

**FRESAMENTO DO AÇO SAE 4340 TEMPERADO E REVENIDO UTILIZANDO
FERRAMENTAS DE METAL DURO RECOBERTAS**

LARISSA RIBAS DE LIMA SOARES

Guaratinguetá, SP

2017

LARISSA RIBAS DE LIMA SOARES

**FRESAMENTO DO AÇO SAE 4340 TEMPERADO E REVENIDO UTILIZANDO
FERRAMENTAS DE METAL DURO RECOBERTAS**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia
do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual
Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, para a obtenção
do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área
de Materiais

Orientador:

Prof. Dr. Manoel Cléber de Sampaio Alves

Guaratinguetá, SP

2017

S676
f Soares, Larissa Ribas de Lima
Fresamento do aço SAE 4340 temperado e revenido utilizando
ferramentas de metal duro recobertas / Larissa Ribas de Lima Soares –
Guaratinguetá, 2017.
128 f : il.

Bibliografia: f. 119-122

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade
de Engenharia de Guaratinguetá, 2017.

Orientador: Prof. Dr. Manoel Cléber de Sampaio Alves

1. Usinagem. 2. Ferramentas de corte. 3. Aço. I. Título

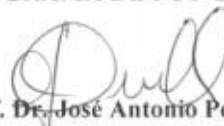
CDU 621.9(043)

LARISSA RIBAS DE LIMA SOARES

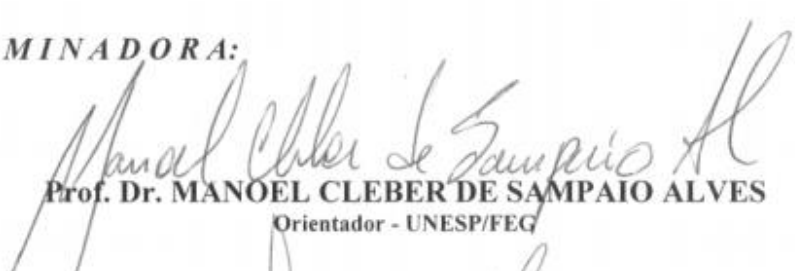
**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA”**

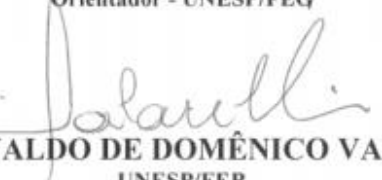
**PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: MATERIAIS**

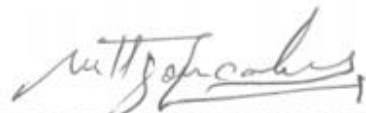
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. José Antonio Perrella Balestieri
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


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


Prof. Dr. IVALDO DE DOMÊNICO VALARELLI
UNESP/FEB


Prof. Dr. MARCOS TADEU TIBÚRCIO GONÇALVES
UNESP/ITAPEVA

Março de 2017

DADOS CURRICULARES
LARISSA RIBAS DE LIMA SOARES

NASCIMENTO	17.03.1992 - ITAPEVA/SP
FILIAÇÃO	Loide Rodrigues Ribas de Lima João Calil Rodrigues de Lima
2008/2009	Curso Técnico Assessoria Empresarial - ETEC Centro Paula Souza “Demétrio de Azevedo Junior”
2010/2014	Curso de Graduação Engenharia Industrial Madeireira, na Faculdade de Engenharia do Campus de Itapeva da Universidade Estadual Paulista.
2015/2017	Curso de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Mestrado, na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista.

A Loide, Calil e Wil.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus por estar comigo em todos os momentos, me dando força e coragem para enfrentar os desafios do caminho que eu escolhi para trilhar,

aos meus pais, Loide e Calil, por todo amor, carinho e incentivos concedidos durante este período,

ao meu marido, Wildenson, por ser o meu amparo, por entender que às vezes eu preciso estar longe para alcançar meus objetivos e por todo o amor dedicado,

ao Prof. Dr. Manoel Cléber de Sampaio Alves, pela paciência, dedicação e incentivo. E também por me ajudar nesta pesquisa e acreditar no meu trabalho,

aos meus amigos, Bruno, Carlino, Eduardo e Yuzo, pela contribuição neste trabalho, disponibilizando tempo e paciência,

a Sarah pela amizade, pela ajuda concedida neste trabalho e pela hospitalidade durante a minha permanência em Guaratinguetá,

a empresa Seco Tools pela doação das ferramentas de corte utilizadas neste estudo,

ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de mestrado,

a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Fapesp) pelo apoio financeiro na compra de equipamentos e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo auxílio concedido para a participação em congresso.

Obrigada!

“Aproveitar um bom conselho requer mais sabedoria do que dá-lo.”

(John Collins)

SOARES, L. R. L. **Fresamento do aço SAE 4340 temperado e revenido utilizando ferramentas de metal duro recobertas**. 2017. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2017.

RESUMO

Alternativas para otimizar os processos de fabricação por usinagem têm sido buscadas com o objetivo de diminuir custos, aumentar produtividade e diminuir problemas ambientais. Entre essas alternativas destacam-se a procura pela usinagem a seco, o desenvolvimento e aprimoramento de materiais para ferramentas de corte e de recobrimento da mesma e a usinagem de aços endurecidos com o intuito de eliminar o processo de retificação. Com base nisso, neste trabalho foi analisado o fresamento frontal, do tipo abertura de canal, do aço SAE 4340 na forma recozida e na forma endurecida (temperado e revenido), utilizando ferramenta de metal duro com recobrimento de TiAlN e TiN na condição à seco. Este aço é comumente utilizado em componentes mecânicos, solicitados à esforços dinâmicos, na indústria automobilística e aeroespacial. O objetivo deste trabalho foi avaliar a viabilidade da usinagem a seco deste aço na forma endurecida, através da análise do comportamento da qualidade superficial, da potência consumida, da vibração, da emissão acústica, do desgaste das ferramentas e das formas e tipos de cavacos produzidos nas diferentes condições de usinagem. Esta pesquisa foi realizada em um Centro de Usinagem CNC, variando-se os parâmetros velocidade de corte e avanço. Os ensaios foram realizados em duas etapas, no qual, na primeira etapa as amostras do material, nas duas formas mencionada (recozido e endurecido), foram usinadas com V_c de 200 e 300 m/min e avanço de 0,1 e 0,04 mm/dente. Na segunda etapa, o material recozido foi ensaiado com uma V_c de 400 m/min e o material endurecido foi ensaiado com uma V_c de 300 m/min, em ambos os casos, os ensaios foram realizados nos dois níveis de avanço. Através da análise dos resultados, conclui-se que o endurecimento do aço 4340 contribuiu para uma menor rugosidade (R_a e R_t) das peças produzidas. Comprovando, através dos valores obtidos para o parâmetro R_a , que o fresamento frontal do aço 4340 endurecido, com uma V_c de 200 m/min e avanço de 0,04 mm/dente, pode substituir o processo de retificação em boa parte das aplicações. E por fim, a utilização da velocidade de corte de 300 m/min com usinagem a seco, se mostrou inviável em relação ao desgaste provocado na ferramenta de corte e aos resultados obtidos para as variáveis de saída.

Palavras-chave: Usinagem de aços endurecidos; fresamento a seco; aço 4340.

SOARES, L. R. L. **Milling of quenched and tempered steel SAE 4340 using coated carbide tools**. 2017. 134 f. Dissertation (Master in Mechanical Engineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2017.

ABSTRACT

Alternatives to optimize machining processes have been sought with the aim of reducing costs, increasing productivity and reducing environmental problems. Among those options, it is highlighted the demand for dry machining, the development and improvement of materials for cutting and covering the same tools and the machining of hardened steels in order to eliminate the grinding process. On this basis, this paper analyzed the steel face milling, of channel opening type, SAE 4340 in annealed form and in hardened form (quenched and tempered) using carbide tool with coating TiAlN and TiN in the dry condition. This steel is commonly used in mechanical components, ordered the dynamic forces in the automotive and aerospace industry. The aim of this study was to investigate the behavior of the surface quality, consumed power, vibration, acoustic emission, wear of tools and forms and types of chips produced in different machining conditions. This research was conducted in a CNC Machining Center, varying the parameters cutting speed and feed. The tests were carried out in two stages, in which, in the first step, samples of the material in the two forms mentioned (annealed and hardened) were machined with V_c of 200 and 300 m/min and advance of 0,1 and 0,04 mm/tooth. In the second step, the annealed material was tested with a V_c of 400 m/min and the cured material was tested with a V_c of 300 m/min, in both cases the tests were performed at both feed rates. In which, through the analysis of the results, it is concluded that the hardening of the 4340 steel contributed to a lower roughness (R_a and R_t) of the produced parts. Verifying, through the values obtained for parameter R_a , that the front milling of hardened 4340 steel, with a V_c of 200 m/min and an advance of 0.04 mm/tooth, can replace the grinding process in most applications. Finally, the use of the cutting speed of 300 m / min with dry machining was not feasible in relation to the wear caused by the cutting tool and the results obtained for the output variables.

Key-words: Machining of hardened steels; Dry milling; steel 4340

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS.....	15
2.1	Geral	15
2.2	Específicos.....	15
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
3.1	Aços.....	16
3.1.1	Aço ABNT 4340.....	17
3.2	Processo de usinagem.....	17
3.2.1	Usinagem de aços endurecidos.....	19
3.2.2	Fresamento	20
3.2.2.1	Fresamento frontal.....	20
3.2.3	Parâmetros de corte para o processo de fresamento	21
3.2.4	Fluido de corte e os impactos ambientais.....	23
3.2.4.1	Usinagem à seco e pesquisas relacionadas.....	24
3.2.5	Mecanismo de formação de cavaco.....	26
3.2.5.1	Tipos e formas de cavaco	28
3.2.6	Materiais para ferramenta.....	30
3.2.6.1	Metal duro	31
3.2.6.2	TiAlN e TiN	32
3.2.7	Desgaste e avaria de ferramenta.	33
3.3	Rugosidade	36
3.3.1	Sistema de medição da rugosidade superficial através da linha média	37
3.3.1.1	Rugosidade média	38
3.3.1.2	Rugosidade total.....	40
3.4	Potência de usinagem	41
3.5	Emissão acústica.....	43
3.6	Vibração.....	44
4	MATERIAL E MÉTODOS	45
4.1	Preparação dos corpos de prova	45
4.2	Tratamento térmico.....	46
4.3	Processo de usinagem.....	47
4.3.1	Fresamento	47

4.3.1.1	Fresa	51
4.3.2	Sistema Aquisição de dados	51
4.3.2.1	Potência de corte	52
4.3.2.2	Emissão acústica	53
4.3.2.3	Vibração	54
4.3.3	Desgaste da ferramenta.....	55
4.3.4	Integridade Superficial	56
4.3.4.1	Rugosidade Superficial	56
4.3.5	Tipos e formas dos cavacos	57
4.4	Delineamento experimental e tratamento estatístico dos dados	58
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
5.1	Aço SAE 4340 Recozido	59
5.1.1	Rugosidade Média (R_a)	59
5.1.1.1	Análise estatística	59
5.1.1.2	Comportamento da R_a conforme o desgaste.....	61
5.1.2	Rugosidade Total (R_t).....	64
5.1.2.1	Análise Estatística	64
5.1.2.2	Comportamento da R_t conforme o desgaste	66
5.1.3	Potência Consumida	69
5.1.3.1	Análise de Variância	69
5.1.3.2	Análise de Regressão	70
5.1.4	Vibração.....	72
5.1.4.1	Análise de Variância	72
5.1.4.2	Análise de Regressão	73
5.1.5	Emissão Acústica.....	75
5.1.6	Desgaste da ferramenta.....	76
5.1.6.1	Análise Estatística	76
5.1.6.2	Desgaste da Ferramenta em função do comprimento usinado.....	77
5.1.6.3	Análise de Regressão	80
5.1.6.4	Análise Qualitativa.....	83
5.1.7	Tipos e formas dos cavacos	85
5.2	Aço SAE 4340 Temperado e Revenido.....	86
5.2.1	Rugosidade Média (R_a)	87

5.2.1.1	Análise Estatística	87
5.2.1.2	Comportamento da R_a conforme o desgaste.....	88
5.2.2	Rugosidade Total (R_t)	89
5.2.2.1	Análise Estatística	89
5.2.2.2	Comportamento da R_t conforme o desgaste	91
5.2.3	Potência Consumida	92
5.2.3.1	Análise Estatística	92
5.2.3.2	Análise de regressão.....	93
5.2.4	Vibração.....	94
5.2.4.1	Análise Estatística	94
5.2.4.2	Análise de regressão.....	95
5.2.5	Emissão Acústica.....	96
5.2.5.1	Análise Estatística	96
5.2.5.2	Análise de Regressão	96
5.2.6	Desgaste da ferramenta.....	97
5.2.6.1	Análise Estatística	97
5.2.6.2	Desgaste da Ferramenta em função do comprimento usinado.....	98
5.2.6.3	Análise Qualitativa.....	100
5.2.7	Tipos e formas dos cavacos	104
5.3	Comparação entre os materiais.....	107
5.3.1	Rugosidade Média (R_a).....	107
5.3.2	Rugosidade Total (R_t)	108
5.3.3	Potência Consumida	110
5.3.4	Vibração.....	111
5.3.5	Emissão Acústica.....	112
5.3.6	Desgaste da Ferramenta.....	114
5.4	Comentários em geral.....	115
6	CONCLUSÃO	118
	REFERÊNCIAS	119
	Apêndice A.....	123
	Apêndice B	124
	Apêndice C	125
	Apêndice D.....	126

Apêndice E	127
Apêndice F.....	128

1 INTRODUÇÃO

A usinagem de aços endurecidos está cada vez mais em destaque no setor industrial devido à possibilidade de 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.

Devido a esta necessidade em relação às ferramentas, há um constante aprimoramento e desenvolvimento de novos materiais para ferramenta e recobrimento, a fim de contribuir para a usinagem destes aços. Para isso, estes materiais devem possuir características favoráveis a este processo. Como por exemplo, o TiN (nitreto de titânio) que possibilita a redução do atrito entre a pastilha e o cavaco, e o TiAlN (nitreto de alumínio titânio) que possui baixa condutividade térmica.

