções por minuto.

A velocidade efetiva de corte (v_e), é a soma vetorial das velocidades de corte e de avanço, como mostra a Equação 3. Isso significa que a velocidade efetiva é a velocidade instantânea equivalente a direção e ao sentido efetivo de corte.

$$\vec{v}_e = \vec{v}_c + \vec{v}_f \quad [m/min] \quad (3)$$

3.2.2.5 Grandezas de corte

Alguns outros parâmetros de corte, essenciais para a compreensão e execução do processo de torneamento são o avanço (f) e a profundidade de corte (a_p).

O ajuste desses parâmetros ocorre na máquina, e pode ser feito de maneira direta no processo de *setup*, ou indiretamente por meio de outros parâmetros (MACHADO et al., 2011).

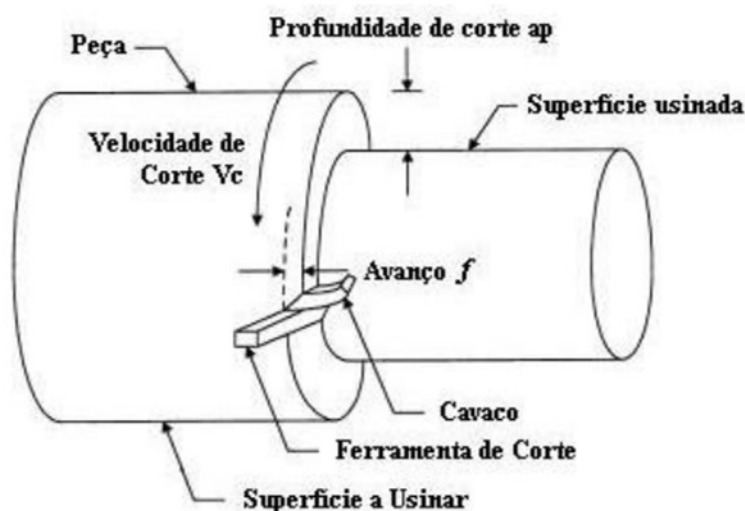
O avanço (f) é a distância percorrida pela aresta cortante da ferramenta a cada volta ou rotação da peça, e pode ser dado em mm/rev . Já a profundidade de corte (a_p) é a medida da penetração da ferramenta na peça perpendicularmente ao plano de trabalho, ou seja, a espessura do material que irá ser removido na forma de cavaco (AMORIM, 2002).

Além desses dois parâmetros de corte, é importante definir as superfícies existentes e geradas no processo de torneamento.

A superfície inicial da peça é a superfície a usinar. No momento em que a ferramenta executa o corte do material, são formadas as superfícies de corte, sendo a superfície principal de corte aquela gerada pela aresta principal da ferramenta, e a superfície secundária de corte aquela gerada pela aresta lateral da ferramenta. A superfície que ficará presente na peça após o fim do corte é chamada de superfície usinada (AMORIM, 2002; FERRARESI, 1977)

Estes parâmetros de superfícies estão representados na Figura 5.

Figura 5 – Exemplo de parâmetros de corte e superfícies de usinagem no torneamento



Fonte: Amorim (2002)

3.2.3 Ferramentas de corte

Para que exista um processo de usinagem, ou seja, de arrancamento de material da peça, é necessário o uso de uma ferramenta de corte de geometria definida para que tal retirada de material seja realizada. Ao longo dos anos, com a necessidade de se produzir objetos e peças de maior complexidade, ou com materiais de propriedades mecânicas diferenciadas, foram sendo desenvolvidas novas tecnologias para ferramentas de corte, envolvendo tanto novos materiais como novas geometrias.

Dependendo do material que será usinado, da qualidade final necessária, da complexidade da peça, e da velocidade de produção requerida, existe uma gama de ferramentas, com materiais e geometrias distintas, que irão melhor atender essa demanda (FERRARESI, 1977).

Segundo Ozel (2005), nas indústrias a escolha correta da geometria da ferramenta para o torneamento de materiais endurecidos ocorre menos da metade das vezes. Além disso, a utilização de ferramentas de corte até o real fim de sua vida útil ocorre apenas em um terço das vezes, principalmente ao se tratar de ferramentas de Nitreto Cúbico de Boro (CBN). Isso gera uma enorme perda de produtividade para a indústria, e dessa forma deve-se cuidar para que as decisões corretas sejam realizadas em relação as ferramentas de corte no torneamento.

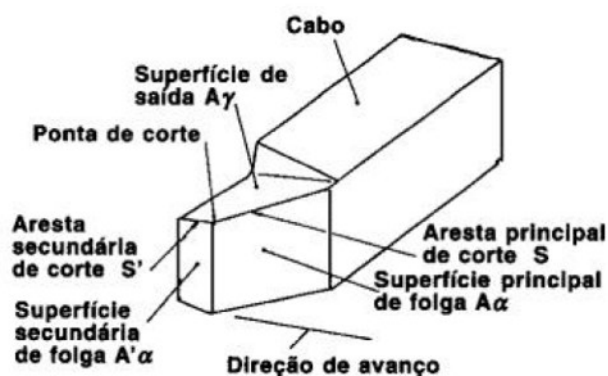
3.2.3.1 Geometria das ferramentas

Existe uma infinidade de geometrias para as ferramentas de corte, que foram sendo desenvolvidas ao longo dos anos, no entanto, algumas características são comuns a maioria das ferramentas, mudando apenas sua disposição, forma ou tamanho. Algumas dessas características são as superfícies de folga, de saída e de avanço, cunha cortante e quebra cavacos, e são fundamentais para o entendimento do processo de corte, da formação de cavaco, e desgaste da ferramenta.

Os principais elementos presentes na geometria de corte de uma ferramenta para torneamento podem ser observados na Figura 6, e são descritos por Machado et al. (2011), e Amorim (2002) com base na norma brasileira NBR 6163 - *Conceitos da Técnica de Usinagem: Geometria da Cunha Cortante: Terminologia* como se segue:

- Superfície de saída (A_γ): É a superfície pela qual o cavaco irá se mover, deslizando para fora da região do corte;
- Superfície de folga (A_α): É a superfície que fica separada da superfície principal que está sendo usinada, determinando uma folga entre a ferramenta e a peça;
- Superfície secundária de folga (A'_α): Semelhante a definição da superfície de folga, mas separa a ferramenta da superfície secundária que está sendo usinada;
- Cunha de corte: É responsável pelo corte efetivo do material e a formação do cavaco pelo movimento relativo entre peça e ferramenta, e é formada pela junção das superfícies de folga e de saída;
- Aresta principal de corte (S): É uma das arestas que limita a cunha de corte, na interface peça-ferramenta, formada pela intersecção das superfícies de saída e de folga;
- Aresta secundária de corte (S''): Da mesma forma que a aresta principal de corte, mas formada pela intersecção das superfícies de saída e a superfície secundária de folga;
- Ponta de corte: Local de intersecção das arestas principal e secundária de corte.

Figura 6 – Elementos da geometria da ferramenta e corte para torneamento.



Fonte: Machado et al. (2011)

3.2.3.2 Ferramenta de CBN

Para conseguir uma boa qualidade superficial ou uma boa produtividade ao usinar um aço endurecido, é necessário que o material da ferramenta também possua uma dureza elevada, necessariamente maior que o material a ser usinado.

De acordo com Souza (2011), para que seja possível um aumento de produtividade e redução de custos com a usinagem a seco (sem utilização de fluido de corte), é necessário que a ferramenta suporte elevadas temperaturas sem perder suas propriedades.

No entanto, como explica Amorim (2002), o grande desafio no desenvolvimento e escolha de materiais para ferramentas de corte é o equilíbrio entre as propriedades de dureza e tenacidade, uma vez que quando se aumenta uma destas propriedades, a outra tende a diminuir.

Depois do diamante, que possui um custo extremamente elevado, a ferramenta de maior dureza é a de Nitreto Cúbico de Boro (CBN). Além disso, o CBN possui uma maior estabilidade química quando comparado ao diamante, principalmente em relação à oxidação. A falta de afinidade química do CBN com aços e ferros fundidos ainda pode ser citada como mais uma vantagem deste material (CHINCHANIKAR; CHOUDHURY, fev. 2015).

Essas ferramentas são fabricadas a partir de cristais hexagonais de nitreto de boro que são submetidos à altas pressões e temperaturas, em torno de 6000 MPa e 1400 graus Celsius respectivamente, para obter uma estrutura cúbica. Assim como ocorre para o diamante, a estrutura cúbica resulta em propriedades mecânicas muito superiores, e apesar de não ocorrerem naturalmente para o CBN, pode ser obtida de forma sintética (EZUGWU; BONNEY; YAMANE, mar. 2003; GUIMARÃES, 2013).

Comercialmente existem duas classes de ferramentas de CBN disponíveis (EZUGWU; BONNEY; YAMANE, mar. 2003):

- CBN_H : Essa ferramenta contém um elevado teor de CBN (*HighCBNcontent*). Geralmente apresenta maior dureza que a classe CBN_L , além de maior resistência à fratura.
- CBN_L : Ao contrário da anterior, essa classe é chamada "*LowCBNcontent*", pois contém, além do CBN, carbeto de titânio (TiC) ou nitreto de titânio (TiN) em grande quantidade. Esses materiais adicionais são responsáveis por oferecer uma maior resistência ao desgaste, porém ocasionam também uma redução da resistência à fratura.

Segundo Souza (2013), as ferramentas de CBN são, em geral, compostas de grãos de nitreto cúbico de boro unidos por um ligante metálico ou cerâmico, como o TiC ou TiN anteriormente citado. A diferença entre as classes de ferramenta reside na proporção com que esse ligante é adicionado à ferramenta, ou seja, a classe CBN_H possui em sua composição em torno de 80-95% de nitreto cúbico de boro, enquanto a CBN_L possui cerca de 40-70%.

3.2.3.3 Desgaste da ferramenta

Segundo Amorim (2002), além da dureza e tenacidade, algumas outras propriedades se mostram importantes para o material da ferramenta, como resistência ao desgaste, resistência à compressão, resistência ao cisalhamento, boas propriedades mecânicas e térmicas a altas temperaturas, resistência

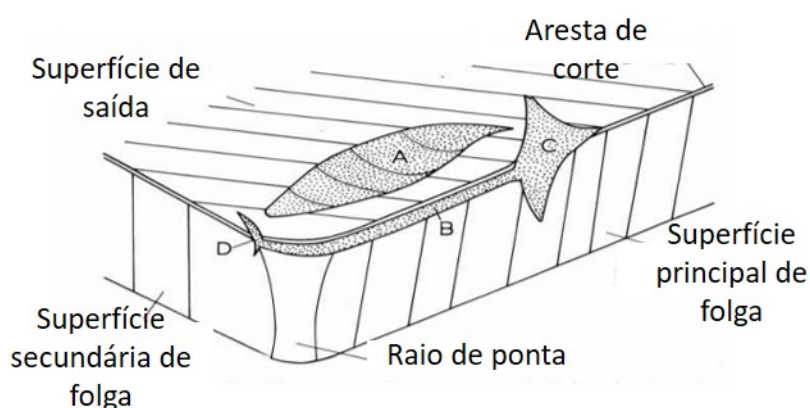
ao choque térmico, e estabilidade química. A grande importância de todas essas propriedades deriva da influência que elas tem sobre o desgaste da ferramenta, esta que também irá influenciar na produtividade do processo, na qualidade superficial e no custo final de usinagem.

Segundo Chinchankar e Choudhury (2015), são diversos os fatores que ocasionam danos na ferramenta de corte, e podem levar a falhas na mesma. Os fatores ocorrem simultaneamente, e podem ser de origem térmica, abrasiva, química e mecânica.

Os efeitos decorrentes destes fatores são divididos em efeitos superficiais (desgastes de flanco e nas superfícies da ferramenta), e efeitos volumétricos, ou avarias, como trincas e fraturas (SOUZA, 2011).

As principais formas de desgaste que ocorrem no torneamento são desgaste de flanco, de cratera, e de entalhe (esquematisados na Figura 7), e as principais avarias que podem ocorrer são a formação de aresta postiça, deformação plástica, trincas térmicas, lascamento e quebra.

Figura 7 – Esquema dos principais tipos de desgaste: A - Desgaste de cratera; B - Desgaste de flanco; C e D - Desgaste de entalhe.



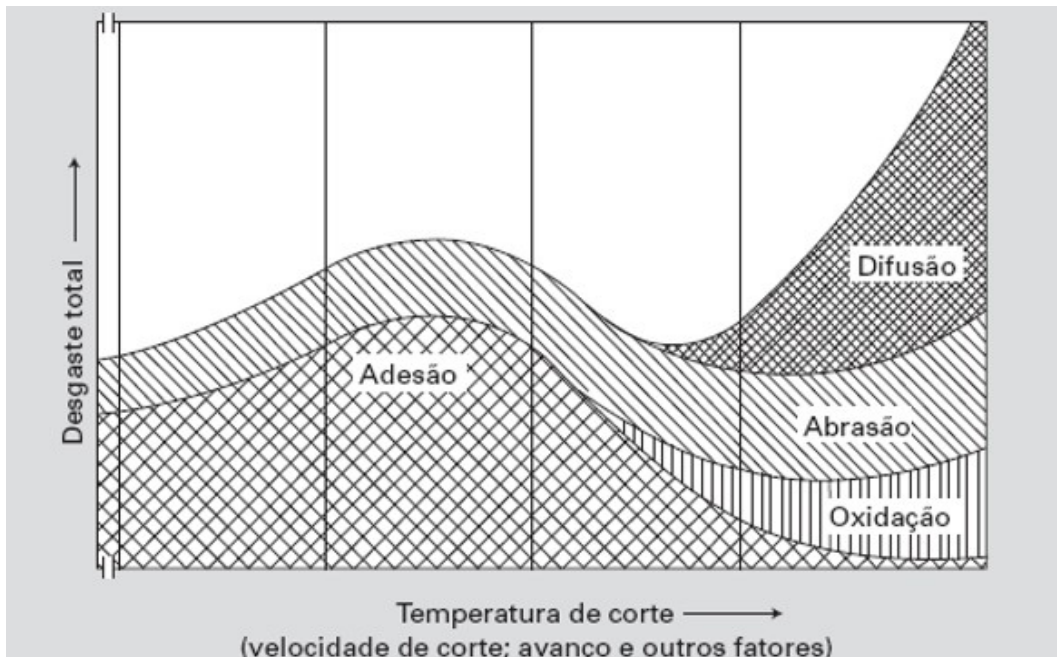
Fonte: adaptado de Dearnley e Trent (1982)

De acordo com Trent e Wright (2000), são determinados os parâmetros de medida para os principais tipos de desgaste. Para o desgaste de flanco, é realizada a medida da marca do desgaste desenvolvido na superfície da ferramenta (V_B). Já para o desgaste de cratera, é feita a medida da profundidade máxima da cratera (K_T), e da distância do centro da cratera até a aresta de corte (K_M).

Sabe-se que os tipos de desgaste antes apresentados não ocorrem sozinhos, e diversas formas de desgaste estarão presentes ao mesmo tempo. No entanto, uma das formas deve sobressair e prevalecer sobre as outras (MACHADO et al., 2011). Da mesma forma, os mecanismos de desgaste não aparecem individualmente, mas pode ocorrer predominância de algum mecanismo.

Na Figura 8 é apresentado um exemplo da dependência dos mecanismos com relação a temperatura de corte onde é possível identificar a presença de mais de um mecanismo ao mesmo tempo, mas sendo que um sempre gera uma maior influência sobre o processo. Por exemplo, para um aumento da temperatura, o mecanismo de difusão para a influenciar no desgaste, e se torna rapidamente o mecanismo de desgaste mais significativo entre os representados.

Figura 8 – Diagrama esquemático da presença dos diferentes mecanismos de desgaste e sua relação com a temperatura de corte.



Fonte: Machado et al.(2011)

3.2.4 Cavaco: tipos e formação

Um dos fatores que possui grande influência nos processos de usinagem é a formação de cavaco, afetando características do processo como desgaste de ferramentas, temperatura desenvolvida, e os esforços envolvidos no corte de um modo geral (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2006).

Por outro lado, uma vez que a formação do cavaco envolve o cisalhamento do material na região de corte, envolvendo uma grande quantidade de tensões que se desenvolvem no material, o produto resultante pode apresentar diversas formas e tamanhos, e ainda fornecer informações qualitativas e quantitativas com relação ao processo (TRENT, 1985).

Dessa forma, um estudo do cavaco e sua formação pode trazer importantes informações do processo de usinagem, assim como contribuir para o avanço da usinagem no que tange ao desenvolvimento de novas tecnologias e materiais para ferramentas de corte (MACHADO et al., 2011).

3.2.4.1 Mecanismo da formação do cavaco

Machado et al. (2011) dividem o processo de formação de cavaco em quatro etapas, sendo elas:

- Recalque inicial: no início do corte, a ferramenta toca uma porção do material da peça, e inicia a penetração, fazendo com que uma pequena porção deste material, ainda junto da peça, comece a ser comprimido contra a superfície de saída da ferramenta;
- Deformação e ruptura: progredindo o movimento da aresta de corte contra a peça, a porção de material pressionada é deformada, inicialmente por deformação elástica, e então plástica, até que em um próximo estágio, onde a pressão sobre o material é elevada o suficiente, se inicia a ruptura que normalmente ocorre por cisalhamento com formação e propagação de trinca, nos

planos de cisalhamento dos cristais do material. Estes planos irão definir, de forma instantânea, a região de cisalhamento no material, entre a peça e o cavaco, que por facilidade é considerada como um plano, chamado plano de cisalhamento. Entre o plano de cisalhamento e a direção da velocidade de corte, pode ser medido um ângulo, chamado ângulo de cisalhamento (ϕ);

- Deslizamento das lamelas: dando continuidade a penetração da ferramenta, a ruptura que ocorre da porção de material com relação a peça usinada, pode ser total ou parcial, sendo que a porção de material que resultará em cavaco, assim como sua forma e tamanho, são influenciadas por propriedades do material da peça, e também por parâmetros de corte;
- Saída do cavaco: por fim, o material rompido é deslocado para a superfície de saída da ferramenta, devido ao movimento relativo entre peça e ferramenta, ao mesmo tempo que o processo se inicia novamente com uma nova porção de material ainda aderido a peça, gerando um processo periódico.

3.2.4.2 Tipos de cavacos

Segundo Amorim (2002), a divisão dos cavacos formados em diferentes tipos é de grande importância, uma vez que durante um processo de usinagem podem ser gerados cavacos prejudiciais a um bom desempenho da ferramenta ou a boa qualidade superficial da peça.

Para Ferraresi (1977), dentre as várias classificações que podem ser feitas para tipo de cavaco, a que distingue pela morfologia é uma das mais comumente usadas, separando em cavaco contínuo, cavaco de cisalhamento, e cavaco de ruptura.

O cavaco contínuo é comum na usinagem de materiais dúcteis e homogêneos, e se forma com uma propagação lenta da trinca, de forma que não seja interrompido rapidamente. Assim, ocorre um agrupamento do material que vai sendo separado da peça, formando um cavaco de maior comprimento, que pode causar danos à peça usinada ou a ferramenta (MACHADO et al., 2011; AMORIM, 2002).

Segundo Ferraresi (1997), cavaco de cisalhamento pode ser consequência de diversos fatores como heterogeneidade do material, aumento de deformação e elevadas vibrações. Ainda segundo Ferraresi (1997), este tipo de cavaco é formado com o cisalhamento de porções do material, e posterior soldagem dos mesmos em seguida.

O cavaco de ruptura ocorre com uma ruptura total da cavaco, sem que este volte a se juntar com outros fragmentos. É o tipo mais comum de cavaco formado na usinagem de materiais frágeis, ou sob baixas velocidades de corte e grandes avanços (FERRARESI, 1977; MACHADO et al., 2011).

Para Diniz, Marcondes e Coppini (2006), o fator de maior importância na distinção do tipo de cavaco é o material que está sendo usinado, no entanto a diferença entre o cavaco contínuo e o de cisalhamento pode não ser muito clara, podendo ocorrer a transição entre um e outro dependendo das condições e parâmetros de corte utilizados, além das ferramentas empregadas.

3.2.4.3 Formas de cavacos

Embora de modo geral os cavacos possam ser classificados de acordo com sua forma em fita, helicoidais, em espiral, em lascas ou em pedaços, a norma ISO 3685 (1993) classifica mais detalhadamente

as diversas formas que um cavaco pode apresentar, como mostrado na Figura 9¹ (MACHADO et al., 2011).

