

STELLA ANDREOLLI MIRA DE ASSUMPÇÃO

**Análise dos efeitos de diferentes parâmetros de usinagem com
ferramentas de $\text{Ni}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$ no torneamento do aço ABNT 4340**

Stella Andreolli Mira de Assumpção

**Análise dos efeitos de diferentes parâmetros de usinagem com
ferramentas de $\text{Ni}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$ no torneamento do aço ABNT 4340**

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. Dr. Manoel Cleber de Sampaio Alves

Guaratinguetá/SP
2018

A851a	Assumpção, Stella Andreolli Mira de Análise dos efeitos de diferentes parâmetros de usinagem com ferramentas de Ni203 + Al2O3 no torneamento do aço ABNT 4340 / Stella Andreolli Mira de Assumpção - Guaratinguetá, 2019. 63 f. : il. Bibliografia: f. 61-63 Trabalho de Graduação em Engenharia de Materiais – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2018. Orientador: Prof. Dr. Manoel Cléber de Sampaio Alves 1. Material cerâmico. 2. Usinagem. 3. Ligas resistentes ao calor. 4. Ferro fundido. I.Título. CDU 621.9
-------	--

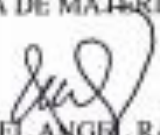
Luciana Máximo

Bibliotecária CRB-8/3595

STELLA ANDREOLLI MIRA DE ASSUMPÇÃO

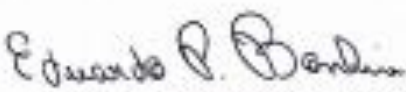
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS"

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


Prof. Dr. MIGUEL ANGEL RAMIREZ GIL
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


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


Eng. EDUARDO PIRES BONHIN
UNESP-FEG


MSc. SARAH DAVID MÚZEL
UNESP-FEG

Novembro de 2018

DADOS CURRICULARES

STELLA ANDREOLLI MIRA DE ASSUMPÇÃO

NASCIMENTO	16.01.1992 – CAMPINAS/ SP
FILIAÇÃO	Isilda Sueli Andreolli Mira de Assumpção Homero Mira de Assumpção
2013/2018	Curso de Graduação Engenharia de Materiais - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”

Dedico este trabalho aos meus pais que, desde sempre, me deram amor, carinho e apoio, sendo os maiores responsáveis pelo meu sucesso.

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente aos meus pais por terem me dado a oportunidade de estudar antes de tudo, e por serem meu apoio, meu porto seguro e principal fonte de incentivos, sempre acreditando em mim quando, às vezes, nem eu mesma acreditava.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Manoel Cleber de Sampaio Alves por aceitar duas vezes ser meu orientador e por sempre estar disposto a me ajudar nessa etapa final.

Ao Prof. Dr. Jose Vitor Candido de Souza por fornecer alguns materiais necessários para realização deste trabalho.

Aos técnicos e mestrandos que auxiliaram na realização dos ensaios e coleta de dados e disponibilizaram seu tempo para ajudar quando precisei.

Às minhas irmãs e companheiras da república Tá-mar por todos esses anos de convivência e amizade, e por terem me dado toda força para conquistar esse sonho.

Agradeço de coração a aluna de doutorado Sarah David Müzel que me ajudou desde as disciplinas de pesquisas, na realização dos ensaios, na escrita dos trabalhos e pôsteres, sempre me incentivando e sendo minha verdadeira anja da guarda em algumas situações!

E agradeço ao meu noivo Aude Germano por ter me ajudado a focar neste trabalho, abrindo mão de algumas distrações junto de mim, ouvindo minhas preocupações e medos, sempre sabendo a melhor maneira de me acalmar!

Agradeço ainda a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para este trabalho e durante minha graduação!

RESUMO

A principal característica do material cerâmico é sua resistência ao amolecimento pelo calor às altas temperaturas, além da sua elevada dureza e resistência a temperatura ambiente, alta resistência à formação de cratera e baixa condutividade térmica. Essas são características de extrema importância no processo de usinagem, principalmente a seco, quando não existe o resfriamento por um fluido lubrificante. Acredita-se que por essa razão, a vida útil de uma ferramenta de corte cerâmica pode ser maior se comparada às ferramentas metálicas, e assim, reduz custos de processo. No entanto, para avaliar a aplicabilidade do produto final, também é necessário entender quais são as desvantagens que o material cerâmico pode oferecer no processo. Vale citar a fragilidade ao impacto, sendo comum que as ferramentas trinquem ou lasquem devido a algum tipo de solicitação causada pelo torno. O foco principal deste estudo foi avaliar a viabilidade de aplicação de ferramentas de $\text{Ni}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$ no torneamento de Aço ABNT 4340, ao variar os parâmetros de velocidades de corte (V_c) em 160 e 200m/min, avanços (f) de 0,1 e 0,15 mm/rot e de profundidade (A_p) de 0,15 e 0,25mm. Foi levado em questão a influência na potência exigida pelo sistema, valores de emissão acústica produzidos durante o processo e a vibração total medida, além de claro, o acabamento final do produto, tendo sido medidas as rugosidades R_t e R_a . Também foram estudados os cavacos formados e medidos os desgastes das ferramentas, a fim de se medir a perda e avaliar sua vida útil. Pelos resultados obtidos e análise de variância, foi possível assumir que os melhores parâmetros utilizados para usinar este aço foram velocidade de corte (V_c) de 160m/min, avanço (f) de 0,1 mm/rot e profundidade (A_p) de 0,15mm, uma vez que para essas condições, foram obtidos os menores valores de rugosidade, potência e vibração.

PALAVRAS-CHAVE: Ferramentas cerâmicas. Usinabilidade. Ligas ferro-carbono.

ABSTRACT

The main characteristic of ceramic material is the resistance when exposed to high temperature, its hardness and resistance to room temperature, besides its high resistance to crater formation and low thermal conductivity, according to Ferraresi (1977). These characteristics are extremely important during the machining process, especially when it is a dry process, what means there is no lubricant fluid to low the heat. It is believed that for this reason, the life cycle of a cutting tool can be longer than metal tools, and thus reduce process costs. However, to evaluate the applicability of the final product, it is important to understand with disadvantage ceramic material can offer to the process. It is worth mentioning the fragility to the impact, and that it is common for the tools to crack due to some type of request caused by the machine. The main focus of this study was to evaluate the feasibility of applying $\text{Ni}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$ tools in ABNT 4340 Steel turning, by varying the cutting speed (V_c) parameters at 150 and 200m / min, feed rate (f) of 0.1 and 0.15 mm / rot and depth (A_p) of 0.15 and 0.25 mm. It considered the influence on the power required by the system, acoustic emission values produced during the process and the total vibration measured, besides the superficial quality on the final product, and also the roughness R_t and R_a were measured. We also studied the formed chips and measured the wear of the tools in order to measure the loss and evaluate their life cycle. From the results obtained and the variance analysis, it was possible to assume that the best parameters used to machine this steel were cutting speed (V_c) of 160m / min, feed rate (f) of 0.1 mm / rot and depth (A_p) of 0.15mm, since it showed the lowest values of roughness, power and vibration.

KEYWORDS: Ceramic tools. Machinability. Carbon-Iron base alloys.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema de classificação dos Aços	17
Figura 2: Composição química do Aço ABNT 4340	18
Figura 3: Os tipos de processos de fabricação.....	19
Figura 4- Classificação dos tipos de torneamento	21
Figura 5: Movimentos de corte.....	22
Figura 6- Parâmetros de corte.....	24
Figura 7: Formação do Cavaco.....	25
Figura 8 Classificação de cavacos de acordo com sua forma segundo norma ISO 3685:1993	26
Figura 9: Influencia dos parâmetros de usinagem na formação dos cavacos.....	27
Figura 10: Materiais de ferramentas e suas propriedades.....	28
Figura 11: Tipos de desgaste: A-Cratera, B- Flanco, C/D- Entalhe	30
Figura 12: Mecanismos formadores de desgaste e a relação com a temperatura de corte	31
Figura 13: Perfil de rugosidade média (Ra)	32
Figura 14: Mesmo valor de Ra para perfis diferentes	33
Figura 15: Parâmetro de medição de Rt	33
Figura 16- Corpo de prova.....	36
Figura 18: Composição Química ferramenta de corte SNMG 120408	36
Figura 19- Ferramenta cerâmica SNMG 120408	37
Figura 20: Centro de torneamento CNC ROMI GL240M	39
Figura 21: Rugosímetro marca Mahr modelo Mahrsurf M300	39
Figura 22: Microscópio da marca Mahr, modelo MarVision MM200.....	40
Figura 23: Microscópio da marca Zeiss, modelo Stemi2000	41
Figura 24: Computador com software LabView7.1	41
Figura 25: Sensor de efeito Hall marca LEM modelo AT100 B10.....	42
Figura 26: Sensor de vibração modelo TV100	43
Figura 27- Sensor de captação acústica marca Physical Acoustics.....	43
Figura 28- Efeito das médias para a potência.....	44
Figura 29: Medidas de Potência de corte por ensaio	45
Figura 30- Efeito das médias para a vibração.....	46
Figura 31: Medidas de Vibração por ensaio	47
Figura 32- Efeito das médias para emissão acústica	48
Figura 33: Medidas de Emissão Acústica por ensaio	49

Figura 34- Efeito das médias para R_t	51
Figura 35: Valores médios de R_t por condição	52
Figura 36- Efeito das médias para R_a	53
Figura 37: Valores médios de R_a por condição.....	54
Figura 38: Gráfico de V_b/L_c	56
Figura 39: Desgastes medidos para ensaio 11(A), 12(B) e 16(C).	56
Figura 40: Imagem da melhor condição (Ensaio 1, D) e da pior condição (Ensaio 15, E)	57
Figura 41: Imagem do cavaco formado no ensaio 16.....	58
Figura 42: Imagem do cavaco formado no ensaio 15.....	58
Figura 43: Pior formação de cavaco (A) e melhor formação de cavaco (B).....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Ensaio das ferramentas.....	37
Tabela 2: Resultados da análise de variância para a Potência	45
Tabela 3: Resultados da análise de variância para a Vibração	47
Tabela 4: Resultados da análise de variância para a Emissão Acústica	49
Tabela 5: Dados de Rugosidade Ra e Rt a cada passada.....	50
Tabela 6: Resultados da análise de variância para a Rugosidade total (Rt)	51
Tabela 7: Resultados da análise de variância para a Rugosidade Média (Ra)	53
Tabela 8: Desgaste em cada aresta das ferramentas	55
Tabela 9: Cavacos formados.....	57

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	15
2.1	GERAIS	15
2.2	ESPECÍFICOS	15
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1	AÇOS	16
3.1.1	Aço ABNT 4340	17
3.2	USINAGEM	18
3.2.1	Torneamento	20
3.2.2	Movimentos entre peça e ferramenta	21
3.2.3	Cavacos	24
3.2.3.1	Mecanismos de formação	24
3.2.3.2	Formas e tipos de cavacos	25
3.3	MATERIAIS PARA FERRAMENTAS	27
3.3.1	Ferramentas Cerâmicas	28
3.4	DESGASTE DE FERRAMENTA	29
3.4.1	Tipos de desgaste	29
3.4.2	Mecanismos causadores	30
3.5	RUGOSIDADE	31
3.6	POTÊNCIA DE USINAGEM	34
3.7	EMIÇÃO ACÚSTICA.....	34
3.8	VIBRAÇÃO	35
4	MATERIAL E MÉTODOS	36
4.1	FERRAMENTA DE CORTE SNMG120408	36
4.2	EQUIPAMENTOS UTILIZADOS	38
4.2.1	Centro de Torneamento CNC	38
4.2.2	Rugosímetro	39
4.2.3	Microscópios	40
4.2.3.1	Microscópio Mahr	40
4.3	SOFTWARE DE CAPTURA DE DADOS	41
4.3.1	Potência de corte.....	41
4.3.2	Vibração	42

4.3.3	Emissão acústica	43
4.4	CAVACOS	43
4.5	MODELAMENTO DO ENSAIO	37
4.6	TRATAMENTO ESTATÍSTICO DE DADOS	38
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
5.1	POTÊNCIA DE CORTE	44
5.2	VIBRAÇÃO	46
5.3	EMIÇÃO ACÚSTICA.....	48
5.4	RUGOSIDADE	49
5.4.1	Rugosidade Total (RT).....	50
5.4.2	Rugosidade Média (RA).....	52
5.5	DESGASTE DAS FERRAMENTAS	54
5.6	ANÁLISE DOS CAVACOS	57
6	CONCLUSÃO.....	60
	REFERÊNCIAS	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.

1 INTRODUÇÃO

Não é de hoje que o processo de usinagem tem grande destaque na indústria metalúrgica, isso porque ofereceu importantes transformações para o mundo e novas possibilidades na maneira de beneficiar e aplicar os materiais metálicos, ampliando o leque de utilização desse material, como por exemplo, em ferramentas e utensílios utilizados no cotidiano de todos.

Na área dos aços endurecidos, a usinagem trouxe ainda mais inovações ao eliminar o processo de retificação, possibilitando, portanto, a redução de custo e tempo de fabricação. Para que isso ocorra, é necessário que o processo de usinagem seja realizado em uma máquina rígida combinada com ferramentas de corte com elevada dureza e resistência ao desgaste em temperaturas elevadas.

Sendo assim, é cada vez mais relevante o estudo de novas ferramentas de corte, a fim de se desenvolver características específicas para os diferentes materiais a serem usinados. Os aços continuam ganhando espaço na indústria, podendo ser aplicados em diferentes situações, de acordo com a quantidade de carbono que possuem em sua composição, e por isso, o consumo de aço em todo mundo é em média, de mais de um bilhão de toneladas por ano.

Em paralelo, os estudiosos se interessam pelos efeitos que as ferramentas de corte podem causar nos materiais usinados, demandando que haja estudo da aplicabilidade da usinagem nos mesmos e certa atenção para as diferentes combinações de parâmetros de usinagem a serem utilizados em cada caso.

Por esse motivo, o maior desafio neste processo é adequar o acabamento final do produto às melhores condições de usinagem, altamente influenciados pelo tipo e material de ferramenta de corte a ser utilizada. De acordo com a aplicação e o tipo de produto que se deseja obter, é necessário combinar as variáveis de entrada entre si, sempre avaliando a combinação formada nas variáveis de saída.

Como fator importante nos processos industriais de larga escala, podemos citar o desgaste das ferramentas e a influência que o uso de fluidos de corte pode causar a elas. Segundo Santos e Sales (2007), o uso de fluidos de corte neste processo é comum devido à melhora nas condições tribológicas. O emprego de fluido de corte aumenta a vida da ferramenta, minimiza a geração de calor durante o processo, auxilia na remoção dos cavacos e geralmente melhora a eficiência do sistema produtivo. Isso ocorre, pois, a lubrificação faz com que haja menor atrito entre a ferramenta e a peça, e, portanto, exige menor esforço. Em contrapartida, mais recentemente, as indústrias estão tendo que lidar com outro fator em sua

gestão, a sustentabilidade, tendo que muitas vezes optar por processos que produzam menor quantidade de peças, e por vezes, mais custosos, em face de agredir menos o meio ambiente e a saúde de seus operadores. Este é o caso da usinagem a seco e a técnica de Mínimas quantidades de lubrificante (MQL).

Apesar de existirem tantos fatores favoráveis, é possível dizer que este processo também apresenta alguns problemas. O mais conhecido é a baixa produtividade quando comparado a outros processos industriais, isto porque, demanda de mais cautela ao executar alguns detalhes. Isso, aliado aos altos custos de equipamentos, pode fazer com que o processo não seja aplicável para alguns tipos de indústria, como de bens de consumo, já que esta precisa de grandes quantidades do produto final.