Dentre os aços endurecidos usinados na indústria metalmeccânica, se destaca o SAE 4340, visto que ele é muito utilizado no setor automobilístico e aeronáutico, porque ele possui características favoráveis para componentes solicitados a esforços dinâmicos, como virabrequins e trens de pouso para aviões, tratores, eixos com elevada solicitação mecânica e veículos em geral. Este aço apresenta grande resistência à fadiga, elevada temperabilidade, boa forjabilidade e tenacidade. No qual, estas propriedades são obtidas devido à presença de elementos de liga.

Em relação a estes processos industriais de usinagem, é muito comum utilizar fluidos de corte para lubrificar e refrigerar o sistema ferramenta-peça, porque isto traz vantagens em relação ao desgaste da ferramenta, a temperatura do processo, a rugosidade da peça usinada, entre outros fatores. No entanto, estes fluidos são prejudiciais ao meio ambiente, pois eles são danosos a saúde dos operadores além de poluir a água ou o solo quando precisam ser descartados.

Devido a estes problemas, há uma procura para reduzir ou eliminar a utilização de fluidos durante a usinagem, através do uso de técnicas alternativas. Essas técnicas ajudam a diminuir os impactos ambientais e a reduzir os gastos com lubrificantes. Visto que, de acordo com Sreejith e Ngoi (2000), estes gastos podem representar até 20% dos custos de produção.

Por isso, várias pesquisas veem sendo desenvolvidas para analisar o desempenho de técnicas como a MQL (mínima quantidade de lubrificante) e a usinagem à seco. Entretanto, para que estas técnicas sejam vantajosas para a indústria elas não podem afetar de

forma significativa as variáveis de saída do processo (rugosidade da peça, vida da ferramenta, etc.) e principalmente a produtividade. Portanto, o desafio está em estabelecer condições de usinagem que possam contribuir simultaneamente para estes fatores.

Dentre estas pesquisas, raras são voltadas especificamente para o comportamento dos parâmetros de usinagem conforme ocorre o desgaste da ferramenta, e isto é importante ser avaliado para ampliar os conhecimentos a respeito destas técnicas, bem como, determinar quais condições de usinagem permitem ampliar a vida da ferramenta.

Com base nestas informações, esta pesquisa busca avaliar a usinabilidade do aço SAE 4340 endurecido, mediante o fresamento frontal a seco com ferramentas recobertas de TiAlN e TiN, comparado com a usinagem na condição recozida deste material, com o intuito de buscar melhores condições de usinagem para este aço, além de analisar a influência do desgaste da ferramenta nas variáveis de saída do processo, como na qualidade superficial das peças, a potência consumida, a emissão acústica e as vibrações produzidas durante este processo.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Analisar o fresamento frontal, em processo de abertura de canal, do aço SAE 4340 nas formas recozidas e endurecida (temperado e revenido), utilizando ferramentas de metal duro recobertas com TiAlN e TiN, na condição a seco.

2.2 Específicos

Para as diferentes condições objetivou-se:

- Avaliar a viabilidade da usinagem a seco do aço SAE 4340 endurecido utilizando ferramentas de metal duro recoberta com TiAlN e TiN;
- Avaliar o comportamento da qualidade superficial através da análise dos parâmetros rugosidade média (R_a) e rugosidade total (R_t), potência consumida, vibração, emissão acústica;
- Avaliar o comportamento e a influência do desgaste da ferramenta de metal duro recoberta com TiAlN e TiN nas variáveis de saída do processo;
- Avaliar o comportamento das formas e tipos de cavacos gerados.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Aços

Os aços são definidos como ligas ferro-carbono, no qual, pode conter também apreciáveis concentrações de outros elementos. A variação na composição dos elementos, bem como, no tratamento térmico realizado, dá origem a milhares de ligas diferentes (CALLISTER Jr; RETHWISCH, 2013).

Estas ligas podem ser classificadas como aço comum ou como aços especiais. O comum, também conhecido como aço ao carbono, contém concentrações residuais de impurezas, além do carbono e de uma pequena quantidade de manganês, como pode ser observado na sua composição química: manganês (0,3 a 0,6%), enxofre (máximo de 0,05%), silício (0,1 a 0,3%), carbono (0,08 a 2%), fósforo (máximo de 0,04%), e ferro. Já no caso dos aços especiais (aços-ligas), os elementos são adicionados com uma concentração específica, de forma intencional, para conferir uma determinada característica ao material (ROMEIRO, 1997; CALLISTER Jr; RETHWISCH, 2013). Estes elementos que são adicionados, têm como objetivo proporcionar ao material as seguintes vantagens: aumentar a usinabilidade, conferir dureza a quente, aumentar a temperabilidade, conferir resistência ao desgaste, alterar as propriedades mecânicas, conferir resistência a oxidação, entre outros (ROMEIRO, 1997).

Para Callister Jr e Rethwisch, (2013), o aço também pode ser classificado de acordo com o teor de carbono, visto que as propriedades mecânicas dele são sensíveis a concentração deste elemento químico. Portanto, este material pode ser classificado como:

- Aço com baixo teor de carbono: Este aço apresenta aproximadamente menos que 0,25%p C e não respondem a tratamentos térmicos direcionados para formar martensita.
- Aço com médio teor de carbono: Com concentração de carbono variando de 0,25 a 0,60%p, as ligas desta classe, podem ser tratadas termicamente por meio da austenitização, tempera e revenimento.
- Aço com elevado teor de carbono: Estes aços são mais duros e resistentes, com concentração de carbono variando de 0,60 a 1,4%p, e normalmente são usados em uma condição endurecida e revenida.

3.1.1 Aço ABNT 4340

O aço SAE 4340 é um material de engenharia de grande importância na fabricação de componentes que exigem uma boa combinação de resistência mecânica e tenacidade. Ele é muito empregado na indústria automobilística e aeronáutica na produção de engrenagens de transmissão de energia, semi-eixos, eixos principais, acoplamentos, trens de pouso, entre outros (SILVA *et al.*, 2005; SURESH; BASAVARAJAPPA; SAMUEL, 2012; EL RAYES; EL-DANAF; ALMAJID, 2015; SAHU; CHOUDHURY, 2015; SHARMA; PANDEY, 2016).

De acordo com Chiaverini (1986), o aço 4340 faz parte do grupo dos aços super-resistentes, desenvolvidos inicialmente para o emprego em componentes de aviões e mísseis. Este grupo tem como característica teores de carbono relativamente baixos, no qual, a presença simultânea de vários elementos de liga aumenta a temperabilidade do aço, mesmo que em pequenas proporções.

Este aço é de médio carbono, tratável termicamente, com alta resistência e baixa liga, resistente à fadiga em elevadas temperaturas, aplicado em estruturas críticas, como vasos de pressão em usinas nucleares e componentes de construção (BHATTACHARYA *et al.*, 2011). No entanto, eles são de baixa soldabilidade e usinabilidade (FAVORIT, 2016).

No Quadro 1 é apresentado a composição química deste aço de acordo com a ABNT NBR NM 87:1996, a qual cita que o teor de enxofre e fósforo deve ser de no máximo 0,035%.

Quadro 1: Composição química do aço ABNT 4340.

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

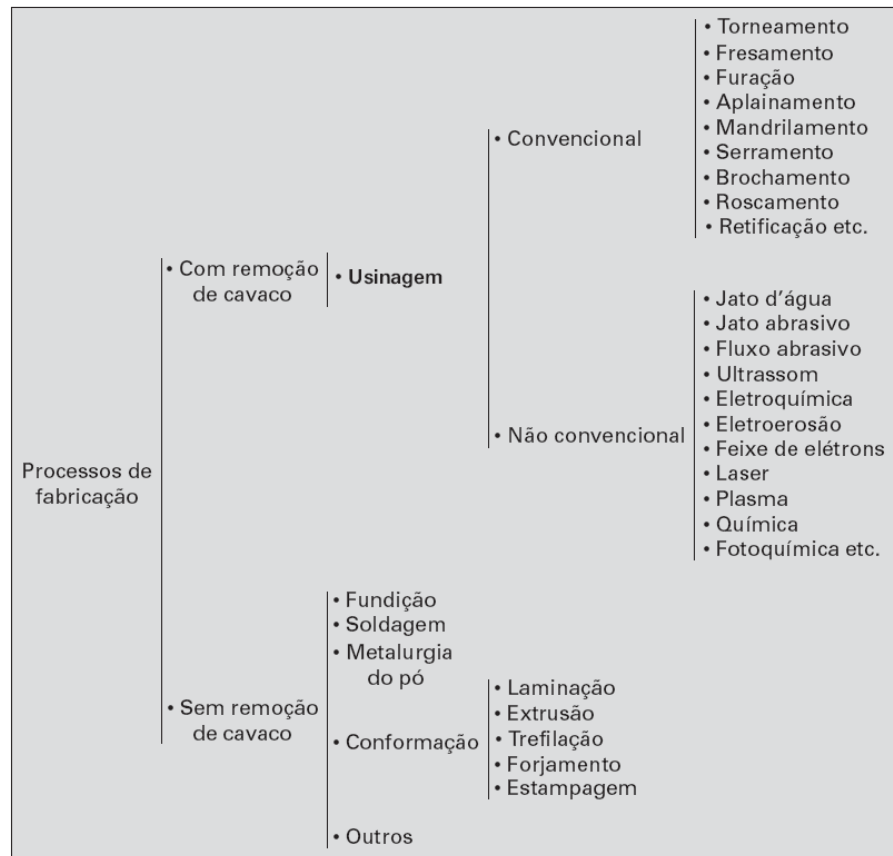
Fonte: Adaptado de ABNT NBR NM 87: 1996

3.2 Processo de usinagem

O processo de usinagem consiste em conferir forma, dimensão e acabamento a uma peça através da remoção de material (cavaco), no qual, estes três fatores podem ser combinados ou não (FERRARESI, 2013). É apresentada na Figura 1 a classificação dos

processos de fabricação, com destaque para os principais processos de usinagem. Dentre estes processos, o torneamento, o fresamento, a furação e a retificação são os mais utilizados na indústria metalmeccânica.

Figura 1: Classificação dos processos de fabricação



Fonte: Machado *et al.* (2009)

A usinagem é amplamente utilizada na fabricação de componentes que requerem alta qualidade superficial e/ou grande precisão. Sendo a mais popular do mundo dentre os processos de fabricação (LAURO *et al.*, 2014).

Entretanto, devido à dificuldade encontrada em determinar as condições ideais de corte, este processo se torna imprevisível e complexo (MACHADO *et al.*, 2009). Para (LAURO *et al.*, 2014), uma das formas que ajudam a diminuir este problema é o monitoramento do sinal de vários parâmetros durante a usinagem, como a força, ruído, vibrações e temperatura. Pois, com este monitoramento é possível identificar o desgaste da ferramenta, a rugosidade da

superfície e anomalias que ocorrem durante a usinagem que podem causar danos e desperdícios. Portanto, além de contribuir para o controle do processo, o monitoramento pode proporcionar economia e praticidade.

3.2.1 Usinagem de aços endurecidos

Por definição, aço endurecido é aquele que possui dureza superior a 45 HRc, com microestrutura formada principalmente por martensita e carbonetos livres. Por causa da sua dureza, estes materiais eram usinados apenas em processos abrasivos. Entretanto, devido ao desenvolvimento de máquinas e ferramentas com capacidade de suportar as duras condições tribológicas, presentes durante a formação do cavaco, e as altas forças de corte, estes materiais já são usinados em processos de fresamento e torneamento (MACHADO *et al.*, 2009).

Para Lima e Corrêa (2002), a usinagem de aços endurecidos está cada vez mais em evidência porque, em alguns casos, ela pode substituir o processo de retificação, possibilitando com isso, reduzir tempo e custos de produção, além de obter peças com elevado acabamento superficial e pequenas tolerâncias, quando a usinagem se procede em uma máquina-ferramenta com alta rigidez e acuracidade.

De acordo com Diniz, Marcondes e Coppini (2013), devido a esta procura por cortar peças endurecidas através do torneamento e/ou fresamento, tem aumentado as exigências em relação as características mecânicas, térmicas e químicas da ferramenta. Visto que, para Machado *et al.*, (2009), na região em que há a formação do cavaco, há altas tensões de ruptura e altas temperaturas.

Para esta aplicação, as ferramentas de metal duro com cobertura de TiAlN ou de AlTiN (nitreto de alumínio-titânio), são alguns dos exemplos de ferramentas que podem ser utilizadas. Estas coberturas são aplicadas a ferramenta pelo processo PVD (deposição física a vapor), que proporciona uma cobertura mais fina e, portanto, arestas mais afiadas, ideal para este tipo de usinagem. Outra ferramenta que também pode ser utilizada é a de CBN (Nitreto de Boro Cúbico), mesmo em corte interrompido. No qual, para usinar estes aços com estas ferramentas, não deve ser utilizado fluido de corte, pois com isso, a temperatura na região de corte aumenta e consequentemente a resistência cai, portanto, facilita o processo (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2013).

3.2.2 Fresamento

O fresamento é um processo de usinagem utilizado para obter superfícies de várias formas através do uso de ferramentas multicortantes (fresas) providas de arestas cortantes situadas simetricamente em torno de um eixo. No processo, a fresa gira e o material a ser usinado ou a ferramenta se desloca segundo uma trajetória qualquer, conferindo forma e dimensão desejadas ao material (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2013; FERRARESI, 2013; ABNT NBR 6175:2015).