Figura 9 – Classificação dos cavacos de acordo com a norma ISO 3685, de 1993

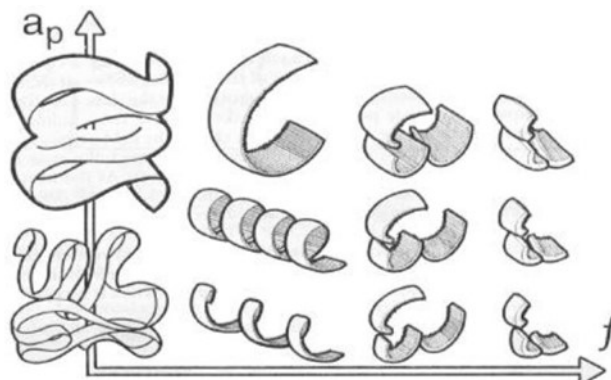
1 – Cavaco em fita	2 – Cavaco tubular	3 – Cavaco espiral	4 – Cavaco hel. tipo arruela	5 – Cavaco hel. cônico	6 – Cavaco em arco	7 – Cavaco fragmentado	8 – Cavaco tipo agulha
1-1 – Longo	2-1 – Longo	3-1 – Plano	4-1 – Longo	5-1 – Longo	6-1 – Conect.		
1-2 – Curto	2-2 – Curto	3-2 – Cônico	4-2 – Curto	5-2 – Curto	6-2 – Solto		
1-3 – Emaranhado	2-3 – Emaranhado		4-3 – Emaranhado	5-3 – Emaranhado			

Fonte: ISO 3685 (1993) apud AMORIM (2002).

De acordo com Ferraresi (1977), dentre as formas mais gerais, a normalmente recomendada é a helicoidal, uma vez que o cavaco em fita pode causar danos ao processo ou a peça, além de ocupar muito espaço e ser de difícil transporte. Quando existe atuação de um fluido de corte para retirar o material, o cavaco também pode ser na forma de lascas.

Segundo Machado (2011), assim como o tipo de cavaco, a sua forma também tem como principal fator de influência o material usinado, além dos parâmetros de corte e a forma da ferramenta utilizada. Por exemplo, é possível relacionar seu formato, de uma forma geral, com a profundidade de corte e o avanço utilizados, como é mostrado na Figura 10 (SMITH, 1989 apud MACHADO, 2011)², no entanto, dependendo do material usinado sua forma pode sofrer divergências.

Figura 10 – Relação da forma dos cavacos com a profundidade de corte e o avanço.



Fonte: SMITH (1989) apud MACHADO et al. (2011).

¹ ISO 3685. **Tool Life Testing with Single-Point Turning Tools**, 1993 apud AMORIM, H. J. **Estudo da relação entre velocidade de corte, desgaste de ferramenta, rugosidade e forças de usinagem em torneamento com ferramenta de metal duro**. Porto Alegre, RS - Brasil: [s.n.], 2002.

² SMITH, G. T. **"Advanced machining: the handbook of cutting technology"**. IFS Publications, 1989 apud MACHADO et al. **"Teoria da usinagem dos materiais"**, 2011

Uma característica importante do cavaco é que, independente da forma ou material, este sempre apresentará a parte superior com certa rugosidade, com pequenas ondulações ou fissuras periódicas, provenientes do movimento cíclico que origina a retirada de cavaco na usinagem (TRENT, 1985).

3.3 QUALIDADE SUPERFICIAL

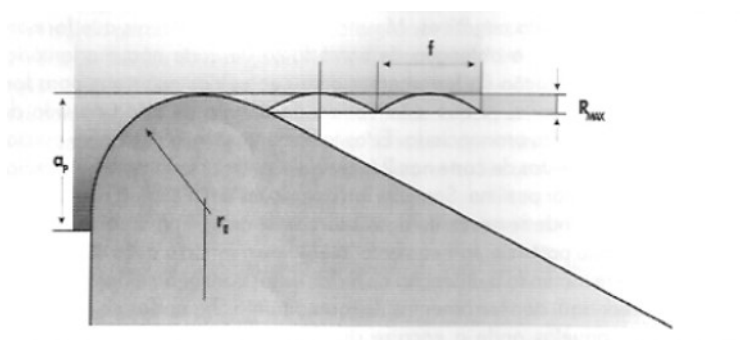
A qualidade da superfície obtida por um processo de usinagem pode ser medida pela rugosidade, que é a medida dos erros microgeométricos da superfície, o que faz com que seja um dos importantes indicadores da integridade superficial e controle de desgaste e falha da ferramenta (JIANG et al., dez. 2006). A rugosidade final é fortemente afetada por parâmetros do processo, como taxa de avanço, e pela ferramenta, tanto por sua geometria como por seu desgaste durante o torneamento de aços endurecidos (OLIVEIRA; DINIZ; URSOLINO, jul. 2009). Segundo Suresh, Basavarajappa e Samuel (2012), ainda no torneamento de aços endurecidos são importantes algumas outras variáveis como a dureza do material, os ângulos de corte, e as condições de corte.

Jiang et al. (2006) afirmam que a rugosidade é fortemente afetada pela taxa de avanço, porém somente quando esta é maior que 0,15 mm/rotação, sendo que para taxas menores a rugosidade não é influenciada. Segundo Oliveira, Diniz e Ursolino (2009), isso ocorre devido a um maior fluxo de material na superfície usinada para menores taxas de avanço, sendo que nesses casos a rugosidade é mais afetada pelas mudanças na geometria da ferramenta acarretadas pelo desgaste, principalmente na aresta de corte secundária.

Apesar de normalmente se obter um valor bem maior que o mínimo, segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2006), o menor valor de rugosidade máxima possível de se obter em um processo de torneamento, é dependente da relação entre o avanço e o raio de ponta, da forma descrita na Equação 4. Da mesma forma, é possível observar o perfil teórico da rugosidade no torneamento na Figura 11, que não considera efeitos como vibrações e desgaste da ferramenta, e sua influência na rugosidade.

$$R_{max\ teor} = \frac{f^2}{8r_e} \quad (4)$$

Figura 11 – Perfil de rugosidade teórico obtido em um processo de torneamento.



Fonte: Diniz, Marcondes e Coppini (2006).

É de grande importância o acompanhamento da rugosidade no torneamento e o seu controle através dos parâmetros de corte, pois a característica superficial da peça usinada pode influenciar em certas propriedades do material e custos de produção (ASILTURK; NESELI, mai. 2012).

Dessa forma, pode-se definir alguns parâmetros a serem medidos na superfície usinada, a fim de avaliar a qualidade superficial através da rugosidade. Alguns desses parâmetros são o Desvio aritmético médio (R_a) e a Altura total do perfil (R_t).

É importante ainda definir o comprimento da amostragem (l_r ou "cut-off"), que é o comprimento da amostra utilizado para identificar as características do perfil que está sendo analisado de forma a considerar apenas os erros microgeométricos, e não as ondulações e desvios macrogeométricos; e o comprimento de avaliação (l_m), que é o comprimento da amostra que está sendo analisado, podendo conter um ou mais comprimentos de amostragem. O comprimento de avaliação recomendado é de cinco vezes o comprimento de amostragem (MACHADO et al., 2011; NUNES, 2011).

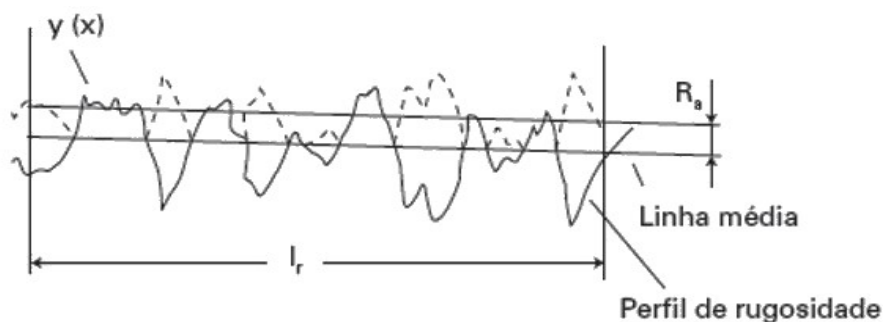
3.3.1 Desvio aritmético médio (R_a)

Este é um parâmetro de amplitude usado para medição de rugosidade, ou seja, é determinado apenas por meio da altura dos picos e profundidade dos vales, sem considerar espaçamentos entre eles (NUNES, 2011). É um dos parâmetros mais utilizados, e pode ser definido matematicamente como o valor da média aritmética entre todos os desvios da linha média encontrados no perfil de rugosidade, este que faz parte de um comprimento de medição especificado, assim como esta representado na Equação 5 (NBR ISO 4287, 2002 apud NUNES, L. T. 2011).³

$$R_a = \frac{1}{l_m} \int_0^{l_m} |y(x)| dx \quad (5)$$

A linha média, ou linha de centro, é a divisão que resulta em um mesmo somatório de área tanto abaixo quanto acima da mesma. O processo de medição descrito na Equação 5 está esquematizado na Figura 12.

Figura 12 – Parâmetro de rugosidade R_a .



Fonte: adaptado de Machado et al. (2011).

Esta forma de medição de rugosidade possui algumas vantagens como sua grande facilidade, é aplicável à maioria dos processos de fabricação, e está presente na maioria dos equipamentos de medição, por isso é o parâmetro mais utilizado pela indústria (PIRATELLI, 2011).

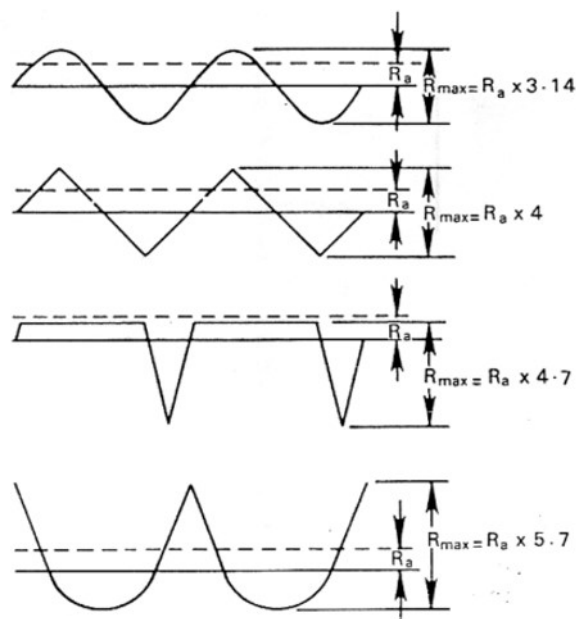
³ NBR ISO 4287. **Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros de rugosidade.** Rio de Janeiro, RJ - Brasil, 2002. 18p apud NUNES, L. T. **Análise estatística da influência dos parâmetros de corte na rugosidade no torneamento do aço microligado DIN 38MnSiVS5.** Uberlândia, MG - Brasil, 2011

No entanto, não é aconselhável que, em um estudo de usinagem, seja utilizado somente este parâmetro pois apresenta também desvantagens importantes (PIRATELLI, 2011):

- Defeitos pontuais ou atípicos não são evidenciados, podendo passar despercebidos;
- Não ocorre distinção entre picos e vales na medição;
- O seu valor não fornece informações sobre a forma das irregularidades.

Um exemplo destes problemas citados por Piratelli (2011) pode ser observado na Figura 13⁴, onde diferentes tipos de superfícies, com características importantes diferentes, fornecem o mesmo valor de R_a , mascarando suas reais diferenças.

Figura 13 – Diferentes superfícies que apresentam o mesmo valor para o parâmetro R_a .



Fonte: Dagnall (1986) apud Nunes (2011).

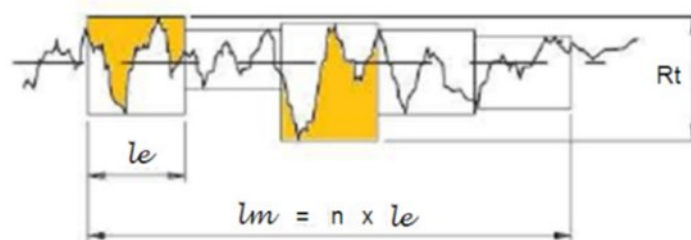
3.3.2 Altura total do perfil (R_t)

O parâmetro R_t de rugosidade é resultante da soma das alturas do maior pico e do maior vale encontrados no perfil envolvido pelo comprimento de avaliação (Figura 14), ou seja, este parâmetro é fortemente influenciado por defeitos atípicos ou irregularidades na superfície, que poderiam passar despercebidos pela medição apenas do parâmetro R_a (MACHADO et al., 2011).

Por um lado, esse parâmetro fornece informações sobre a deterioração máxima da superfície, e é importante para determinar falhas no processo. No entanto, por não ser tão comum como o R_a , não é fornecido por todos os equipamentos, e além disso, pode levar a resultados incorretos sob a presença de riscos feitos após o processo de usinagem. Dessa forma, o parâmetro R_t deve ser utilizado de forma complementar ao R_a (PIRATELLI, 2011).

⁴ DAGNALL, H. **Exploring Surface Texture**. Inglaterra, 1986 apud NUNES, L. T. **Análise estatística da influência dos parâmetros de corte na rugosidade no torneamento do aço microligado DIN 38MnSiV5**. Uberlândia, MG - Brasil, 2011

Figura 14 – Forma de medição do parâmetro de rugosidade R_t .



Fonte: Piratelli (2011)

3.4 VIBRAÇÃO

A definição de vibração trata como o movimento dinâmico de um ponto em torno da sua posição de equilíbrio estático (SOUTO, 2007). Uma vez que todos os corpos apresentam a capacidade de armazenar energia, podem sofrer um excitação interna e possuem certa elasticidade, a existência de vibrações é inerente a qualquer processo de fabricação (MAIA, 2009).

Apesar de ser foco de diversos pesquisadores por mais de um século, a vibração mecânica na usinagem ainda é um dos grandes obstáculos para se atingir maior produtividade e qualidade na maioria dos processos, como torneamento, fresamento e furação (SIDDHPURA; PAUROBALLY, out. 2012).

Ainda segundo Siddhpura e Paurobally (2012), as vibrações na usinagem são ocasionadas pela movimentação relativa e cíclica entre a peça e a ferramenta de corte, e possuem um caráter destrutivo, ocasionando peças com baixa qualidade superficial, ruídos, além de intensificar o desgaste das ferramentas diminuindo sua vida, e também a produtividade do processo.

Pode-se diferenciar no processo de torneamento, três tipos de vibrações que coexistem: vibrações livres, vibrações forçadas, e vibrações auto-excitadas (ou *chatter*). As vibrações livres partem de impulsos transferidos para a máquina-ferramenta, ou do contato entre a peça e a ferramenta, e possuem uma amplitude decrescente. Já as vibrações forçadas são decorrentes de movimentos cíclicos decorridos de desalinhamentos da máquina-ferramenta, mantendo-se com amplitude constante (GRZESIK, 2008).

De acordo com Siddhpura e Paurobally (2012), as vibrações livres e forçadas podem ser identificadas e eliminadas do processo, mas as vibrações auto-excitadas são as mais danosas, principalmente por ainda não serem completamente entendidas devido à sua grande complexidade.

As vibrações auto-excitadas, ou trepidações, ocorrem devido a instabilidades no processo, como a remoção de cavaco, atrito entre a peça e ferramenta, efeitos termomecânicos e formação de faces onduladas, gerando um crescimento da amplitude até um valor constante, e uma frequência próxima à frequência natural do sistema (VITÓRIA, 2016).

O acabamento superficial da peça usinada pode ser relacionado com as vibrações presentes no processo. Desconsiderando o efeito de qualquer vibração no sistema durante o torneamento, tem-se que a rugosidade final é função apenas do avanço e do diâmetro da ferramenta, uma vez que o movimento da ferramenta em relação à peça é composto apenas pela velocidade de corte e o avanço. No entanto, quando a vibração é adicionada a este movimento, aparece uma outra componente normal à direção de avanço, resultando alterações no perfil de rugosidade e piora na qualidade superficial (POLLI, 2005).

Assim, como podem ser monitoradas durante a usinagem, a análise de vibração pode ser um importante parâmetro para qualidade superficial e boa execução do processo, contribuindo para uma maior produtividade e diminuição de custos com peças descartadas e diminuição da vida das ferramentas (ALVES et al., 2010).

Polli (2005), cita a influência de alguns parâmetros de corte na estabilidade do processo de fresamento, mas que também podem ser aplicados para o torneamento, como por exemplo:

- Profundidade de corte: o processo é estável até um valor limite da profundidade, se tornando instável ao ultrapassar esse limite;
- Velocidade de corte: para velocidades muito baixas as vibrações auto-excitadas tendem a diminuir, devido ao efeito de um processo de amortecimento. Já para velocidades elevadas, ocorre uma diferença de fase das vibrações de cortes sequenciais;
- Avanço: normalmente a influência do avanço não é muito grande sobre o processo, mas para avanços maiores pode-se observar uma diminuição das vibrações destrutivas no torneamento.

3.5 EMISSÃO ACÚSTICA (EA)

A análise do sinal de vibração no processo de torneamento é realmente a mais utilizada na indústria, mas devido a importância que esse monitoramento possui para garantir a produtividade, não se deve utilizar apenas uma técnica (PASSOS et al., 2010). Uma outra opção que vem ganhando destaque nos últimos anos é a análise de sinais de emissão acústica, principalmente graças a diminuição nos custos de equipamentos para esse tipo de análise (CHOUDHURY; TANDON, jan. 2000).

Enquanto um sensor de vibração tradicional abrange frequências de 0 a 50 kHz aproximadamente, os sensores de emissão acústica abrangem uma gama de frequências muito maior, que geralmente está entre 20 kHz e 1MHz (COCKERILL et al., 2016). Esse fato, faz com que seja possível detectar informações associadas a deformações plásticas do material e a processos de desgaste (HASE; MISHINA; WADA, jul. 2012).

Inicialmente, o método de monitoramento dos sinais de emissão acústica foi desenvolvido apenas como um método não destrutivo para se detectar falhas ou propagação de trincas nos materiais. Ao passo que é possível acompanhar mudanças estruturais nos materiais dependentes de deformação, esse método evoluiu para um ensaio que pode ser realizado durante a usinagem, servindo como controle do processo de desgaste da ferramenta em tempo real (HASE; MISHINA; WADA, jul. 2012).

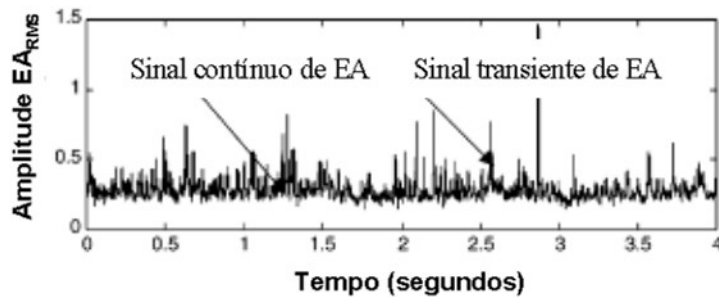
Os sinais de emissão acústica são produzidos quando um material sofre uma fratura ou deformação e, como resultado da acomodação dos átomos na estrutura, são geradas ondas elásticas de tensão características que se propagam pelo material (WIDODO et al., abr. 2009). De acordo com Tan, Irving e Mba (2007), impactos, fadiga ciclica, fricção, turbulências, perda de material e retirada de material então entre as causas de sinais de emissão acústica no torneamento.

Algumas vantagens que podem ser observadas com relação ao monitoramento da emissão acústica são (TAN; IRVING; MBA, jan. 2007):

- Como a EA não é direcional, apenas um sensor já é suficiente para captar as informações durante o processo, não sendo necessário um sensor para cada eixo;
- Permite detectar defeitos e eventos no seus estágios iniciais, por como é um sinal produzido à nível microscópico, é muito sensível a qualquer alteração na estrutura;
- O sinal de EA não é afetado por ruídos típicos do processo mecânico (<20 kHz), nem por ressonâncias da estrutura, pois só detecta ondas elásticas de alta frequência.

Pode-se distinguir dois tipos de sinal de emissão acústica, como sinalizado na Figura 15, sendo que o chamado sinal contínuo possui uma amplitude relativamente constante e maior duração, enquanto que o sinal de pico, ou transiente, possui uma elevada amplitude, mas por um pequeno período de tempo. Pode-se associar ainda cada tipo de sinal a certas características do processo: o sinal contínuo é associado na maioria das vezes às deformações plásticas, que ocorrem mais intensamente em materiais de maior ductilidade; por outro lado, o sinal de pico possui relação com defeitos, propagação de trincas e choques com o cavaco (SOUTO, 2007).

Figura 15 – Caracterização de sinal de emissão acústica.



Fonte: Li (2002).