Esse estudo foi desenvolvido a fim de se entender melhor o comportamento das ferramentas cerâmicas na usinagem do aço ABNT 4340, um material que apresenta alta resistência quando submetido a solicitações mecânicas. Foi necessário analisar os efeitos das combinações de diferentes parâmetros de usinagem como velocidade de avanço, de corte e profundidade durante a usinagem para beneficiamento do aço ABNT 4340 para poder avaliar a aplicabilidade dessa ferramenta em situações semelhantes à observada.

2 OBJETIVOS

2.1 GERAIS

- Analisar a usinabilidade do aço ABNT 4340 temperado e revenido no processo de torneamento a seco com ferramentas cerâmicas a base de Al_2O_3 e Ni_2O_3 avaliando a viabilidade da utilização dessas ferramentas a partir da qualidade do acabamento superficial da peça final, considerando os desgastes na ferramenta;

2.2 ESPECÍFICOS

- Analisar o desempenho e durabilidade de ferramentas com composição cerâmica a base de Al_2O_3 e Ni_2O_3 na usinagem do aço ABNT 4340 a partir da medição do desgaste e avarias causadas na ferramenta;
- Encontrar condições de usinagem alternando os parâmetros de velocidade de corte, avanço e profundidade, medindo os fatores de vibração, emissão acústica e potência de usinagem, que viabilizem a utilização dessa ferramenta para o aço ABNT 4340;
- Observar e classificar os tipos e formas de cavacos gerados em cada combinação de parâmetro;
- Avaliar o torneamento de aços de elevada dureza e tenacidade

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 AÇOS

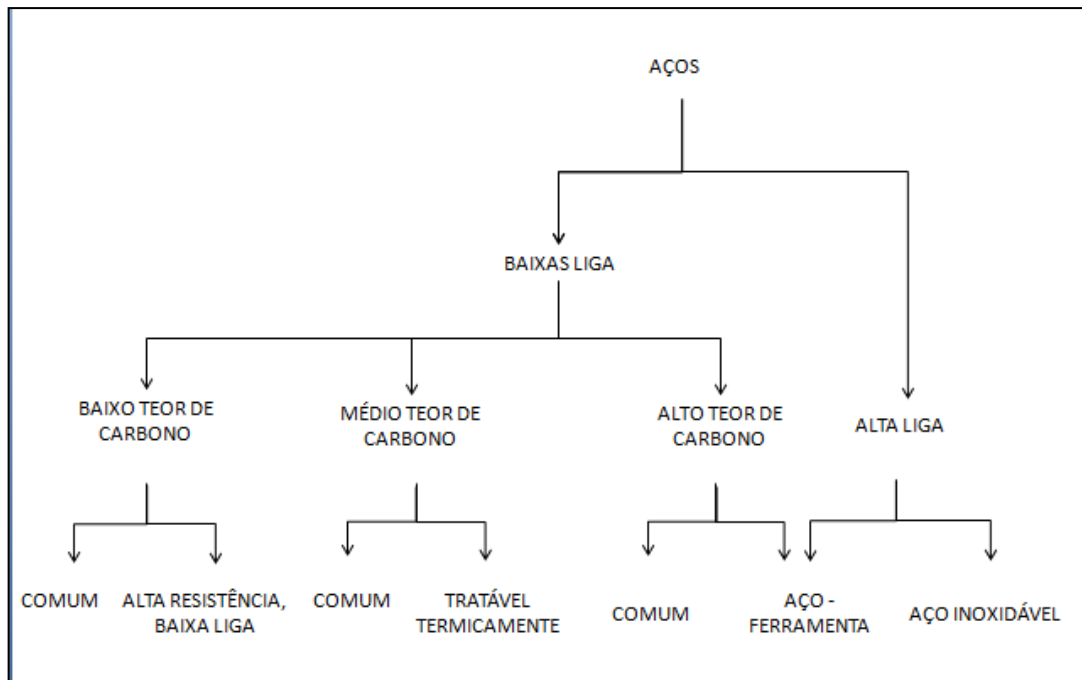
É possível definir os aços como ligas ferro-carbono, sendo a quantidade de carbono presente na liga o fator mais crítico, podendo atingir até 2,1% peso. Além disso, a concentração significativa de outros elementos, junta de tratamentos térmicos, é responsável por modificar algumas características e propriedades do material final, influenciando na classificação em vários tipos de aço (CALLISTER, 2013). Existem os aços de baixa liga e alta liga, divididos assim em razão da quantidade de outros elementos presentes como manganês, enxofre, silício, fósforo, etc. O principal objetivo ao adicioná-los é obter melhores propriedades, como por exemplo, melhor usinabilidade, maiores níveis de dureza a quente, melhorar a temperabilidade, resistência ao desgaste entre outras (ROMEIRO, 1997)

De maneira geral, podemos classificar as porcentagens de teor de carbono em três níveis: baixo, médio e alto. Quanto maior for a quantidade presente, maior também será a influência na capacidade de modificação de propriedades, podendo aumentar os níveis de dureza, resistência ao desgaste, entre outros. (CALLISTER, 2013).

De acordo com Callister (2013), as faixas de classificação são definidas da seguinte maneira:

- Aços com baixo teor de carbono: normalmente, a presença de carbono é inferior a 0,25% e apresentam resistência na formação de fase martensítica, fazendo com que sejam mais dúcteis e tenazes, porém com menor resistência mecânica.
- Aços com médio teor de carbono: se situam na faixa entre 0,25 e 0,60% de teor de carbono, apresentando facilidade de tratamento por austenitização, têmpera, e revenimento. No entanto, podem ainda não apresentar bons níveis de dureza.
- Aços com elevado teor de carbono: possuem teores de carbono de 0,60 a 2,1% sendo os melhores em questão de dureza e resistência. Normalmente são encontrados endurecidos ou revenidos.

Figura 1: Esquema de classificação dos Aços



Fonte: Adaptado de Callister Jr. (1999).

3.1.1 Aço ABNT 4340

O aço ABNT 4340 é comumente classificado como um aço de alta resistência e médio teor de carbono (LEE; SU, 1999). Sua nomenclatura tem relação com as proporções dos elementos presentes, estando na classe 43XX dos aços ligados de Ni-Cr-Mo, e de acordo com a porcentagem de 0,4% de Carbono (NOGUEIRA, 2013). Destacam-se como propriedades relevantes a alta resistência mecânica, boa tenacidade e possibilidade de diferentes tratamentos térmicos. Entretanto, quando se fala em têmpera, é necessário que haja bastante cautela, pois este aço pode se tornar frágil em razão da faixa de temperatura utilizada (LEE; SU, 1999). De mesmo modo, apresentam baixa soldabilidade, dificultando seu uso em situações que exigem esses requisitos (FAVORIT, 2016).

Devido às suas propriedades, sua aplicação é bastante abrangente, podendo ser utilizado tanto na indústria aeronáutica em virabrequins como também em engrenagens, eixos e componentes estruturais automobilísticos comumente submetidos a altas solicitações mecânicas (ALVES, BIANCHI, AGUIAR, 2011).

Na Figura 2, é possível observar as proporções de elementos de liga na composição química do aço 4340, de acordo com a norma ABNT NBR NM 87:1996.

Figura 2: Composição química do Aço ABNT 4340

C	0,38-0,43
Mn	0,60-0,80
Si	0,15-0,35
Ni	1,65-2,00
Cr	0,70-0,90
Mo	0,20-0,30

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

3.2 USINAGEM

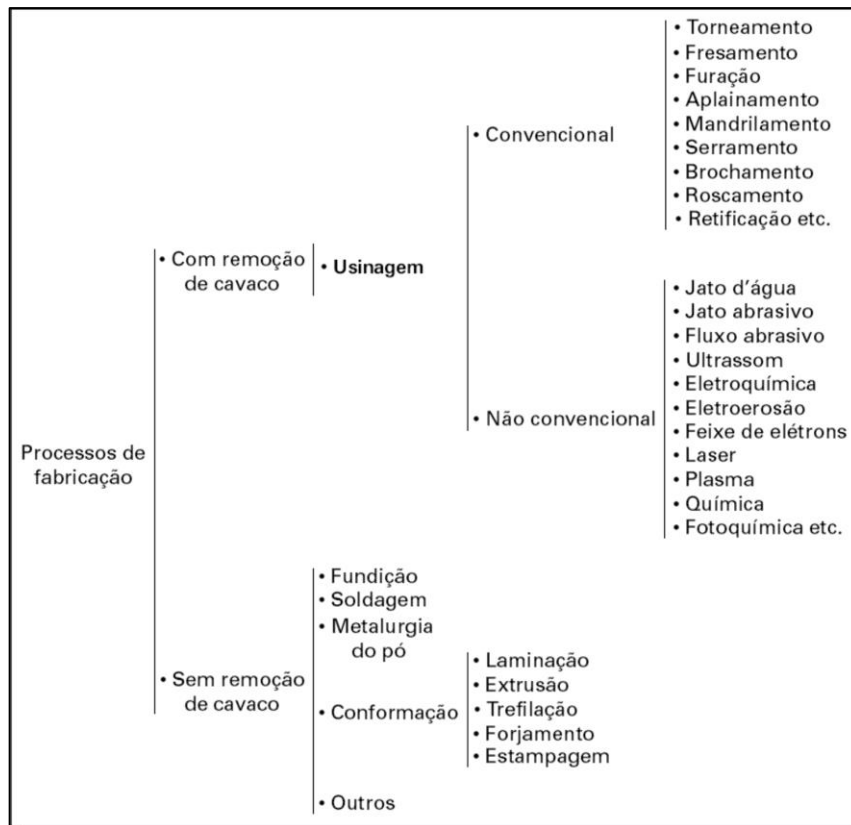
De forma simplificada, a usinagem consiste em um processo responsável por dar forma, dimensão e acabamento a uma peça, removendo material na forma de cavaco, fazendo o uso de uma ferramenta de corte, seja ela qual for (FERRARESI, 1970).

É muito utilizada na fabricação de peças que exigem precisão e alta qualidade superficial (LAURO *et al.*, 2014).

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2013) a usinagem consta em diversos registros históricos como uma das técnicas mais antigas de se dar forma, mas não ficou guardado no passado, sendo que sua visibilidade tem ganhado cada vez mais importância nos dias de hoje, uma vez que é responsável por 10% de todas as peças de metal produzidas no mundo (TRENT ; WRIGHT 2000 apud MACHADO, 2011)

Na Figura 3, estão apresentados em forma de diagrama, os processos de fabricação mais utilizados:

Figura 3: Os tipos de processos de fabricação



Fonte: Machado *et al.*, (2011).

Mesmo com o avanço de técnicas e com equipamentos cada vez mais tecnológicos, ainda é difícil controlar alguns parâmetros de usinagem, o que torna um processo bastante complexo em relação ao resultado e difícilmente de ser repetido nas mesmas condições (MACHADO *et al.*, 2011).

O torneamento é um dos tipos mais comuns de usinagem, principalmente por apresentar um melhor custo benefício, se comparando o maquinário e ferramental com outros métodos de fabricação (CHAUDHARI; HASHIMOTO, 2016) o que faz com que seja mais acessível em produções de larga escala.

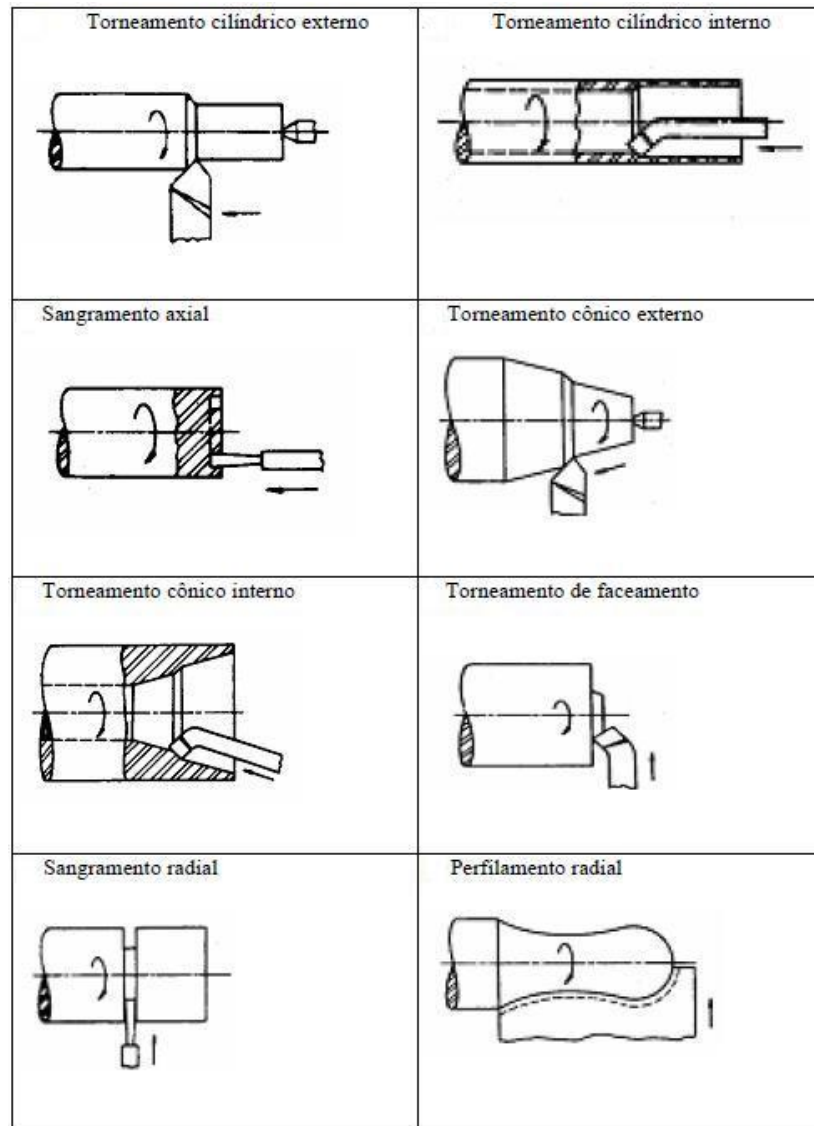
3.2.1 Torneamento

Considerado o processo mais comum no corte de metais (TRENT ; WRIGHT, 2000), o torneamento é definido como um processo em que necessário prender a peça a máquina e rotacioná-la em torno de seu eixo, movimento a ferramenta de corte, tanto na forma longitudinal quanto transversal (MACHADO *et al*, 2011). É possível ainda classificar o processo de torneamento de acordo com objetivo específico e as diferentes trajetórias que a ferramenta pode seguir (MACHADO *et al*, 2011). Como objetivo mais comum pode-se citar a obtenção de peças de revolução (TRENT; WRIGHT, 2000).

Amorim (2002) cita como principal diferencial do torneamento a possibilidade de um corte contínuo ao longo da peça, sem necessidade de ajustá-la em outro sentido. Outro ponto relevante exposto por ele é o movimento simultâneo de ferramenta em translação e peça em rotação.

O torneamento pode ser classificado como na Figura 4.