As fresas podem apresentar diferentes formas, portanto, o processo de fresamento pode executar uma variedade de cortes e gerar peças com superfícies de diversos tipos e formatos, conferindo ao processo um caráter de versatilidade (KALPAKJIAN e SCHMID, 2009; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Este processo apresenta as seguintes vantagens: o fresamento possui uma operação mais barata do que o aplainamento (processo destinado à obtenção de superfícies regradadas); no brochamento (processo utilizado para obter superfícies quaisquer com o auxílio de ferramentas multicortantes) não é possível usinar uma superfície que intersecciona qualquer outra existente; e, ele apresenta maior capacidade de remoção de cavaco do que o processo de retificação, que é uma usinagem por abrasão, utilizado para obter superfícies com auxílio de ferramentas de revolução (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Para Ferraresi (2013), o processo de fresamento se divide basicamente em fresamento cilíndrico tangencial e fresamento frontal. No entanto, ele também pode ser dividido de acordo com o movimento relativo peça-ferramenta, em relação ao sentido de corte e avanço, como discordante (para cima) e concordante (para baixo), ou então, de acordo com a posição do eixo-árvore da máquina-ferramenta em horizontal, vertical e inclinado (STEMMER, 2005; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

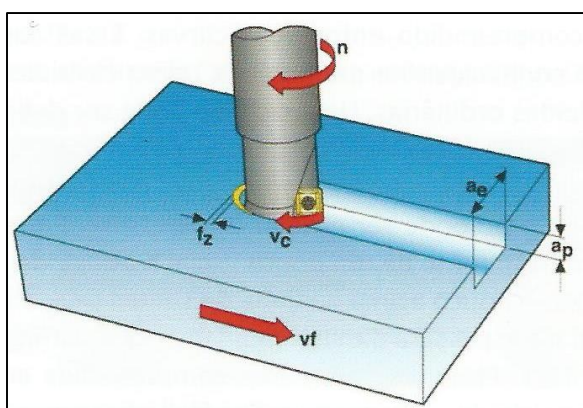
3.2.2.1 Fresamento frontal

Processo de usinagem em que os dentes ativos da fresa estão situados na superfície frontal da ferramenta (denominadas fresas frontais ou de topo) (Figura 2) e a superfície plana

obtida é perpendicular ao eixo de rotação da ferramenta (FERRARESI, 2013; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

O fresamento frontal é caracterizado pelas marcas de usinagem deixadas pelos dentes da fresa, conforme o avanço por volta (f) e por dente (f_z). Neste processo a superfície usinada é resultado de uma ação combinada das arestas cortantes da periferia com os situados na face frontal da fresa. E a penetração de trabalho (a_e) é consideravelmente maior que a profundidade de corte (a_p) (STEMMER, 2005).

Figura 2: Fresamento Frontal



Fonte: Seco Tools AB (2016).

3.2.3 Parâmetros de corte para o processo de fresamento

Ao usinar uma superfície é necessário providenciar um movimento relativo adequado entre a ferramenta e a peça. Para isso, alguns parâmetros de corte devem ser determinados antes do processo de usinagem, como a direção de corte, a direção de avanço, a velocidade de corte (V_c), o avanço por dente (f_z), a velocidade de avanço (V_f), a profundidade e a largura de usinagem (a_p), a penetração de trabalho (a_e), entre outros fatores (MACHADO et al. 2009).

A velocidade de corte para o processo de fresamento, onde os movimentos de avanço e de corte ocorrem concomitantemente, é definida como a velocidade tangencial instantânea, que resulta da rotação da ferramenta em torno da peça. Neste processo, é necessário ter cuidado ao escolher a velocidade de corte, pois ela tem maior influência no desgaste da ferramenta que os demais parâmetros, além de exercer influência sobre a temperatura de corte

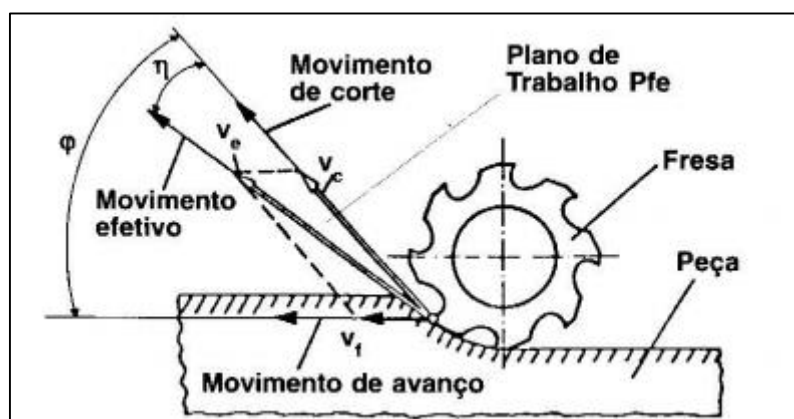
visto que, o aumento desta grandeza faz com que aumente a força de impacto entre a aresta de corte e a peça (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

O avanço por dente é definido como o percurso de avanço a cada dente e é medido na direção do avanço. Ele corresponde a distância estabelecida entre duas superfícies em usinagem consecutiva. Na escolha deste parâmetro para o processo de fresamento deve-se levar em conta o tipo de fresa, a potência da máquina, o material da ferramenta, entre outros (MACHADO *et al.* 2009; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

A velocidade de avanço definida como a velocidade instantânea no ponto da aresta cortante, na direção e sentido de avanço (Figura 3), pode ser obtida através do produto entre o avanço pela rotação da peça (MACHADO *et al.* 2009).

Figura 3: Direção dos movimentos de corte, de avanço e efetivo no fresamento discordante.

Ângulos da direção de avanço ϕ , da direção efetiva η e plano de trabalho



Fonte: Diniz, Marcondes e Coppini (2013).

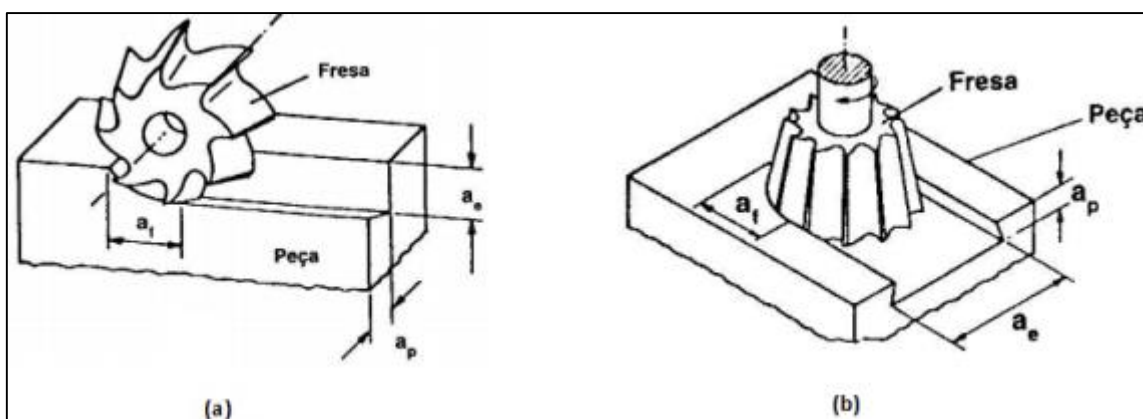
A penetração de trabalho é a penetração da ferramenta em relação a peça. Ela é medida no plano de trabalho e perpendicularmente em relação à direção de avanço. Esta grandeza é considerada muito importante no processo de fresamento, pois o seu crescimento tende a provocar uma queda acentuada da vida da ferramenta. Por isso, dependendo da potência da máquina e/ou da rigidez do sistema, é melhor realizar várias passadas para retirar o volume de material desejado (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013; FERRARESI, 2013).

A profundidade ou largura de usinagem é definida, no fresamento frontal, como a profundidade de penetração da ferramenta em relação a peça. Já no fresamento tangencial, ela

é a largura de penetração. A a_p é medida perpendicularmente em relação ao plano de trabalho. Esta grandeza tem pouca influência no desgaste da ferramenta, então, do ponto vista econômico, pode-se utilizar a maior profundidade possível. No qual, os fatores que irão limitar o a_p serão: a potência e rigidez da máquina, as vibrações, a rigidez da fixação da peça, bem como a rigidez da própria peça, e acabamento superficial desejada para a peça a ser usinada (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

São ilustrados na Figura 4 as grandezas ' a_e ' e ' a_p ', bem como a penetração de avanço ' a_f ', no fresamento tangencial e frontal.

Figura 4: A grandeza ' a_p ' e a ' a_e ' no fresamento: (a) tangencial; (b) frontal.



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

3.2.4 Fluido de corte e os impactos ambientais

O fluido de corte, no processo de usinagem de metais, é utilizado como lubrificante (facilitada em baixas velocidades) e refrigerante, portanto, ele diminui o atrito e a temperatura durante o corte (GINTING; NOUARI, 2007). Além de ter outras funções como a remoção do cavaco da zona de corte, proteção da máquina-ferramenta e da peça (quanto à oxidação), melhorar o acabamento superficial da peça usinada, minimizar o desgaste da ferramenta, minimizar o dano térmico à estrutura superficial da peça, minimizar a dilatação térmica da peça, entre outros (MACHADO *et al.*, 2009; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013; FERRARESI, 2013).

Entretanto, os fluidos de corte presentes em alguns processos podem causar doenças ou lesões em operadores de máquinas, como doenças de pele e doenças respiratórias. Além de

poluir o solo e a água, quando eles não passam por uma reciclagem e/ou não são tratados adequadamente após a sua eliminação (DUARTE COSTA *et al.*, 2015).

De acordo com as pesquisas realizadas atualmente, voltadas para a usinagem de materiais, há uma procura por uma produção mais limpa, no qual, para alcançar este objetivo um dos principais meios é a utilização de técnicas para reduzir a quantidade de fluido de corte utilizado durante o processo, pois, a influência destes fluidos na saúde humana não deve ser negligenciada (SIMUNOVIC; SIMUNOVIC; SARIC, 2015). Para Sahoo e Sahoo (2012), as operações de usinagem devem ser orientadas para a usinagem a seco ou a usinagem próxima a seco a fim de evitar os problemas ambientais.

Muitos autores têm analisado estas técnicas, tais como a usinagem à seco e a técnica de mínima quantidade de lubrificante (MQL) também conhecida por técnica de mínima quantidade de fluido (MQF), comparando-as com a usinagem em condições convencionais (lubrificação abundante), para verificar o comportamento destas técnicas em relação ao desgaste da ferramenta, aos custos, a saúde, ao ambiente e a qualidade superficial das peças (SIMUNOVIC; SIMUNOVIC; SARIC, 2015). Visto que, a ausência de fluido durante o corte pode trazer sérios problemas para a usinabilidade em relação à vida da ferramenta e acabamento superficial. Portanto, o desafio para as técnicas alternativas de lubrificação está em manter as condições de usinagem iguais à usinagem convencional (GINTING E NOUARI, 2007).

3.2.4.1 Usinagem à seco e pesquisas relacionadas

Na usinagem a seco, devido a remoção de fluido de corte durante os processos, é exigido das ferramentas de corte um melhor desempenho em altas temperaturas, para poder sustentar taxas de alimentação que satisfaçam elevadas taxas de produção (MEENA; EL MANSORI, 2011).

Portanto, para realizar o corte a seco sem que haja uma queda drástica da vida da ferramenta ou a perda da qualidade da peça, é imprescindível a utilização de ferramentas de corte e condições de usinagem adequadas. Os metais duros com camadas duras de cobertura de TiCN (carbonitreto de titânio), TiAlN (nitreto de titânio-alumínio), AlTiN (nitreto de alumínio-titânio) e diamante, ou então, *cermet* (contém uma fase cerâmica e uma fase metálica) e materiais cerâmicos são exemplos de ferramentas quando se trata de corte à seco. Quanto às

condições de corte, é realizado o aumento do avanço e a diminuição da velocidade de corte para tornar o processo mais adequado, pois com isso, se mantém o volume de cavaco removido por unidade de tempo e a quantidade de calor gerado por unidade de tempo será aproximadamente o mesmo (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013). Está ilustrado na Figura 5 as necessidades de se utilizar este tipo de usinagem em processos industriais, bem como as suas vantagens.

Figura 5: Benefícios da usinagem à seco



Fonte: adaptado de Weinert *et al.* (2004)

Devido a estes benefícios, há grande interesse na usinagem a seco. Porém, as vezes ela não é eficaz para obter um bom acabamento superficial, ou então, quando é necessário aplicar condições severas de corte. Nestas situações as operações semi-secas (em que são utilizadas pequenas vazões de lubrificantes) se tornam uma boa alternativa (DHAR; KAMRUZZAMAN; AHMED, 2006). A seguir se encontram algumas pesquisas de usinagem à seco em aço 4340.

Ávila e Abrão (2001) compararam o desempenho de três fluidos de corte (duas emulsões, sendo uma com óleo mineral, e um fluido sintético) com o corte a seco no processo de torneamento do aço endurecido AISI 4340. Nesta pesquisa, eles avaliaram a vida da ferramenta, a rugosidade superficial, desgaste da ferramenta e a forma dos cavacos, em

diferentes velocidades de corte (200, 300 e 400 m/min) e avanço. Os resultados indicaram que, em geral, o fluido à base de emulsão (sem óleo mineral) e o corte a seco apresentaram melhores resultados, seguido pelo fluido sintético e a emulsão contendo óleo mineral, ambas com resultados semelhantes. Em relação ao controle dos cavacos, os fluidos de corte tiveram uma influência positiva. E, a rugosidade superficial da peça, no processo a seco, foi afetada com o aumento da velocidade.

Chakraborty et al. (2008) analisaram o desgaste de ferramentas revestidas de TiAlN–TiN no processo de fresamento à seco e semi-seco do aço AISI 4340 (26 HRC), variando no processo de usinagem os seguintes parâmetros: velocidade de corte (183 m/min e 229 m/min), taxa de alimentação (0,10; 0,15 e 0,20 mm/rotação) e profundidade de corte (2,54 e 3,81 mm). E eles concluíram que: houve um menor desgaste inicial no fresamento semi-seco com velocidade de corte igual a 183 m/min com taxa de alimentação igual a 0,10 mm/rotação; o desgaste foi mais acentuado na velocidade de corte mais alta e a variação na profundidade de corte não apresentou influência no desgaste.