3.6 POTÊNCIA DE USINAGEM

Segundo Machado et al. (2011), pode-se definir como potência de usinagem a potência consumida pela força de usinagem, ou ainda, a soma das potências que cada componente da força de usinagem necessita. Dessa forma, a potência é composta apenas pelas componentes de corte e de avanço da força de corte, e assim é possível escrever as equações para a potência de corte (Equação 6) e potência de avanço (Equação 7):

$$P_C = \frac{F_C \cdot v_c}{6,0 \times 10^4} \quad (6)$$

$$P_f = \frac{F_f \cdot v_f}{6,0 \times 10^7} \quad (7)$$

Utilizando os valores das forças em unidades de Newtons [N], e as velocidades em [m/min], o valor calculado para a potência é dado em [kW].

De acordo com Souza (2011), como os valores da potência de corte são normalmente muito superiores aos de potência de avanço, esta última pode ser desprezada nos cálculos, aproximando a potência total do motor da máquina-ferramenta a:

$$P_{motor} = \frac{P_C}{\eta} \quad (8)$$

Onde η é o rendimento do sistema de transmissão utilizado. Para sistemas que possuem motor acoplado, considera-se $\eta = 0,80$ a $0,85$, já para sistemas que utilizam engrenagens ou correias, esse valor varia entre $\eta = 0,65$ a $0,85$ (MACHADO et al., 2011).

Através da medida de parâmetros relacionados ao motor da máquina-ferramenta, é possível realizar medidas das condições de corte e da ferramenta (TETI et al., 2010). Uma vez que a potência de corte depende diretamente a força de corte, e a força de corte pode ser descrita pela Equação 9 (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2006), é possível afirmar que os fatores que influenciam na pressão específica de corte (K_s), conseqüentemente irão influenciar na potência final consumida.

$$F_C = K_s \cdot A \quad (9)$$

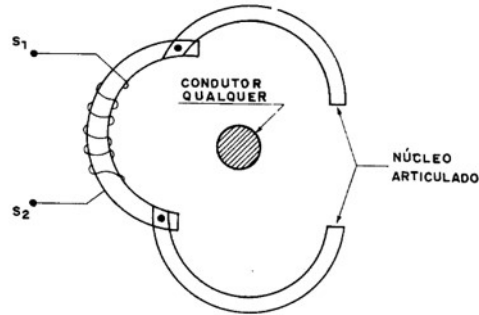
Alguns desses fatores de influência da pressão específica de corte são a geometria da ferramenta, e o estado de afiação da ferramenta. Por exemplo, sabe-se que com a progressão do desgaste de flanco na usinagem, o atrito entre a peça e a ferramenta cresce, levando a um aumento da pressão específica de corte, e conseqüentemente a potência de corte (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2006). Isso faz com que o acompanhamento dos valores de potência em um processo de usinagem seja importante no monitoramento da vida da ferramenta de corte.

De forma experimental, durante o processo de usinagem, o valor de potência pode ser obtido através da tensão e corrente elétrica consumida. Para isso, é necessário medir a diferença de potencial, através de um voltímetro, e a corrente, por meio de um sensor de Efeito Hall ou do tipo TC (transformador de corrente). A corrente também pode ser mensurada por amperímetros dentro do circuito, mas essa forma de medição pode ocasionar problemas de intrusão em máquinas-ferramentas, o que torna os sensores não intrusivos mais adequados (MACHADO et al., 2011).

Os sensores que utilizam transformadores de corrente são dispositivos que, a partir de efeitos da indução magnética, podem ser utilizados para realizar a medição da corrente que passa através de um condutor, e conseqüentemente da potência consumida pela máquina. Apesar de sua construção robusta e formato simples, esse tipo de sensor de corrente ainda é muito utilizado, principalmente para aplicações industriais, e com resultados bastante satisfatórios (AVELINO, 2012). Um esquema de sensor TC pode ser observado na Figura 16.

A maior vantagem de se medir parâmetros relacionados ao motor para estudo do processo ao invés de parâmetros na região do corte em si, é a garantia de que os instrumentos de medição, ou sensores, não irão interferir no processo de usinagem. Além disso, a potência de usinagem pode ser medida em muitas operações de usinagem de forma bastante econômica (TETI et al., 2010).

Figura 16 – Transformador de corrente do tipo núcleo dividido



Fonte: SAELPA (2002).

3.7 PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS

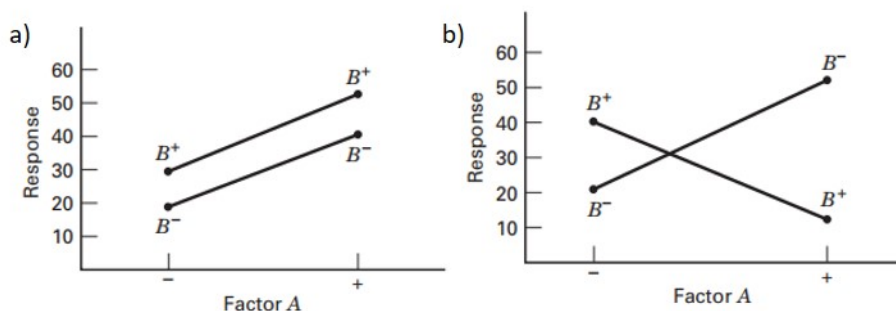
Segundo Nunes (2011), para que a análise de um experimento seja confiável, é necessário utilizar algum método científico de planejamento de experimentos, assim como utilizar um método estatístico para estudo dos resultados.

Utilizando o planejamento de experimentos adequado ao estudo, pode-se diminuir o número total de experimentos, economizando tempo e recursos, obter os dados de forma uniforme para todas as variáveis que estão sendo aplicadas, e ainda relacionar de forma confiável os fatores de influência e as variáveis de saída do processo (CHOUDHURY; TANDON, jan. 2000).

Um dos métodos mais eficientes para realizar o estudo da influência de dois ou mais fatores sobre uma resposta é através do planejamento fatorial. Utilizando o método fatorial completo, a cada réplica do experimento todas as combinações possíveis entre os níveis dos fatores são realizadas. Dessa forma, é possível identificar o efeito do fator sobre a resposta quando, ao variar um nível daquele fator, ocorrer uma mudança na variável de saída, sendo esse efeito chamado de efeito principal (MONTGOMERY, 2013).

Quando ocorre variações na resposta ao mudar o nível de um fator, mas essa variação não é a mesma para diferentes níveis de outro fator, existe uma interação entre os fatores. Essa diferença entre um experimento com ou sem interação pode ser melhor percebida no exemplo da Figura 17, onde ocorre variação de dois fatores, A e B, com dois níveis cada um, o alto (+) e o nível baixo (-).

Figura 17 – a) Exemplo de experimento fatorial sem interação entre os fatores A e B. b) Exemplo de experimento fatorial com interação entre os fatores.



Fonte: adaptado de Montgomery (2013)

Ainda para a Figura 17, nota-se que para o primeiro caso não ocorre interação, já que o comportamento de B é semelhante independente do nível de A. Diferentemente, no segundo caso, ao mudar o nível de A, o comportamento de B também se altera devido a interação existente entre os fatores (MONTGOMERY, 2013).

3.7.1 Análise estatística

Dentre os métodos de análise estatística que podem ser empregados em um estudo, a Análise de Variância (ANOVA) pode ser muito útil na determinação de influências dos parâmetros experimentais nos dados de saída obtidos, facilitando a interpretação dos resultados. Além da ANOVA, uma outra forma importante de avaliar os dados é através da relação sinal-ruído, ou "*signal-to-noise (S/N) ratio*" (GOPALSAMY; MONDAL; GHOSH, ago. 2009).

Para que o método de análise de variância seja válido para a análise, algumas condições devem ser satisfeitas (BOX e HUNTER, 1978 apud NUNES, 2011)⁵

- É necessário que os efeitos sejam independentes, assim como seus erros;
- Deve ocorrer uma homogeneidade da variância entre as repetições do experimento;
- A distribuição dos erros dos efeitos deve obedecer a uma curva normal.

Com os resultados do experimento, é então construída a tabela de análise da variância, que consiste em somas de quadrados e graus de liberdade. O valor de F que é obtido através da tabela de ANOVA, é a razão entre o quadrado médio (razão da soma de quadrados e os graus de liberdade) e o erro experimental. Para que o fator analisado seja significativo dentro do intervalo de confiança adotado, é necessário que seu valor seja superior ao valor de F tabelado, confirmando a influência do fator, ou da interação entre fatores, na resposta do modelo testado (SURESH; BASAVARAJAPPA; SAMUEL, ago. 2012).

⁵ BOX, G. E. and HUNTER, J.S., **Statistics for Experiments**, EUA, 1978 apud NUNES, L. T. **Análise estatística da influência dos parâmetros de corte na rugosidade no torneamento do aço microligado DIN 38MnSiVS5**, Uberlândia - MG, Brasil, 2011.

4 METODOLOGIA

Nos itens a seguir, são descritos os métodos de realização da pesquisa para cada etapa, até a análise final dos resultados, assim como os equipamentos utilizados.

4.1 PREPARAÇÃO DO CORPO DE PROVA

O corpo de prova utilizado foi de aço ABNT 4340, temperado e revenido. No início dos ensaios, o corpo de prova possuía um diâmetro de 100 mm e comprimento de 210 mm.

O aço, de composição química como descrita na Tabela 2, foi tratado termicamente da seguinte forma, seguindo orientações do catálogo do material, da GGD Metals:

Tabela 2 – Composição química aproximada do aço ABNT 4340 utilizado

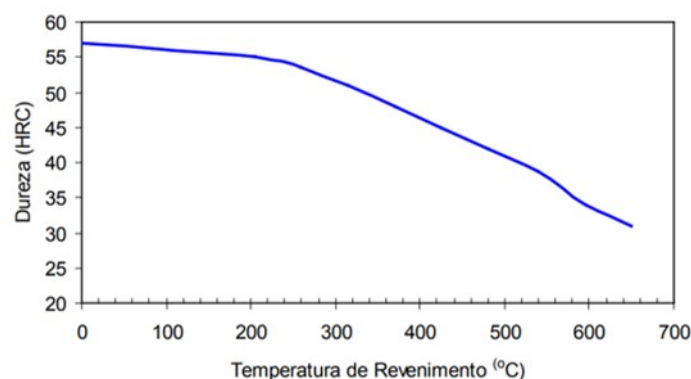
Elemento	Composição (%)
C	0,38 - 0,43
Si	0,15 - 0,30
Mn	0,60 - 0,80
Cr	0,80 - 1,10
Ni	1,65 - 2,00
Mo	0,20 - 0,30

Fonte: Adaptado do catálogo de especificação técnica do material - GGD Metals (2015).

- **Têmpera:** foi realizada à 850°C para austenitização por 4 horas, devido ao diâmetro de 100mm da peça, pois é recomendado 1 hora para cada 25 mm de espessura, adicionando 1 hora para cada 25mm adicionais. Posteriormente foi realizado o resfriamento em óleo;
- **Revenimento:** após a têmpera, quando o material resfriou até 70°C, foi dado início o processo de revenimento. Para esse processo, foi mantida a temperatura de 150°C por 2 horas (mínimo recomendado, sendo pelo menos 1 hora para cada 25mm de espessura), para o alívio de tensões. O tempo e a temperatura foram escolhidos de forma que, ao final do processo, o material possuísse uma dureza de aproximadamente 56 HRc.

Como citado, o processo de revenimento foi realizado de forma a proporcionar uma dureza final de 56 HRc ao material, equivalente a aproximadamente 577 HB (613 HV), conforme a curva da Figura 18.

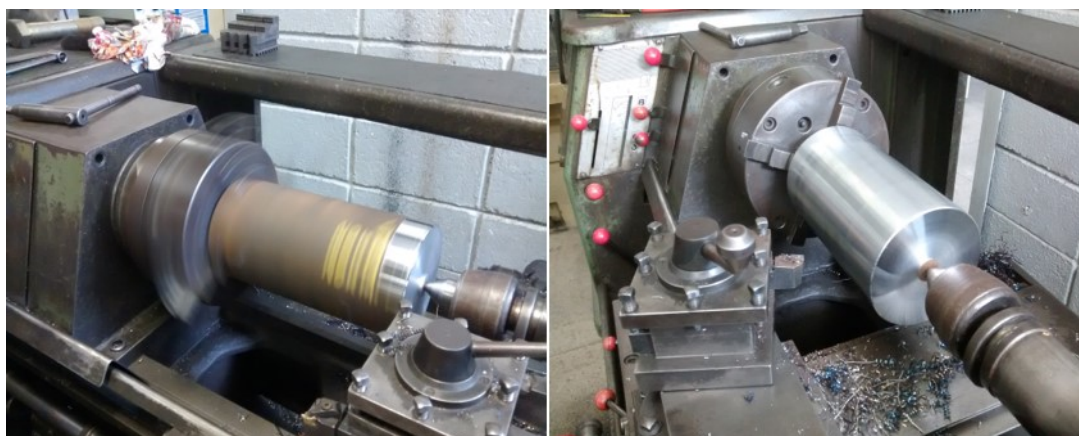
Figura 18 – Curva de revenimento, para têmpera a partir de 850°C.



Fonte: Adaptado do catálogo de especificação técnica do material - GGD Metals (2015).

Foi realizado um processo de preparação da superfície do material, através do próprio processo de torneamento. A superfície inicial, e a final a essa preparação estão ilustradas na Figura 19.

Figura 19 – Material antes da preparação (à esquerda), e material após a preparação (à direita).

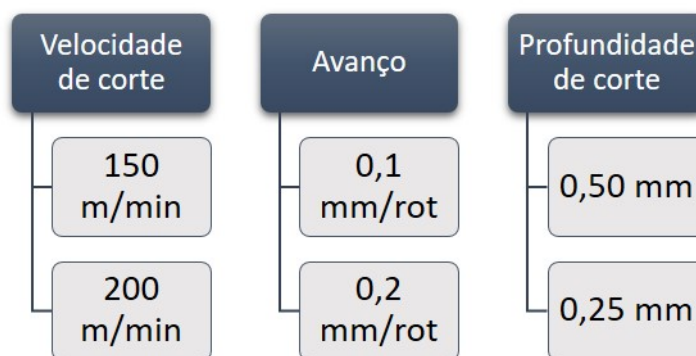


Fonte: Produção do próprio autor.

4.2 PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTO

Para o planejamento de experimentos, foi utilizada a metodologia fatorial completo 3^2 (três fatores, com dois níveis cada fator), conforme esquematizado na Figura 20, que totaliza 8 ensaios para cada repetição realizada. Para o fator avanço (f), foram utilizados os valores de 0,1 e 0,2 mm/rot. Já para o fator velocidade de corte (V_c), os valores utilizados foram de 150 e 200 m/min. Finalmente, para o fator profundidade de corte (a_p), os níveis adotados foram 0,25 mm e 0,50 mm.

Figura 20 – Esquema do planejamento de experimentos fatorial completo 3^2 utilizado.

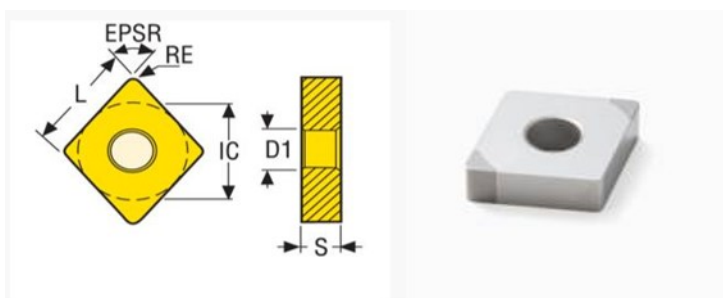


Fonte: Produção do próprio autor.

4.3 FERRAMENTAS DE CORTE

As ferramentas de corte utilizadas foram ferramentas de nitreto cúbico de boro (CBN), produzidas pela empresa Seco Tools (Figura 21). O código da ferramenta é CNGA120408E25-L1-U CBN170. Cada ferramenta possui quatro arestas cortantes, ângulo de ponta de 80 graus, classe CBN170, classe tipo PCBN. O comprimento teórico da aresta de corte é de 12,9 mm, e o comprimento efetivo da aresta de corte 0,5 mm. O raio de ponta é igual a 0,8 mm, e a espessura é igual a 4,8 mm (SECO, 2017).

Figura 21 – Desenho (à esquerda) e fotografia (à direita) da ferramenta de corte de CBN utilizada, sendo $EPSR$ o ângulo de ponta, IC o diâmetro do círculo inscrito, l o comprimento teórico da aresta de corte, LE o comprimento efetivo da aresta de corte, RE o raio de ponta, e s a espessura da pastilha.



Fonte: Secotools (2017).

4.4 PARÂMETROS DE USINAGEM E ENSAIOS

Os ensaios de torneamento foram realizados no Laboratório de Estudo da Usinagem na Unesp - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, utilizando um Centro de Torneamento da marca ROMI, linha ROMI GL, modelo 240M (Figura 22), para o qual foi montado um sistema de aquisição de dados com os sensores de potência, emissão acústica e vibração.

Os parâmetros de usinagem utilizados foram estabelecidos com base na recomendação do fabricante das ferramentas, e variaram da seguinte forma:

Figura 22 – Centro de torneamento da ROMI, linha ROMI GL, modelo 240M do Laboratório de Estudo da Usinagem da Unesp, câmpus de Guaratinguetá.



Fonte: Produção do próprio autor.

- Velocidade de corte = 150 ou 200 m/min;
- Produndidade de corte = 0,5 ou 0,25 mm;
- Avanço = 0,1 ou 0,2 mm/rot;
- Percurso de avanço (L_f) = 46 mm;
- Percurso de corte inicial (L_c) = 144,5 m ($f = 0,1$) e 72,3 m ($f = 0,2$).

Os parâmetros de velocidade de corte e avanço foram variados conforme o planejamento de experimentos adotado, sendo executados ensaios com todas as combinações dessas condições, em réplica, totalizando 16 ensaios. Não foi utilizado fluido de corte, sendo realizado o torneamento a seco.

4.5 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Para aquisição dos dados de vibração, emissão acústica e potência de usinagem durante os ensaios, foi utilizado um módulo de aquisição de dados (Figura 23), constituído pelas sensores de potência, vibração e emissão acústica, por um módulo de canais, e uma placa de aquisição de dados, marca National Instruments, modelo NI PCI 6220, que transmitia os dados para o software LabView 7.1, também da National Instruments.

Dessa forma, os sinais analógicos captados pelos sensores eram recebidos pela placa de aquisição de dados, a qual tinha a função de transformá-los em sinais digitais, para serem interpretados pelo software e serem armazenado, durante a execução dos ensaios, para posterior análise estatística.

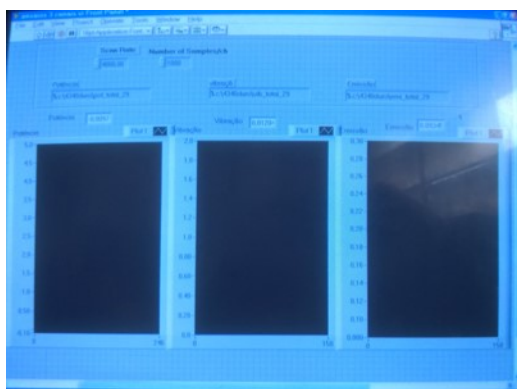
Figura 23 – Módulo de aquisição de dados, ao qual estavam conectados os sensores e a placa de aquisição de dados.



Fonte: Produção do próprio autor.

A tela de aquisição de dados está representada na Figura 24, da mesma forma que podia ser observada durante os ensaio, para que pudesse ser acompanhado em tempo real o desgaste e possíveis avarias das ferramentas.

Figura 24 – Tela do programa de aquisição de dados desenvolvido, onde podem ser observados a potência, vibração e emissão acústica durante o andamento do ensaio.



Fonte: Produção do próprio autor.

4.5.1 Vibração

Os sinais de vibração são proporcionais a sinais de tensão, e para que possa ser feita a análise estatística foi utilizada uma equação de conversão particular do sensor utilizado e fornecida pelo fabricante, como descrita na Equação 10.

$$Vib. = \frac{25 \cdot V_{cc}}{8} [mm/seg] \quad (10)$$

Os dados de vibração foram obtidos por meio do sensor de vibração da marca Vibro Control, modelo TV-100 (Figura 25).

Figura 25 – Sensor de vibração utilizado.



Fonte: Produção do próprio autor.

4.5.2 Emissão Acústica

Para aquisição dos sinais proporcionais de emissão acústica, foi utilizado um módulo de emissão acústica (Figura 26), constituído por um sensor piezoelétrico, modelo R15A, e um amplificador de sinal elétrico com saída retificada em RMS, ambos da marca Physical Acoustic Corporation.

Figura 26 – Módulo de emissão acústica utilizado, sendo 1) e 2) o sensor piezoelétrico, e 3) o amplificador de sinal.