Figura 4- Classificação dos tipos de torneamento



Fonte: Ferraresi, (1970)

3.2.2 Movimentos entre peça e ferramenta

Como dito anteriormente, segundo Machado *et al* (2011) o torneamento ocorre com a movimentação da ferramenta em relação a peça que fica fixa na máquina, sendo que a ultima rotaciona apenas em torno de seu eixo. Dessa forma, se faz importante a determinação dos parâmetros envolvidos nesse processo. São os principais: movimento de corte, movimento de avanço, velocidade de corte (V_c), e profundidade de corte (a_p). É possível ainda dividir os movimentos de acordo com a remoção ou não de cavaco direto, isto é, segundo Machado *et al* (2011) e Ferraresi (1970), a divisão é a seguinte:

- Movimentos que originam cavaco diretamente:

Movimento de corte: movimento entre a peça e a aresta de corte, capaz de remover material apenas em uma rotação se não houver avanço;

Movimento de avanço: ocorre entre a peça e a aresta de corte, que sem o movimento acima dito, é capaz de remover material continuamente;

Movimento efetivo: é a combinação dos movimentos de corte e avanço, resultando na remoção de cavaco quando efetuados ao mesmo tempo.

- Movimentos que não originam cavaco diretamente:

Movimento de aproximação: é o movimento inicial, em que a ferramenta é levada até a superfície da peça a ser usinada;

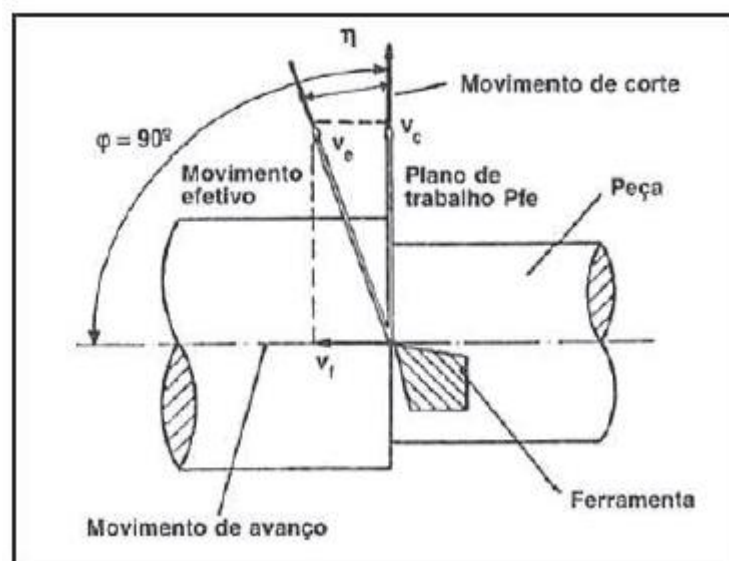
Movimento de profundidade: determina a profundidade do corte, ou seja, quanto de material será removido por passada;

Movimento de correção: ajusta a distância entre peça e ferramenta causado por algum fator durante a usinagem;

Movimento de recuo: depois de finalizado o processo de usinagem, é o movimento de afastamento entre a ferramenta e a peça.

Na Figura 5, observam-se os movimentos de corte, avanço e efetivo:

Figura 5: Movimentos de corte



Para Machado *et al* (2011), velocidade de corte (V_c) pode ser dita como a velocidade analisada instantaneamente em um ponto, seguindo a direção e o sentido do corte. Machado *et al* (2011) afirma que pode ser calculada pela equação (1):

$$V_c = \frac{\pi \times d \times \eta}{1000} \quad (\text{m/min}) \quad (1)$$

Sendo: v_c = velocidade de corte, d = diâmetro da peça (mm) e η = número de rotação (rpm)

De forma parecida, a velocidade de avanço (V_f) também é a velocidade analisada naquele instante, no entanto, ocorre no sentido e direção do avanço e Diniz *et al* (2013) a calcula através da equação (mm/min)

(2):

$$V_f = f \cdot n \quad (\text{mm/min}) \quad (2)$$

Sendo:

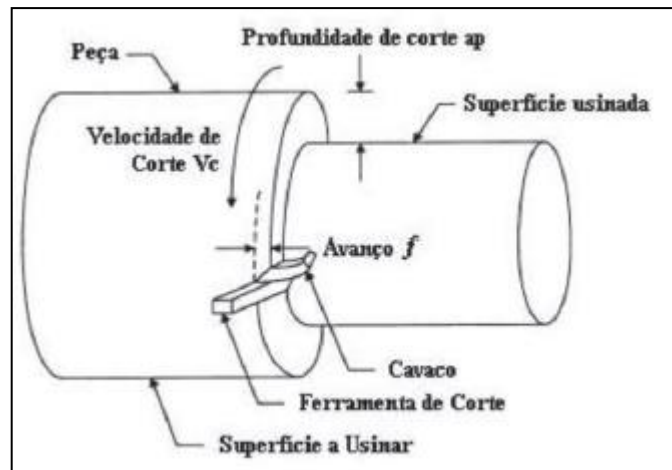
f = avanço (mm/volta) e n = número de revoluções por minuto

Já o avanço (f) pode ser definido como a distância percorrida pela aresta de corte da ferramenta por rotação.

A profundidade de corte (a_p) é o nível de penetração da ferramenta na peça, perpendicular ao plano de trabalho e diz respeito à espessura de material que será retirado (AMORIM, 2002).

A Figura 6 ilustra todos os parâmetros de usinagem V_c , V_f , f e a_p .

Figura 6: Parâmetros de corte



Fonte: Amorim, (2002).

3.2.3 Cavacos

De acordo com Diniz, Marcondes e Coppini (2006), a formação do cavaco influencia diretamente em fatores como desgaste de ferramentas, temperatura do sistema e os esforços exigidos durante o processo de corte. O cavaco pode ter diversas formas e tipos, e para cada um, existem condições de usinagem específicas.

3.2.3.1 Mecanismos de formação

Segundo Machado *et al.* (2011), o cavaco resulta de um processo a altíssimas velocidades, havendo deformação, ruptura, e as vezes até fundição do cavaco, que acaba grudando na peça novamente, causando ruído nas variáveis medidas. São vários fatores que devem ser olhados neste processo, os econômicos, os de segurança, e a qualidade da peça como um todo, mas principalmente, superficial (DINIZ *et al.*, 2013).

Machado *et al* (2011) sugere que é possível separá-los em quatro diferentes etapas de formação do cavaco:

- Recalque inicial: Nesta primeira etapa, aparecem as deformações plásticas e elásticas da peça, devido à solicitação que o ângulo de saída da ferramenta causa.

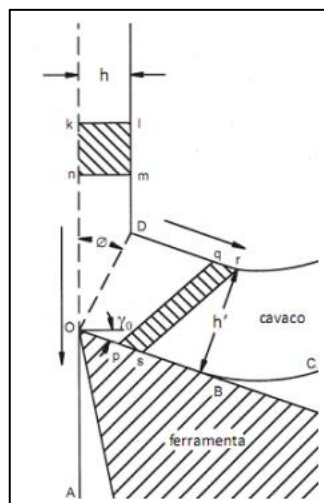
- Deformação e Ruptura: é quando as solicitações mecânicas aumentam e a parte que sofreu recalque vai se cisalhando em relação à peça.

-Deslizamento das lamelas: Nesta terceira etapa, começa a ocorrer alguma ruptura do cavaco. De acordo com o as propriedades do material, isto é, seu comportamento mecânico, o cavaco formado vai se diferenciar nesta etapa.

-Saída do cavaco: Por fim, a última etapa é quando cavaco e peça se separam definitivamente, enquanto um novo cavaco vai se formando em outra parte superficial da peça sendo usinada.

A Figura 7 apresenta as áreas de formação do cavaco.

Figura 7: Formação do Cavaco



Fonte: Tancret *et al.*, (2003).

3.2.3.2 Formas e tipos de cavacos

É possível dizer que os cavacos são classificados de acordo com o comportamento mecânico do material a ser usinado, isto é, se é dúctil ou frágil. Ainda é necessário levar em consideração as condições de usinagem empregadas durante o processo, como visto na figura 6. De forma geral, para materiais dúcteis, os cavacos formados são contínuos, sendo que para materiais frágeis, os cavacos formados são mais curtos, isto é, descontínuos (MACHADO *et al.*, 2011).

Materiais como os aços de baixa liga ou ainda normalmente produzem cavacos contínuos. Segundo Machado *et al.* (2011) na formação deste tipo de cavaco, o material inicia uma fratura na zona de cisalhamento primária com grandes deformações e permanece

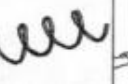
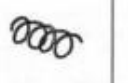
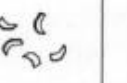
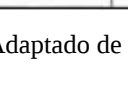
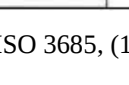
homogêneo, sem fragmentação. Para o Aço ABNT 4340, devido sua alta tenacidade, também costumam produzir cavacos contínuos e pouco fragmentado.

Para Ferraresi (1970) o cavaco de cisalhamento ocorre devido a diversos fatores, como por exemplo, a heterogeneidade do material, aumento da deformação e elevadas vibrações. Ainda segundo Ferraresi (1970), este tipo de cavaco pode ser formado a partir do cisalhamento de algumas partes do material, que posteriormente voltam a se soldar.

Já para os cavacos descontínuos, por se tratar de materiais frágeis, na zona de cisalhamento primária ocorre a fratura completa do cavaco, fazendo com que haja a formação de vários fragmentos curtos (BOOTHROYD; KNIGHT, 1989).

A forma em que os cavacos são produzidos também oferece diferenciação e classificação entre eles, de acordo com a Figura 8.

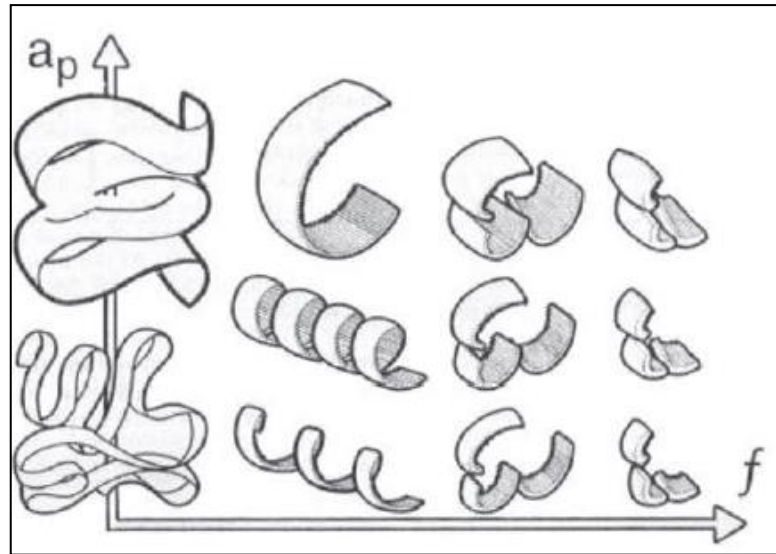
Figura 8: Classificação de cavacos de acordo com sua forma segundo norma ISO 3685:1993

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- Salto		
							
1-3- Emaranhado	2-3- Emaranhado		4-3- Emaranhado	5-3- Emaranhado			
							

Fonte: Adaptado de ISO 3685, (1993)

Pela Figura 9, é possível observar que conforme aumenta a profundidade de corte (ap), o cavaco se forma em fitas mais grossas e menos enroladas. Já com o aumento do avanço (f), os cavacos ficam mais cisalhados, ou seja, quebrados e curtos.

Figura 9: Influência dos parâmetros de usinagem na formação dos cavacos



Fonte: Smith, (1989) apud Machado *et al.*, (2011).

3.3 MATERIAIS PARA FERRAMENTAS

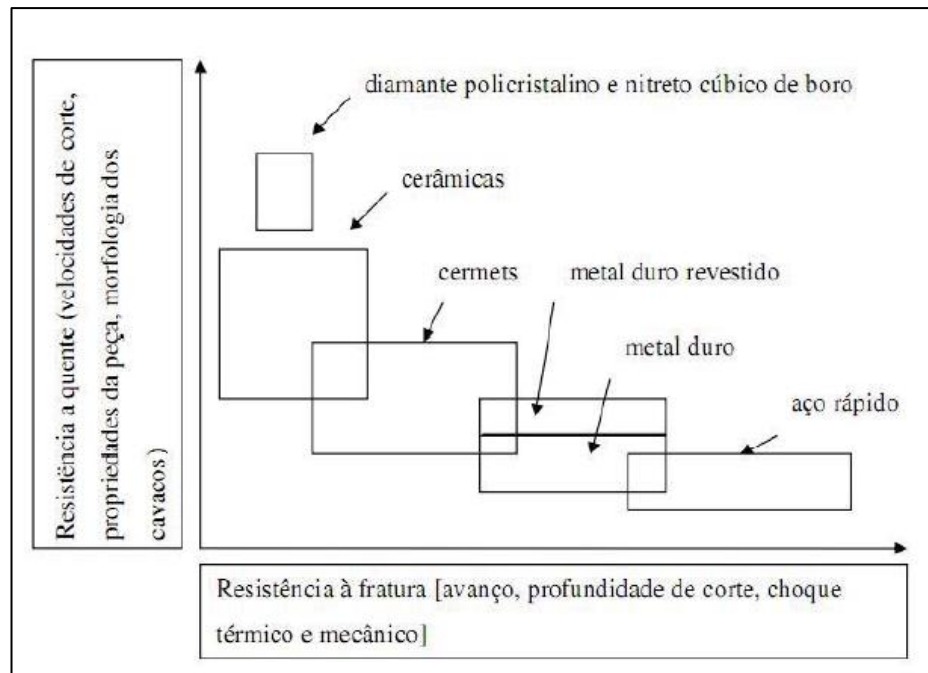
Para que o processo de usinagem seja realmente efetivo e faça sentido, parte-se do pré requisito que a dureza da ferramenta deve ser superior a dureza do material a ser usinado. (DINIZ *et al*, 2013).

As principais propriedades de uma ferramenta de corte devem ser: tenacidade adequada, elevada dureza, ser quimicamente estável, isto é, inerte a corrosão e não reagir com elementos externos e por fim, ter uma boa resistência ao desgaste, ao cisalhamento e à compressão. (FERRARESI, 1970).

Para que seja feita a escolha da ferramenta ideal, deve se levar em consideração qual o material a ser usinado, qual a qualidade superficial final necessária para o produto, a complexidade da peça, a velocidade e o volume de produção requerida, entre outros fatores que irão definir o material e a geometria mais adequada para a determinada aplicação.

De acordo com Mehrotra (1998), é possível classificar os materiais para ferramental a partir de suas propriedades como apresentado na Figura 10.

Figura 10: Materiais de ferramentas e suas propriedades



Fonte: Mehrotra, (1998).

3.3.1 Ferramentas Cerâmicas

As ferramentas cerâmicas tem como principais propriedades: dureza a quente e a frio, resistência ao desgaste, estabilidade química e resistência a abrasão. Entretanto, também possui algumas propriedades desfavoráveis ao processo de usinagem, tais como: baixa condutividade térmica e baixa tenacidade o que faz com que a ferramenta possa sofrer mais trincas e quebras (DINIZ *et al*, 2013).

Para Diniz *et al* (2013), é possível classificar as ferramentas cerâmicas em três grupos:

- A base de óxido de alumina

Conhecidas por ferramentas de cerâmica branca, devido à coloração que apresentam quando são prensadas a frio, porém, quando o processo é feito a quente, esta coloração passa a ser acinzentada.

São divididas ainda em mistas, quando tem em sua composição traços de “whiskers” ou simplesmente puras. As cerâmicas mistas contem além de alumina, carboneto de titânio (TiC) ou nitreto de titânio (TiN).

A alumina classificada como reforçada com “whiskers” é constituída de uma matriz cerâmica de Al_2O_3 com reforço de monocristais.