Banin Jr (2009) estudou as influências dos parâmetros velocidade de corte, profundidade de corte e avanço por dente, na integridade superficial do aço SAE 4340 endurecido (52 HRC), mediante o fresamento de topo, utilizando ferramentas convencionais de Metal Duro com cobertura de óxido de alumínio. Com isso, ele constatou que: os valores medidos da rugosidade “Ra” obtidos variaram entre 0,08 e 0,27 μ m; as variáveis do processo não interferiram na rugosidade; os resultados obtidos, em relação ao acabamento superficial, foram similares aos de operações de retificações ou lapidações.

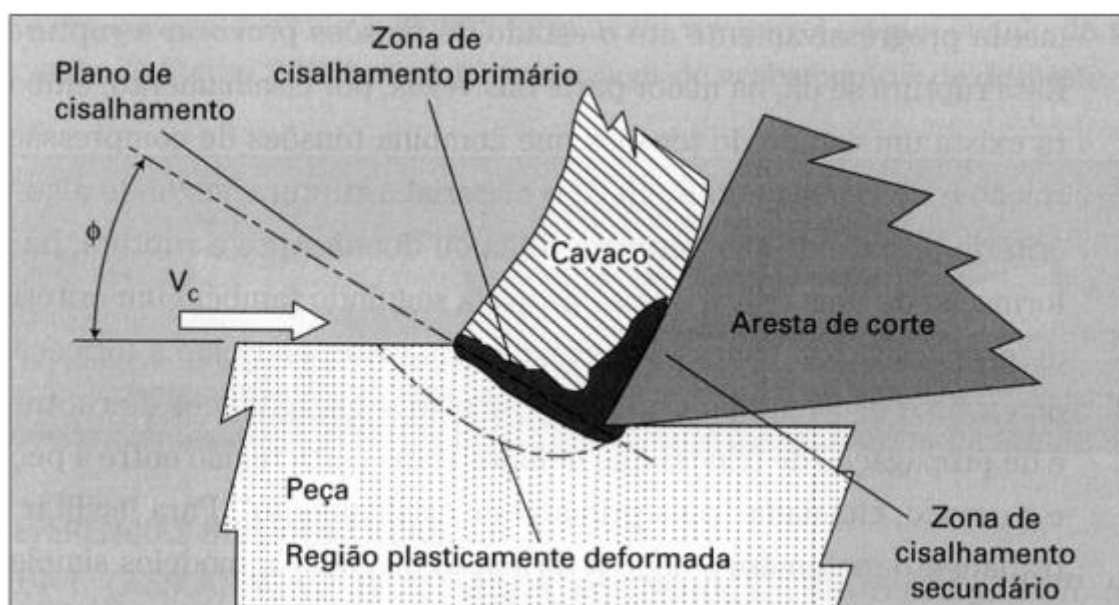
3.2.5 Mecanismo de formação de cavaco

O cavaco formado durante o processo de usinagem influencia em diversos fatores ligados a este processo, como nos esforços de corte, desgaste da ferramenta, penetração do fluido de corte, calor gerado na usinagem, entre outros. Portanto, os aspectos econômicos, segurança do operador e qualidade da peça são alguns dos fatores envolvidos neste mecanismo de formação do cavaco (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

De acordo com Machado *et al.* (2019), a formação do cavaco pode ser dividida em quatro evento, sendo eles:

- **Recalque inicial:** Nesta etapa, uma pequena porção de material, que ainda está unida a peça, se encontra pressionada contra a superfície de saída da ferramenta devido à penetração da cunha cortante neste material.
- **Deformação e ruptura:** Este material recalcado sofre, inicialmente, uma deformação elástica, e, após, uma deformação plástica. Esta deformação aumenta progressivamente até o momento em que as tensões de cisalhamento se tornam grandes o suficiente para iniciar um deslizamento. Na Figura 6 é ilustrada a esquematização do plano de cisalhamento primário (entre a peça e o cavaco) definida pelo ângulo ϕ (denominado ângulo de cisalhamento) formado entre a direção da velocidade de corte (V_c) e o plano de cisalhamento.
- **Deslizamento das lamelas:** Conforme a ferramenta vai penetrando há uma ruptura parcial ou completa, que irá depender da extensão da propagação da trinca, na região de cisalhamento. No qual, o que determinará se o material rompido continuará unido ao cavaco recém-formado serão as propriedades do material e as condições de velocidade, avanço e de corte, dando origem aos cavacos contínuos ou descontínuos.
- **Saída do cavaco:** nesta etapa se inicia o escorregamento do cavaco devido ao movimento relativo ferramenta-peça. Enquanto isso, uma nova porção de material está se formando e cisalhando passando pelos mesmos processos.

Figura 6: Mecanismo de formação de cavacos.



Fonte: Machado *et al.* (2009)

Este fenômeno de formação de cavaco é um fenômeno periódico, em condições normais de trabalho com ferramenta de aço rápido ou metal duro, inclusive na formação de cavaco contínuo. No qual, tem-se uma fase de recalque e uma de escorregamento (alternadamente) para cada porção removida de material (FERRARESI, 2013). Para Machado *et al.* (2009), esta periodicidade do fenômeno provoca na ferramenta de corte excitações dinâmicas.

Em materiais dúcteis, esses quatro eventos são bem pronunciados, porque eles apresentam uma grande zona plástica e, portanto, se deformam bastante antes de ocorrer a ruptura. Enquanto que, em materiais frágeis, com zona plástica bem pequena, o primeiro e o segundo evento são bem curtos, no terceiro a ruptura do cavaco é total e o último evento é praticamente inexistente, pois o cavaco de pequena dimensão é extraído rapidamente da região de corte (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

3.2.5.1 Tipos e formas de cavaco

Entre as diversas classificações existentes para os cavacos, a mais comum de acordo com Ferraresi (2013) é a classificação subdividida em 03 principais tipos denominados como: cavacos contínuos, cavacos de cisalhamento e cavacos de ruptura.

O primeiro tipo de cavaco é constituído de lamelas justapostas em uma disposição contínua, no qual, não é nítida a distinção destas lamelas. Este tipo de cavaco é formado na usinagem de materiais dúcteis e homogêneos. Os cavacos de cisalhamento são constituídos de lamelas justapostas bem distintas. E por fim, os cavacos de ruptura são constituídos de fragmentos que foram arrancados da peça usinada. Este tipo de cavaco é característico da usinagem de materiais frágeis. A ação do atrito neste caso é menor porque a superfície de contato entre a superfície de saída do cavaco e o próprio cavaco é reduzida (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013; FERRARESI, 2013).

Em usinagem de aços endurecidos pode haver um quarto tipo de cavaco, denominado cavaco segmentado. Isso ocorre devido a grandes tensões de compressão que aparecem na ferramenta e na peça quando são utilizadas ferramentas com ângulo de saída negativo. Esta alta tensão promove a formação de trincas ao invés de deformação plástica (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Para Stemmer (1993), no processo de formação do cavaco contínuo, há um baixo coeficiente de atrito entre a ferramenta e o cavaco. Além de que, ele é o mais desejável em termos de bom acabamento superficial, durabilidade da peça e energia consumida. No entanto, é necessário utilizar quebra cavacos para removê-los, pois, segundo Machado *et al.* (2009), os cavacos contínuos podem causar acidentes e danos a superfície usinada. No cavaco de cisalhamento, o acabamento superficial da peça usinada é de qualidade inferior, com ondulosidades (STEMMER, 1993).

Os cavacos de cisalhamento e contínuos podem ser classificados quanto à sua forma geométrica, como: em fita, helicoidais, em espiral, em lascas ou pedaços (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013; FERRARESI, 2013). Na norma ISO 3685 (1993) há a classificação detalhada das formas dos cavacos (Figura 7).

Figura 7: Classificação do formato de cavaco segundo norma ISO 3685:1993

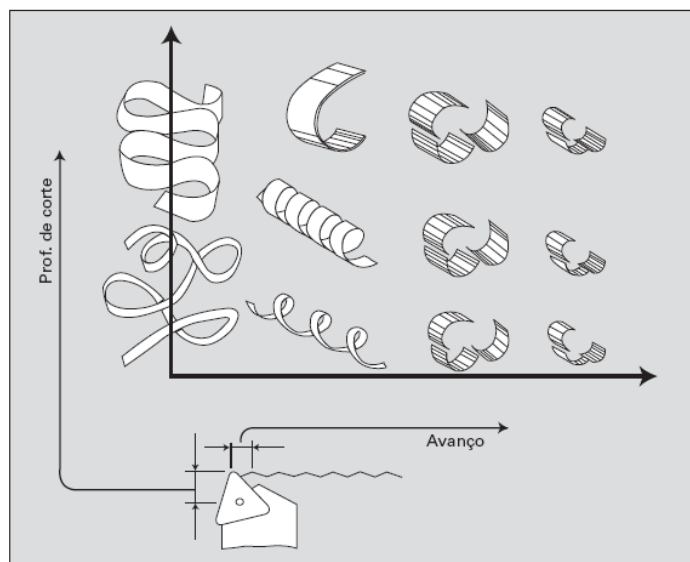
1- Cavaco em fita	2- Cavaco tubular	3- Cavaco espiral	4- Cavaco helicoidal tipo arruela	5- Cavaco helicoidal cônico	6- Cavaco em arco	7- Cavaco fragmentado	8- Cavaco tipo agulha
1-1- Longo	2-1- Longo	3-1- Plano	4-1- Longo	5-1- Longo	6-1- Conectado		
1-2- Curto	2-2- Curto	3-2- Cônico	4-2- Curto	5-2- Curto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

Fonte: Adaptado de ISO 3685 (1993)

Para Ferraresi (2013) e Diniz, Marcondes e Coppini (2013), o cavaco em fita traz consigo alguns inconvenientes como o fato de ocupar muito espaço, difícil de ser transportado e poder provocar acidentes. O cavaco helicoidal é o mais conveniente, pois com ele não há risco de entupimento no bolsão de armazenamento de cavaco, entre os dentes da fresa. E quando há pouco espaço disponível, ou então, a remoção de cavacos deve ser feita por fluido refrigerante é preferível que seja formado cavacos em lascas.

O parâmetro de corte que mais influenciam na forma do cavaco, é o avanço seguido da profundidade de corte. A Figura 8 mostra como esses dois parâmetros afetam a formado cavaco (MACHADO *et al.*, 2009).

Figura 8: Efeito do avanço e da profundidade de corte na forma dos cavacos.



Fonte: Machado *et al.* (2009)

3.2.6 Materiais para ferramentas

Para obter maior eficiência no processo de usinagem é necessário determinar qual é o material ideal a ser utilizado como ferramenta de corte. A seleção deste material depende de diversos fatores como: a natureza da operação de usinagem; o material a ser usinado; a forma e dimensões da própria ferramenta; condição da máquina ferramenta; custo do material para ferramenta; entre outros (FERRARESI, 2013).

No entanto, independente do material para ferramenta de corte, é desejável que ele tenha as seguintes propriedades: alta dureza; alta resistência ao desgaste abrasivo; alta resistência ao cisalhamento; alta resistência ao choque térmica; ser inerte quimicamente; tenacidade suficiente a fim de evitar falha por fadiga; alta resistência a compressão; alta resistência ao impacto; e, boas propriedades térmicas e mecânicas em temperaturas elevadas. No qual, dependendo da aplicação, algumas destas propriedades são reunidas. Pois todas as características não se encontram reunidas em um único material (MACHADO *et al.*, 2009).

Para Diniz, Marcondes e Coppini (2013), os materiais para ferramenta de corte podem ser classificados de acordo com as suas características químicas, apresentados a seguir, em ordem crescente em relação a sua dureza a quente e resistência ao desgaste por abrasão:

- Aços rápidos;
- Aços rápidos com cobertura;
- Metal duro;
- Metal duro com cobertura;
- Material cerâmico;
- Nitreto de boro cúbico;
- Diamante.

3.2.6.1 **Metal duro**

O metal duro é o material para ferramenta mais importante na indústria moderna, pois este produto combina dureza à temperatura ambiente, resistência ao desgaste, dureza a quente e tenacidade. No qual, esta combinação se torna possível de se obter devido à variação em sua composição (FERRARESI, 2013). Ele é um produto da metalurgia do pó, sinterizado com um ou mais metais do grupo do ferro (ferro, níquel ou cobalto), resultando em um corpo com alta dureza e resistência a compressão (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

O tamanho das partículas que constituem este material varia, geralmente, de 1 a 10 μm e ocupam um volume em torno de 60 a 95% do volume total do material. Entretanto, já se encontram partículas com 0,1 μm , o que faz melhorar certas características do material, pois, partículas menores tem maior fator de empacotamento, e isto proporciona um aumento da resistência ao desgaste, da dureza e da tenacidade do material (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Para melhorar o seu desempenho durante a usinagem de materiais ferrosos (o mais utilizado na indústria mecânica), estas ferramentas de metal duro podem ser revestidas. Este revestimento pode ser de uma camada apenas ou várias camadas de diferentes compostos, porém, o mais comum é o revestimento triplo (MACHADO et al., 2009).

Os metais duros revestidos possuem uma base tenaz, sobre o qual se aplicam camadas finas, consideradas duras, com resistência a abrasão e com granulometria fina. Isto

permite com que a vida da ferramenta aumente consideravelmente. Pois, a camada superior, que entra em contato com a peça e com o cavaco, fica mais resistente ao desgaste. Com isso, a ferramenta passa a ter, ao mesmo tempo, tenacidade, resistência ao desgaste e dureza a quente (STEMMER, 1993; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

3.2.6.2 **TiAlN e TiN**

O TiAlN é derivado do nitreto de titânio (TiN), no qual, durante o processo de deposição parte dos átomos de titânio são substituídos por átomos de alumínio. Estes átomos são retidos no material em forma de solução sólida, provocando o endurecimento. Com isso, aumenta a dureza (3.500 HV 0,05), e consequentemente, a resistência ao desgaste (KANZLER, 2016).