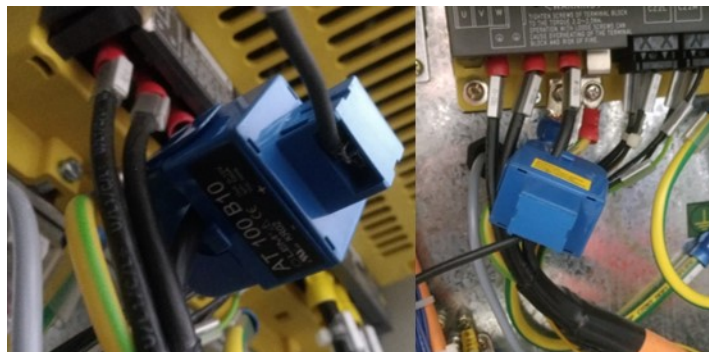
Fonte: Produção do próprio autor.

O sinal elétrico retificado é correspondente à unidade V_{cc} de tensão, e é amplamente empregado nessa grandeza para expressar a emissão acústica, não havendo transformações para outras unidade.

4.5.3 Potência de usinagem

Para a aquisição da potência consumida pelo motor do centro de torneamento, foram utilizados sensores de potência do tipo TC, da marca LEM, sendo o modelo AT 100 B10. Sua montagem na máquina pode ser observada na Figura 27.

Figura 27 – Sensor de potência do tipo TC utilizado, montado no equipamento.



Fonte: Produção do próprio autor.

Os sinais de potência obtidos em sinais de tensão (Volts), foram convertidos através da Equação 11, para posterior análise estatística.

$$Pot. = V_{cc} \cdot 220 \cdot 0,92 \cdot 10 \cdot \sqrt{3} \quad [Watts] \quad (11)$$

A Equação 11 deriva da equação da potência ativa para motores trifásicos (P_{at3F}), descrita na Equação 12, onde V é a tensão, I é a corrente elétrica, e ϕ é o ângulo de defasagem entre tensão e corrente (MACHADO et al., 2011).

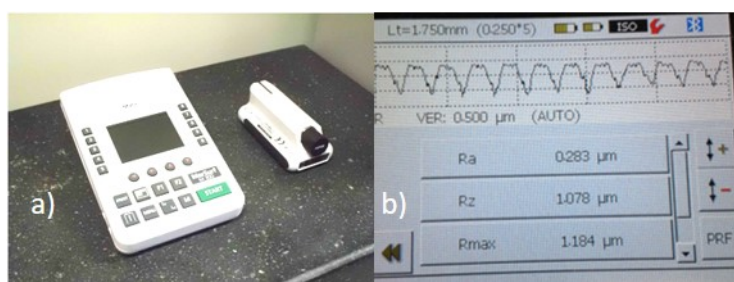
$$P_{at3F} = V \cdot I \cdot \sqrt{3} \cdot \cos\phi \quad [Watts] \quad (12)$$

Para o sensor utilizado, o sinal obtido V_{cc} é proporcional à corrente por um fator 10 ($I = V_{cc} \cdot 10$), a tensão utilizada foi de 220 V, e o cosseno do ângulo de defasagem é igual a 0,92.

4.6 RUGOSIDADE

Para a medição de rugosidade, no intervalo entre os ensaios, foi utilizado o rugosímetro portátil da marca Mahr, modelo MarSurf M300 (Figura 28). Este equipamento fornece os valores de R_a e R_t , por meio da passagem de um apalpador pela superfície usinada, e o ensaio de rugosidade foi realizado em triplicata para cada ensaio de torneamento, para diferentes regiões da superfície usinada.

Figura 28 – Rugosímetro da marca Mahr, modelo MarSurf M300 (a), e imagem da tela do rugosímetro durante ensaio (b).



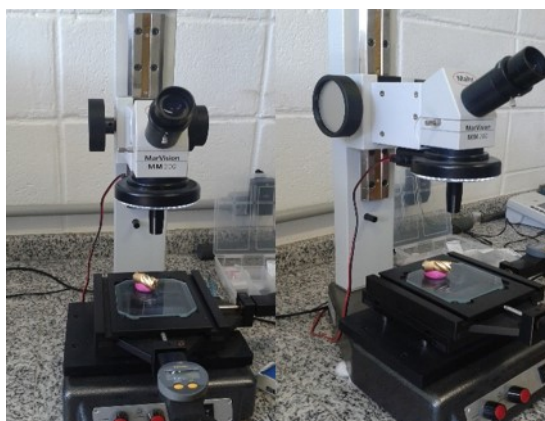
Fonte: Produção do próprio autor.

O *cut-off* utilizado foi de 0,8 mm, escolhido com base na norma NBR 6405/1988, considerando o parâmetro de rugosidade R_a entre 0,1 e 2,0 μm .

4.7 DESGASTE DA FERRAMENTA

O desgaste das ferramentas foi avaliado de forma quantitativa, com a medição do desgaste de flanco com o microscópio de medição da marca Mahr, modelo MarVision MM200 (Figura 29); e também de forma qualitativa, com a realização de imagens de microscopia, utilizando estereomicroscópio marca Carl Zeiss, modelo Stemi 2000 (Figura 30) e uma câmera também da marca Carl Zeiss, modelo AxioCam ICc3, com uma ampliação de 20 vezes.

Figura 29 – Microscópio de medição da marca Mahr, modelo MarVision MM200.



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 30 – Estereomicroscópio da marca Carl Zeiss, modelo Stemi 2000.



Fonte: Produção do próprio autor.

4.8 ANÁLISE DE CAVACO

Para análise visual do cavaco, a cada ensaio foi coletado o respectivo cavaco gerado. Posteriormente, foram realizadas imagens de microscopia, com o mesmo equipamento utilizado para fotografar o desgaste das ferramentas (Figura 30), utilizando ampliação de 10 vezes.

Cada cavaco foi classificado de acordo com sua morfologia e seu formato, para tentar relacionar essas características com o processo e com os dados de desgaste, integridade superficial, e também com a potência, vibração e emissão acústica.

4.9 TRATAMENTOS ESTATÍSTICOS

Para tratamento estatístico dos dados, foi utilizado o software Minitab 17, da Minitab Inc. de forma a realizar o estudo fatorial completo com análise de variância ANOVA, conforme o planejamento de experimentos previamente realizado.

Os dados de potência, EA e vibração foram captados a uma taxa elevada, registrando vários pontos por segundo. Dessa forma, para facilitar a análise, foi desenvolvida uma programação no software MatLab da MathWorks que tornou possível calcular o valor médio da resposta, apenas para a região de dados que corresponde efetivamente ao ensaio, além de determinar os valores máximos e mínimos do ensaio. Dessa forma, foi possível utilizar estes valores médios no Minitab para a análise de variância.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para avaliar os fatores que possuem influência no processo, foi realizada a ANOVA para cada variável resposta obtida (rugosidade, emissão acústica, vibração e potência), realizando a análise para cada caso, e em seguida uma análise do processo como um todo, considerando as possíveis interações entre variáveis.

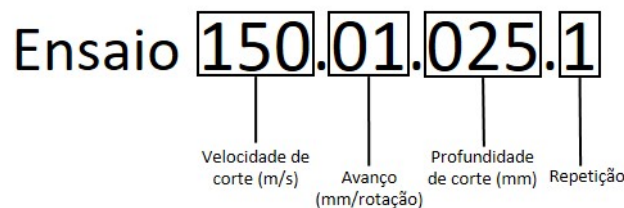
Para o estudo do desgaste das ferramentas a análise foi visual, destacando algumas imagens que necessitem de maior atenção, e quantitativa por meio dos valores medidos de desgaste de flanco.

Para análise do cavaco o estudo é por meio visual apenas, com destaque de algumas imagens.

Dessa forma, nos itens a seguir, serão abordadas as análises estatísticas, sendo que para cada item será apresentada a tabela resultante da análise de variância, os gráficos de efeitos principais e os de interações entre os fatores, assim como os comentários pertinentes.

De forma a evitar um texto cansativo, serão utilizados códigos para representar cada ensaio, sendo cada código composto por todas as informações de parâmetros utilizados no ensaio especificado. Um exemplo pode ser observado na Figura 31.

Figura 31 – Exemplo do código utilizado para citar os ensaios.



Fonte: Produção do próprio autor.

Os dados que constam nas tabelas da ANOVA, assim como os gráficos de efeitos principais e de interações, foram obtidos com o Software Minitab 17. Nas tabelas ainda constam de forma abreviada os termos "Grau de Liberdade" como "GL", "Soma dos Quadrados Ajustada" como "Aj.SQ", e "Quadrado Médio Ajustado" como "Aj.QM".

É importante destacar que, um fator ou uma interação entre fatores é considerada significativa nesta análise quando o Valor - P é menor que 0,05, uma vez que foi adotado $\alpha = 5\%$ como nível de significância. Para Valor - P maior que 0,05, considera-se que o fator ou interação não influencia na variável resposta, com base nos dados analisados.

Todas as variáveis analisadas são do tipo "menor-melhor", ou seja, quanto menor seu valor absoluto, melhor o desempenho do processo de usinagem. Dessa forma, ao avaliar os melhores níveis de cada fator, busca-se sempre o menor valor para a variável analisada.

Uma vez que os fatores analisados possuem apenas dois níveis, não é necessário realizar testes estatísticos, como o teste de Tukey, para encontrar o melhor nível. É possível fazê-lo através dos próprios gráficos de efeitos principais e interações (MONTGOMERY, 2013).

5.1 RUGOSIDADE (R_a)

Na Tabela 3, pode-se observar que para o nível de significância de 5% o único fator que apresentou influência no valor de R_a foi o avanço. A velocidade de corte não foi significativa, mas seu valor-P foi de 0,057, o que pode mostrar algum indício de influência no resultado de R_a .

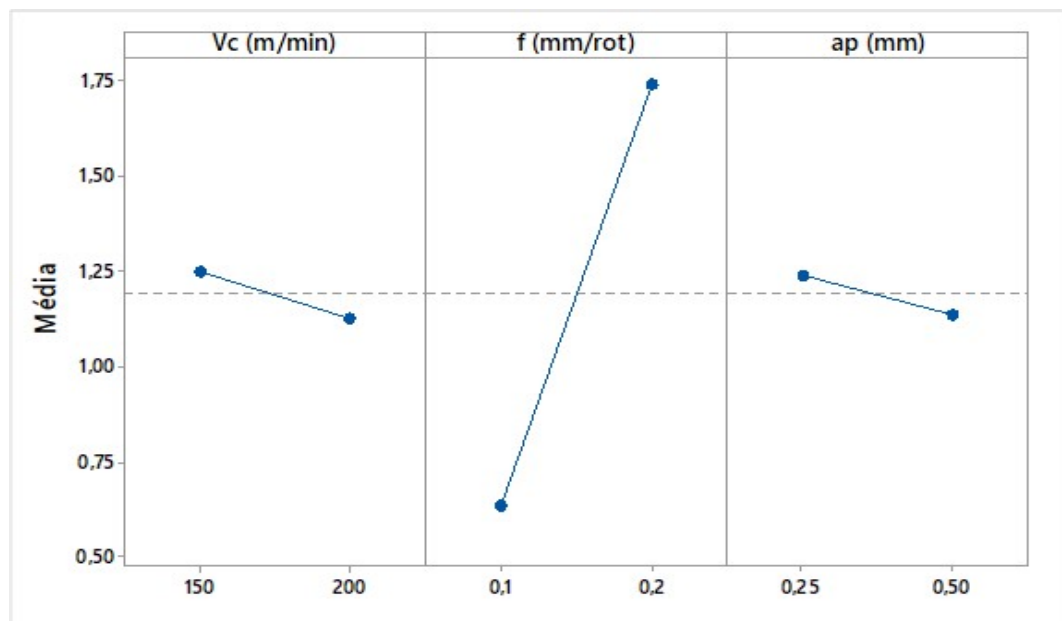
Tabela 3 – Análise de variância para parâmetro R_a de rugosidade.

Fonte	GL	Aj.SQ	Aj.QM	Valor - F	Valor - P
Modelo	7	15,720	2,245	49,450	0,000
Linear	3	15,049	5,016	110,440	0,000
V_c (m/min)	1	0,175	0,175	3,840	0,057
f (mm/rot)	1	14,738	14,738	324,480	0,000
a_p (mm)	1	0,1364	0,1364	3,000	0,091
Interação de 2°	3	0,580	0,1933	4,260	0,011
V_c (m/min)* f (mm/rot)	1	0,228	0,228	5,020	0,031
V_c (m/min) * a_p (mm)	1	0,091	0,091	2,010	0,164
f (mm/rot) * a_p (mm)	1	0,261	0,261	5,740	0,021
Interação de 3°	1	0,092	0,092	2,020	0,164
V_c (m/min)* f (mm/rot) * a_p (mm)	1	0,092	0,092	2,020	0,163
Erro	40	1,817	0,045		
Total	47	17,537			

Fonte: Produção do Próprio Autor.

Na Figura 32 é possível confirmar visualmente a significância do fator avanço, sendo que o seu nível baixo (0,1 mm/rot) apresentou um melhor efeito sobre o valor de rugosidade para o parâmetro analisado.

Figura 32 – Gráficos de efeitos principais para o parâmetro de rugosidade R_a (μm).



Fonte: Produção do próprio autor.

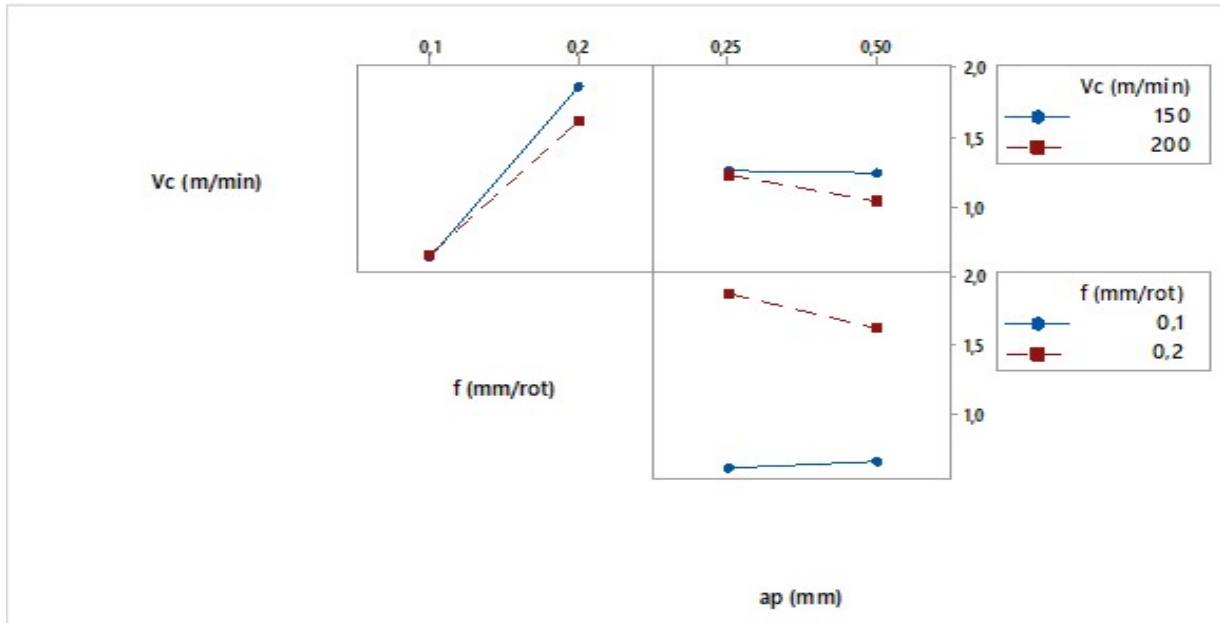
Conforme esperado, a profundidade de corte não apresentou impacto no valor de rugosidade, uma vez que, como observou Bonifácio (1993) para valores menores que 1 mm, a profundidade não exerce

influência significativa sobre a qualidade superficial.

A análise apresentou ainda interações de segundo grau, nas combinações em que o fator avanço está presente, ou seja, velocidade de corte com avanço e profundidade de corte com avanço. Ambos os casos influenciam significativamente no resultado final de R_a .

Observando a Figura 33, percebe-se que apesar das duas interações com o avanço serem significativas, seu nível mais interessante para o processo continua sendo a 0,1 mm/rot, para ambos os casos. Com relação à velocidade de corte, o parâmetro avaliado tem um valor levemente menor à 200 m/min.

Figura 33 – Gráficos de interação entre fatores para o parâmetro de rugosidade R_a (μm).



Fonte: Produção do próprio autor.

Realizando a variação no nível da velocidade de corte, para o avanço a 0,2 mm/rot, a profundidade de 0,5 apresenta melhores resultados de rugosidade. Mas sob um avanço de 0,1 mm/rot, a profundidade 0,25 resulta em valores levemente menores de R_a . O menor valor médio obtido nessa interação foi para profundidade a 0,25 mm e avanço a 0,1 mm/rot. Para essa variável, não houve interação de terceiro grau entre os fatores estudados.

Assim, pode-se estabelecer que a melhor condição ocorre com os parâmetros de corte ajustados da seguinte forma:

- $v_c = 200\text{m}/\text{min}$
- $f = 0,1\text{mm}/\text{rot}$
- $a_p = 0,25\text{mm}$

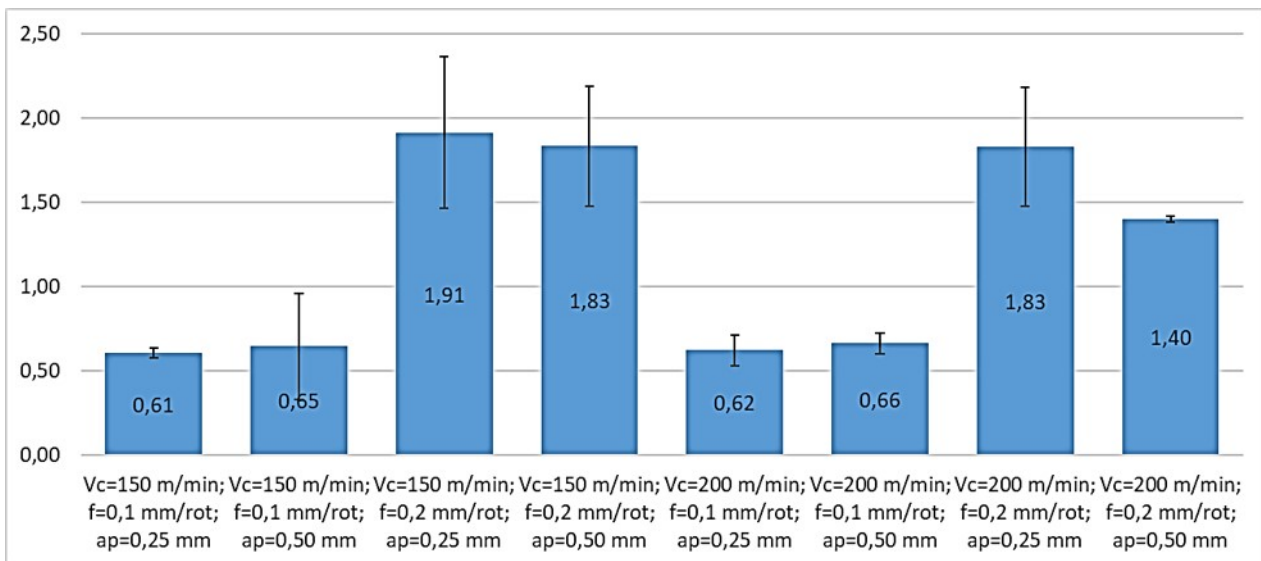
A influência do avanço sobre a qualidade superficial é prevista matematicamente para operações de usinagem, sendo que um maior avanço tende a gerar maiores valores de rugosidade (MACHADO et al., 2011).

Isso ocorre devido a contribuição geométrica do raio de ponta da ferramenta, através do avanço de ferramenta sobre a peça, tanto para o torneamento como para o fresamento. Ocorre que com um maior

avanço, uma maior área de contato é estabelecida entre o raio de ponta da ferramenta e a superfície a ser usinada, e assim ocorre aumento de atrito e vibrações indesejadas, diminuindo a qualidade superficial (BONIFÁCIO, 1993).

Os valores médios de R_a obtidos para cada condição podem ser melhor avaliados graficamente através da Figura 34. É possível comprovar a influência do avanço, sendo que os resultados médios com o avanço de 0,1 mm/rot são claramente menores que os resultados obtidos sob um avanço de 0,2 mm/rot. Percebe-se também que o ajuste dos parâmetros na melhor condição ($V_c=200$ m/min; $f=0,1$ mm/rot; $a_p=0,25$ mm) está entre os menores valores médios obtidos.

Figura 34 – Gráfico de valores médios para R_a (μm), com desvio padrão amostral.



Fonte: Produção do próprio autor.

5.2 RUGOSIDADE (R_t)

Assim como no parâmetro de rugosidade R_a , para o parâmetro R_t verifica-se através da Tabela 4 que o fator avanço é significativo na análise, mas nesse caso o fator velocidade de corte também possui influência significativa na variável resposta.