As cerâmicas puras são constituídas de óxido de alumina pura em finos grãos de Al_2O_3 . Também podem apresentar algum teor de MgO responsáveis pela inibição do crescimento dos grãos, titânio e níquel para aumentar a resistência mecânica e óxido de zircônio (ZrO_2) para aumentar a tenacidade.

- Cerâmicas a base de nitreto de silício

São ferramentas constituídas por cristais de Si_3N_4 com uma fase intergranular de SiO_2 que são sinterizados na presença da alumina, chamada de Sialon, e/ou Y_2O_3 e MgO .

- Cermets

Sua estrutura é semelhante a ferramentas de metal duro, constituídas de partículas de cerâmica e metal, que são ligadas por um aglomerante. As partículas duras são TiC , TiN ou TiCN . Tendo como elemento de ligação geralmente o Ni . Podem ser recobertas com TiN , o que reforça o coeficiente de atrito e a tendência a formação de aresta postiça de corte.

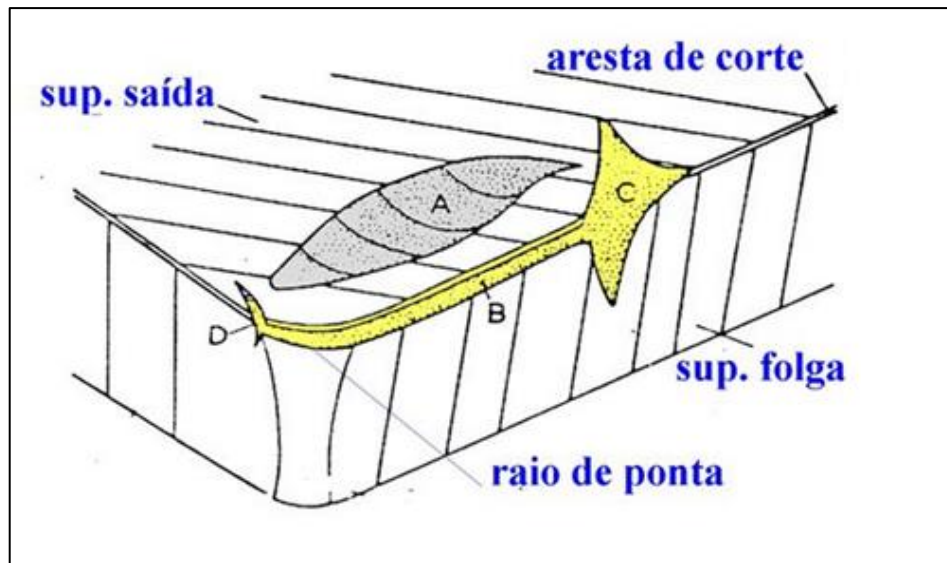
3.4 DESGASTES DE FERRAMENTA

Diniz *et al* (2013) classifica os impactos causados nas ferramentas de várias formas, mas basicamente em desgaste, avaria e deformação. A avaria normalmente é algo que inutiliza a peça como trincas e quebras. O desgaste apresenta uma perda de material, adquirindo uma forma diferente da inicial, é comum e vai ocorrendo conforme o uso da ferramenta. Já para que uma deformação ocorra, é necessário que haja força de cisalhamento entre peça e ferramenta. Isso ocorre normalmente quando a tenacidade da ferramenta é maior que a da peça, o que provoca uma reação oposta na ferramenta.

3.4.1. Tipos de desgaste

Para Diniz *et al* (2013), os desgastes principais podem ser classificados em três: flanco, entalhe e cratera. Estes desgastes estão apresentados a seguir, na Figura 11:

Figura 11: Tipos de desgaste: A-Cratera, B- Flanco, C/D- Entalhe



Fonte: Adaptado de Ezugwu, (2005)

- O desgaste de flanco ou frontal é o tipo mais comum, causado no espaço de folga da ferramenta devido ao atrito com a peça. Acontece devido à perda do ângulo da ferramenta, já que a folga vai ficando maior e assim, aumenta o contato com a peça (DINIZ *et al.*, 2013)
- O desgaste de cratera é decorrente da maneira como o cavaco é formado, fazendo com que esse tipo de desgaste aconteça na face de saída da ferramenta (DINIZ *et al.*, 2013)
- O desgaste de entalhe é conhecido por ocorrer nas duas superfícies entre a ferramenta e a peça, tanto a de saída quanto a de folga (DINIZ *et al.*, 2013)

3.4.2. Mecanismos causadores

Segundo Diniz *et al* (2013) os principais mecanismos formadores de desgaste são: abrasão mecânica, difusão e oxidação.

O mecanismo de abrasão ocorre em toda extensão na qual uma peça é submetida a uma ferramenta de corte, devido à presença de partículas duras na composição química da peça usinada combinada a altas temperatura, o que pode reduzir a dureza da ferramenta e causar deformações em sua superfície (DINIZ *et al.*, 2013). Este é um dos principais causadores de desgaste de ferramentas, normalmente ocasionando desgaste de cratera e flanco, mas principalmente desgaste de entalhe.

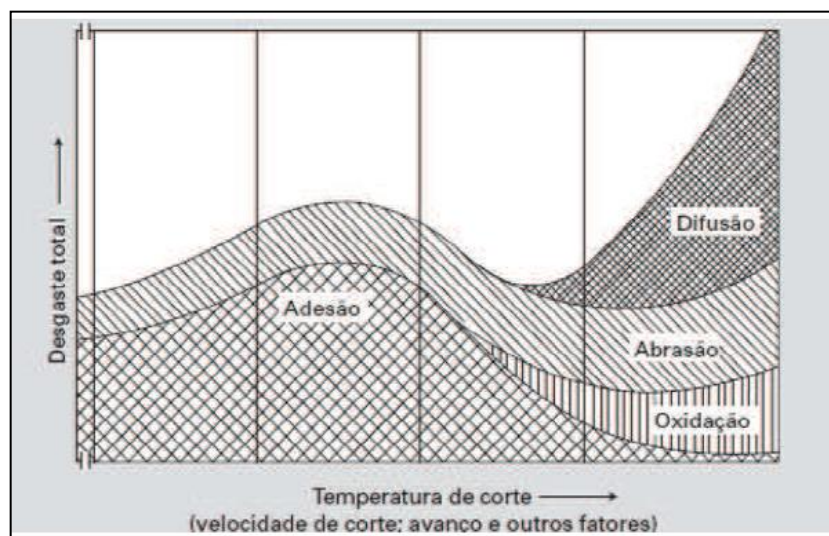
O mecanismo de difusão ocorre entre a ferramenta e cavaco decorrente de altas temperaturas durante o corte, causadas por altas velocidades de corte. É o principal responsável por desgastes de cratera (DINIZ *et al.*, 2013).

Já o mecanismo de oxidação normalmente tem a ver com a atmosfera em que ocorre o processo de usinagem, isto é, se existe a presença de gases ou fluidos de corte que podem reagir com a peça ou ferramenta, e oxidá-las. É mais comum observá-lo em regiões de atrito entre cavaco-ferramenta (DINIZ *et al.*, 2013)

Para Amorim (2002), é impossível observar estes fenômenos separadamente, isto porque, normalmente ocorre um conjunto deles, causados por várias condições de usinagem.

A figura 12 exemplifica esta relação entre condições de usinagem e mecanismos.

Figura 12: Mecanismos formadores de desgaste e a relação com a temperatura de corte



Fonte: Machado *et al.*, (2011)

3.5 RUGOSIDADE

A qualidade superficial de um produto originado por usinagem é um dos fatores mais importantes no processo, principalmente porque pode afetar os custos do processo, e tem como maior indicador a Rugosidade, que nada mais é que a medida dos erros microgeométricos da superfície (JIANG *et al.*, 2006)

A rugosidade é afetada por fatores devido às condições de usinagem e da ferramenta, sendo os principais impactos causados pela taxa de avanço e geometria da ferramenta, ou ainda ângulo de corte e dureza da ferramenta (OLIVEIRA; DINIZ; URSOLINO, 2009)

De forma geral, para avaliar a qualidade final da peça é necessário analisar os seguintes parâmetros de rugosidade:

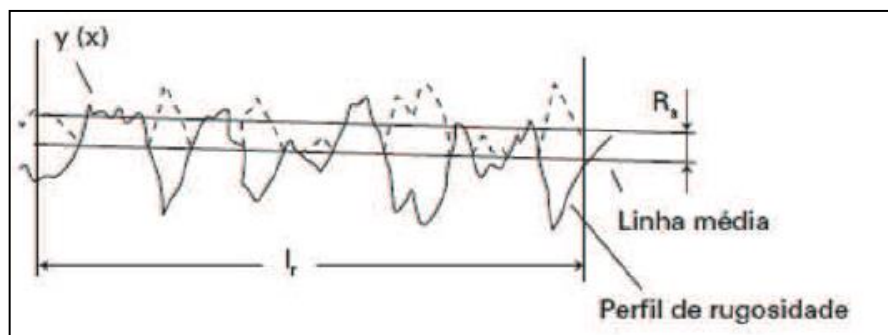
- Rugosidade média (R_a)

Conhecida como desvio aritmético médio, funciona como um parâmetro de amplitude, ou seja, medido através da altura de picos e profundidade de vales, independentemente do espaçamento entre eles (NUNES, 2011). Matematicamente, pode ser definido como a média aritmética entre todos os desvios da linha média encontrados no perfil de rugosidade (NUNES, 2011).

A maior facilidade que existe neste método é que pode ser aplicado na maioria dos processos de fabricação e está presente na maioria dos equipamentos de medição, sendo o parâmetro mais utilizado pela indústria (PIRATELLI, 2011).

Porem, por apresentar algumas desvantagens, não pode ser o único parâmetro utilizado num processo industrial. As desvantagens principais são: defeitos pontuais, que podem passar despercebidos, falta de distinção entre picos e vales e falta de informação sobre as formas de irregularidades. A Figura 13 apresenta como pode ser analisada a rugosidade média.

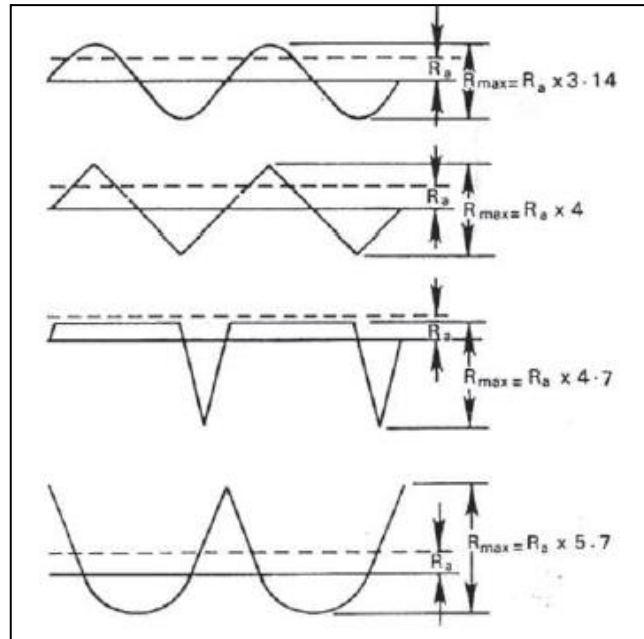
Figura 13: Perfil de rugosidade média (Ra)



Fonte: Adaptado de Machado *et al.*, (2011)

Um exemplo dos problemas causados por este tipo de medição pode ser observado na Figura 14, em que, para perfis topográficos bastante distintos, é possível observar o mesmo valor de Ra:

Figura 14: Mesmo valor de Ra para perfis diferentes



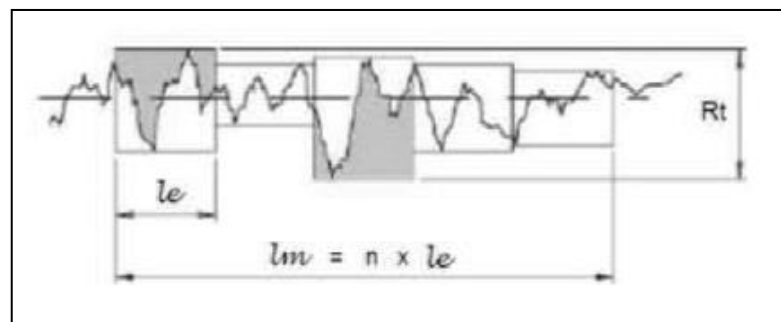
Fonte: Nunes L.T., (2011) apud Dagnall, H. (1986).

- Rugosidade total (R_t)

Conhecida como altura total do perfil, é o parâmetro de rugosidade resultante da soma dos tamanhos do maior pico e do maior vale encontrados no comprimento medido, ou seja, é influenciado por defeitos e irregularidades na superfície, diferentemente da rugosidade R_a (MACHADO *et al.*, 2011).

A Figura 15 apresenta como pode ser medido o parâmetro R_t .

Figura 15: Parâmetro de medição de R_t



Fonte: Piratelli (2011).

Por apresentar valores mais específicos é capaz de definir de melhor maneira algumas falhas no processo. No entanto, por não ser tão comum quanto o R_a , não está presente em

todos os equipamentos. Ou seja, ambos os parâmetros devem ser complementares entre si. (PIRATELLI, 2011).

3.6. POTÊNCIA DE USINAGEM

Para Machado *et al.*, (2011), potência de usinagem pode ser definida como a a potência consumida por um motor devido a força de usinagem requerida no processo, 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 que podem ser calculadas a partir das fórmulas apresentadas nas equações 3 e 4.

$$P_c = \frac{F_c \cdot V_c}{60 \cdot 10^3} \quad (\text{kW}) \quad (3)$$

$$P_f = \frac{F_f \cdot V_f}{60 \cdot 10^6} \quad (\text{kW}) \quad (4)$$

sendo P_c potência de corte, P_f potência de avanço, F_c força de corte em (N), F_f força de avanço em (N), V_c e V_f as velocidades de corte e avanço em (m/min).

Segundo Souza (2004), como os valores da potência de avanço costumam ser muito inferiores aos de potencia de corte, é possível eliminá-los do cálculo e aproximar a potência total do motor da máquina-ferramenta à formula expressa na equação 5.

$$P_m = \frac{P_c}{\eta} \quad (5)$$

em que η é o rendimento do sistema de transmissão utilizado (MACHADO *et al.*, 2011).

3.7. EMISSÃO ACÚSTICA

A emissão acústica pode ser uma opção complementar a vibração, e tem ganhado destaque devido à diminuição nos custos de equipamentos para esse tipo de análise, se comparado a outros métodos (CHOUDHURY; TANDON, 2000)

De primeira, o método de monitoramento dos sinais de emissão acústica foi desenvolvido como um método não destrutivo para se detectar falhas ou propagação de trincas nos materiais. Em seguida, o 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, 2012).

3.8. VIBRAÇÃO

Mesmo que já tenha sido estudada por bastante tempo, a vibração mecânica existente durante um processo usinagem ainda oferece bastante dificuldade para se atingir maiores taxas de produtividade e qualidade na maioria dos processos, como torneamento, fresamento e furação (SIDDHPURA; PAUROBALLY, 2012). Isso ocorre uma vez que todos os corpos têm capacidade de armazenar energia, podem sofrer um excitação interna e fazendo com que a existência de vibrações seja inerente a qualquer processo de fabricação (MAIA, 2009).

De forma geral, vibração pode ser definida como o movimento dinâmico de um ponto em torno da sua posição de equilíbrio estático (MAIA, 2009). 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 útil (SIDDHPURA; PAUROBALLY, 2012)

4. MATERIAL E MÉTODOS

O único material usinado foi o aço ABNT 4340. Como principais elementos de liga presentes em sua composição, podem-se citar Ni, Cr e Mo.