Dentre os revestimentos existentes, o TiAlN, composto à base de titânio e alumínio, pode ser utilizado no fresamento e torneamento de peças endurecidas com corte à seco, processo este, que só era feito por retificação ou então por processos não convencionais. Os materiais revestidos com este composto apresentam baixa condutividade térmica, alta estabilidade química, alta dureza a frio e a quente, além de maior resistência a oxidação (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013). Este revestimento possui alto desempenho em parâmetros de corte mais elevados, além de aumentar a vida da ferramenta, pois ele reduz o aquecimento da ferramenta (DAVIM, 2012). A estequiometria do TiAlN pode variar em larga margem, e devido a isto, podem-se obter diversos produtos com diferentes aplicações. Ele, por exemplo, pode ser aplicado na usinagem de superligas de níquel, na usinagem de ferro fundido, entre outros (MACHADO et al., 2009).

O TiN também é importante dentre os revestimentos existentes, pois ele proporciona um menor coeficiente de atrito entre o cavaco e a ferramenta, visto que ele tem boa resistência a abrasão. Com dureza de 2.300 HV 0,05, este composto tem uma menor tendência à adesão em materiais ferrosos, portanto, garante menores contatos, durante o corte, entre a ferramenta e o cavaco. A estabilidade térmica do TiN vai até 600 °C e normalmente ele se apresenta na camada externa da ferramenta, no qual, a espessura desta camada varia de 5 a 7 µm (MACHADO et al., 2009; DAVIM, 2012; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013; KANZLER, 2016).

Além destas características, o TiN é considerado quimicamente mais estável do que o carboneto de titânio (TiC) pois ele possui menor tendência à difusão em aços (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013). Portanto, em processos de usinagem, o uso de ferramentas revestidas com TiN faz com que haja uma menor formação de crateras na superfície de saída da ferramenta, quando comparadas com ferramentas revestidas de TiC. Entretanto, este último é mais resistente ao desgaste de flanco (STEMMER, 1993; TRENT & WRIGHT, 2000).

3.2.7 Desgaste e avaria de ferramenta.

Na maioria dos processos de usinagem ocorrem alterações graduais na ferramenta de corte, de modo que a ferramenta diminui a sua eficiência ou falha completamente (TRENT & WRIGHT, 2000). Estas alterações graduais que ocorrem na superfície de saída e de folga da ferramenta são denominadas desgaste, e são induzidas por diversos fatores, como exemplo, elevadas tensões na ponta da ferramenta e altas temperaturas na face de corte (FERRARESI, 2013; KALPAKJIAN e SCHMID, 2009). Segundo Machado *et al.* (2009), durante o desgaste ocorre a mudança geométrica da peça por perda de massa, no qual, essa perda ocorre em proporções pequenas, de maneira contínua e progressiva.

Os principais fatores que favorecem o desgaste são: abrasão, deformação plástica, oxidação do material, difusão de componentes entre o material da ferramenta e da peça, aderência de asperezas que estão na superfície da ferramenta e correntes elétricas iônicas formadas pelo atrito ferramenta-peça (STEMMER, 1993).

Os desgastes mais comuns de serem encontrados, de acordo com Diniz, Marcondes e Coppini (2013), são:

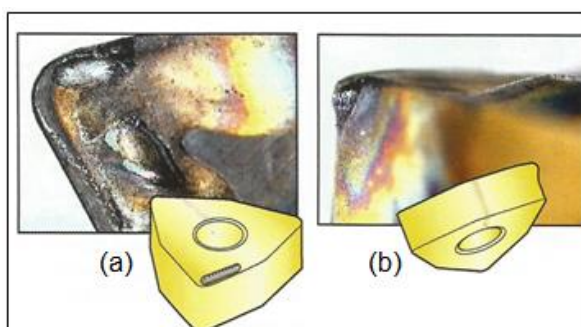
- **Desgaste de flanco** (Figura 10a): ocorre na superfície de folga da ferramenta causado pelo atrito da mesma ao longo da superfície usinada (KALPAKJIAN e SCHMID, 2009). Este tipo de desgaste é muito comum e ocorre em todo o processo de usinagem. Ele ocasiona a deterioração do acabamento superficial da peça e modifica a forma da aresta de corte (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).
- **Desgaste de cratera** (Figura 9a): ocorre na superfície de saída da ferramenta de corte devido ao atrito ferramenta-cavaco. O seu crescimento leva a quebra da ferramenta quando ele se encontra com o desgaste de flanco. Em alguns processos

de usinagem ele pode não ocorrer, principalmente quando o material da ferramenta é de metal duro revestido ou de cerâmica, ou então, quando o material da peça a ser usinada é frágil (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013);

- **Desgaste de entalhe** (Figura 10b): ocorre na extremidade do contato entre a peça e a superfície de folga da ferramenta, devido à exposição ao ar (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013). Ele também pode se desenvolver na superfície de saída ou apenas no flanco da ferramenta. Há evidências, embora não haja um consenso sobre as causas deste desgaste na literatura, que os óxidos se formam e se aderem à ferramenta nessas regiões, e a quebra por *attrition* (desgaste que envolve aderência e arrastamento do material) das junções de aderência entre a ferramenta e os óxidos pode remover material da superfície da ferramenta (MACHADO *et al.*, 2009).

A deformação plástica (Figura 9b) é outra alteração geométrica que pode ocorrer na aresta de corte durante a usinagem, devido ao deslocamento de material. Essas deformações ocorrem por cisalhamento, em consequência das altas tensões nas superfícies da ferramenta (MACHADO *et al.*, 2009). Porém, neste caso não há remoção de material apenas deslocamento (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Figura 9: Desgastes e avarias: (a) cratera; (b) deformação plástica



Fonte: De Vos e Ståhl (2014).

Além dos desgastes e deformações plásticas, pode haver também avarias nas ferramentas de corte. Estas avarias são fenômenos que ocorrem de forma abrupta, causando danos como trincas (térmicas ou mecânicas), quebras, ou lascamentos. No qual, estes dois últimos resultam em uma destruição total ou em uma perda considerável de material da aresta (MACHADO *et al.*, 2009).

As trincas térmicas (Figura 10d) se formam devido à variação de temperatura que ocorre durante o processo de corte, pois, quando a ferramenta está em contato com o cavaco a temperatura se encontra elevada e esta vai diminuindo conforme ela se afasta desta zona de contato. Como consequência, a ferramenta se dilata e se deforma porque o calor gerado é dissipado, em parte, pela ferramenta (FERRARESI, 2013). Já a trinca mecânica é causada por variações de esforços mecânicos e ocorre paralelamente à aresta de corte, enquanto que as trincas de origem térmicas são perpendiculares à aresta. Esses dois tipos de trincas são favorecidos pelos seguintes fatores: acesso irregular do fluido de corte; corte interrompido; variação da espessura de corte; etc (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

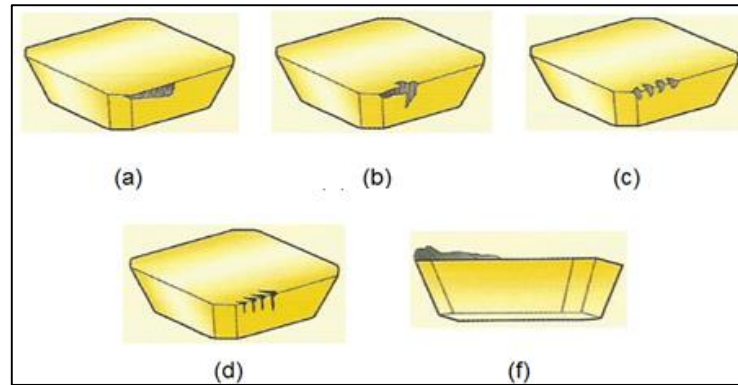
A quebra poder ser resultante do crescimento de diversos desgastes e avarias que uma ferramenta sofre ao longo do processo de usinagem. No entanto, algumas vezes ela acontece de forma inesperada, devido a fatores como: carga excessiva sobre a ferramenta; ferramenta muito dura; corte interrompido; entre outros (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Para Stemmer (1993), o lascamento (Figura 10c) ocorre por causa das sobre sollicitações, de origem térmica ou mecânica, na aresta. E ele pode ser evitado de diversas formas como, por exemplo, empregando ângulos de saída negativos em trabalhos severos com pastilhas de cerâmica ou metal duro.

Outro problema prejudicial além dos desgastes e avarias mencionados é a aresta postiça de corte (APC) que pode se formar na ferramenta (Figura 10e). Esta APC consiste em uma camada de cavaco que permanece aderente a aresta de corte, que modifica o comportamento da ferramenta em relação ao acabamento da peça, ao desgaste da ferramenta e à força de corte (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Figura 10: Desgastes e avarias: (a) Desgaste de Flanco; (b) Desgaste de Entalhe; (c)

Lascamento; (d) Trincas Térmicas; (e) Aresta Postiça.



Fonte: Seco Tools AB (2016).

3.3 Rugosidade

A rugosidade é caracterizada pelas irregularidades ou erros micro geométricos existentes em uma superfície devido ao processo de corte (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013). Esta rugosidade pode ser atribuída às marcas do avanço da ferramenta e aos fragmentos da APC que ficam acamados na peça durante a formação do cavaco (STEMMER, 1993). Além disso, ela é dependente de alguns parâmetros como as propriedades do material usinado, o material e a geometria da ferramenta, o conjunto máquina–ferramenta, etc. (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

No processo de usinagem, por exemplo, há determinados fatores que interferem na rugosidade, pois de acordo com Stemmer (1993), eles são capazes de diminuir a dimensão da aresta postiço e/ou da altura das raiais. Os efeitos de alguns desses fatores estão descritos a seguir:

- O aumento da velocidade de corte, normalmente, contribui para um melhor acabamento superficial, porque conforme ocorre este aumento a APC diminui;
- Um avanço pequeno pode garantir um melhor acabamento superficial, por causa da altura das raiais;
- O acabamento superficial melhora conforme ocorre o aumento do ângulo de saída, porque dificulta a formação da APC.

É importante analisar e procurar controlar a rugosidade, através dos parâmetros de corte, porque ela influencia em determinadas propriedades do material como na resistência à fadiga, visto que superfícies rugosas possibilitam o surgimento de concentrações de tensões e

estas facilitam o aparecimento de trincas de fadigas, portanto, quanto mais lisa for uma superfície maior será a sua resistência à fadiga (SMITH e HASHEMI, 2012).

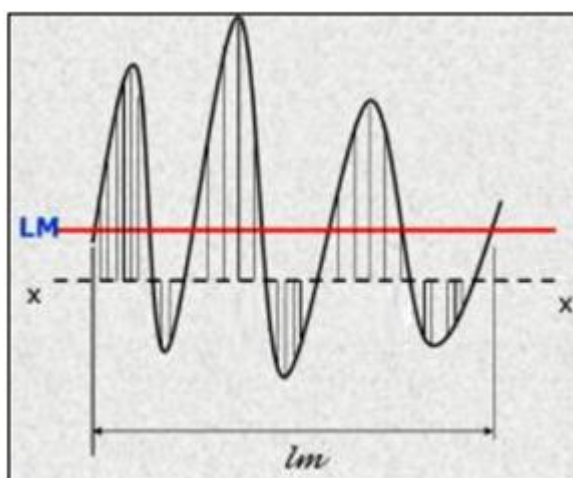
Há vários parâmetros que podem ser utilizados para quantificar a rugosidade de uma superfície usinada, com o intuito de avaliá-la (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013). Dentre estes parâmetros, a rugosidade média (R_a) é a mais utilizada pela indústria (MACHADO *et al.*, 2009).

3.3.1 Sistema de medição da rugosidade superficial através da linha média

A rugosidade é determinada em função de uma linha de referência, esta linha é denominada linha média e tem a finalidade de dividir o perfil em análise, ao longo de um comprimento de medição ' l_m ', de forma que a área acima desta linha seja igual a área abaixo da mesma, conforme ilustrado na Figura 11 (PIRATELLI FILHO, 2011).

Além do comprimento de medição há também o comprimento de amostragem ' l_r ' ("cut-off") que é o comprimento na direção da abscissa (eixo x), utilizado com o intuito de identificar as irregularidades características da superfície em análise, e o comprimento de avaliação ' l_n ' também é na direção do eixo 'x' que contém um ou mais l_r . É recomendado que este l_n seja equivalente a 5 vezes o comprimento l_r (ABNT NBR 4287: 2002).

Figura 11: Linha Média



Fonte: adaptado de Piratelli Filho (2011).

A escolha do *cut-off* deve ser realizada de acordo com a norma ABNT NBR ISO 4288:2008 para processos de usinagem não periódicos. Os valores padronizados de *cut-off* estão ilustrados no Quadro 2.

Quadro 2: Comprimento de amostragem (“cut-off”).

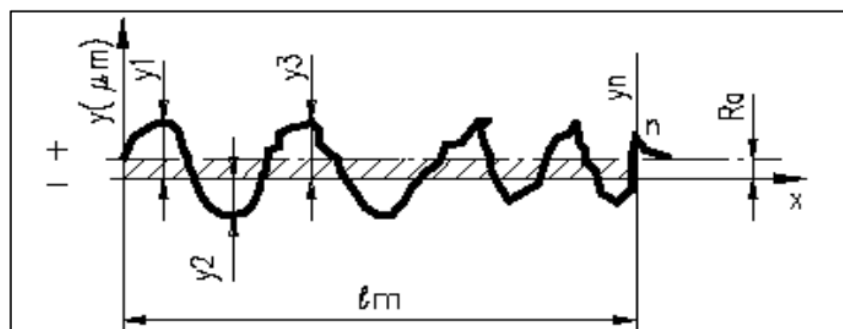
Ra (μm)	Comprimento de amostragem de rugosidade (lr): cut-off (mm)
$(0,006) < Ra \leq 0,02$	0,08
$0,02 < Ra < 0,1$	0,25
$0,1 < Ra < 2,0$	0,8
$2,0 < Ra < 10,0$	2,5
$10,0 < Ra \leq 80$	8

Fonte: Adaptado da ABNT NBR ISO 4288 (2008).

3.3.1.1 Rugosidade média

A rugosidade média (R_a), em um comprimento de amostragem, representa uma média dos valores absolutos das ordenadas (Figura 12). Este parâmetro é disponível em instrumentos mais simples, no entanto, os efeitos ocasionais não influenciam na medida da R_a , portanto, ele não é suficiente na identificação de algumas características da superfície (MACHADO et al., 2009).