Além disso, a interação entre os dois fatores de influência não se apresenta significativa, sendo que a única interação com valor-P menor que 0,05 foi a de segundo grau entre avanço e profundidade de corte, a qual também foi significativa para o parâmetro R_a .

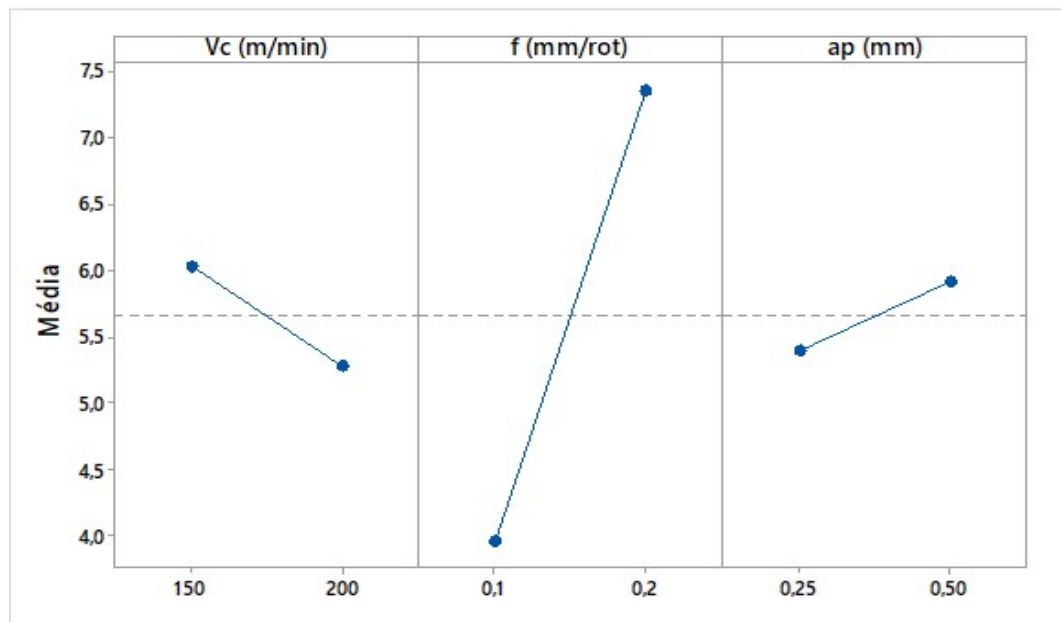
Novamente, pode-se observar a relação da qualidade superficial com o avanço da ferramenta, com base na Figura 35, levando à mesma conclusão obtida para o parâmetro R_a , de que um menor avanço contribui positivamente para a qualidade superficial.

Com relação a velocidade de corte, seu aumento resulta em menores valores do parâmetro de rugosidade R_t , ou seja, melhor qualidade superficial. Uma das causas para esse comportamento, observado por Bordin, Bruschi e Ghiotti (2014), é a menor formação de aresta postiça de corte para maiores velocidades devido a menores porções de material sendo retiradas, e exercendo então menores pressões contra a superfície da ferramenta, não sendo o suficiente para realizar a soldagem do cavaco à

Tabela 4 – Análise de variância para parâmetro R_t de rugosidade.

Fonte	GL	Aj.SQ	Aj.QM	Valor - F	Valor - P
Modelo	7	165,826	23,689	28,090	0,000
Linear	3	147,446	49,149	58,280	0,000
V_c (m/min)	1	6,583	6,583	7,810	0,008
f (mm/rot)	1	137,654	137,654	163,240	0,000
a_p (mm)	1	3,209	3,209	3,800	0,058
Interação de 2°	3	17,036	5,679	6,730	0,001
V_c (m/min)*f (mm/rot)	1	0,000	0,000	0,000	0,993
V_c (m/min) * a_p (mm)	1	3,028	3,028	3,590	0,065
f (mm/rot) * a_p (mm)	1	14,008	14,008	16,610	0,000
Interação de 3°	1	1,344	1,344	1,590	0,214
V_c (m/min)*f (mm/rot) * a_p (mm)	1	1,344	1,344	1,590	0,214
Erro	40	33,731	0,843		
Total	47	199,557			

Fonte: Produção do Próprio Autor.

Figura 35 – Gráficos de efeitos principais para o parâmetro de rugosidade R_t (μm).

Fonte: Produção do próprio autor.

ferramenta. Porém esse fenômeno ocorre normalmente em materiais mais dúcteis, e não foi observado para nenhuma condição de velocidade, como será melhor detalhado na seção "Desgaste da ferramenta".

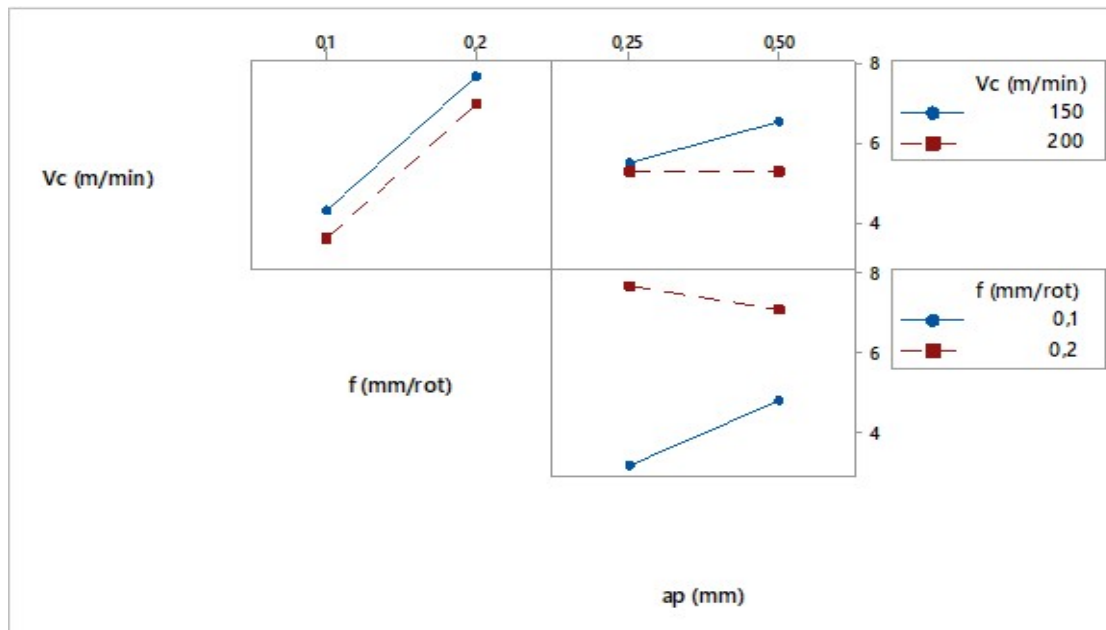
Uma outra possibilidade, mais adequada a situação descrita neste trabalho, foi exposta por Machado et al. (2011) e atribui este comportamento a maior temperatura que decorre de maiores velocidades, fazendo com que a resistência ao cisalhamento do material sofra uma diminuição, reduzindo consequentemente as forças de usinagem necessárias ao processo, e resultando em uma melhor qualidade superficial.

A diferença de significância estatística do fator velocidade de corte nos parâmetros R_a e R_t de rugosidade, pode ocorrer devido a um fenômeno conhecido quando, sob velocidades de corte mais elevadas, o acabamento superficial torna-se insensível às variações da velocidade de corte (NUNES,

2011).

A interação entre profundidade de corte e avanço possui o mesmo comportamento para o parâmetro R_t , que o apresentado pelo R_a , sendo que a melhor combinação observada para estes fatores é com avanço de 0,1 mm/rot, e profundidade de 0,25 mm, como pode ser observado na Figura 36. Dessa forma, pode-se extrair que essa condição, com uma velocidade de corte de 200 m/min, resulta em menores e melhores valores de rugosidade, para ambos os parâmetros estudados.

Figura 36 – Gráficos de interação entre fatores para o parâmetro de rugosidade R_t (μm).



Fonte: Produção do próprio autor.

Um ponto importante levantado por Agrawal et al. (2015) é o fato do avanço ser o fator de maior influência sobre a rugosidade no processo de torneamento, seguido da velocidade de corte, e posteriormente pela profundidade de corte. Além disso, discorrem sobre o menor efeito que o avanço possui para valores de rugosidade mais baixos, aumentando juntamente com o aumento da rugosidade. Já para a velocidade de corte ocorre de forma contrária, sendo maior seu efeito para menores valores de rugosidade.

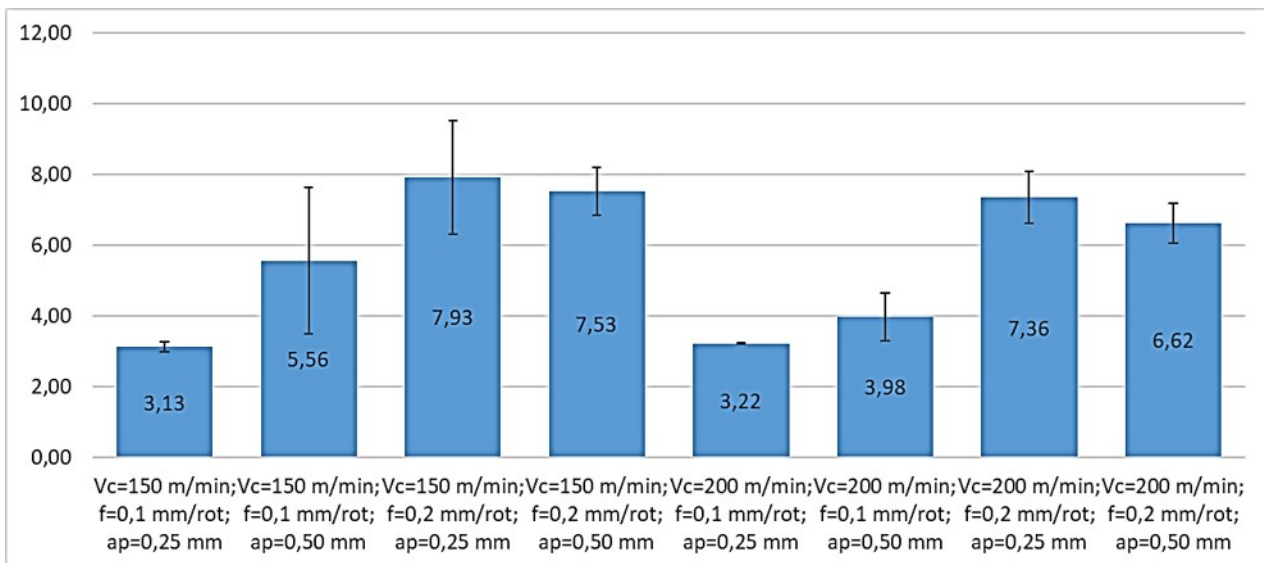
Isso ocorre devido às características das marcas deixadas pela ferramenta na superfície, serem uma contribuição da geometria da ferramenta com o avanço utilizado. Para avanços maiores, a distância entre picos e vales, assim como sua dimensão, tendem a aumentar. Já a velocidade de corte possui um melhor desempenho no seu nível alto pois, quanto menor, mais deformação mecânica ocorre no material ao formar o cavaco, escoando parte do material pelas laterais da ferramenta ao invés de cortá-lo na forma de cavaco. More et al. (2006) notou que o avanço possui esta mesma influência na deterioração da superfície, contribuindo para maiores valores de rugosidade sob menores taxas de avanço.

Através da Figura 37 pode-se perceber que a maior influência no valor da rugosidade R_t ocorre por parte do fator avanço, como relatado anteriormente. Verifica-se ainda que as condições que combinam o avanço de 0,1 mm/rot e profundidade de corte de 0,25 mm forneceram os melhores resultados médios,

como previsto. Para esses casos, não foi observada diferença significativa nos valores médios obtidos com os ensaios ao variar a velocidade de corte.

Ainda com relação à Figura 37, percebe-se que as condições com avanço de 0,1 mm/rot e profundidade de corte de 0,50 mm, que para R_a (Figura 34) estavam entre os melhores resultados dos ensaios, não mostraram o mesmo comportamento para R_t . Isso mostra que essas condições não afetam tão fortemente o parâmetro R_a , podendo ter seus defeitos resultantes mascarados, mas que aparecem com significativa diferença no parâmetro R_t , corroborando a importância de analisar mais de um parâmetro de rugosidade.

Figura 37 – Gráfico de valores médios para R_t (μm), com desvio padrão amostral.



Fonte: Produção do próprio autor.

A maior influência da variação de parâmetros sobre o valor de R_t comparado com R_a , provavelmente ocorre devido a defeitos de grande amplitude, mas com presença pontual, resultantes de uma maior profundidade de corte, que não são identificados ao medir o parâmetro R_a pois sua influência não é grande o suficiente para subir significativamente o valor de rugosidade média.

5.3 VIBRAÇÃO

Para a análise estatística da vibração, foram utilizados os valores máximos dos ensaios, de forma a avaliar o efeito das maiores vibrações ocorridas sobre o processo. Nota-se, na Tabela 5 que todos os fatores avaliados foram significativos na análise, e possuem um influência na vibração. Da mesma forma, as interações de segundo e de terceiro grau também foram classificadas como significativas, ao nível de confiança de 95%.

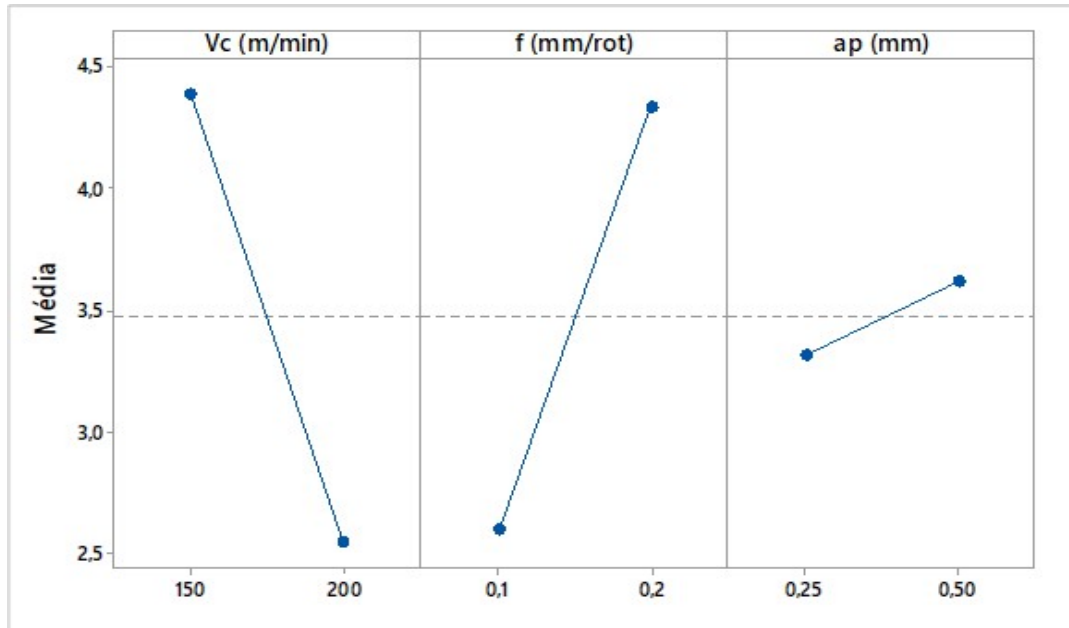
Ao contrário do encontrado na literatura a velocidade em seu nível alto resultou em menores valores de vibração que em seu nível baixo, como pode ser observado na Figura 38. Isso pode ocorrer por não ter sido utilizada uma velocidade de corte demasiadamente elevada, o que ocasionaria em instabilidade do processo e aumento das vibrações. Pode-se dizer então que 200 m/min foi uma velocidade adequada ao processo estudado.

Tabela 5 – Análise de variância para vibração.

Fonte	GL	Aj.SQ	Aj.QM	Valor - F	Valor - P
Modelo	7	330,619	47,231	271,780	0,000
Linear	3	77,789	25,930	149,20	0,000
V_c (m/min)	1	40,557	40,557	233,37	0,000
f (mm/rot)	1	36,145	36,145	207,99	0,000
a_p (mm)	1	1,087	1,087	6,25	0,017
Interação de 2°	3	167,954	55,985	322,15	0,000
V_c (m/min)* f (mm/rot)	1	110,897	110,897	638,120	0,000
V_c (m/min) * a_p (mm)	1	30,825	30,825	177,370	0,000
f (mm/rot) * a_p (mm)	1	26,232	26,232	150,940	0,000
Interação de 3°	1	84,876	84,976	488,390	0,000
V_c (m/min)* f (mm/rot) * a_p (mm)	1	84,876	84,976	488,390	0,000
Erro	40	6,951	0,174		
Total	47	337,571			

Fonte: Produção do Próprio Autor.

Figura 38 – Gráficos de efeitos principais para a vibração (mm/s).



Fonte: Produção do próprio autor.

Bonifácio (1993), por exemplo, também registrou uma diminuição do sinal RMS de vibração ao variar a velocidade de corte de 150 para 200 m/min ao executar torneamento em aço ABNT 4340 (com uma dureza de aproximadamente 260 HV). Porém, ao avançar com a velocidade para valores superiores à 250 m/min, observou grandes aumentos de valores de vibração.

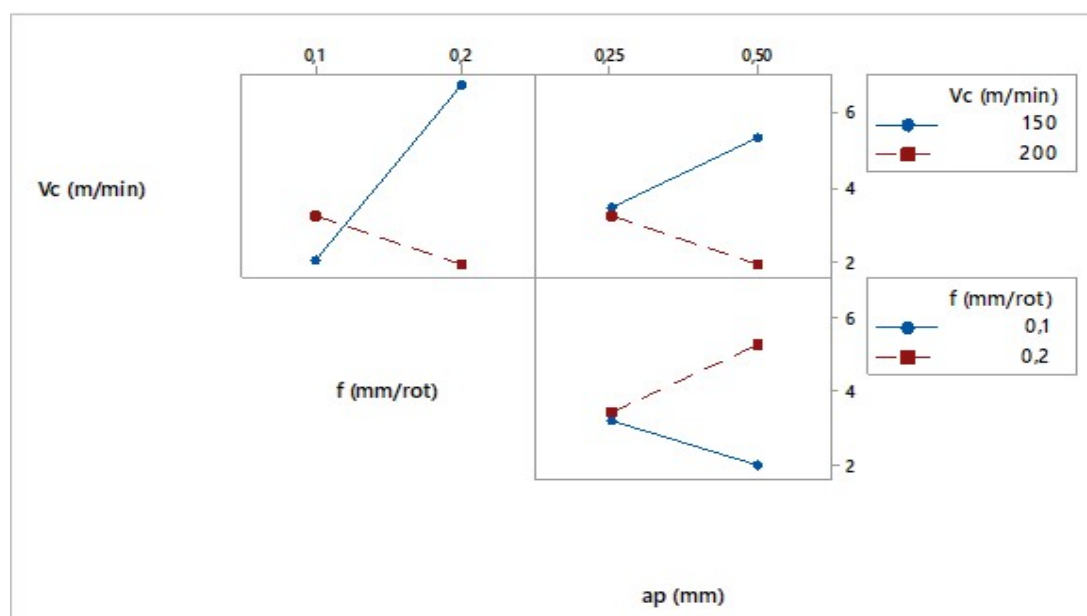
O avanço repetiu o comportamento observado para a rugosidade, sendo os melhores valores observados para esse fator, quando a 0,1 mm/rot. Ao trabalhar com menores avanços, o processo tende a ser mais sutil, retirando menores porções de material na forma de cavaco e então reduzindo as componentes das forças de usinagem que originam as vibrações. De acordo com Nunes (2011), um aumento do avanço pode gerar mais atrito, e conseqüentemente maiores vibrações na peça.

Para o fator profundidade de corte, o seu nível alto (0,50 mm) foi o que resultou em menores

valores de vibração, apesar da amplitude de variação ser menor que para os outros fatores avaliados. Aparentemente, repete-se o fenômeno observado por Wayal et al. (2015) onde o aumento da profundidade de corte leva a um aumento das componentes da força de corte, mas gera uma diminuição das componentes do sinal da vibração. Assim, pode-se afirmar que a profundidade de corte nos níveis estudados não afeta da mesma forma (aumentando ou diminuindo) a frequência de vibração nas suas três componentes, gerando uma menor influência na vibração final que os outros parâmetros estudados.

Nas interações de segundo grau que contêm o parâmetro velocidade de corte, pode-se perceber (Figura 39) que os menores valores de vibração ocorrem com a velocidade a 200 m/min, e os maiores para a velocidade a 150 m/min, como era esperado após verificar os efeitos principais. Percebe-se também que a forma de influência do avanço e da profundidade de corte se invertem com a mudança da velocidade de corte.