O único corpo de prova utilizado foi um tarugo de aço ABNT 4340 de 77 mm de diâmetro por 300 mm de comprimento, apresentado na Figura 16, preparado anteriormente para iniciar o ensaio nessas medidas.

Estava em sua forma temperada e revenida, apresentando dureza de 56 HRC.

Figura 166- Corpo de prova



Fonte: Autora

4.1. FERRAMENTA DE CORTE

Para os ensaios, foram utilizadas duas unidades da ferramenta cerâmica SNMG120408, intercalando as faces da ferramenta após cada trecho usinado.

Em sua composição elementos químicos que podem conferir a ela dureza elevada e significativa resistência ao desgaste. Sua composição é dada na Figura 17.

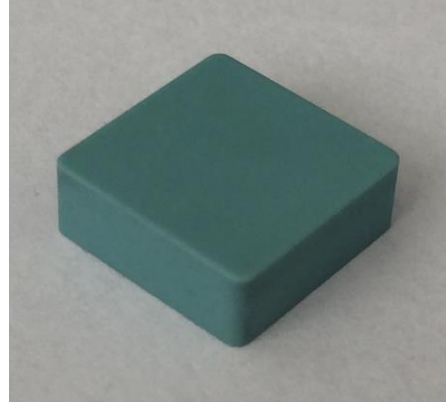
Figura 17: Composição Química ferramenta de corte SNMG 120408

Al_2O_3	CeO_2	TZP	Ni_2O_3
97%	0,50%	2,00%	0,50%

Fonte: Autora

Na Figura 18 está apresentada uma das ferramentas utilizadas no processo.

Figura 17- Ferramenta cerâmica SNMG 120408



Fonte: Autora

4.2. MODELAMENTO DO ENSAIO

O processo todo foi feito a seco, tendo variado os parâmetros de velocidade de corte (V_c), de avanço (f), e de profundidade de corte (a_p).

A Tabela 1 contempla o modelo de experimento. O diâmetro inicial do corpo de prova foi de 77 mm.

Tabela 1: Ensaios das ferramentas

Ensaio	V_c (m/min)	f (mm/rot)	a_p (mm)	Ferram.	Lado	Aresta
1	160	0,1	0,15	2	1	A1
2	160	0,1	0,15	2	1	A2
3	200	0,1	0,15	2	1	A3
4	200	0,1	0,15	2	1	A3
5	160	0,15	0,15	2	2	A1
6	160	0,15	0,15	2	2	A2
7	200	0,15	0,15	2	2	A3
8	200	0,15	0,15	2	2	A4
9	160	0,1	0,25	3	1	A2
10	160	0,1	0,25	3	1	A3
11	200	0,1	0,25	3	1	A4
12	200	0,1	0,25	3	1	A1
13	160	0,15	0,25	3	2	A2
14	160	0,15	0,25	3	2	A3
15	200	0,15	0,25	3	2	A4
16	200	0,15	0,25	3	2	A1

Fonte: Autora

A ferramenta 1 foi utilizada apenas para limpeza da peça por isso suas variáveis de saída não foram consideradas para o estudo.

A cada passada ou variação de parâmetro, eram feitas medidas de rugosidade, de potência de corte, de vibração, de emissão acústica, recolha do cavaco gerado e verificação de alguma avaria que pudesse ter ocorrido na ferramenta.

4.3 TRATAMENTOS ESTATÍSTICO DOS DADOS

O experimento trata-se de um Fatorial completo, e foi necessário fazer a análise de variância ANOVA e assumir como significativos os valores cujo p-value estava abaixo do nível de 0,05.

Com os dados obtidos após cada medição e cada passada, foram feitas análises para verificar se houve correlação entre as variáveis de entrada (velocidade de corte, avanço e profundidade) e as variáveis de saída (emissão acustica, vibração etc) e também com o desgaste medido em cada ferramenta. Verificou-se também qual a relação entre as os parâmetros utilizados e as formações dos cavacos.

Foi utilizado software Minitab 17 da Minitab Inc, a fim de fazer uma análise estatística mais elaborada, podendo comparar as variáveis em estudo com a influência que causaram nos valores obtidos das variáveis de saída, individualmente e das interações entre elas.

4.4 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

4.4.1 Centro de torneamento CNC

O ensaio todo ocorreu dentro da própria Universidade (Unesp/ Campus de Guaratinguetá), no Laboratório de Estudo de Usinagem do Departamento de Materiais e Tecnologia, no Centro de Torneamento CNC da marca ROMI, modelo GL 240M, com rotação máxima do eixo da árvore de 4500 rpm e com potência de 18 kW, apresentado na Figura 19.

Figura 1918: Centro de torneamento CNC ROMI GL240M



Fonte: Autora

4.4.2 Rugosímetro

Para análise de rugosidade e avaliação de acabamento superficial, foram feitas medidas de Rugosidade total (Rt) e Rugosidade média (Ra)

O rugosímetro utilizado foi da marca Mahr, modelo Marsurf M300, com ponta de diamante na haste de medição em formato de cone-esférico (raio de ponta de 2 μm), apresentado na Figura 21. A cada medição, era necessário equilibrar o equipamento em cima do próprio corpo de prova, sem que fosse necessário tirar o mesmo do torno.

Figura 19: Rugosímetro marca Mahr modelo Mahrsurf M300



Fonte: Autora

4.4.3 Análise do desgaste de ferramentas e tipo de cavaco

4.4.3.1 Microscópio Mahr

Todas as ferramentas de corte utilizadas nos ensaios foram observadas e tiveram seus desgastes medidos no microscópio. O microscópio utilizado foi da marca Mahr, modelo MahrVision MM 200.

Figura 20: Microscópio da marca Mahr, modelo MarVision MM200



Fonte: Autora

4.4.3.2 Microscópio Zeiss

Para captura de imagens, foi utilizado um microscópio óptico da marca Zeiss, modelo Stemi2000 conectado a um software de computador, responsável por capturar as imagens e salvá-las para edição. Foram medidos todos os desgastes e avaliadas as avarias existentes. Também foi possível fazer imagens dos cavacos coletados com o auxílio desse microscópio.

Figura 21: Microscópio da marca Zeiss, modelo Stemi2000



Fonte: Autora

4.4.4 Software de captura de dados

Para captação de dados de potência de corte, emissão acústica e vibração durante o processo de torneamento, foi utilizado um sistema com sensores e ferramentas específicas a fim de se utilizar desses dados posteriormente.

O equipamento utilizado foi uma placa da marca National Instruments, NI PCI 6220, capaz de receber os sinais analógicos dos sensores e converte-los em sinal digital para que um software possa interpretá-lo. Esse software foi o LabView® 7.1 da National Instruments.

Figura 22: Computador com software LabView7.1



Fonte: Autora

4.4.5 Potência de corte

Valores de potência consumida pelo motor foram capturados através de um sensor da marca LEM, modelo AT 100B10. O sensor capta o sinal de potência e em seguida os converte para Watts. A equação 7 nos dá a fórmula de conversão simplificada.

$$P_c = \frac{F_c \cdot V_c}{60 \cdot 10^3} \quad (\text{kW}) \quad (6)$$

Substituindo V_{cc} , temos:

$$P_c = I \cdot U_f \cdot F_p \cdot v_3 \quad (7)$$

Sendo: P_c = potência de corte, V_c = velocidade de corte (m/min) e F = força de corte (N)

Figura 23: Sensor de efeito Hall marca LEM modelo AT100 B10



Fonte: Autora

4.4.6 Vibração

A vibração foi captada por um sensor piezoelétrico e um amplificador de sinal da marca VIBRO CONTROL, modelo TV100.

A equação nos dá a fórmula de conversão.

$$V = \frac{25 \cdot V_{cc}}{8} \quad (8)$$

Figura 24: Sensor de vibração modelo TV100



Fonte: Autora

4.4.7 Emissão acústica

Valores de emissão acústica foram capturados através de um sensor R15A da marca Physical Acoustics Corporation, com amplificador de sinal 1272-1000, e saída em RMS. Para esse tipo de dado não é necessário fazer conversões pois o software já o reconhece e armazena.

Figura 25- Sensor de captação acústica marca Physical Acoustics



Fonte: Autora

4.5 CAVACOS

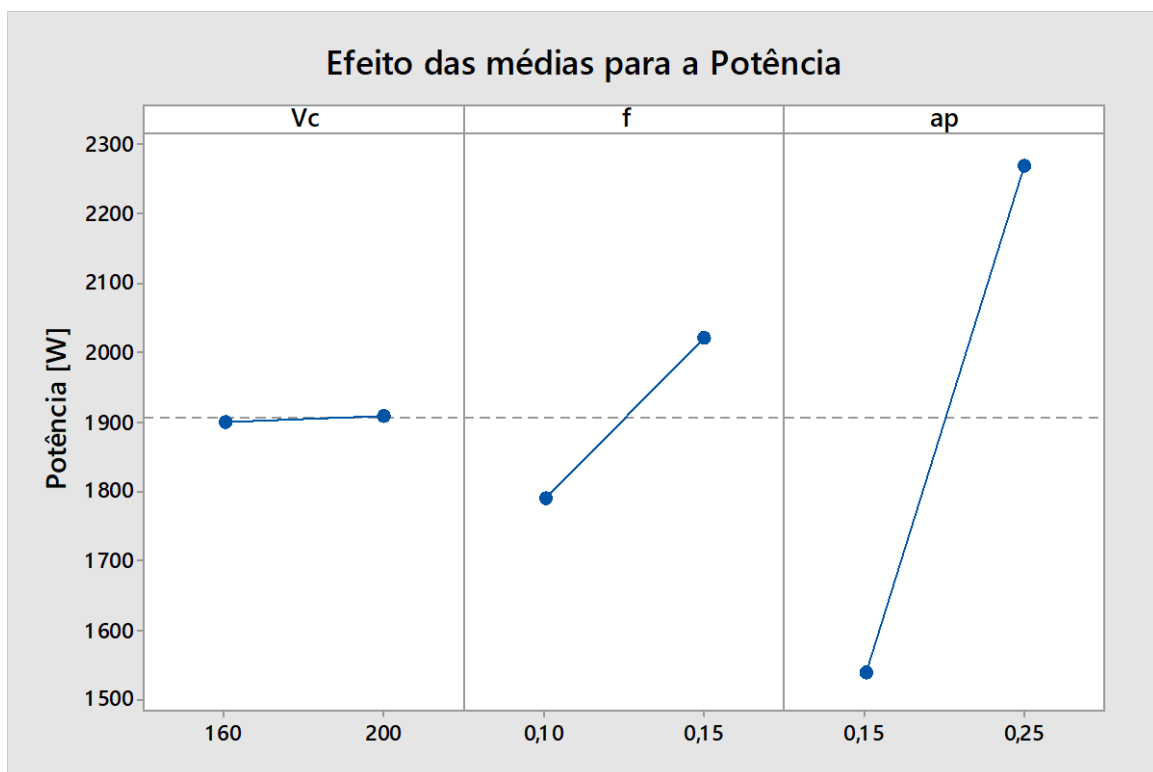
Foram feitas as coletas de cavacos após cada passada, e devido armazenamento para análises posteriores. Cada cavaco foi avaliado de acordo com sua morfologia e seu formato, para tentar relacionar essas características com os parâmetros utilizados e os desgastes medidos

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 POTÊNCIA DE CORTE

Pela Figura 28, é possível observar que quase não houve diferença entre as velocidades de 160 e 200 m/min, pois a potência se manteve próxima a 1900W. Já para a velocidade de avanço (f), fica nítido que o valor de potência obtido foi bem menor para o nível de 0,1. A maior divergência de valores obtidos para potência foi no critério profundidade de corte (ap), já que ao nível de 0,25, foi exigida uma potência muito maior para usinar. Isto é esperado pois com maior nível de profundidade, a área de arrancamento de matéria é maior, e conseqüentemente, a força exigida também será.

Figura 26- Efeito das médias para a potência



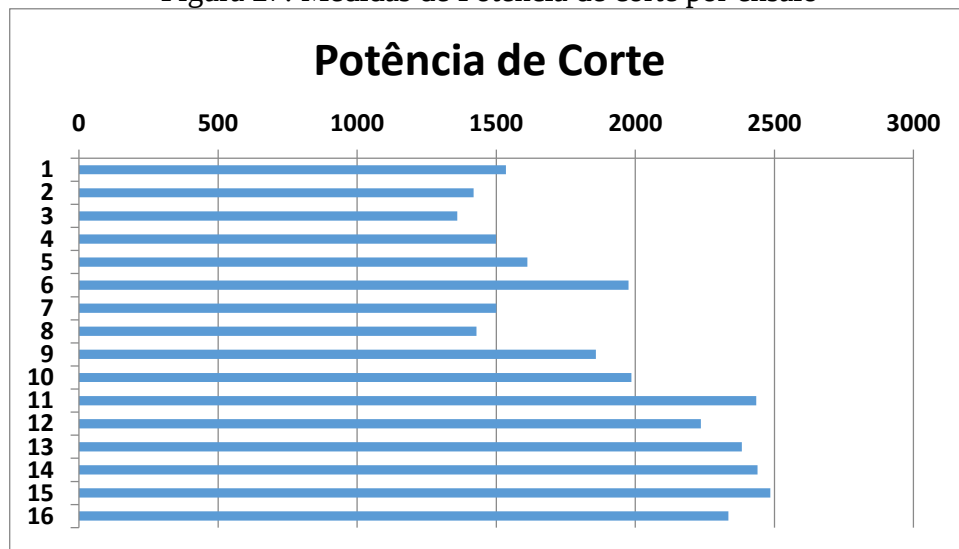
Fonte: Autora

Pela Figura 28, é possível observar que quase não houve diferença entre as velocidades de 160 e 200 m/min, pois a potência se manteve próxima a 1900W. Já para a velocidade de avanço (f), fica nítido que o valor de potência obtido foi bem menor para o nível de 0,1. A maior divergência de valores obtidos para potência foi no critério profundidade de corte (ap), já que ao nível de 0,25, foi exigida uma potência muito maior para usinar. Isto é esperado pois

com maior nível de profundidade, a área de seção transversal é maior, e consequentemente, a força exigida também será.

A figura 29 apresenta o valor medido de potência exigida em casa ensaio, sendo possível observar os ensaios 3 e 8 foram os que demandaram menor potência do torno.