Figura 12: Parâmetro de Rugosidade R_a



Fonte: Carpinetti et al. (1996).

É apresentado no Quadro 3 a rugosidade R_a esperada em função de cada processo de usinagem e no Quadro 4 a recomendação da rugosidade R_a ideal para um material em função da sua aplicação (CATAPAN, 2013).

Quadro 3: Rugosidade R_a em função dos processos de usinagem.

R_a (μin)	2000	1000	500	250	125	63	32	16	8	4	2	1	0,5
R_a (μm)	51	25,4	12,7	6,3	3,2	1,6	0,8	0,4	0,2	0,1	0,05	0,025	0,013
R_q (μin)	2112	1056	528	265	134	66,2	35,5	16,8	8,4	4,1	2,06	1,03	0,52
R_q (μm)	53,6	26,8	13,4	6,7	3,4	1,68	0,86	0,42	0,21	0,105	0,053	0,026	0,013
$R_{\text{máx}}$ (μin)	—	—	—	590	406	209	103	50	24	12	5,9	2,9	1,5
$R_{\text{máx}}$ (μm)	—	—	—	15	10,3	5,3	2,7	1,25	0,60	0,30	0,15	0,07	0,04
Corte por chama													
Moldagem em areia													
Laminação a quente													
Forjamento													
Plainamento													
Rasqueteamento													
Corte de serra													
Furação													
Usinagem química													
Corrosão eletrolítica													
Fresamento													
Torneamento/Mandrilamento													
Brochamento													
Alargamento													
Moldagem em coquilha													
Moldagem de precisão													
Extrusão													
Laminação a frio													
Moldagem sob pressão													
Retífica													
Espelhamento													
Polimento eletrolítico													
Rolagem													
Polimento													
Lapidação													
Super acabamento													

Aplicação menos comum

Campo de aplicação usual

R_a = Rugosidade média

R_q = Desvio médio quadrático

$R_{\text{máx}}$ = Rugosidade máxima

μm = microns / μin = micro polegadas

Fonte: Adaptado de Seco Tools AB (2016).

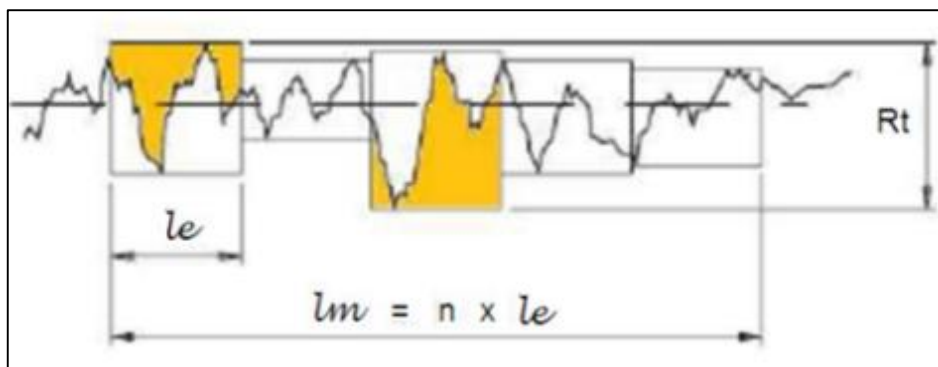
Quadro 4: Rugosidade média em função da aplicação.

R_a (μm)	APLICAÇÕES
0,01	Blocos padrão, réguas triangulares de alta precisão, guias de aparelhos de medida de alta precisão.
0,02	Aparelhos de precisão, superfícies medidas em micrômetros e calibradores de precisão.
0,03	Calibradores, elementos de válvulas de alta pressão hidráulica.
0,04	Agulhas de rolamentos, super-acabamento de camisa de bloco de motor.
0,05	Pistas de rolamentos, peças de aparelhos de controle de alta precisão.
0,06	Válvulas giratórias de alta pressão, camisas de blocos de motores.
0,08	Agulhas de rolamentos de grandes dimensões, colos de virabrequim.
0,1	Assentos cônicos de válvulas, eixos montados sobre mancais de bronze ou teflon a velocidades médias, superfícies de cames de baixa velocidade.
0,15	Rolamentos de dimensões médias, colos de rotores de turbinas e redutores.
0,2	Mancais de bronze, náilon, etc., cones de cubos sincronizadores de caixas de câmbio de automóveis.
0,3	Flancos de engrenagens, guias de mesas de máquinas-ferramentas.
0,4	Pistas de assentamento de agulhas de cruzetas em cardas, superfície de guia de elementos de precisão.
0,6	Válvulas de esferas, tambores de freio.
1,5	Assentos de rolamentos em eixos com carga pequena, eixos e furos para engrenagens, face de união de caixas de engrenagens.
2	Superfícies usinadas em geral, eixos, chavetas de precisão, alojamentos de rolamentos.
3	Superfícies usinadas em geral, superfícies de referência e apoio.
4	Superfícies desbastadas por operações de usinagem.
5 a 15	Superfícies fundidas, superfícies estampadas.
> 15	Peças fundidas, forjadas e laminadas.

Fonte: Catapan (2013).

3.3.1.2 Rugosidade total

A rugosidade total ‘R_t’ (Figura 13) representa a soma da dimensão do maior vale com a dimensão do maior pico presente no comprimento de avaliação (MACHADO et al., 2009; ABNT NBR 4287: 2002). Portanto, este parâmetro é influenciado diretamente por qualquer irregularidade ou defeito presente em uma superfície (MACHADO et al., 2009).

Figura 13: Parâmetro de Rugosidade R_t 

Fonte: Piratelli Filho (2011).

3.4 Potência de usinagem

Uma máquina-ferramenta ao girar seu eixo-árvore para executar o movimento de corte e de avanço, gera potência (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013). Segundo Machado *et al.*, (2009) e Ferraresi, (2013) a potência de usinagem resulta do produto das componentes da força de usinagem com as respectivas componentes de velocidade.

De acordo com a ABNT NBR 12545: 1991 a potência pode ser classificada como:

- **Potência Efetiva:** O produto entre a força efetiva (F_e) e a velocidade efetiva (V_e), ou então, a soma das potências de corte (P_c) e de avanço (P_f);
- **Potência de corte:** O produto entre a força de corte (F_c) e a velocidade de corte (V_c);
- **Potência de avanço:** O produto entre a força de avanço (P_f) e a velocidade de avanço (V_f).

Como a V_f é muito pequena se compará-la com a V_c , a potência de avanço se torna praticamente desprezível (SECO TOOLS, 2016). Para Diniz, Marcondes e Coppini (2013), em uma situação extrema, a potência de corte pode chegar a ser 140 vezes maior do que a potência de avanço. Portanto, a potência de usinagem pode ser igualada a potência de corte.

Como foi visto, a P_c é diretamente proporcional a força de corte. E segundo Seco Tools AB (2016), esta força pode ser definida, a grosso modo, como a força necessária para a remoção de 1 mm^2 de cavaco de um determinado material. No qual ela sofre influência principalmente da seção de corte, geometria da ferramenta, material da peça, rigidez da ferramenta, velocidade de corte e do ângulo de posição da aresta de corte.

De acordo com Kant e Sangwan (2014), a redução no consumo desta potência durante a usinagem ajuda a alcançar um desempenho sustentável nos processos industriais. No entanto, é necessário reconciliar esta redução com a qualidade superficial da peça. Visto que esta redução pode afetar a rugosidade, gerando mais rejeições, retrabalho e perda de tempo.

Em uma operação de fresamento, devido às características do processo, a potência consumida durante a usinagem varia constantemente por causa da variação da espessura do cavaco e do número de dentes. Entretanto, ela pode ser dimensionada através do cálculo da potência média (Equação 2), tanto no fresamento tangencial como no fresamento frontal. Para este cálculo é levado em consideração o valor médio da espessura do cavaco e o K_s (constante relativa ao material da peça) médio calculado através da Equação 1 (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

$$K_{s_m} = K_{s_1} \cdot h_m^{-z} \quad (1)$$

$$P_c = \frac{K_{s_m} \cdot a_e \cdot a_p \cdot v_f}{60 \cdot 10^6} \quad [\text{KW}] \quad (2)$$

Onde:

P_c = potência média de corte consumida pelo processo.

K_{s_1} = constante relativa ao material da peça.

h_m = espessura média do cavaco.

Experimentalmente, a potência de usinagem pode ser mensurada durante um processo, através da tensão e da corrente elétrica consumida. No qual, a tensão pode ser obtida através do uso de voltímetros e a corrente com o uso de amperímetros em série. No entanto, pode haver problemas de intrusão em máquina-ferramenta. Os dispositivos de Efeito no Hall, colocados externamente aos cabos elétricos, evitam este tipo de problema (MACHADO *et al.*, 2009).

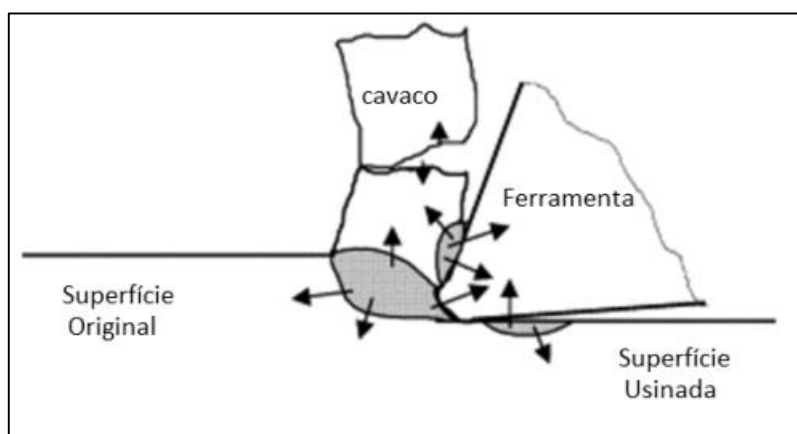
3.5 Emissão acústica

A emissão acústica (EA) é um conjunto de ondas elásticas transientes formadas devido à rápida liberação de energia a partir de uma fonte, localizada ou não, quando esta é submetida ao estresse (GUO; AMMULA, 2005). Em outras palavras, a EA é uma onda de tensão resultante de uma liberação repentina de energia de deformação, que se propaga através de um material (LI, 2002). Pois, quando um corpo sofre alguma alteração ele emite som (MAIA *et al.*, 2015).

Em um processo de usinagem, por exemplo, as principais fontes de EA (Figura 14), de acordo com Dornfeld¹ (1985) *apud* Guo e Ammula (2005), são:

- Deformações e fraturas que ocorrem na ferramenta devido ao contato entre a ferramenta-peça e entre a ferramenta-cavaco,
- Emaranhamento, colisão e quebra dos cavacos gerados;
- Deformações e fraturas que ocorrem na zona primária, secundária e terciária de cisalhamento em uma peça usinada.

Figura 14: Fontes de EA durante a usinagem de metal.



Fonte: Adaptado de Li (2002).

Tendo em vista que as deformações (desgaste) em ferramentas trazem consequências indesejáveis ao processo de usinagem e afeta a rugosidade da peça, é muito importante desenvolver métodos (diretos e indiretos) para monitorar este desgaste, a fim de ter maior controle do processo. Entre os métodos indiretos, a EA é o mais eficaz para detectar o

¹ DORNFELD, D.A. (1984): Acoustic emission in monitoring and analysis in manufacturing, Proc. AE Monit. Anal. **Manuf.** 14, 124.

desgaste, pois, a faixa (*range*) de frequência do sinal é maior do que os ruídos ambientais e vibrações da máquina, além de não interferir na operação de corte (LI, 2002).

3.6 Vibração

A vibração é o principal parâmetro para análise do acabamento superficial e das condições de usinagem, além do mais, este fenômeno é o maior obstáculo para conseguir conciliar o aumento da produtividade com uma boa qualidade superficial. (SONG *et al.*, 2014; VIKRAM; RATNAM; NARAYANA, 2016)

Em um processo de usinagem ocorrem dois tipos básicos de vibração, que são denominados vibração forçada e vibração auto excitada. A vibração forçada é causada por forças, presentes na máquina-ferramenta, aplicadas de forma periódica, que ocorre devido a problemas como o desequilíbrio e desalinhamento de componentes do conjunto máquina-ferramenta. A vibração auto excitada também chamada de trepidação é causada pela interação entre o processo de remoção de cavaco e a estrutura da máquina-ferramenta (KALPAKJIAN e SCHMID, 2009).

Dentre estes dois tipos de vibração mencionados, a trepidação é a mais importante, porque ela possui efeitos adversos no processo de usinagem, como na contribuição para o desgaste rápido da ferramenta, na baixa qualidade superficial e na limitação da produtividade (DESHPANDE; FOFANA, 2001; MORADI *et al.*, 2015; WEREMCZUK; RUSINEK; WARMINSKI, 2015). Portanto, é necessário controlar essas trepidações para aumentar a produtividade e reduzir os custos. Para isso é necessário compreender a interação que ocorre entre a ferramenta e a peça de trabalho afim de prever o comportamento da vibração e selecionar os parâmetros de usinagem apropriados (DESHPANDE; FOFANA, 2001).

Para Kalpakjian e Schmid (2009), as trepidações são proporcionais às forças de corte, largura do corte e profundidade, bem como à dureza do material. Devido a estas forças, os tipos de cavaco também influenciam nestas vibrações, porque na formação de cavacos contínuos a força de corte é estável e, portanto, elas geralmente não causam trepidações. O mesmo pode não ocorrer com cavacos descontínuos ou serrilhados, porque a variação da força resultante durante a formação periódica do cavaco pode causar vibrações. Além destes fatores, a falta de fluido lubrificante no processo de usinagem também pode contribuir para causar trepidações.

4 MATERIAL E MÉTODOS

Nestes itens foram descritos todos os materiais e métodos utilizados e as etapas de desenvolvimento da pesquisa, bem como, a forma de análise dos resultados.