Figura 39 – Gráficos de interação entre fatores para a vibração (mm/s).



Fonte: Produção do próprio autor.

Elencando os melhores resultados, conclui-se que quatro interações de dois fatores geram resultados semelhantes de vibração máxima, sendo eles:

- $v_c = 150\text{m}/\text{min}$; $f = 0,1\text{mm}/\text{rot}$
- $v_c = 200\text{m}/\text{min}$; $f = 0,2\text{mm}/\text{rot}$
- $v_c = 200\text{m}/\text{min}$; $a_p = 0,50\text{mm}$
- $f = 0,1\text{mm}/\text{rot}$; $a_p = 0,50\text{mm}$

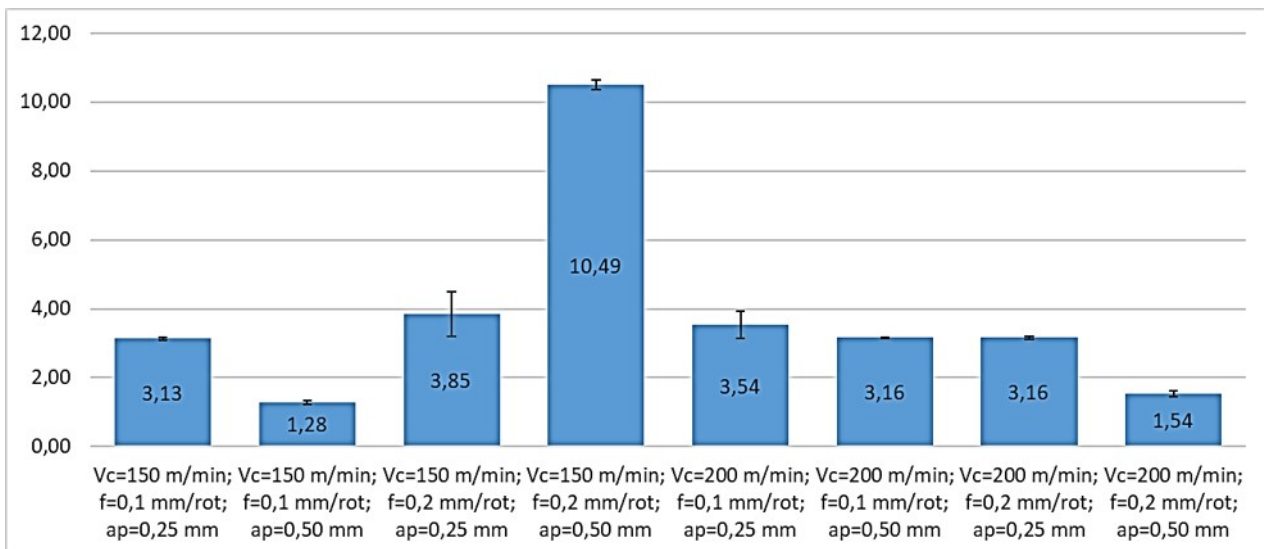
Como a interação de terceiro grau também foi significativa, para encontrar a condição dos três parâmetros que reduz a vibração, é necessário verificar as condições ensaiadas individualmente, por meio da média entre as repetições de cada condição. Dessa forma, a condição que apresentou menores valores de vibração foi:

- $v_c = 150\text{m}/\text{min}$
- $f = 0,1\text{mm}/\text{rot}$
- $a_p = 0,50\text{mm}$

O resultado de vibração máxima para essa condição foi de 1,284 mm/s. É interessante notar que a condição que forneceu os maiores valores de vibração foi com a mesma velocidade e profundidade de corte que o melhor ensaio, mudando apenas o avanço para 0,2 mm/rot, e alcançando 10,491 mm/s no resultado da vibração. Isso mostra o grande efeito que o avanço possui sobre o equilíbrio do sistema.

Verificando os resultados médios obtidos para cada condição, na Figura 40, fica clara essa diferença entre a pior e a melhor condições obtidas, com a variação ao avanço apenas. Embora de forma não tão extrema, isso também ocorre para outras condições, como por exemplo com velocidade de corte de 200 m/min e profundidade de corte de 0,50 mm. Porém, para este caso, observa-se a diferença de efeito na mudança do avanço.

Figura 40 – Gráfico de valores médios para vibração (mm/s), com desvio padrão amostral.



Fonte: Produção do próprio autor.

5.4 EMISSÃO ACÚSTICA

Dentre os fatores analisados para o sinal de emissão acústica, apenas a profundidade de corte se mostrou significativa, de acordo com a Tabela 6. Já para as interações o resultado foi interessante, uma vez que nenhuma interação de fator com a profundidade de corte foi significativa, apenas a interação entre os outros dois fatores (velocidade de corte e avanço). Para essa variável, foi verificada também a existência de interação de terceiro grau significativa.

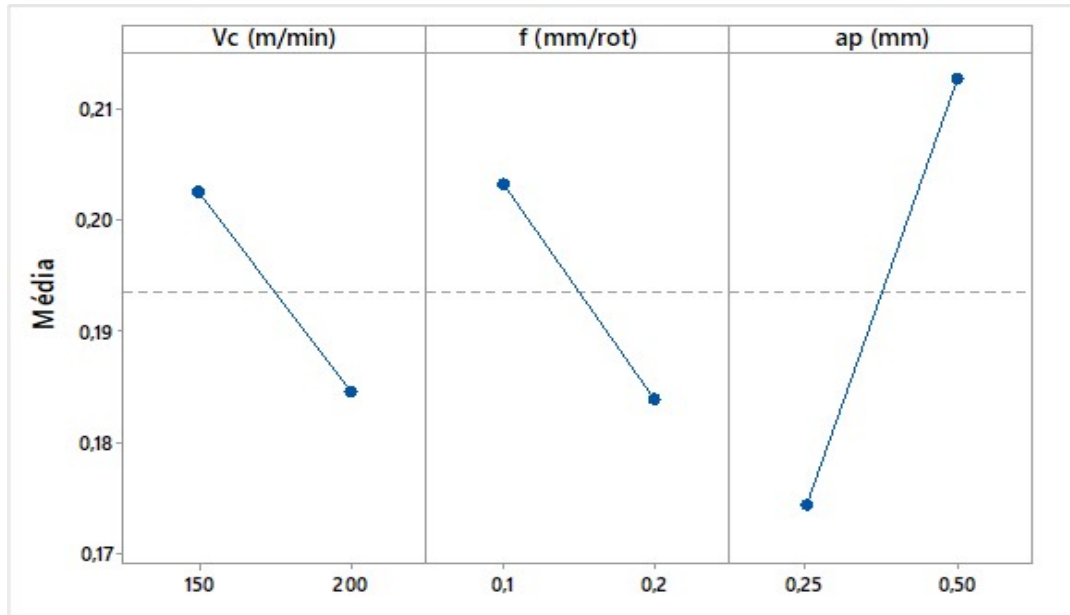
Os gráficos de efeitos principais da Figura 41 para a emissão acústica, em RMS, comprovam visualmente a grande influência do parâmetro de profundidade de corte. Desta análise pode-se extrair que a profundidade de corte de 0,25 mm fornece a melhor condição de operação, quando se busca minimizar a emissão acústica.

Tabela 6 – Análise de variância para emissão acústica.

Fonte	GL	Aj.SQ	Aj.QM	Valor - F	Valor - P
Modelo	7	0,599	0,086	32,140	0,000
Linear	3	0,026	0,009	3,260	0,031
V_c (m/min)	1	0,004	0,004	1,480	0,231
f (mm/rot)	1	0,004	0,004	1,660	0,205
a_p (mm)	1	0,018	0,018	6,630	0,014
Interação de 2°	3	0,022	0,007	2,770	0,054
V_c (m/min)*f (mm/rot)	1	0,019	0,019	7,040	0,011
V_c (m/min) * a_p (mm)	1	0,001	0,001	0,420	0,519
f (mm/rot) * a_p (mm)	1	0,002	0,002	0,860	0,360
Interação de 3°	1	0,551	0,551	206,860	0,000
V_c (m/min)*f (mm/rot) * a_p (mm)	1	0,551	0,551	206,860	0,000
Erro	40	0,107	0,003		
Total	47	0,706			

Fonte: Produção do Próprio Autor.

Figura 41 – Gráficos de efeitos principais para a emissão acústica (RMS).



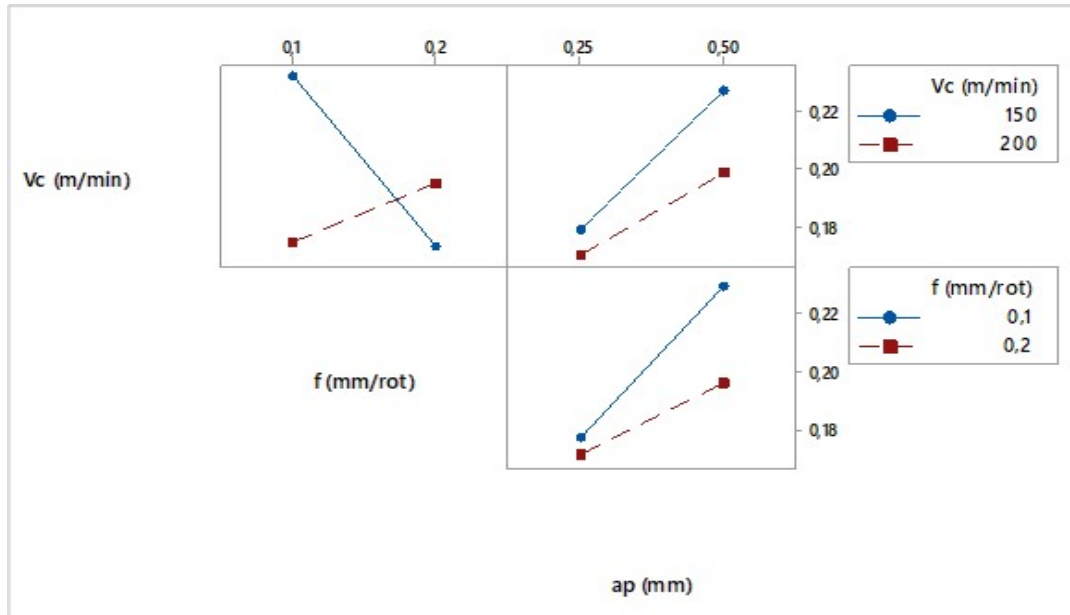
Fonte: Produção do próprio autor.

A interação que se mostrou significativa na ANOVA apresenta um comportamento para o qual duas combinações dos fatores geram valores semelhante de emissão acústica, e pode ser visto na Figura 42.

Quando a velocidade de corte é 150 m/min, e o avanço é igual a 0,2 mm/rot, a emissão acústica máxima é aproximadamente a mesma que para a velocidade a 200 m/min e o avanço a 0,1 mm/rot. Isso demonstra que para os níveis estudados, ao aumentar a velocidade, para manter a emissão acústica em níveis mais baixos, é necessário reduzir a taxa de avanço.

Analisando os valores de cada condição ensaiada, na forma de média aritmética entre os máximos das duas repetições, pode-se concluir que a interação de terceiro grau fornece como melhores condições de ensaio a velocidade de corte a 200 m/min, avanço de 0,1 mm/rot, e profundidade de corte de 0,25 mm, ou velocidade de corte de 150 m/min, avanço de 0,2 mm/rot, e profundidade de corte de 0,25

Figura 42 – Gráficos de interação entre fatores para a emissão acústica (RMS).



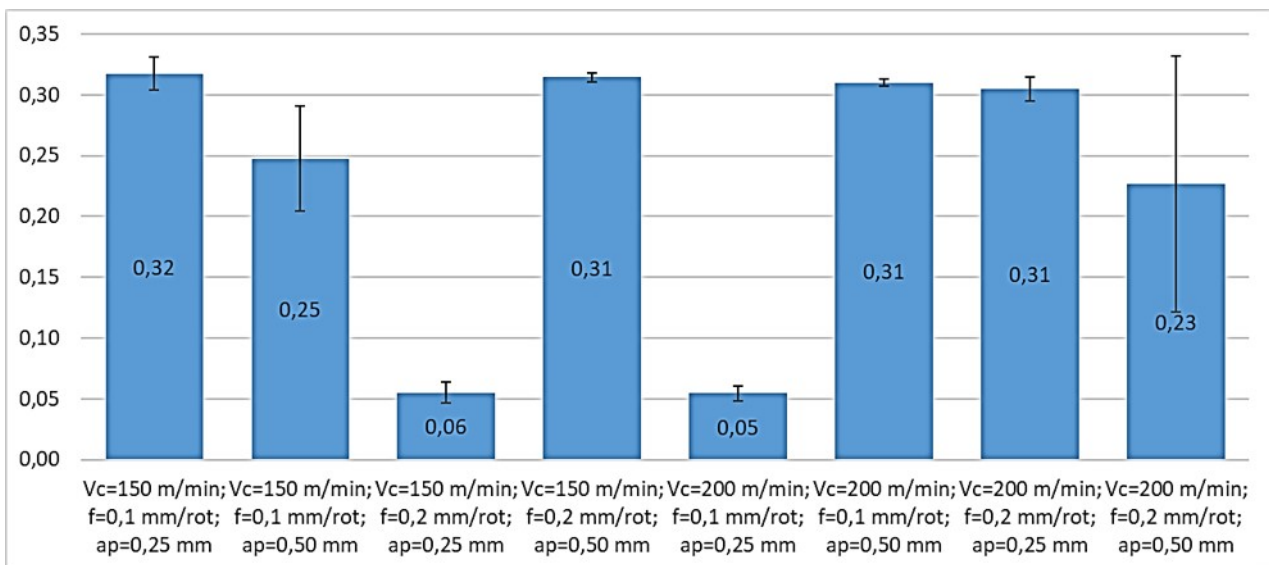
Fonte: Produção do próprio autor.

mm. Essas condições forneceram o valor máximo de EA de 0,050 e 0,060 (RMS), respectivamente, corroborando as análises anteriores de efeitos principais e interações de segundo grau.

O pior resultado, por sua vez, é atribuído às condições de velocidade de corte de 150 m/min, avanço de 0,1 mm/rot e profundidade de corte de 0,25, demonstrando novamente a forte influência da interação entre velocidade de corte e avanço.

Através da média dos valores de EA obtidos nos ensaios, plotados graficamente na Figura 43, verifica-se que apesar da condição anteriormente citada trazer o pior resultado absoluto, a maioria das outras condições testadas resulta em valores semelhantes de EA. Os resultados que se destacam da maioria são exatamente os qualificados como melhores condições na análise estatística.

Figura 43 – Gráfico de valores médios para emissão acústica (RMS), com desvio padrão amostral.



Fonte: Produção do próprio autor.

Com os resultados obtidos, é possível inferir que a emissão acústica está diretamente relacionada com a taxa de remoção de material, principalmente devido às deformações causadas na estrutura do material durante a retirada do cavaco. Ao aumentar a velocidade de corte, deve-se compensar diminuindo a taxa de avanço, a fim de manter o nível de remoção de material. Quando essa taxa de remoção é deslocada da melhor condição, ocorre um aumento do sinal de emissão acústica relacionado ao aumento da deformação elástica do material (INASAKI, fev. 1998).

5.5 POTÊNCIA DE CORTE

A análise dos dados de potência indicaram (Tabela 7) significância de todos os fatores analisados, com destaque a forte influência observada para a profundidade de corte, para a qual o valor-F foi 882,6, ou seja, o modelo é 882,6 vezes maior que o seu erro.

Tabela 7 – Análise de variância para potência de corte.

Fonte	GL	Aj.SQ	Aj.QM	Valor - F	Valor - P
Modelo	7	7.671.484	1.088.212	190,490	0,000
Linear	3	7.159.922	2.386.641	417,780	0,000
V_c (m/min)	1	41.685	41.685	7,300	0,027
f (mm/rot)	1	2.076.160	2.076.160	363,430	0,000
a_p (mm)	1	5.042.077	5.042.077	882,600	0,000
Interação de 2°	3	143.884	47.961	8,400	0,007
V_c (m/min)* f (mm/rot)	1	3.725	3.725	0,650	0,443
V_c (m/min) * a_p (mm)	1	2.937	2.937	0,510	0,494
f (mm/rot) * a_p (mm)	1	137.222	137.222	24,020	0,001
Interação de 3°	1	313.679	313.679	54,910	0,000
V_c (m/min)* f (mm/rot) * a_p (mm)	1	313.679	313.679	54,910	0,000
Erro	8	45.702	5.713		
Total	15	7.663.186			

Fonte: Produção do Próprio Autor.

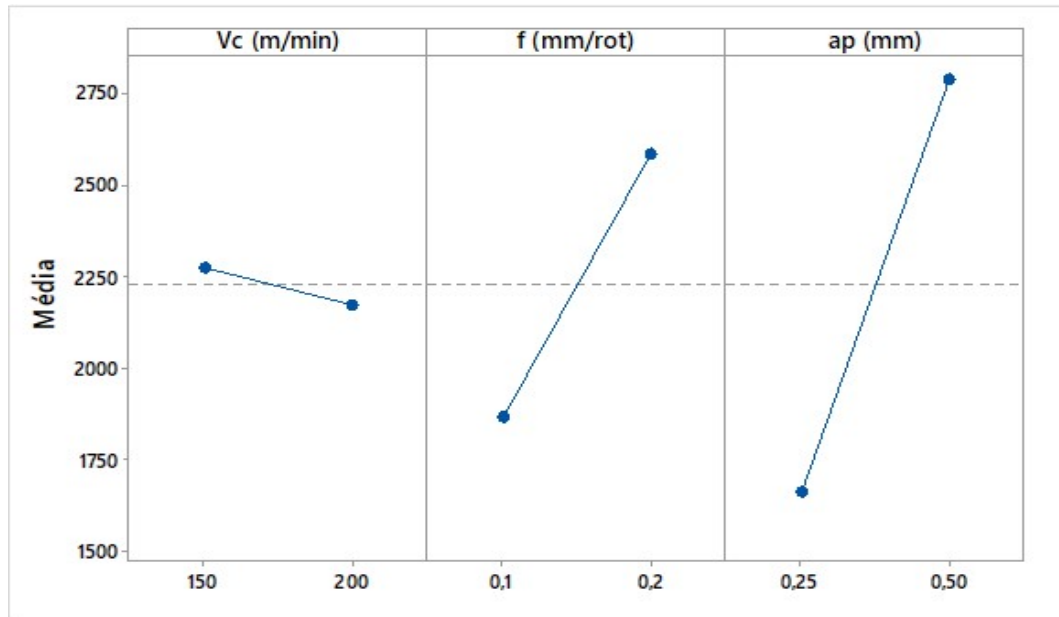
Já para as interações de segundo grau, a única que se mostrou significativa foi entre a profundidade de corte e o avanço, fato que condiz com a tendência de significância dos fatores uma vez que o valor-P para a velocidade de corte ficou em 0,027, mostrando menos significância que os outros fatores. Esse comportamento diferenciado para influência de cada fator também pode ser constatado nas inclinações das retas da Figura 44, sendo que as diferenças de médias, ao mudar o nível do fator, crescem juntamente com o valor-F.

Ainda na Tabela 7, nota-se a significância da interação entre os três fatores, que será analisada por meio dos valores médio entre as repetições para cada condição ensaiada, em busca da condição que oferece menores valores de potência.

A partir da Figura 44, é possível extrair a melhor condição que, individualmente, minimiza o valor de potência, sendo ela: $V_c=200$ m/min; $f=0,1$ mm/rot; $a_p=0,25$ mm.

Como descrito anteriormente, o nível de remoção de material está diretamente ligado a potência consumida no processo. Partindo deste princípio, se torna claro que para um maior avanço e uma maior profundidade de corte a potência necessária também cresce, pois a porção de material que deverá ser

Figura 44 – Gráficos de efeitos principais para a potência de corte (kW).