Figura 27: Medidas de Potência de corte por ensaio



Fonte: Autora

Os resultados da análise de variância estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Resultados da análise de variância para a Potência

	Adj SS	Adj MS	F-value	P-value
Vc	315	315	0,02	0,891
f	209810	209810	13,33	0,006
ap	2120518	2120518	134,69	0,000
Vc*f	120861	120861	7,68	0,024
Vc*ap	155551	155551	9,88	0,014
f*ap	11067	11067	0,7	0,426
Vc*f*ap	4409	4409	0,28	0,611

Fonte: Autora

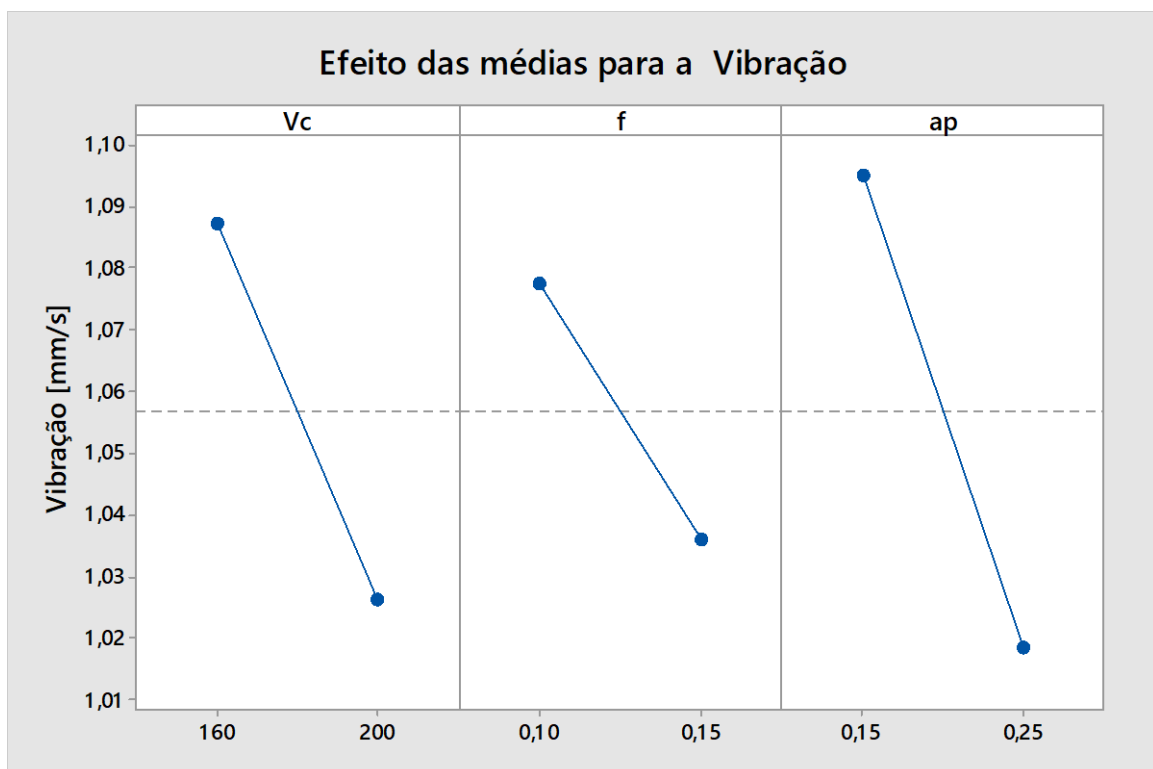
De acordo com os dados acima, é possível perceber que os parâmetros *f* e *ap* foram significativos, já que apresentam valores de *p*-value inferiores a 0,05. Isto significa que conforme estes parâmetros são variados, pode haver bastante influência nos valores de potência medidos, e assim, existe a concordância com a análise da figura 28.

Portanto, a melhor condição para que o motor exija menor potência e, consequentemente, haja menor gasto de energia, pode ser obtida tanto com os fatores $V_c = 200$ m/min ou $V_c = 160$ m/min, e para $f = 0,1$ e $a_p = 0,15$, possivelmente no ensaio 3, que foi a única abaixo de 1400W de potência dentre as condições em estudo.

5.2 VIBRAÇÃO

Na Figura 30, é fácil perceber que houve bastante contraste entre os pares de parâmetros utilizados devido à inclinação das retas. Em se falando de velocidade de corte, para a maior velocidade (200m/min) foi detectado o menor valor de vibração. Isso é um fenômeno coerente, uma vez que para maiores velocidades, a peça acaba tendo maior estabilidade, menor oscilação, sendo natural, portanto, que apresente menor nível de vibração. Na velocidade de avanço, também foi obtidas menores taxas de vibração para o maior nível, de 0,15 mm/rot.

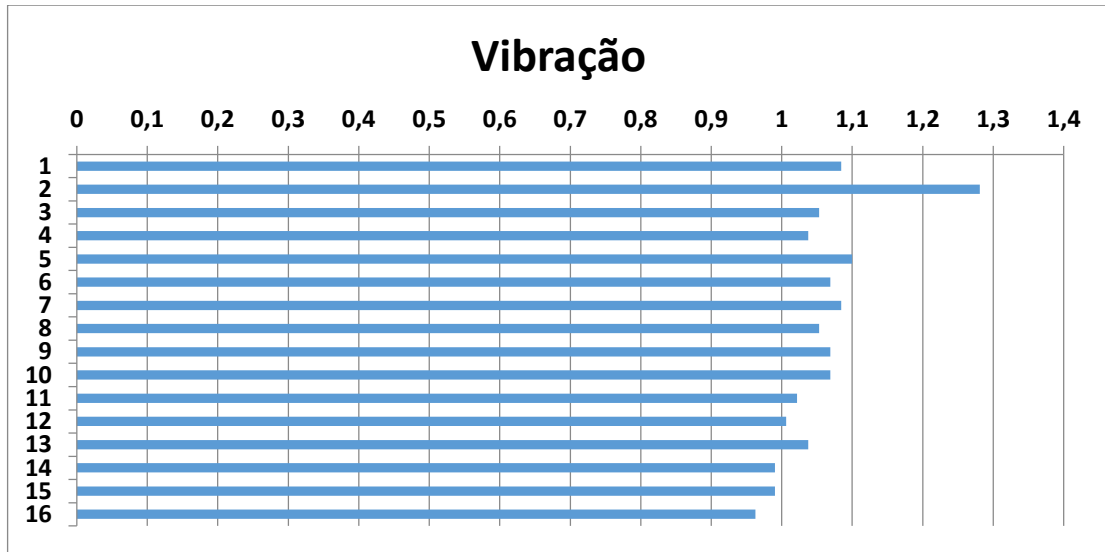
Figura 28- Efeito das médias para a vibração



Fonte: Autora

A figura 31 apresenta os valores medidos no software para vibração apresentada em cada ensaio.

Figura 29: Medidas de Vibração por ensaio



Fonte: Autora

A análise de variância está apresentada na tabela 3:

Tabela 3: Resultados da análise de variância para a Vibração

	Adj SS	Adj MS	F-value	P-value
Vc	0,015037	0,015037	5,46	0,048
f	0,006985	0,006985	2,54	0,15
ap	0,023662	0,023662	8,59	0,019
Vc*f	0,004827	0,004827	1,75	0,222
Vc*ap	0,000926	0,000926	0,34	0,578
f*ap	0,000076	0,000076	0,03	0,87
Vc*f*ap	0,002733	0,002733	0,99	0,348

Fonte: Autora

Para os valores de p-value obtidos, é possível dizer que individualmente, apenas o avanço (f) não foi significativo, enquanto que para os valores de interação em dupla, nenhum foi significativo. De forma semelhante, a interação total entre os três parâmetros em estudo também não foi significativa para influência nos resultados de vibração.

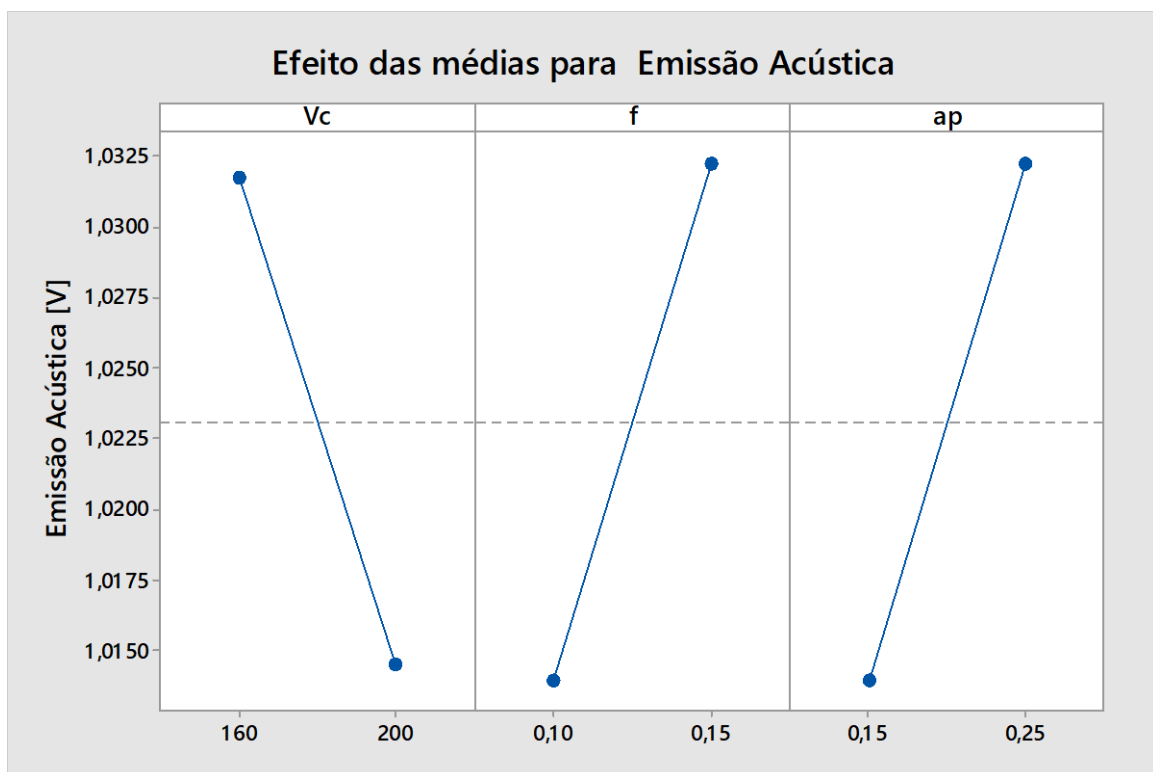
Portanto, entre os ensaios realizados, a melhor condição para obter o menor nível de vibração foi no ensaio 16 com $V_c=200\text{m/min}$, $f=0,15$ e $A_p=0,25$.

5.3 EMISSÃO ACÚSTICA

No quesito emissão acústica, houve resultados inversamente proporcionais entre velocidade de corte e de avanço, de acordo com a Figura 32, isso porque, para menor valor de velocidade de corte obtivemos o maior valor de emissão acústica, enquanto que para o menor valor de velocidade de avanço, obtivemos também a menor taxa de emissão acústica. Já para os níveis de profundidade a_p , observou-se menos emissão acústica no nível de 0,15.

Provavelmente tivemos uma melhor condição a $V_c = 200 \text{ m/min}$ porque conforme a velocidade aumenta, fica mais fácil de romper as ligações dos átomos na produção do cavaco, e também porque a esta velocidade, a temperatura pode atingir maiores níveis, fazendo com o que a peça usinada se torne um pouco mais dúctil, facilitando a retirada de material.

Figura 30- Efeito das médias para emissão acústica



Fonte: Autora

A partir da tabela 4, é possível observar os valores da análise de variância.

Individualmente, todos os parâmetros foram significativos, ou seja, quando são variados seus níveis nos ensaios, apresentam devida influência nos valores obtidos de emissão acústica.

Em relação às interações duplas, apenas $V_c * f$ não foi significativa. A Interação tripla também não apresentou influência nos ensaios.

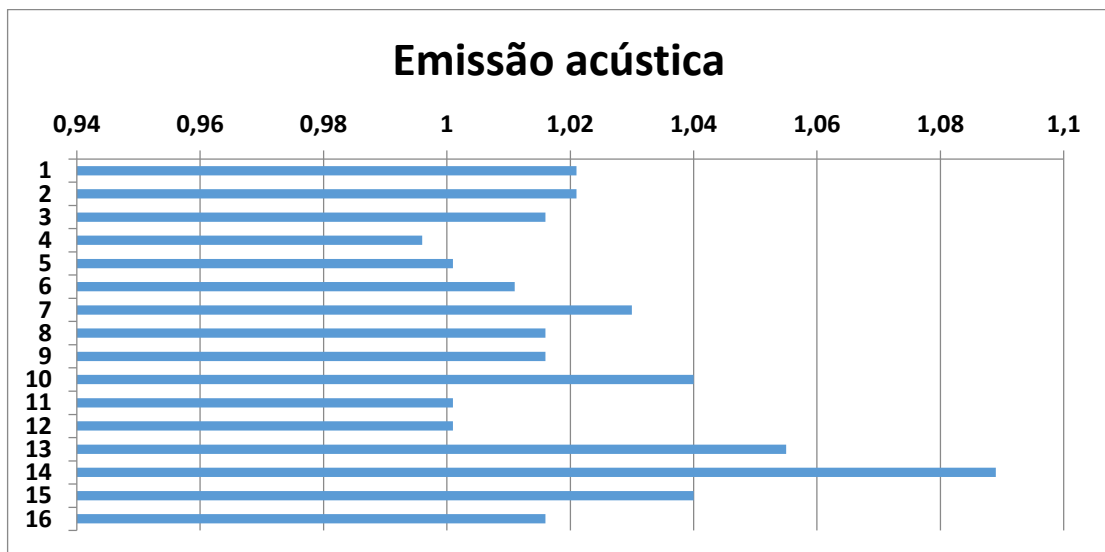
Tabela 4: Resultados da análise de variância para a Emissão Acústica

	Adj SS	Adj MS	F-value	P-value
Vc	0,00119	0,00119	6,34	0,036
f	0,001332	0,001332	7,1	0,029
ap	0,001332	0,001332	7,1	0,029
Vc*f	0,000056	0,000056	0,3	0,599
Vc*ap	0,001332	0,001332	7,1	0,029
f*ap	0,00119	0,00119	6,34	0,036
Vc*f*ap	0,0006	0,0006	3,2	0,112

Fonte: Autora

De modo geral, dentre as condições ensaiadas e dos resultados obtidos, é possível dizer que a fim de obter o menor ruído possível, pode-se escolher a condição $V_c=200$ m/min, $f=0,1$ e $A_p=0,15$, observada no ensaio 4.