4.1 Preparação dos corpos de prova

O material utilizado para estudo nesta pesquisa foi o aço ABNT 4340. Ele foi adquirido na forma bruta, proveniente de 03 lotes diferentes, com dureza variando de 201 a 227 HB. A composição química deste aço está apresentada na Tabela 1.

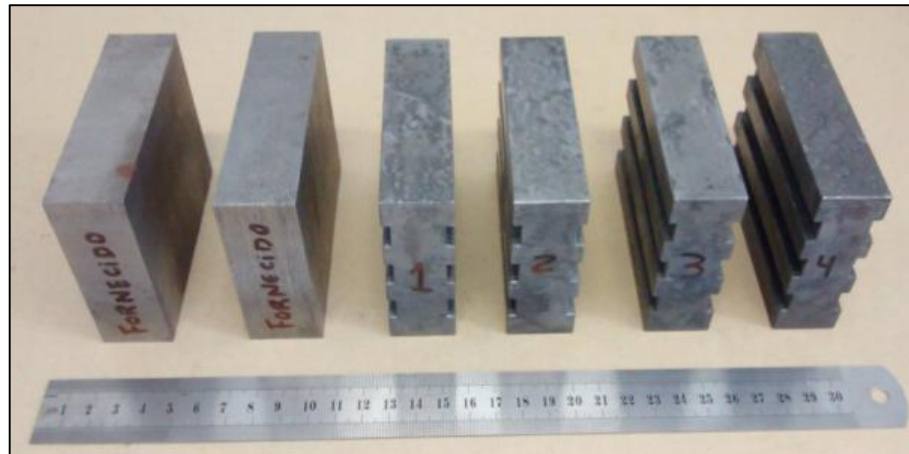
Tabela 1: Composição do aço ABNT 4340 adquirido.

Lote 1									
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Al
0,400	0,650	0,260	0,016	0,005	0,720	1,750	0,220	0,180	0,032
Lote 2									
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Al
0,400	0,630	0,220	0,015	0,014	0,730	1,660	0,220	0,150	0,037
Lote 3									
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Al
0,400	0,650	0,240	0,019	0,012	0,750	1,680	0,240	0,190	0,033

Fonte: Autoria Própria

Este material passou por um processo de usinagem preparatório para obter dimensões nominais de 25x70x100mm. Ele foi ensaiado na forma como foi fornecido (recozido), ilustrado a esquerda na Figura 15. E na forma temperada e revenida, ilustrado a direita na mesma foto, com numeração de 1 a 4, com dureza pré-estabelecida de 56 HRC (615 HV).

Figura 15: Corpo de prova na forma recozida e na forma temperada e revenida.



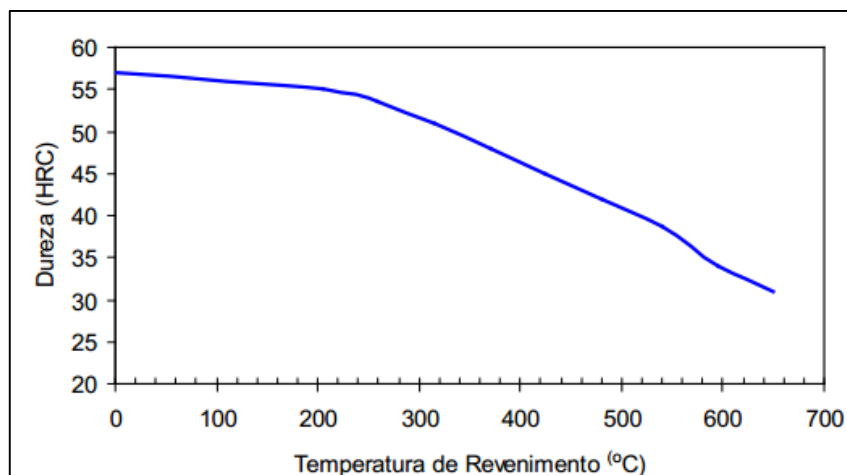
Fonte: Autoria Própria

4.2 Tratamento térmico

Estas amostras foram tratadas termicamente na Empresa Proterm na cidade de São José dos Campos e atingiram a dureza especificada. No qual, para realizar a tempera, foi feito a austenitização em uma temperatura variando de 840 a 870 °C por 1 hora. Após esta etapa, o material foi resfriado em óleo.

O revenimento foi realizado imediatamente após a tempera, mais especificamente quando a temperatura atingiu creca de 70 °C. No qual, para atingir a dureza desejada (56 HRC) o processo foi realizado a 200 °C, por 2 horas. A curva de revenimento para este material está ilustrada na Figura 16.

Figura 16: Curva de Revenimento. Têmpera a partir de 850°C.



Fonte: GGD Metals (2016).

4.3 Processo de usinagem

A pesquisa foi desenvolvida no Laboratório de Estudo da Usinagem na Unesp-Guaratinguetá em um Centro de Usinagem marca DMG modelo DMU50ECO série DMG Ecoline (Figura 17), acoplado a um sistema de aquisição de dados de potência, emissão acústica e vibração. Este equipamento possui rotação máxima do fuso de 8000 rpm e potência de 17 kVA.

Figura 17: Centro de Usinagem



Fonte: Autoria Própria

4.3.1 Fresamento

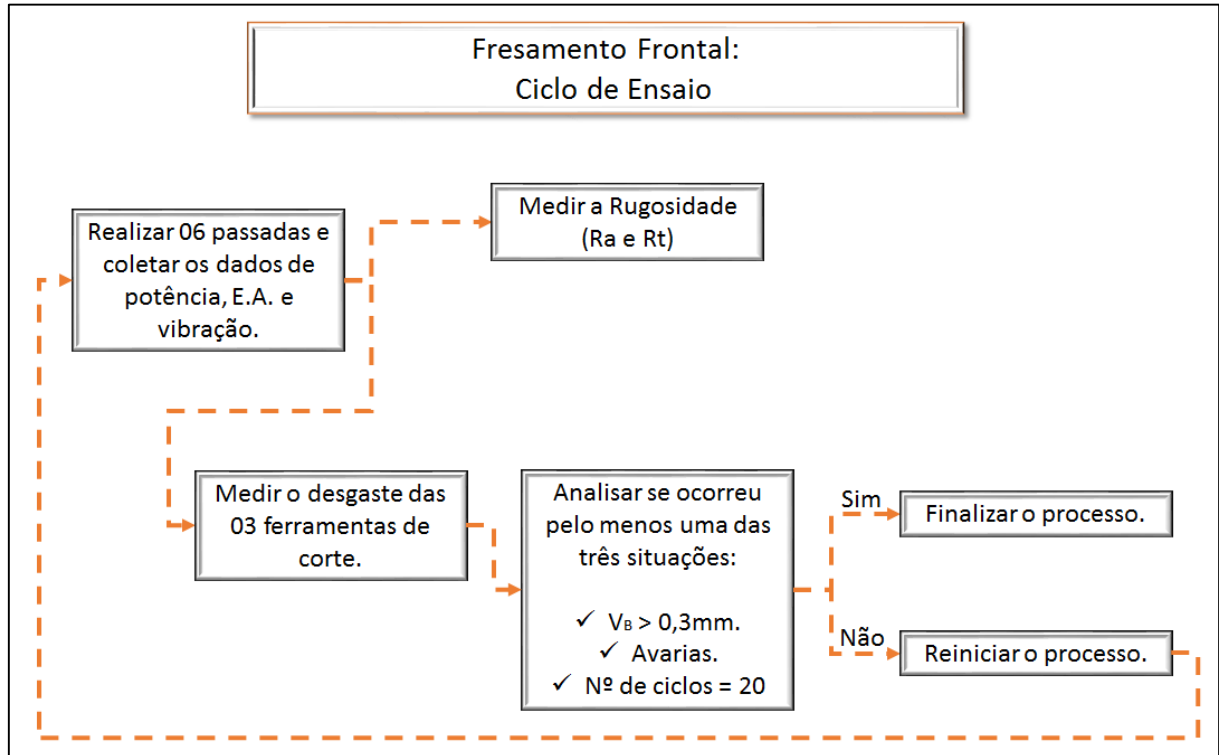
O processo de usinagem realizado nesta pesquisa foi o fresamento frontal simétrico (abertura de canal) a seco das amostras. No qual, para cada condição de usinagem foram utilizadas 3 ferramentas de metal duro revestida com TiAlN (1,8 μm) e TiN (0,2 μm).

1º Etapa:

Na primeira etapa do experimento, foram realizados ciclos de fresamento, para analisar o comportamento das variáveis conforme ocorria o desgaste da ferramenta. Na Figura 18, há uma esquematização de como ocorreu cada ciclo, bem como, a condição estabelecida para parar o processo. No qual, o V_B máximo de 0,3 mm foi estabelecido conforme o recomendado pela ISO 3685: 1993 como critério para o fim da vida da ferramenta.

Esta etapa foi realizada para cada material em estudo (aço recozido e o aço endurecido) em 04 condições de usinagem diferentes, ilustradas na Tabela 2.

Figura 18: Ciclo de Ensaio



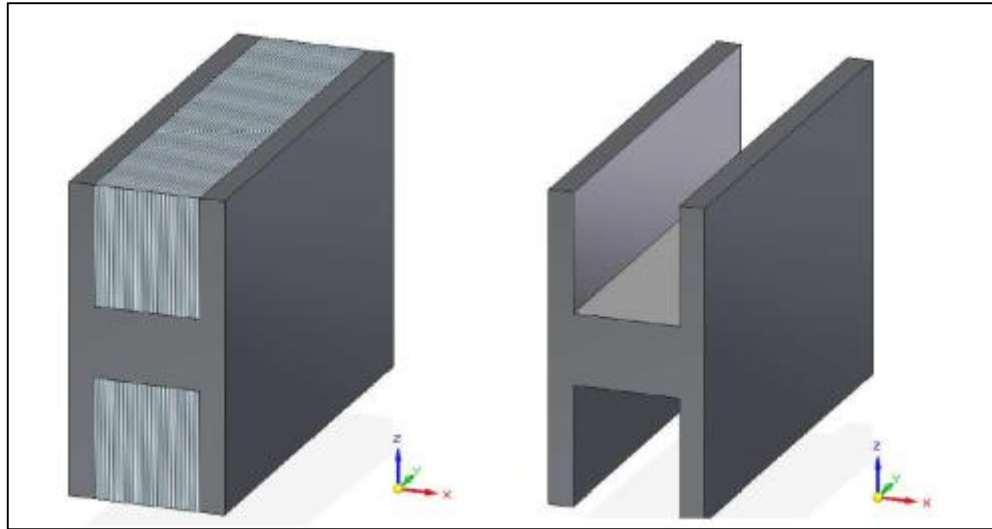
Fonte: Autoria Própria

Tabela 2: Condições de usinagem analisadas para os dois materiais em estudo.

Condição	1	2	3	4
V_c (m/min)	200	200	300	300
f (mm/dente)	0,1	0,04	0,1	0,04
n (RPM)	2546,5	2546,5	3819,7	3819,7
a_p (mm)	0,5	0,5	0,5	0,5
a_e (mm)	25	25	25	25
v_f (mm/min)	764,0	305,6	1145,9	458,4

Como a cada passada a profundidade de corte era de 0,5 mm, então, ao final de cada ciclo totalizava 3 mm de profundidade de material retirado. Considerando a estabilidade da peça durante a usinagem, já que a mesma possuía 70 mm de altura, foi planejado realizar nove ciclos em uma face do material e mais nove ciclos na outra face, conforme está ilustrado na Figura 19.

Figura 19: Esquemática da peça antes e após a usinagem



Fonte: Autoria Própria

2º Etapa:

Como os resultados obtidos na primeira etapa, mostraram que era possível usinar o aço recozido com uma V_c de 300 m/min, este material passou a ser analisado com uma V_c de 400 m/min, a fim de verificar a viabilidade deste nível de velocidade.

No caso do aço endurecido, a V_c de 300 m/min não se mostrou viável. Portanto, ele analisado com uma V_c de 250 m/min (nível intermediário). Como esta etapa era apenas investigativa, foram realizados somente seis passadas da ferramenta sobre a peça.

Na Figura 20, está ilustrada a condição de usinagem (V_c de 300 m/mm e avanço de 0,04 mm/dente) realizada para o aço recozido. E na Figura 21 para o aço endurecido, nas mesmas condições, com o intuito de enfatizar a diferença dos dois processos.

Figura 20: Fresamento do aço 4340 recozido.



Fonte: Autoria Própria

Figura 21: fresamento do aço 4340 endurecido



Fonte: Autoria Própria

Comprimento de Corte (L_c):

Para calcular o comprimento de corte (L_c), foi utilizado as equações propostas por Garcia (2015). No qual, o valor de L_c é encontrado com base no comprimento do arco a cada giro da fresa (L_{cf}), no comprimento da amostra (L_n) e na taxa de avanço (f), conforme demonstrado na Equação 4. O L_{cf} , por sua vez, é determinado de acordo com o ângulo de engajamento (α_e) e com o diâmetro da fresa (D), como pode ser visto na Equação 3.

Dados: $\alpha_e = 180^\circ$; $D = 25 \text{ mm}$.

$$L_{cf} = \frac{\alpha_e \cdot \pi \cdot D}{360} \quad (3)$$

$$L_c = \frac{L_{cf} \cdot N \cdot L_n}{f} \quad (4)$$

4.3.1.1 Fresa

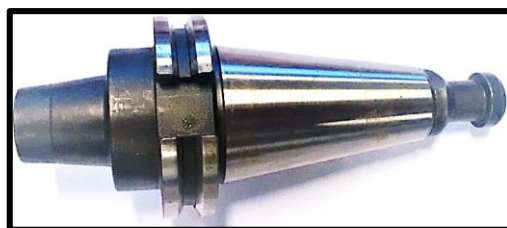
A empresa Seco Tools, sediada em Sorocaba, forneceu as ferramentas de corte utilizadas nesta pesquisa. Estes insertos (LOEX080408TR-M08) são de metal duro revestidos de TiAlN e TiN com 4 arestas (Figura 22). Foi utilizado também, suporte SECO R21794-1225.RE-08-3A, e um porta pinça SECO-EPB E3476 5820 1260 (Figura 23).