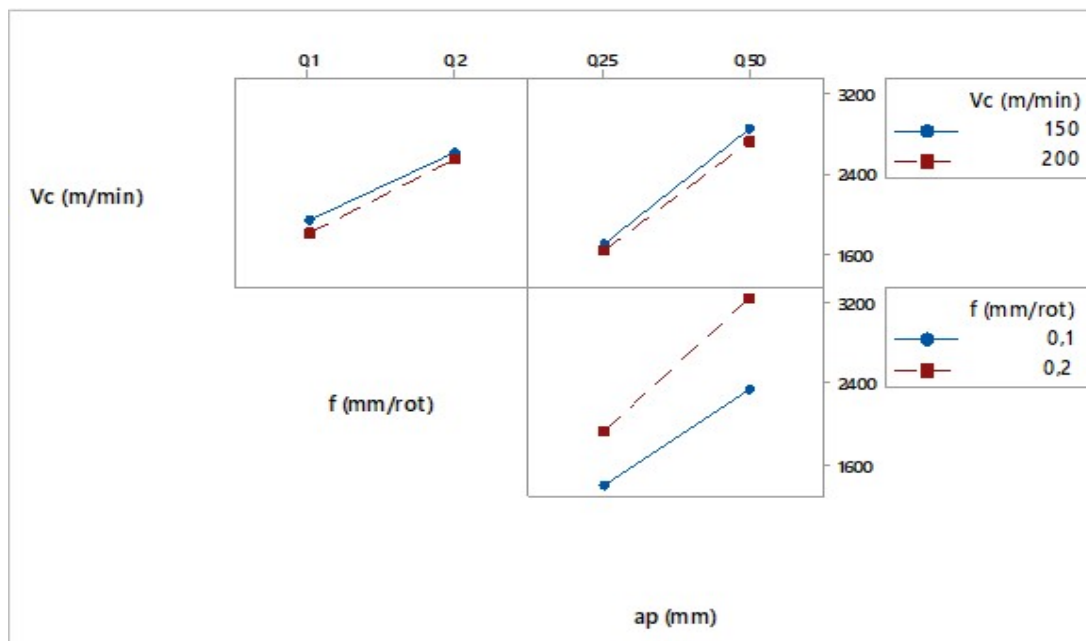
Fonte: Produção do próprio autor.

retirada cresce com esses parâmetros. Isso decorre da maior força que deve ser aplicada no material, uma vez que a área de contato do material usinado com a ferramenta de corte será maior e então maiores forças de atrito estarão presentes.

O efeito da velocidade de corte sobre a força de corte, e conseqüentemente sobre a potência consumida, provavelmente está relacionado com a menor deformação que ocorre no material para velocidade mais altas, gerando uma diminuição da força necessária para formação do cavaco.

A interação entre os fatores avanço e profundidade de corte é representada na Figura 45.

Figura 45 – Gráficos de interação entre fatores para a potência de corte (kW).



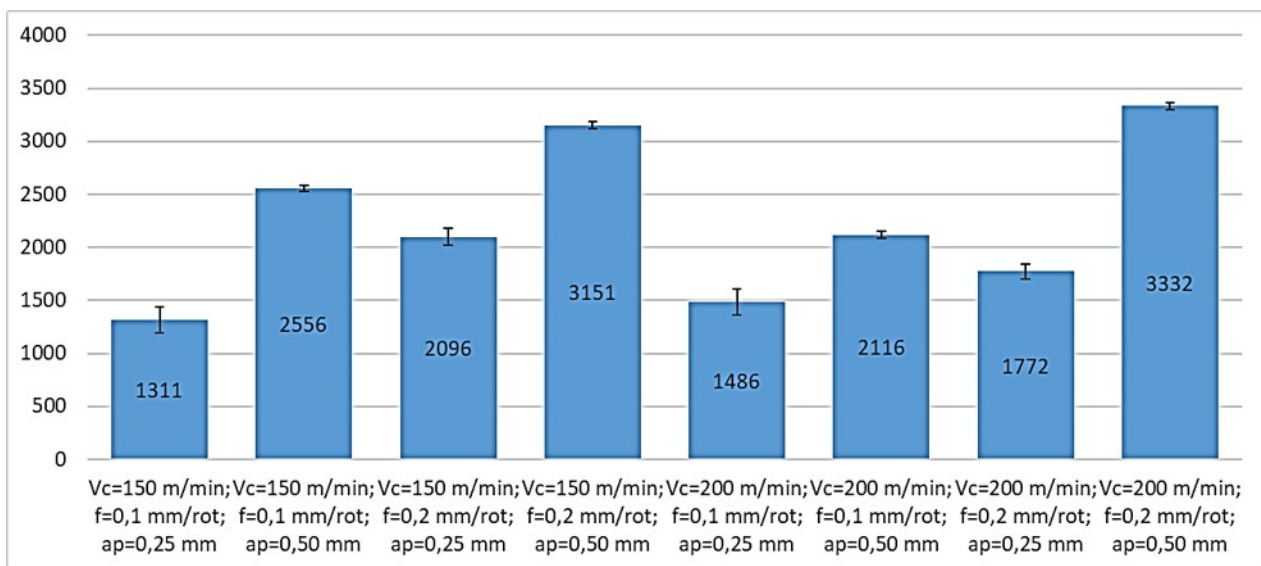
Fonte: Produção do próprio autor.

Para essa interação, observa-se um comportamento semelhante da influência da profundidade - crescimento da potência consumida juntamente com a profundidade de corte utilizada - mas apresentando maiores valores sob avanço de 0,2 mm/rot do que para 0,1 mm/rot, dessa forma confirmando como melhores condições para esses parâmetros as mesmas verificadas na análise dos efeitos principais.

A utilização da profundidade de corte no nível baixo mostra-se muito efetiva, gerando diminuição da potência consumida em aproximadamente 48,7%, no caso mais extremo, e 39,7% na média.

Quanto a interação de terceiro grau, como pode ser visualizado na Figura 46, as condições que resultaram nos menores valores de potência foram a velocidade de corte a 150 m/min, avanço de 0,1 mm/rot, e profundidade de corte de 0,25 mm, resultando em uma média de 1311 kW. Em segundo lugar ficaram os ensaio com a velocidade de corte a 200 m/min, avanço de 0,1 mm/rot, e profundidade de corte de 0,25 mm, com média de 1486 kW. Apesar da primeira condição ter um resultado médio ligeiramente melhor, verifica-se pelos ensaios 150.01.025.1, 150.1.025.2, 200.01.025.1 e 200.01.025.2 que a segunda condição mantém um valor muito mais estável de potência durante o ensaio, e resultando em um valor médio também muito baixo se comparado às outras condições. Tal fato pode ser verificado na Figura 47.

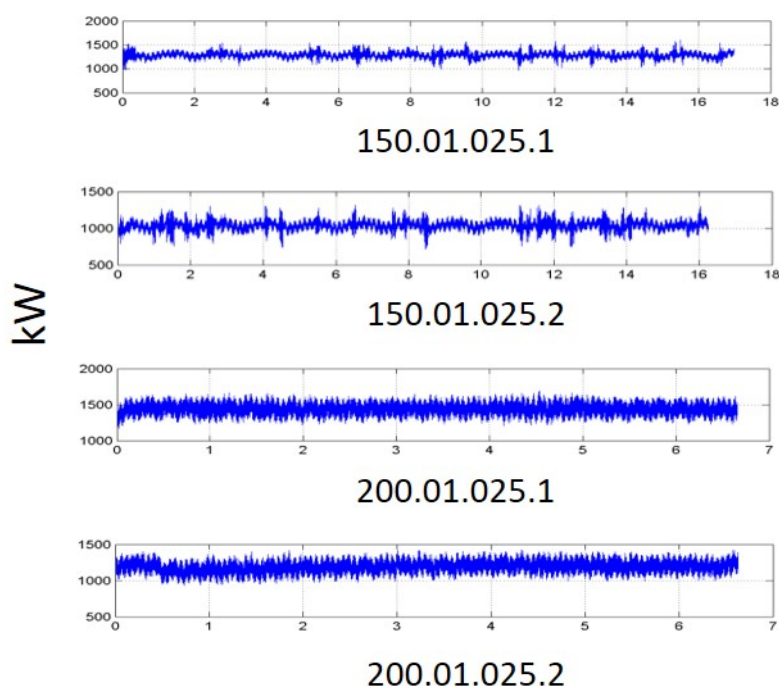
Figura 46 – Gráfico de valores médios para potência de corte (kW), com desvio padrão amostral.



Fonte: Produção do próprio autor.

É interessante notar também, na Figura 46, que a potência de corte descreve comportamento semelhante para ambas as velocidade de corte testadas, ao variar os outros parâmetros de corte: um aumento na profundidade de corte é mais impactante no aumento de potência do que ao variar o avanço. Da mesma forma, o aumento dos dois parâmetros (avanço e profundidade de corte), resulta nos maiores valores de potência.

Figura 47 – Resultados de sinal de potência para os ensaios 150.01.025.1, 150.1.025.2, 200.01.025.1 e 200.01.025.2, em kW.



Fonte: Produção do próprio autor.

5.6 DESGASTE DA FERRAMENTA

O desgaste das ferramentas de corte utilizadas foi analisado por meio de medidas do desgaste de flanco relativo ao comprimento usinado (mm/metro usinado), e por meio de imagens de microscopia óptica.

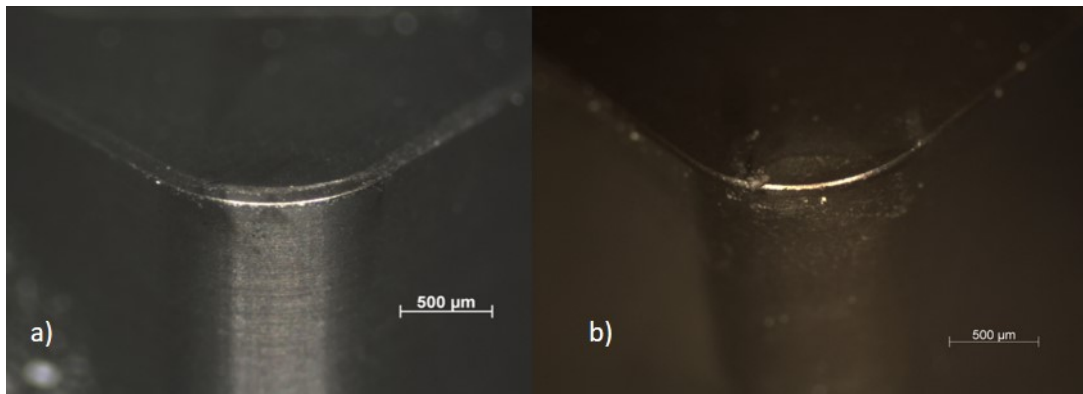
Relativo ao desgaste de flanco, o ensaio que apresentou o melhor resultado absoluto foi o 200.01.050.2, com um valor de $1,0 \times 10^{-4}$ mm/m usinado. Apesar dessa condição específica resultar no menor desgaste, não foi observado um padrão para os parâmetros de corte utilizado, tornando difícil definir a menor condição de cada parâmetro separadamente.

A pior condição ocorreu para o ensaio 200.02.050.1 resultando em $8,6 \times 10^{-4}$ mm/m usinado.

De forma geral, observou-se um baixo desgaste das ferramentas, sendo que o valor médio para o parâmetro V_b relativo foi de $2,9 \times 10^{-4}$ mm/m usinado, e não foi encontrada nenhuma avaria nas ferramentas utilizadas. Isso fica evidente ao comparar as arestas de corte resultantes da melhor e da pior condição, como na Figura 48. Nota-se que, apesar do desgaste ser mais de 6 vezes maior, ainda permanece com um baixo valor e pouco impacto na ferramenta de corte.

Curiosamente, a melhor e a pior condições ocorreram para os mesmos níveis de velocidade de corte e profundidade de corte, sendo que o avanço foi o determinante de tal diferença. Na verdade, isso não mostra a influência do avanço no desgaste, mas sim que o desgaste não foi grande o suficiente para exercer influência sobre a qualidade do processo (qualidade superficial), e nem para que seja possível determinar os parâmetros de usinagem que mais influenciam no seu resultado. Pode-se concluir que os efeitos dos parâmetros de corte sobre o desgaste da ferramenta, apesar de existirem, não foram

Figura 48 – Micrografia das ferramentas de corte utilizadas nos ensaios a) 200.01.050.2; e b) 200.02.050.1.



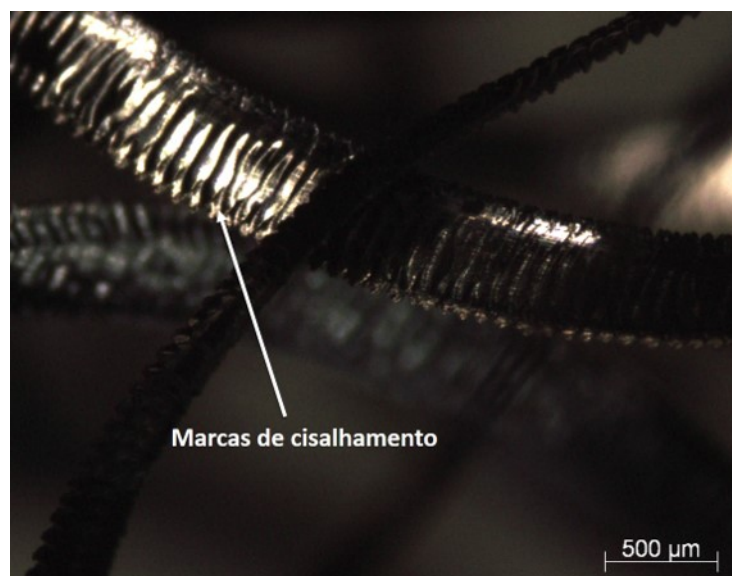
Fonte: Produção do próprio autor.

evidentes para as condições testadas, demonstrando a grande eficiência da ferramenta de CBN utilizada no processo.

5.7 ANÁLISE DE CAVACO

Avaliando as imagens microscópicas dos cavacos, sob uma ampliação de 10 e 20 vezes, foi possível identificar o cavaco formado como sendo do tipo de cisalhamento, devido a presença nítida das marcas de cisalhamento na sua superfície. Essas marcas ocorrem devido as porções do cavaco que se soldam novamente após seu corte da peça, e um exemplo está destacado na Figura 49, sendo este cavaco resultante do ensaio 150.02.025.2.

Figura 49 – Micrografia do cavaco resultante do ensaio 150.02.025.2, com ampliação de 10x, demonstrando a presença das marcas de cisalhamento que caracterizam o tipo de cavaco formado.

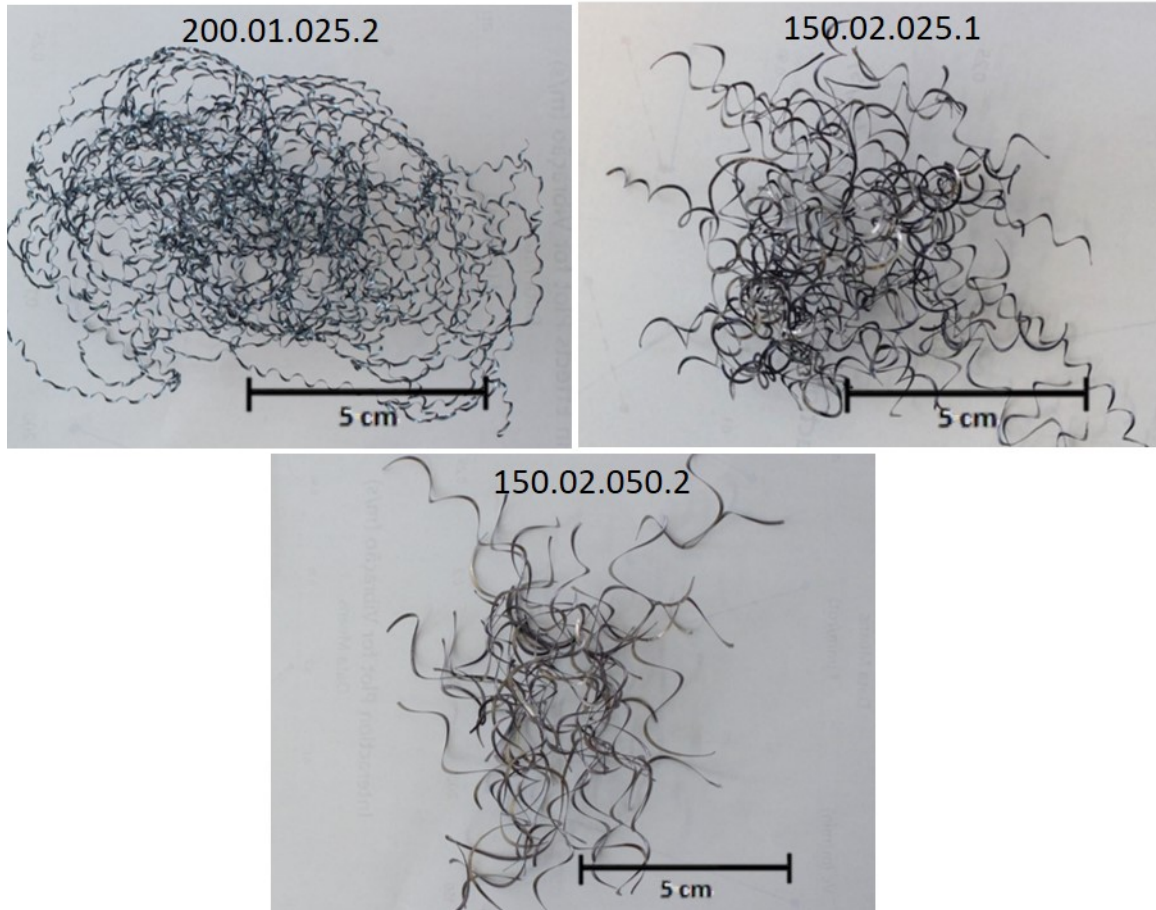


Fonte: Produção do próprio autor.

A partir da análise visual a nível macroscópico dos cavacos obtidos, foi feita a separação dos

cavacos de formas semelhantes, sendo obtidos então três grupos, sendo cada grupo representado por um exemplo na Figura 50.

Figura 50 – Exemplos dos grupos de cavaco separados por análise visual macroscópica, sendo os cavacos resultantes dos ensaios 200.01.025.2, 150.02.025.1 e 150.02.050.2.



Fonte: Produção do próprio autor.

Os cavacos de cada grupo são identificados pelos ensaios de que foram gerados, sendo que a separação resultou em:

- Grupo 1: ensaios 200.01.025.2, 200.01.025.1, 200.01.050.1, 200.01.050.2, 150.01.025.1 e 150.01.025.2;
- Grupo 2: ensaios 150.02.025.1, 150.02.025.2, 200.02.050.1, 200.02.050.2, 150.01.050.1 e 150.01.050.2;
- Grupo 3: ensaios 150.02.050.2, 150.02.050.1, 200.02.025.1 e 200.02.025.2;

De acordo com a norma ISO 3685 (1993), os cavacos do Grupo 1 podem ser classificados como cavaco de formato tubular emaranhado. Já o Grupo 2, pode ter seus constituintes classificados como cavaco de formato helicoidal do tipo arruela emaranhado. Finalmente, o Grupo 3 é formado por cavacos de formato também helicoidal do tipo arruela, porém longo.

Apesar de classificações distintas, é possível identificar semelhanças entre todos os cavacos obtidos nos ensaios, sendo que as principais diferenças entre eles são do diâmetro e o espaçamento das voltas, uma vez que não foram obtidos cavacos de formato em fita, agulhas, ou fragmentados.

Ao avaliar os parâmetros que resultaram na separação dos grupos de cavacos, fica claro a influência dos parâmetros na forma do cavaco, já que as repetições das condições resultaram sempre na mesma forma de cavaco. Pode-se ainda perceber que ao aumentar a velocidade de corte, a curvatura do cavaco tende a diminuir, e assim a quebra de cavaco deveria ser dificultada. Porém o que se observou, é que a quebra de cavaco foi mais eficiente para o Grupo 3 (que apresentou menor curvatura) que para os outros dois grupos. Provavelmente, isso se deve a relação avanço/profundidade de corte que se percebeu maior para as amostras do Grupo 3 com relação ao Grupo 2, e deste com relação ao Grupo 1. Este aumento gera uma maior deformação e curvatura, melhorando consequentemente o processo de quebra do cavaco (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2006).

Um problema decorrente justamente da dificuldade em quebra do cavaco foi observado em alguns ensaios que resultaram em cavacos para o Grupo 1, onde o cavaco enroscou na ferramenta de corte durante o torneamento, gerando imperfeições na superfície já usinada e dificultando o processo. Devido ao material da ferramenta, o processo fica restrito a certos parâmetros de corte, o que dificulta um grande aumento da quebra de cavaco além do obtido nos ensaios.