Figura 31: Medidas de Emissão Acústica por ensaio



Fonte: Autora

5.4 RUGOSIDADE

A partir dos experimentos, e da medição de parâmetros de rugosidade R_t e R_a a cada passada, foi possível montar a tabela 5 a seguir:

Tabela 5: Dados de Rugosidade Ra e Rt médias

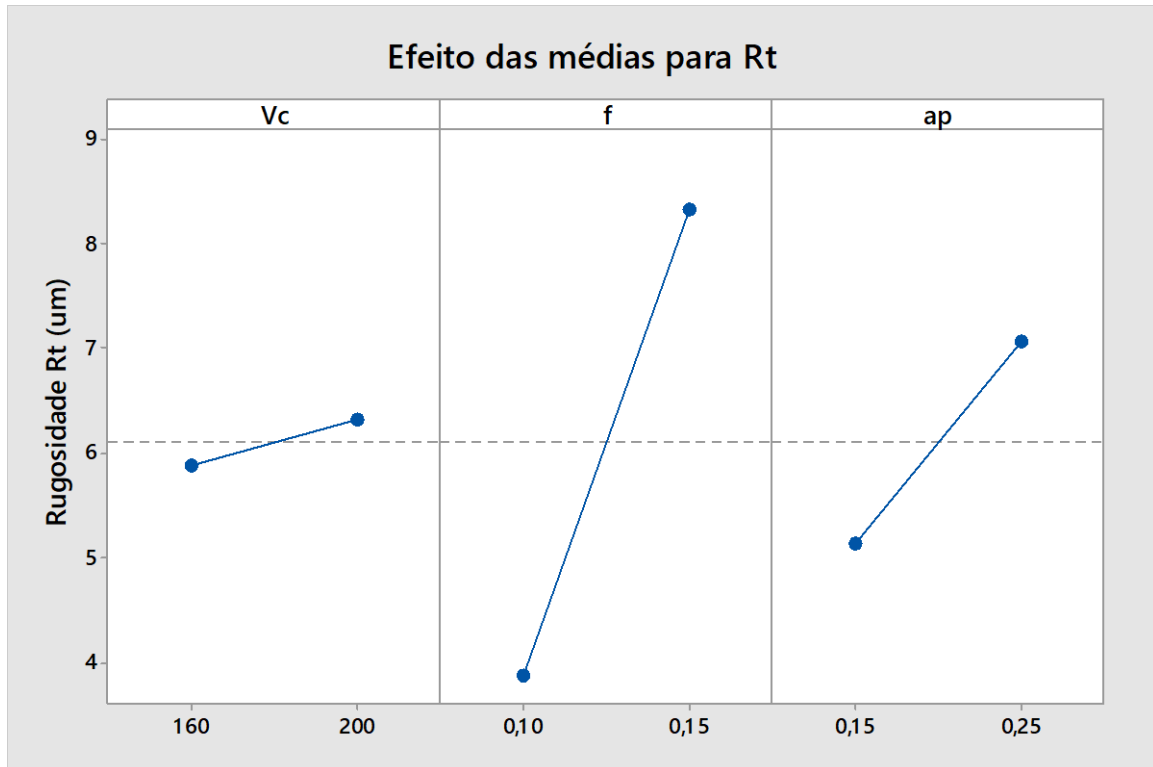
Ensaio	Velocidade de corte	Velocidade de avanço	Profundidade	Ra média	Rt Média
1	160	0,1	0,15	0,846	5,131
2	160	0,1	0,15	0,878	4,946
3	200	0,1	0,15	0,464	3,009
4	200	0,1	0,15	0,661	3,520
5	160	0,15	0,15	0,986	5,015
6	160	0,15	0,15	1,515	8,130
7	200	0,15	0,15	1,042	6,451
8	200	0,15	0,15	0,884	4,915
9	160	0,1	0,25	0,506	3,689
10	160	0,1	0,25	0,486	2,962
11	200	0,1	0,25	0,731	4,700
12	200	0,1	0,25	0,455	3,088
13	160	0,15	0,25	1,076	5,778
14	160	0,15	0,25	1,310	11,443
15	200	0,15	0,25	2,729	12,883
16	200	0,15	0,25	2,510	12,107

Fonte: Autora

5.4.1 Rugosidade Total (RT)

Com certeza o fator que houve maior divergência entre os níveis foi da velocidade de avanço (f), apresentando melhores valores de rugosidade quando estava em 0,1. Para a velocidade de corte, houve pouca diferença, mas ainda apresentou menores valores de rugosidade para o nível mais baixo, de 160 m/min. Para a profundidade ap, é necessário utilizar 0,15 para obter menor taxa de rugosidade Rt.

Figura 32- Efeito das médias para Rt



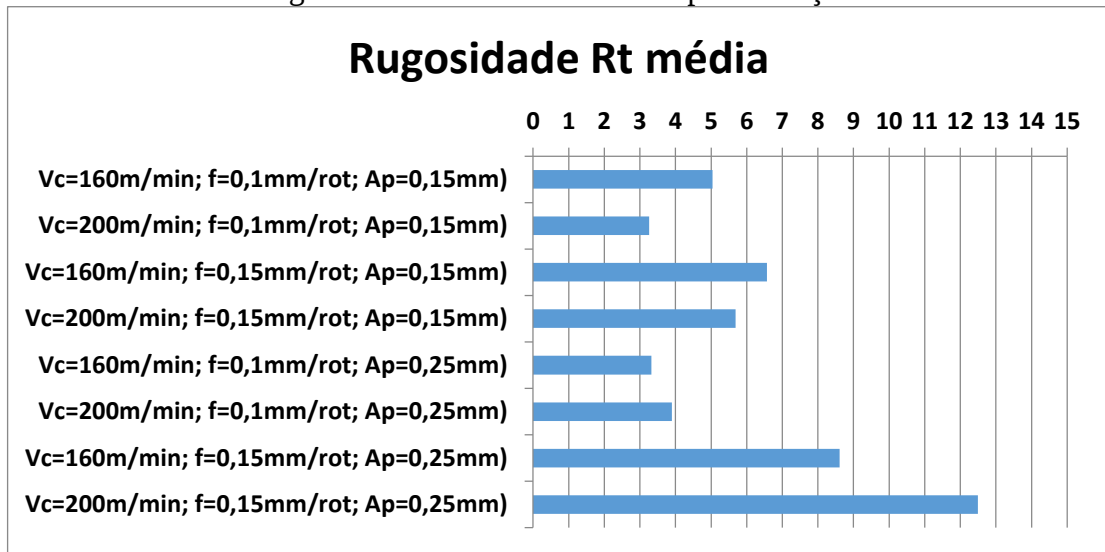
Fonte: Autora

A partir da análise de variância, foi possível observar que o único fator que não apresentou influência, foi a velocidade de corte, fazendo com que a interação tripla não tivesse influência também. Para as interações duplas, todas foram bastante significativas.

Tabela 6: Resultados da análise de variância para a Rugosidade total (Rt)

	Adj SS	Adj MS	F-value	P-value
Vc	2,401	2,401	1,06	0,311
f	238,672	238,672	104,94	0
ap	45,241	45,241	19,89	0
Vc*f	13,234	13,234	5,82	0,021
Vc*ap	37,982	37,982	16,7	0
f*ap	74,003	74,003	32,54	0
Vc*f*ap	4,43	4,43	1,95	0,172

Fonte: Autora

Figura 33: Valores médios de R_t por condição

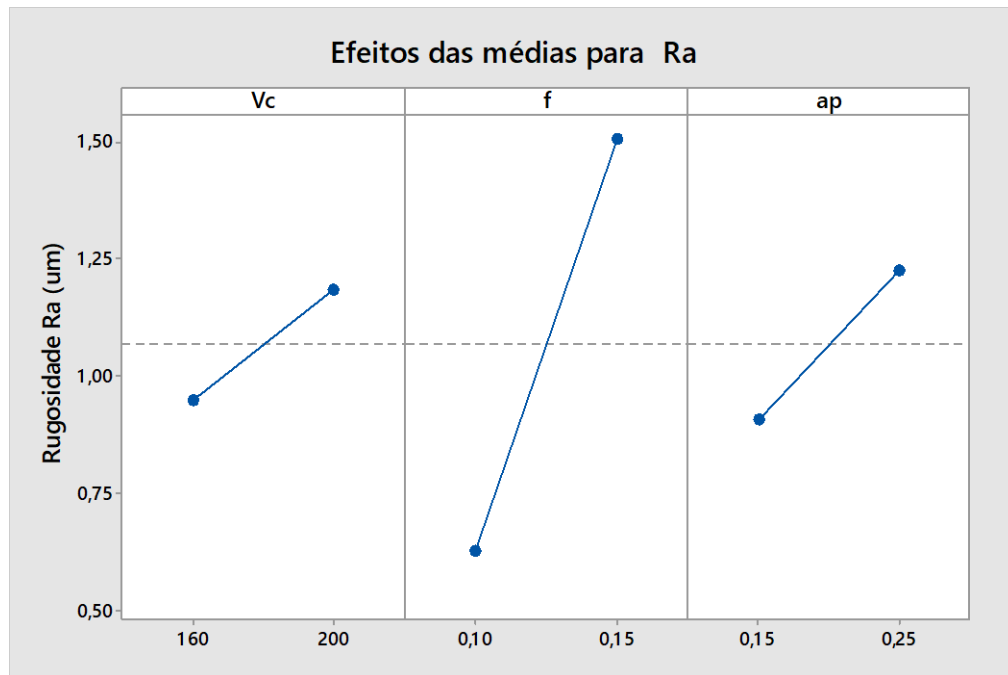
Fonte: Autora

De acordo com a análise de variância e Figura 35, é possível dizer que as melhores condições para obtenção de uma superfície com menor R_t deve ser com $f=0,1$ e $A_p=0,15$, não apresentando tanta diferença entre os níveis de velocidade de corte de $V_c=160\text{m/min}$ e 200m/min .

5.4.2 Rugosidade Média (R_a)

De forma similar à Rugosidade R_t , o fator que houve maior divergência entre os níveis também foi a velocidade avanço (f), apresentando melhores valores de rugosidade quando estava em 0,1. Para a velocidade de corte, a diferença também foi pequena, mas ainda assim, apresentou menores valores de rugosidade para o nível mais baixo, de 160 m/min. Para a profundidade A_p , é necessário utilizar 0,15 para obter menor taxa de rugosidade

Figura 34- Efeito das médias para Ra



Fonte: Autora

Pela tabela 7, ao observar os valores de p-value, é possível dizer que individualmente, todos apresentaram bastante influência para a Rugosidade média. Isso ocorre porque por serem parâmetros críticos, ao menor estímulo de variação, têm impactos bastante relativos nos valores de rugosidade. Isto é, com o aumento de velocidade de corte e de avanço, necessariamente a rugosidade final acaba sendo maior.

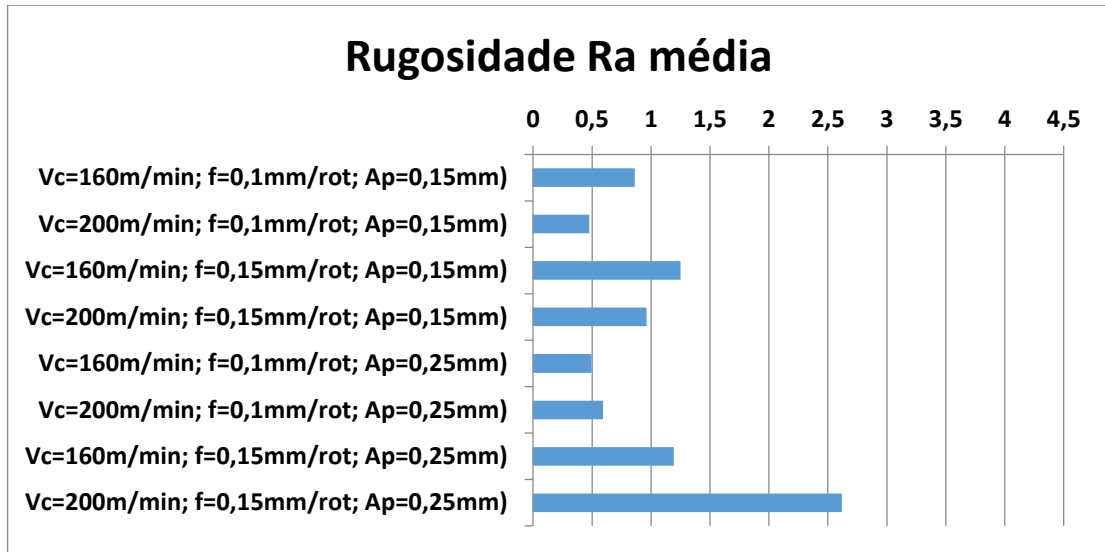
Tabela 7: Resultados da análise de variância para a Rugosidade Média (Ra)

	Adj SS	Adj MS	F-value	P-value
Vc	0,6573	0,65731	25,06	0
f	9,2515	9,25149	352,69	0
ap	1,198	1,19796	45,67	0
Vc*f	1,3477	1,34771	51,38	0
Vc*ap	3,3417	3,34171	127,39	0
f*ap	2,8038	2,80382	106,89	0
Vc*f*ap	1,3025	1,30251	49,65	0

Fonte: Autora

A Figura 37 apresenta os valores de Rugosidade média para os ensaios nas diferentes combinações de parâmetros.

Figura 35: Valores médios de Ra por condição



Fonte: Autora

A partir das análises e de acordo com a Figura 37, é possível assumir que a melhor condição para obtenção de uma superfície com menor Ra foi Vc=200m/min, f=0,1 e Ap=0,15, observados nos ensaios 3 e 4.

5.5 DESGASTE DAS FERRAMENTAS

Todos os desgastes foram medidos no microscópio Zeiss e estão devidamente apresentados na tabela 8 a seguir.

Tabela 8: Desgaste em cada aresta das ferramentas

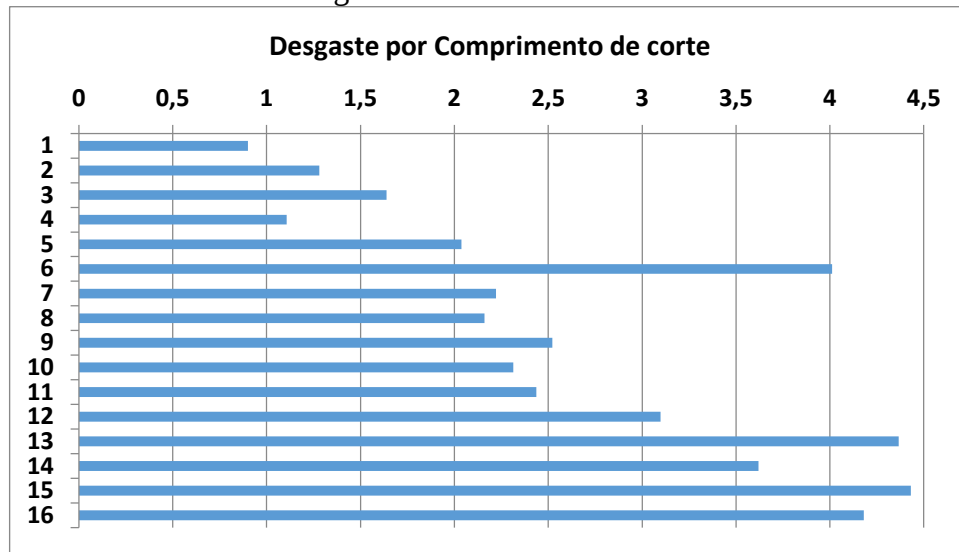
Ensaio	Vc (m/min)	f (mm/rot)	Ap (mm)	Ferram.	Lado	Aresta	Vb/Lc (mm/m)	Avaria
1	160	0,1	0,15	2	1	A1	$9,017 \cdot 10^{-5}$	
2	160	0,1	0,15	2	1	A2	$1,280 \cdot 10^{-4}$	
3	200	0,1	0,15	2	1	A3	$1,639 \cdot 10^{-4}$	
4	200	0,1	0,15	2	1	A4	$1,106 \cdot 10^{-4}$	
5	160	0,15	0,15	2	2	A1	$2,037 \cdot 10^{-4}$	
6	160	0,15	0,15	2	2	A2	$4,012 \cdot 10^{-4}$	Lascamento
7	200	0,15	0,15	2	2	A3	$2,222 \cdot 10^{-4}$	
8	200	0,15	0,15	2	2	A4	$2,160 \cdot 10^{-4}$	
9	160	0,1	0,25	3	1	A2	$2,520 \cdot 10^{-4}$	
10	160	0,1	0,25	3	1	A3	$2,313 \cdot 10^{-4}$	
11	200	0,1	0,25	3	1	A4	$2,437 \cdot 10^{-4}$	Quebra
12	200	0,1	0,25	3	1	A1	$3,098 \cdot 10^{-4}$	Quebra
13	160	0,15	0,25	3	2	A2	$4,367 \cdot 10^{-4}$	Trinca
14	160	0,15	0,25	3	2	A3	$3,619 \cdot 10^{-4}$	Trinca
15	200	0,15	0,25	3	2	A4	$4,431 \cdot 10^{-4}$	Lascamento
16	200	0,15	0,25	3	2	A1	$4,180 \cdot 10^{-4}$	Quebra

Fonte: Autora

Quando se trata de vida útil de uma ferramenta, é possível dizer que um dos fatores mais determinantes é o desgaste causado durante o processo de usinagem. Para Ferraresi (1970), quanto menor a taxa de desgaste, maior será a vida útil deste material. Na verdade, para efeito de comparação efetiva, é necessário calcular a taxa de desgaste em relação ao comprimento de corte Lc, para que seja possível avaliá-las nas mesmas proporções de acordo com o esforço solicitado em cada passada.