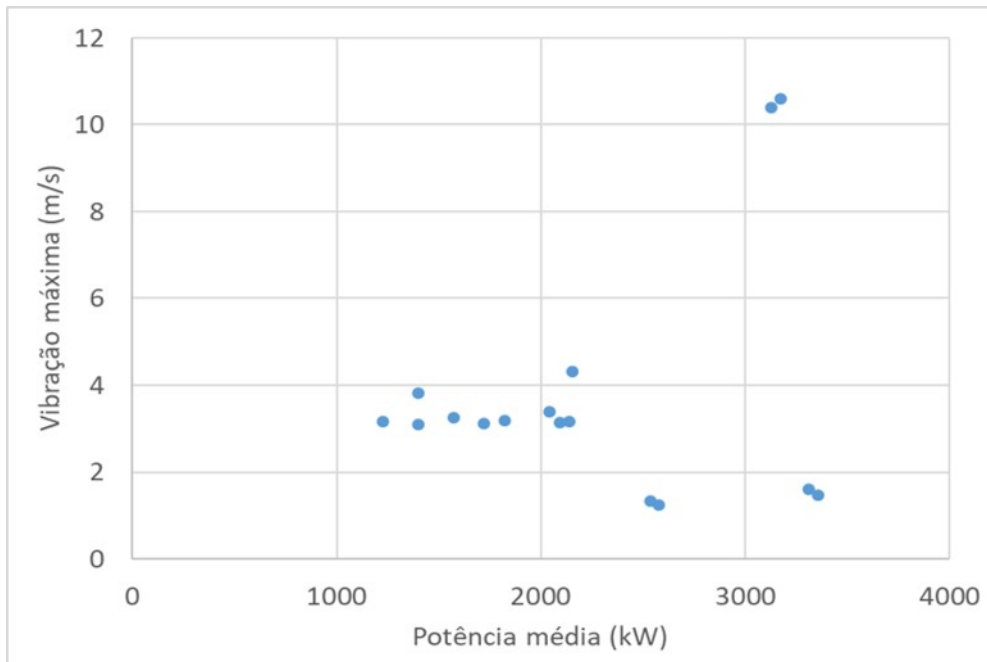
5.8 RELAÇÕES ENTRE AS ANÁLISES INDIVIDUAIS

Ao desenvolver as análises das variáveis estudadas, foi possível observar tendências de comportamento no processo, assim como correlacionar influências de alguns fatores.

Dentre as combinações de parâmetros testadas, uma se destacou sendo a melhor condição para rugosidade (ambos os parâmetros), emissão acústica e potência: velocidade de corte de 200 m/min, avanço de 0,1 mm/rot, e profundidade de corte de 0,25 mm. Provavelmente isso se deve a menor agressividade do processo de torneamento quando se diminui os parâmetros de avanço e profundidade de corte, retirando menores porções de material e reduzindo dessa forma o atrito e a força de corte necessária. Da mesma forma, ao aumentar a velocidade de corte, a deformação sofrida pelo material na região do corte também diminui, o que facilita a retirada do cavaco.

Na Figura 51, estão relacionados os resultados de potência de corte e vibração para cada condição, e é possível perceber a tendência de diminuição da potência consumida para uma faixa específica de vibrações no sistema, em torno de 3 a 4 mm/s. Tanto para valores maiores, quanto para valores menores de vibração, se observa um aumento significativo nos valores de potência de corte, mostrando que a faixa entre 3 e 4 mm/s se refere ao equilíbrio do sistema estudado. É inclusive nesta faixa que estão incluídos os resultados de vibração decorrentes da melhor condição encontrada.

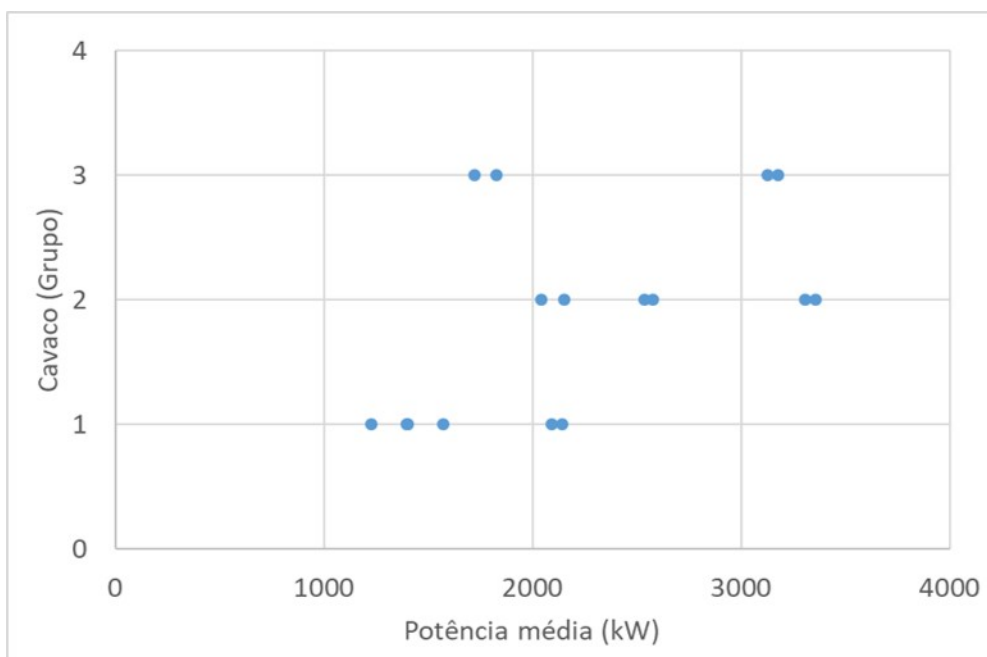
Figura 51 – Relação entre os resultados de potência de corte média, em kW, e vibração máxima, em mm/s.



Fonte: Produção do próprio autor.

Relacionando ainda a forma de cavaco, com base na classificação nos três grupos, com a potência de corte através da Figura 52, fica claro que o cavaco do formato tubular é resultado de um menor consumo de potência que o cavaco helicoidal.

Figura 52 – Relação entre os resultados de potência de corte média, em kW, e os cavacos gerados, por forma.



Fonte: Produção do próprio autor.

Isso se deve, provavelmente, a uma maior deformação que ocorre no material quando ocorre a formação dos cavacos dos Grupo 2 e Grupo 3, gerando assim uma necessidade de maior força de corte

e conseqüentemente refletindo no maior consumo de potência.

Para a análise de desgaste, apesar de ser possível destacar uma condição de melhores resultados, os valores foram baixos o suficiente para eliminar sua influência nos outros parâmetros. Com a progressão de desgaste poderia ser observado um aumento da área de contato da peça com a superfície principal de folga da ferramenta, levando a um aumento de potência de corte, vibrações e emissão acústica. No entanto isso não foi observado para as condições estudadas, corroborando sua exclusão da análise de interações entre variáveis.

Entre os parâmetros de rugosidade analisados, verifica-se um comportamento muito semelhante entre R_a e R_t , fato que indica a ausência de falhas durante o processo, que poderiam ser mascaradas pelo valor de R_a , mas apareceriam na análise de R_t .

Com relação a representatividade dos fatores nos modelos estudados estatisticamente, pode-se dizer que as variáveis R_a e R_t foram fortemente afetadas pelo avanço, este correspondendo a 84,0% e 68,9% do modelo, respectivamente. Por outro lado, a profundidade de corte teve uma influência muito baixa sobre estas variáveis, não sendo nem significativa no caso do R_t .

A potência de corte foi muito afetada pela profundidade de corte, com 65,8% do modelo, seguida do avanço com 27,1%. Neste caso, a velocidade de corte não se mostrou com grande influência.

Nas variáveis vibração e EA, as maiores influências no modelo vieram de interações, sendo que para a vibração a maior responsável foi a interação de segundo grau entre velocidade de corte e avanço (32,9% do modelo), e no caso da EA a interação de terceiro grau que foi a mais influente, representando 78,0% do modelo.

6 CONCLUSÃO

Através das análises realizadas neste trabalho, é possível concluir alguns pontos:

- Quando se busca diminuir a rugosidade (R_a e R_t), a emissão acústica e a potência de corte, dentre as condições estudadas a que se mostrou mais adequada foi com os parâmetros ajustados a velocidade de corte de 200 m/min, avanço de 0,1 mm/rot, e profundidade de corte de 0,25 mm;
- Para as condições testadas neste trabalho, é possível perceber que a ferramenta de corte de CBN utilizada teve um bom desempenho, uma vez que não apresentou desgaste elevado e avarias durante os ensaios;
- Verificou-se o efeito da taxa de remoção de material sobre o sinal de emissão acústica e de vibração. Apesar das duas variáveis não serem minimizadas pelos mesmos parâmetros de corte, para ambos foi encontrada uma zona de equilíbrio onde os valores eram reduzidos;
- Foi possível identificar o mecanismo de cisalhamento como formador de cavaco no processo estudado, assim como três formas de cavaco diferentes. Dentre estas, uma causou certos problemas nos ensaios devido a dificuldade de quebra do cavaco que decorreu da baixa relação avanço/profundidade de corte nestas condições;
- A potência de corte foi relacionada com outras variáveis como vibração e forma do do cavaco, podendo então relacioná-la com as deformações que ocorrem no material, e regiões de vibração de equilíbrio que minimizam a potência consumida;
- A análise estatística utilizada (ANOVA) foi considerada efetiva nos estudo de parâmetros como rugosidade, vibração, emissão acústica e potência de corte, permitindo identificar os fatores que influenciavam no processo, além de encontrar os seus melhores níveis;
- Finalmente, apesar de verificada a viabilidade do processo estudado, nas condições testadas, a rugosidade alcançada não foi baixa o suficiente para que o processo possa substituir a complementação pelo processo de retificação, após o torneamento. No entanto, a faixa de qualidade superficial alcançada abrange boa parte dos valores de retificação que são praticados nas indústrias.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir dos resultados obtidos, e dificuldades encontradas, são propostos alguns trabalhos futuros:

- Análise da quebra de cavaco com aumento do avanço utilizado, e sua influência na qualidade superficial final;
- Estudo do desgaste da ferramenta de CBN ao usinar o aço ABNT 4340 endurecido, identificando os principais fatores de influência e seu comportamento;
- Viabilidade econômica da substituição parcial do processo de retificação pelo torneamento do aço endurecido ABNT 4340 com ferramenta de CBN;

REFERÊNCIAS

- AGRAWAL, A. et al. Prediction of surface roughness during hard turning of aisi 4340 steel (69 hrc). **Applied Soft Computing**, v. 30, p. 279–286, mai. 2015.
- ALVES, M.; BIANCHI, E.; AGUIAR, P. Influência da lubrificação na qualidade superficial de metais retificados. **Metalurgia e materiais**, Ouro Preto, v. 64, n. 4, p. 505–512, 2011.
- ALVES, M. C. S. et al. Desenvolvimento de um sistema de aquisição e monitoramento de dados à distância para processos de usinagem. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 6., 2010, Campina Grande. **Anais...**, Campina Grande, 2010.
- AMORIM, H. J. **Estudo da relação entre velocidade de corte, desgaste de ferramenta, rugosidade e forças de usinagem em torneamento com ferramenta de metal duro**. 2002. 114 f. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002. Nota sobre a Tese de Mestrado.
- ANAZAWA, R. M. et al. Caracterização mecânica e microestrutural de um aço 300m com microestrutura multifásica. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 6., 2010, Campina Grande. **Anais...**, Campina Grande, 2010.
- ASILTURK, I.; NESELI, S. Multi response optimisation of cnc turning parameters via taguchi method-based response surface analysis. **Measurement**, v. 45, n. 4, p. 785 – 794, mai. 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 3002-1 - Grandezas básicas em usinagem e retificação Parte 1: Geometria da parte cortante das ferramentas de corte (Termos gerais, sistemas de referência, ângulos da ferramenta e de trabalho e quebra-cavacos)**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2013.
- AVELINO, R. A. **MAMCEE: Microcontrolador aplicado no monitoramento de consumo de energia elétrica**. Campinas: [s.n.], 2012.
- BONIFÁCIO, M. E. R. **Monitoramento do processo de torneamento de acabamento via sinais de vibração**. 1993. 103 f. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1993.
- BORDIN, A.; BRUSCHI, S.; GHIOTTI, A. The effect of cutting speed and feed rate on the surface integrity in dry turning of cochrmo alloy. In: CIRP CONFERENCE OF SURFACE INTEGRITY (CSI), 2., 2014, Nottingham. **Anais...**, Nottingham: Procedia CIRP, v. 13, p. 219–224, 2014.
- BRAGA, N. **Instituto Newton Braga : O site do hardware livre**. 2017. Disponível em: <<http://www.newtonbraga.com.br>>. Acesso em: 27 jul. 2017.
- CALLISTER JÚNIOR, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. Salt Lake City: LTC, 1999.
- CALLISTER JÚNIOR, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Fundamentals for materials science and engineering: an integrated approach**. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2007.
- CARDOSO, A. S. M. **Caracterização mecânica e microestrutural dos aços SAE 4340 e 300M após soldagem a laser e tratamento superficial de nitretação a plasma**. 2011. 112 f. Dissertação (Mestrado) — Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2011.
- CHIAVERINI, V. **Tecnologia mecânica**. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.

- CHINCHANIKAR, S.; CHOUDHURY, S. K. Machining of hardened steel: experimental investigations, performance modelign and cooling techniques (a review). **Journal of Materials Processing Technology**, v. 89, p. 95–109, fev. 2015.
- CHOUDHURY, A.; TANDON, N. Application of acoustic emission technique for the detection of defects in rolling element bearings. **Tribology International**, v. 33, n. 1, p. 39 – 45, jan. 2000.
- COCKERILL, A. et al. Determination of rolling element bearing condition via acoustic emission. **J. Engineering Tribology**, v. 230, n. 11, p. 1377 – 1388, 2016.
- DEARNLEY, P. A.; TRENT, E. M. Wear mechanisms of coated carbide tools. **Metals Technology**, v. 9, n. 1, p. 60 – 75, 1982.
- DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. São Paulo: mm editora, 2006.
- EZUGWU, E. O.; BONNEY, J.; YAMANE, Y. An overview of the machinability of aeroengine alloys. **Jornal of Material Processing Technology**, v. 134, n. 2, p. 233–253, mar. 2003.
- FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1977.
- GGD Metals. **Catálogo técnico: aços e metais**. 2015. Disponível em: <www.ggdmetals.com.br>. Acesso em: 14 ago. 2017.
- GOPALSAMY, B. M.; MONDAL, B.; GHOSH, S. Taguchi method and anova: an approach for process parametres optimization of hard machining while machining hardened steel. **Journal of Scientific and Industrial Research**, v. 68, n. 8, p. 686–695, ago. 2009.
- GRZESIK, W. **Advanced machining processes of metallic materials**. Amsterdã: Elsevier Science, 2008.
- GUIMARÃES, L. M. **Estudo do processo síntese do nitreto cúbico de boro – cBN utilizando Mg como catalisador**. 2013. 77 f. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2013.
- HASE, A.; MISHINA, H.; WADA, M. Correlations between features of acoustic emission signals and mechanical wear mechanisms. **Wear**, v. 292-293, p. 144 – 150, jul. 2012.
- INASAKI, I. Application of acoustic emission sensor for monitoring machining processes. **Ultrasonics**, v. 39, n. 1-5, p. 273–281, fev. 1998.
- JIANG, W. et al. A cbn-tin composite coating for carbide inserts: coating characterization and its applications for finish hard turning. **Surface & Coatings Technology**, v. 201, n. 6, p. 2443 – 2449, dez. 2006.
- KONDO, M. et al. ABNT 4340 steel grinding with geometry interrupted by conventional grinding wheel. In: ABCM INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING, 23., 2015, Rio de Janeiro. **Anais...**, Rio de Janeiro: Springer-Verlag, 2015.
- LEE, W. S.; SU, T. T. Mechanical properties and microstructural features of AISI 4340 high-strength alloy steel under quenched and tempered conditions. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 87, n. 1-3, p. 198–206, mar. 1999.
- LIMA, G. R. **Influência dos elementos de liga no encruamento proveniente do processo de aplainamento nos aços Hadfield**. 2011. 76 f. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia, Bauru, 2011.

- MACHADO, A. et al. **Teoria da usinagem dos materiais**. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 2011.
- MAIA, L. H. A. **Influência das condições de corte do fresamento do aço baixa liga ABNT-4140 nos sinais vibracionais e de emissão acústica**. 2009. 198 f. Dissertação (Mestrado) — Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.
- MATTAR JÚNIOR, A. R. **Influência dos elementos de liga Cu-Ni-Mo nas propriedades mecânicas e na austemperabilidade do ADI**. 2009. 142 f. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.
- MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments - 8ª edição**. New York: John Wiley & Sons, Inc, 2013.
- MORE, A. S. et al. Tool wear and machining performance of cbn–tin coated carbide inserts and pcbn compact inserts in turning aisi 4340 hardened steel. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 180, n. 1-3, p. 253 – 262, dez. 2006.
- NEVES, O. R.; CAMISASCA, M. M. **Aço Brasil: uma viagem pela indústria do aço**. Belo Horizonte: Escritório de Histórias, 2013.
- NOGUEIRA, R. C. **Caracterização mecânica e análise microestrutural com a utilização da técnica de tríplex ataque do aço multifásico AISI 4350**. 2013. 134 f. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2013.
- NUNES, L. T. **Análise estatística da influência dos parâmetros de corte na rugosidade no torneamento do aço micro-ligado DIN 38MnSiVS5**. 2011. 125 f. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011.
- OLIVEIRA, A. J.; DINIZ, A. E.; URSOLINO, D. J. Hard turning in continuous and interrupted cut with pcbn and whisker-reinforced cutting tools. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 209, n. 12-13, p. 5262 – 5270, jul. 2009.
- OZEL, T.; KARPAT, Y. Predictive modeling of surface roughness and tool wear in hard turning using regression and neural networks. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 45, n. 4-5, p. 467–479, abr. 2005.
- PASSOS, A. G. et al. Análise de sinais de vibração e emissão acústica para a detecção de danos em ensaios de fadiga de contato do tipo esfera contra plano. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 6., 2010, Campina Grande. **Anais...**, Campina Grande, 2010.
- PIRATELLI, A. **3 seminário de metrologia da Universidade de Brasília**. 2011. Disponível em: <http://www.posgrad.mecanica.ufu.br/metrologia/arquivos/palestra_ufu_17_05_2011.pdf>. Acesso em: 17 jul. 2017.
- POLLI, M. L. **Análise da estabilidade dinâmica do processo de fresamento a altas velocidades de corte**. 2005. 214 f. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
- SCIELO Citation Index (Web of Science). 2017. Disponível em: <<https://www.webofknowledge.com>>. Acesso em: 21 jun. 2017.
- SECO, T. **CNGA120408E25-L1-U CBN170**. 2017. Disponível em: <<http://www.secotools.com>>. Acesso em: 18 nov. 2017.
- SIDDHPURA, M.; PAUROBALLY, R. A review of chatter vibration research in turning. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 61, p. 27 – 47, out. 2012.

SILVA, R. H. L. et al. Análise do desgaste de ferramentas via emissão acústica na usinagem de um aço inoxidável. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 5., 2009, Belo Horizonte. **Anais...**, Belo Horizonte, 2009.

SOCIEDADE ANÔNIMA DE ELETRIFICAÇÃO DA PARAÍBA. **Relatório técnico parcial:** leitura remota de consumo de energia elétrica e medição agrupada em poste com leitura eletrônica utilizando-se medidores convencionais de energia. Campina Grande: [s.n.], 2002.

SOUTO, U. B. **Monitoramento do desgaste de ferramenta no processo de fresamento via emissão acústica.** 2007. 168 f. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007.

SOUZA, A. J. **Apostila:** Processos de Fabricação por Usinagem. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.

SOUZA, D. J. A. et al. Torneamento ortogonal de aço-rápido obtido por metalurgia do pó com ferramenta de pcbn. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 7., 2013, Itatiaia. **Anais...**, Itatiaia, 2013.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte I.** Florianópolis: Editora da UFSC, 1993.

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

TAN, C. K.; IRVING, P.; MBA, D. A comparative experimental study on the diagnostic and prognostic capabilities of acoustics emission, vibration and spectrometric oil analysis for spur gears. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 21, n. 1, p. 208 – 233, jan. 2007.

TETI, R. et al. Advanced monitoring of machining operations. **Manufacturing Technology**, v. 59, n. 2, p. 717 – 739, 2010.

TRENT, E. M. **Metal cutting.** Londres: Butterworths and Co, 1985.

TRENT, M. C.; WRIGHT, P. K. **Metal cutting principles.** 4. ed. Woburn: Butterworth-Heinemann, 2000.

VITÓRIA, B. C. R. **Análise do sinal de vibração no fresamento do aço AISI 4340 com ferramentas desgastadas.** 2016. 81 f. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

WAYAL, V. et al. Investigation on cutting force and vibration signals in turning: mathematical modeling using response surface methodology. **Journal of Mechanical Engineering and Automation**, v. 5(3B), p. 64–68, 2015.

WIDODO, A. et al. Fault diagn of low speed bearing based on relevance vector machine and support vector machine. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 36, n. 3, p. 7252 – 7261, abr. 2009.

ZHIRAFAR, S.; REZAEIAN, A.; PUGH, M. Effect of cryogenic treatment on the mechanical properties of 4340 steel. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 186, n. 1-3, p. 298–303, mai. 2007.