A Figura 38 mostra o comportamento do desgaste de acordo com o comprimento de corte.

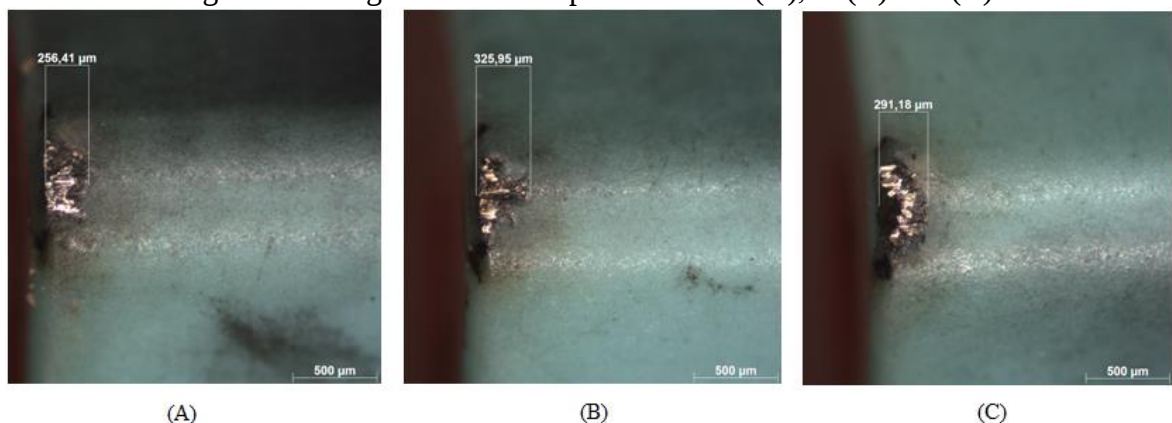
Figura 36: Gráfico de Vb/Lc



Fonte: Autora

A partir dos dados apresentados acima, é possível avaliar os desgastes gerados nas ferramentas de modo a observar que o menores valores de avanço combinados com menores valores de A_p , causaram menor degradação. Já o maior desgaste ocorreu no ensaio 15, com o A_p no nível maior de 0,25mm, possivelmente porque, devido à uma remoção de material mais profunda, acaba aparecendo uma força solicitante maior, podendo vir a ter maiores chances de avaria na ferramenta como quebras e trincas, principalmente por se tratar de uma ferramenta cerâmica.

Figura 37: Desgastes medidos para ensaio 11(A), 12(B) e 16(C).



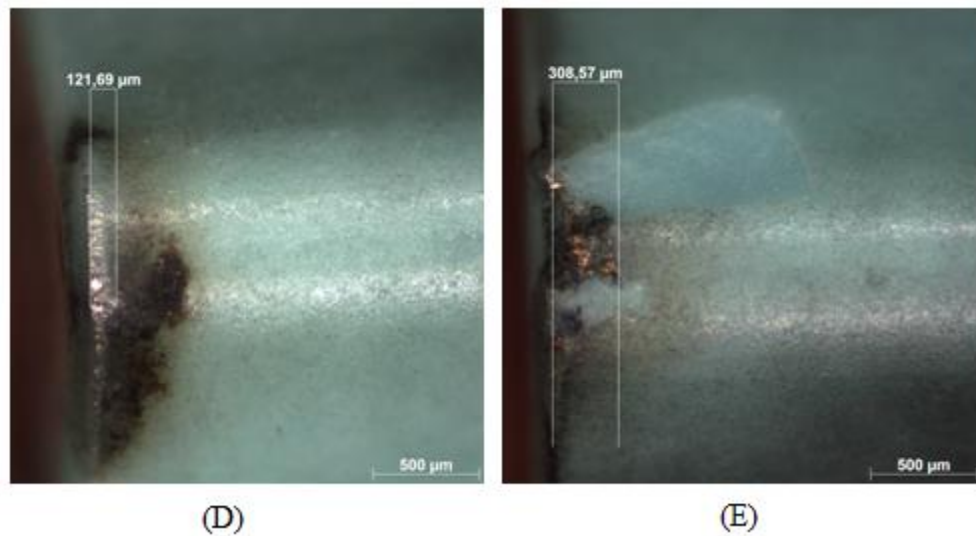
Fonte: Autora

Durante os ensaios 11, 12 e 16, provavelmente devido aos maiores níveis de velocidade de corte (200 m/min) e profundidade (0,25mm), houve quebra da ferramenta. Isso ocorre

também em razão da alta dureza e a baixa tenacidade da ferramenta, sendo ainda mais influenciado devido à presença de fases duras na estrutura da peça.

De maneira geral, a melhor condição pode ser dita por ter a menor taxa de desgaste, sendo dessa forma, observada no ensaio 1, com velocidade de corte de 160m/min, $f=0,1$ e $A_p=0,15$, enquanto que a pior condição, foi para o ensaio 15 com velocidade de corte de 200m/min, $f=0,15$ e $A_p=0,25$

Figura 38: Imagem da melhor condição (Ensaio 1, D) e da pior condição (Ensaio 15, E)



Fonte: Autora

5.6 ANÁLISE DOS CAVACOS

A tabela 9 mostra como foram classificados os cavacos formados de acordo com os parâmetros utilizados.

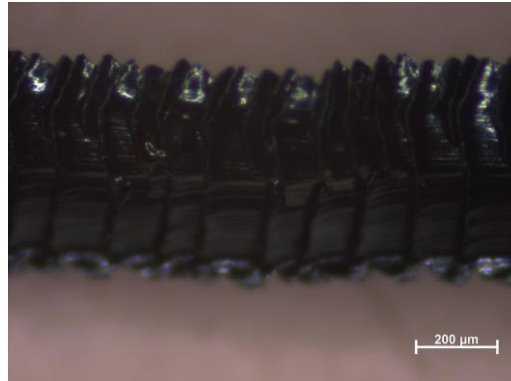
Tabela 9: Cavacos formados

Condições	$f= 0,1$		$f=0,15$	
	$A_p=0,15$	$A_p=0,25$	$A_p=0,15$	$A_p=0,25$
$V_{c1} =$ 160m/min	Hélice Espiral	Hélice Plana	Emaranhado	Hélice Oblíqua
$V_{c2} =$ 200m/min	Emaranhado	Fita	Fita	Emaranhado

Fonte: Autora

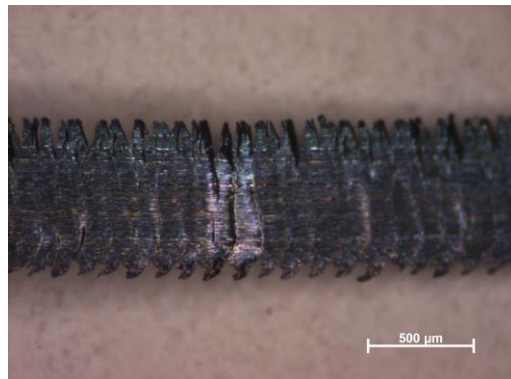
A partir da tabela e das Figuras 41 e 42 obtidas pelo microscópio Zeiss Stemi2000 que apresentam os cavacos obtidos, é possível observar que houve formação de cavacos contínuos, devido à tenacidade do aço ABNT 4340.

Figura 39: Imagem do cavaco formado no ensaio 16



Fonte: Autora

Figura 40: Imagem do cavaco formado no ensaio 15

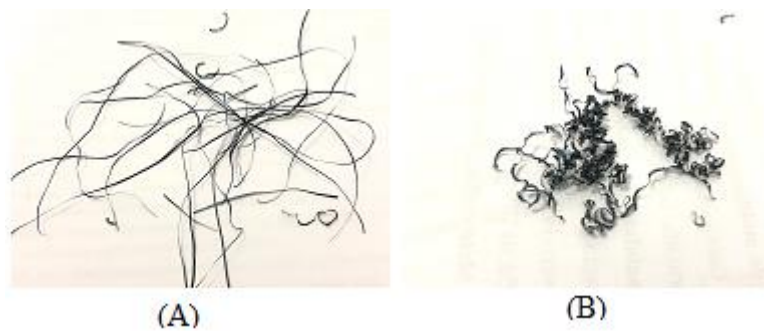


Fonte: Autora

Na imagem em microscópio do cavaco formado no ensaio 15, é possível notar coloração levemente avermelhada, provavelmente oriunda da temperatura de saída do cavaco, que acabou por oxidar um pouco.

De forma geral, é possível dizer que neste estudo, o melhor tipo de cavaco formado foi o de hélice em espiral, observado em (B), e obtido nos ensaios 1 e 2, enquanto que o pior tipo obtido foi o cavaco em fita (A), encontrado em vários ensaios.

Figura 41: Pior formação de cavaco (A) e melhor formação de cavaco (B)



Fonte: Autora

6 CONCLUSÃO

A partir deste trabalho, foi possível verificar que para mesmas ferramentas, diferentes parâmetros de usinagem provocam resultados bastante variados nas variáveis de saída de um processo de torneamento do aço 4340 endurecido e revenido.

- A melhor condição observada na maioria dos experimentos foi para $V_c=160\text{m/Min}$, $f=0,1\text{mm/rev}$ e $A_p= 0,15$, sendo capaz de reduzir custos e oferecer melhor acabamento para as peças;
- De forma geral, o avanço foi o fator que teve maiores contrastes entre seus níveis, mostrando com bastante nitidez que o nível 0,1 apresentou as melhores condições para consumo de potência e nos desgastes das ferramentas. Portanto, desejando melhor acabamento superficial da peça usinada e maior durabilidade da ferramenta, recomenda-se usar o avanço de 0,1 mm/rev.
- O menor desgaste ocorreu para valores de avanço e profundidade baixos, da mesma maneira que ocorreu com as rugosidades. Já para a vibração, o efeito foi contrário, possivelmente, pois a maiores velocidades, a rotação da peça fica mais estável, havendo menos propagação de energia.

Os cavacos formados foram bastante desfavoráveis ao processo, por se tratar de cavacos em contínuos e em fita, com exceção dos formados nos ensaios 1 e 2, em forma de hélice, e um pouco mais segmentados.

Houve quebra da ferramenta quando foi utilizado o maior nível de profundidade, mostrando que este fator é bastante influente em ferramentas cerâmicas, possivelmente devido ao maior esforço solicitado com o arrancamento de mais matéria por passada.

Portanto, em acordo com os dados e informações gerados e analisados a partir deste estudo, é possível concluir que as ferramentas de Al_2O_3 e Ni_2O_3 apresentam boa capacidade de usinagem em aços endurecidos, uma vez que obteve bons níveis de rugosidade e acabamento da peça final.

No entanto, é necessário ter cautela com os parâmetros a serem utilizados, uma vez que já ficou claro que seu desempenho é melhor em baixos níveis, por ter apresentado menores valores de desgaste, oferecendo assim, uma vida útil maior à ferramenta.

REFERÊNCIAS

- ALVES, M. C. S.; BIANCHI, E.C.; AGUIAR, P.R. Influência da velocidade de avanço do rebolo nos danos de aços endurecidos retificados. **Máquinas e Metais**, São Paulo, v. 13, n. 4, p. 636 – 642, 2008.
- AMORIM, H. J. De. **Estudo da relação entre velocidade de corte, desgaste de ferramenta, rugosidade e forças de usinagem em torneamento com ferramenta de metal duro**. Orientador: Kunrath Neto. 2002. 131f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/3791>. Acesso em: 29 nov. 2018.
- BHUIYAN, M. S. H.; CHOUDHURY, I. A.; DAHARI, M. Monitoring the tool wear, surface roughness and chip formation occurrences using multiple sensors in turning. **Journal of Manufacturing Systems**, Kuala Lumpur, v. 33, n. 4, p. 476–487, 2014. Disponível em <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0278612514000429?via%3Dihub>. Acesso em: 29 nov. 2018.
- BOOTHROYD, G; KNIGHT, W. A. **Fundamentals of machining and machine tools**. 2. ed. Nova York: Marcel Dekker, 1989. 256 p.
- CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia dos materiais: uma introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.
- CHAUDHARI, R. G.; HASHIMOTO, F. Process controls for surface integrity generated by hard turning. **Procedia CIRP**, v. 45, p. 15–18, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.357>. Acesso em: 29 nov. 2018.
- DAGNALL, H. **Exploring surface texture**. 3. ed. England: Taylor Hobson Limited, 1998.
- DINIZ, A. E.; COPPINI, N. L.; MARCONDES, F. C. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 6. ed. São Paulo: Editora M.M., 2013. 262 p.
- EZUGWU, O. Key improvements in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys, **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v.45, p. 1353–1367, 2005.
- FAVORIT. **Aços especiais: catálogo técnico Favorit**. 12. ed. Itupeva, 2013.
- FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo: Edgard Blücher, 1970.
- HASE, A. *et al.* The relationship between acoustic emission signals and cutting phenomena in turning process. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 70, n. 5-8, p. 947–955, 6 out. 2013.
- 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, p.2443-2449, 2006.
- KAVANO, E. H. **Análise dos efeitos de diferentes revestimentos em ferramentas de metal duro no Torneamento do aço AISI 4340**. 2017. 104 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2017.

LAURO, C. H.; BRANDÃO, L. C.; BALDO, D.; REIS, R. A.; DAVIM, J. P. Monitoring and processing signal applied in machining processes: a review. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, v. 58, p. 73–86, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2014.08.035>. Acesso em: 29 nov. 2018.

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**, v.87, p198-206, 1999.

MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; SILVA, M. B. **Teoria da usinagem dos metais**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 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**. Orientador: Prof. Dr. Jânes Landre Junior. 2009.198f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

MEHROTRA, P. K. Applications of ceramic cutting tools, key engineering materials. **Trans Tech Publications**, Suíça, v. 138- 140, 1998.

NUNES, E. **Inter-relationship of Skin pass , 2d and 3d roughness parameters, stampability and paintability on cold rolled steel sheets for the automotive industry**. 2014. 247f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Escola politécnica da universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

OLIVEIRA, A. J. D.; DINIZ, A. E.; URSOLINO, J. D. Hard turning in continuous and interrupted cut with PCBN and whisker-reinforced cutting tools. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 209, p. 5262-5270. 2009

PIRATELLI FILHO, A. Rugosidade superficial. In: SEMINÁRIO DE METROLOGIA, 3., 2011, Brasília. **Anais [...]**. Brasília: Faculdades de Tecnologia – Universidade de Brasília, 2011.

ROMEIRO, S. B. B. **Química na siderurgia**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1997. [Material de aula].

SANTOS, S. C.; SALES, W. F. **Aspectos tribológicos da usinagem dos materiais**. São Paulo: Art Liber, 2007, 248p.

SIDDHPURA, M.; PAUROBALLY, R. A review of chatter vibration research in turning. **International Journal of Machine Tools and manufacture**, v.61, pp. 27-47, 2012.

SOUZA, A. J. DE. **Aplicação de multisensores no prognóstico da vida de ferramenta de corte no torneamento**, 2004. 211 f. Tese (Doutorado em engenharia Mecânica) - Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004. Disponível em: <http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/88055>. Acesso em: 29 nov. 2018.

TANCRET, F; SOURMAIL, T; YESCAS, M.A; EVANS, R.W; MCALEESE, C; SINGH, L; SMEETON, T; BHADSHIA, H.K.D.H. Design of a creep resistant nickel base superalloy for power plant applications: part 3—experimental results. **Materials Science and Technology**, Nantes, v.19, p. 296-302, 2003.

TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. **Metal cutting**. 4. ed. Oxonia: Butterworth-Heinemann, 2000.