Figura 22: Ferramentas de metal duro LOEX080408TR-M08.



Fonte: Autoria Própria

Figura 23: Porta pinça.



Fonte: Autoria Própria

4.3.2 Sistema Aquisição de dados

Durante os ensaios, a potência de corte, a emissão acústica e a vibração foram obtidas e armazenadas pelo sistema de aquisição de dados. Este sistema permite a obtenção de

quaisquer variáveis físicas que, mediante sensores ou transdutores apropriados, são convertidos em sinais elétricos proporcionais.

A placa de aquisição de dados utilizada é da marca National Instruments, modelo NI PCI 6220. Ela teve como função, receber os sinais analógicos dos sensores e transformá-los em sinais digitais para serem interpretados pelo software no microcomputador. Essa interpretação foi feita no programa LabView® 7.1 da National Instruments, no qual, foi elaborado um programa para adquirir esses dados.

4.3.2.1 Potência de corte

Para a aquisição da potência consumida do motor do centro de usinagem foram utilizados sensores de efeito Hall marca LEM modelo AT 100 B10 (Figura 24).

Figura 24: Sensor de efeito Hall marca LEM modelo AT 100 B10.



Fonte: Autoria Própria

O sinal do sensor (Potência) é captado pela placa de aquisição de dados e armazenado durante a execução dos ensaios. Este sinal é transformado, através da Equação 5, na unidade de potência (Watts).

$$P_c = I \times U_f \times F_p \times \sqrt{3} \quad (5)$$

No qual:

P_c = potência consumida, em Watts;

I = corrente alternada, em Ampéres;

U_f = Tensão de uma das fases, em Volts;

F_p = Fator de potência.

O sensor em função da corrente elétrica utilizada no motor gera uma saída proporcional de 0 a 10 Volts (VCC), que é armazenada pelo computador. Como o sinal adquirido pelo sistema tem uma saída proporcional em Volts é necessário converter o valor de Volts para Ampéres para que se possa aplicar esse valor na Equação 7.

O fabricante do sensor fornece a Equação 6 para a transformação do dado adquirido em volts para ampéres.

$$I = V_{cc} * 10 \quad (6)$$

I = corrente de uma das fases em ampéres;

V_{cc} = tensão de corrente contínua em volts.

Substituindo o valor da corrente, o valor da tensão de fase do motor do centro de usinagem (220 V) e o fator de potência (0,92) do motor, têm-se a Equação 5, utilizada para transformar o sinal adquirido em Volts para potência consumida em Watts.

$$P_c = V_{cc} * 10 * 0,92 * 220 * \sqrt{3} \quad (7)$$

4.3.2.2 Emissão acústica

Utilizou-se um sistema de captação de emissão acústica da marca PHYSICAL ACOUSTICS CORPORATION, com sensor R15A e amplificador de sinal 1272-1000 com saída retificada em RMS (valor quadrático médio) (Figura 25).

Figura 25: um sistema de captação de emissão acústica da marca PHYSICAL ACOUSTICS CORPORATION



Fonte: Autoria própria

Esse sinal elétrico retificado corresponde à unidade VCC (volts corrente contínua) e é amplamente empregado nessa grandeza para expressar a emissão acústica, não havendo transformações para outras unidades.

4.3.2.3 Vibração

Para a captação da vibração foi usado um módulo de vibração composto por um sensor piezelétrico (acelerômetro) e um amplificador de sinal com saída retificada em RMS, marca VIBRO CONTROL, modelo TV100 (Figura 26).

Figura 26: Módulo de vibração modelo TV100



Fonte: Autoria Própria

Os valores obtidos em VCC foram convertidos depois para valores de velocidade em mm/s através da Equação 8.

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

4.3.3 Desgaste da ferramenta

A cada ciclo efetuado no processo de usinagem foi determinado o desgaste e a avaria que a fresa sofreu durante o processo. Para isso foi utilizado um microscópio de medição da Marca Mahr, modelo MarVision MM200 (Figura 27). No qual, as ferramentas foram fixadas em um suporte metálico para facilitar a visualização das superfícies de saída e de corte. E então, as avarias encontradas foram medidas através da fixação da linha de referência no início do desgaste e em seguida esta mesma linha foi movida até o final do desgaste, e assim, a sua extensão foi determinada em milímetros.

Figura 27: Microscópio de medição



Fonte: Autoria Própria

Foi utilizado nesta pesquisa um microscópio óptico da Zeiss (Figura 28) para avaliar e identificar o tipo de desgaste que a fresa sofreu após o processo. As imagens das superfícies de corte e de saída foram fotografadas e armazenadas.

Figura 28: Microscópio óptico Zeiss



Fonte: Autoria Própria

4.3.4 Integridade Superficial

Após o processo de usinagem a integridade superficial das peças foram avaliadas através da rugosidade superficial (R_a e R_t) e da microdureza das peças fresadas.

4.3.4.1 Rugosidade Superficial

A rugosidade da peça foi analisada através dos parâmetros R_a (rugosidade média) e R_t (rugosidade total). O comprimento de amostragem (*cut-off*) adotado foi de 0,250 mm e o percurso de medição (l_m) de 1,25 mm.

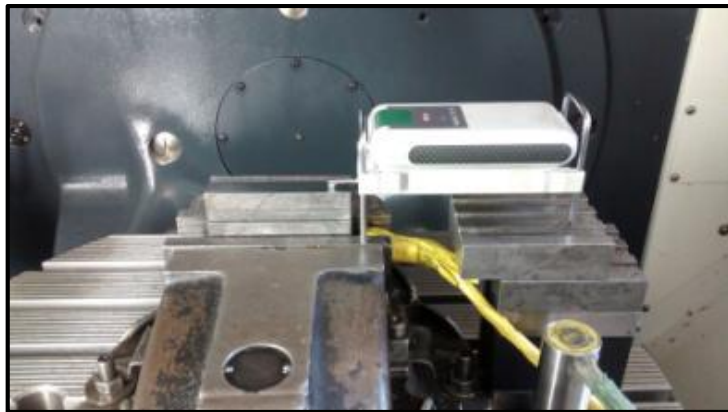
Para obter a medida da rugosidade superficial foi utilizado um rugosímetro da marca Mahr modelo Marsurf M300 (Figura 29) com ponta apalpadora de diamante na haste de medição em formato de cone-esférico (raio de ponta de 2 μm). No qual, foram realizadas três repetições a cada amostra. Este rugosímetro era posicionado, ao final de cada ciclo de usinagem, em cima de dois suportes metálicos dentro do próprio centro de usinagem para não precisar retirar a peça que se encontrava fixada no suporte (Figura 30).

Figura 29: Rugosímetro marca Mahr modelo Marsurf M300



Fonte: Autoria Própria

Figura 30: medição da rugosidade durante o ensaio.



Fonte: Autoria Própria

4.3.5 Tipos e formas dos cavacos

A cada passada efetuada no processo de fresamento era coletado o cavaco gerado. E depois, as imagens destes cavacos, visualizadas com o auxílio do microscópio óptico da Zeiss (Figura 28), foram capturadas para analisar os tipos e formas dos cavacos gerados.

Eles foram classificados segundo a sua morfologia (contínuos, descontínuos, parcialmente contínuos ou segmentados) e o seu formato (fita, helicoidal, espiral ou lascas). A classificação quanto ao formato foi efetuada de acordo com as recomendações da norma ISO 3685:1993.

4.4 Delineamento experimental e tratamento estatístico dos dados

Foram realizadas análises de regressão com os dados obtidos na primeira etapa do experimento para verificar se houve correlação entre as variáveis de saída do processo e o desgaste das ferramentas. Além disso, também foi verificado o comportamento destas variáveis de saída conforme ocorreu o desgaste.

Para analisar os dados obtidos no primeiro ciclo de usinagem em todas as condições ensaiadas, foi realizado um delineamento fatorial 2X3 cruzado completo para cada material, sendo: o fator 1 para o avanço com 2 níveis (0,04 e 0,1 mm/dente) e o fator 2 para a velocidade de corte com 3 níveis (200, 300 e 400 m/min) no fresamento frontal do aço SAE 4340 recozido. E o fator 1 como o avanço com 2 níveis (0,04 e 0,1 mm/dente), e o fator 2 como a velocidade de corte com 3 níveis (200, 250 e 300 m/min) para o aço SAE 4340 temperado. Os dados foram tratados com a análise de variância ANOVA utilizando o software estatístico R.

Além da análise de variância, foi feito também o teste de comparação múltipla de Tukey entre as velocidades de corte utilizando-se o Tukey HSD.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para verificar se houve interação entre os fatores avanço e velocidade de corte nas variáveis de saída do processo, utilizou-se a análise de variância ANOVA. Esta análise foi realizada com os dados obtidos no primeiro ciclo de usinagem.

Além desta análise, foi verificado o comportamento de Rugosidade Média e Total conforme ocorria o desgaste da ferramenta.

Os resultados obtidos estão apresentados a seguir, separados de acordo com o tipo de material usinado para facilitar a compreensão.

5.1 Aço SAE 4340 Recozido

As análises dos resultados obtidos no fresamento frontal do aço SAE 4340 recozido demonstraram que, para a Rugosidade Média - R_a (Tabela A1 – Apêndice A), Rugosidade Total - R_t (Tabela B1 – Apêndice B), Potência Consumida (Tabela C1 – Apêndice C), Vibração (Tabela D1 – Apêndice D) e Desgaste da Ferramenta (Tabela F1 – Apêndice F), houve interação entre os fatores velocidade de corte e avanço, com nível de significância de 5%. Por isso, estes fatores não foram analisados individualmente, pois, estas variáveis de saída se comportaram de modo diferente para cada combinação dos níveis dos fatores.

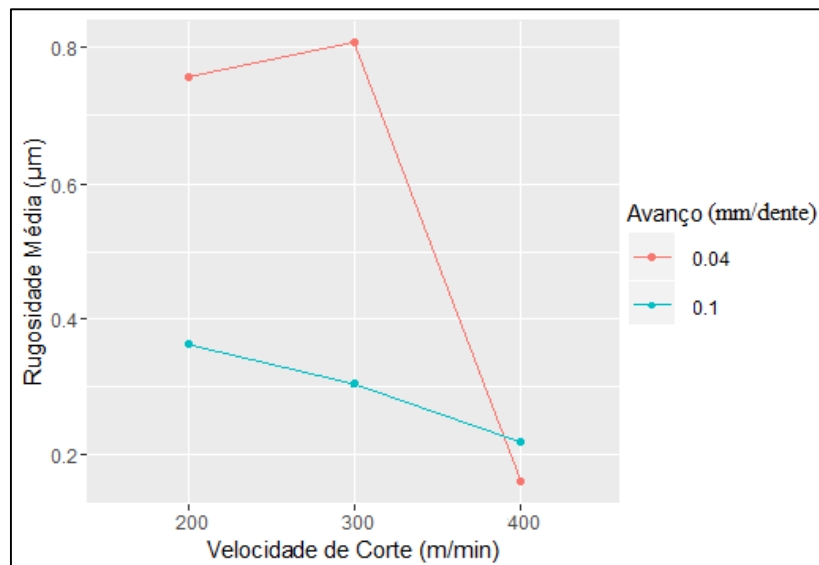
Em relação a análise da Emissão Acústica – EA (Tabela E1 – Apêndice E) produzida durante o processo, não foi observada interação significativa entre os fatores velocidade de corte e o avanço, ao nível de significância de 5%. Entretanto, nenhum dos dois fatores analisados apresentaram diferença significativa entre os níveis analisados, com $\alpha = 5\%$.

5.1.1 Rugosidade Média (R_a)

5.1.1.1 Análise estatística

A interação entre os fatores velocidade de corte e avanço, para o parâmetro R_a , está apresentada no gráfico da Figura 31.

Figura 31: Gráfico da interação entre a velocidade de corte e o avanço: Rugosidade Média (Ra) em função da velocidade de corte.

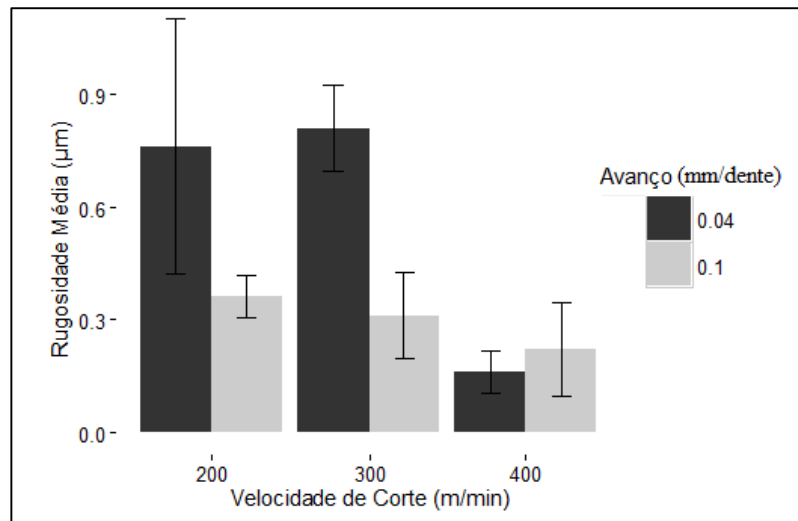


Fonte: Autoria Própria

Ao realizar uma análise gráfica da Figura 31, é possível verificar que as menores rugosidades foram obtidas para a velocidade de corte de 400 mm/min independente do avanço utilizado, e para o avanço de 0,1 mm/dente, a rugosidade diminuiu conforme o aumento da velocidade.

A Figura 32 apresenta um gráfico de barras com a rugosidade obtida na usinagem do aço recozido nas diferentes condições testadas. No qual, acima de cada barra está representado o desvio padrão para cada combinação de avanço e velocidade de corte com intervalos de confiança de 95%. Enfatizando as verificações gráficas realizadas na Figura 39.

Figura 32: Média da rugosidade com os desvios padrões para cada condição de usinagem.

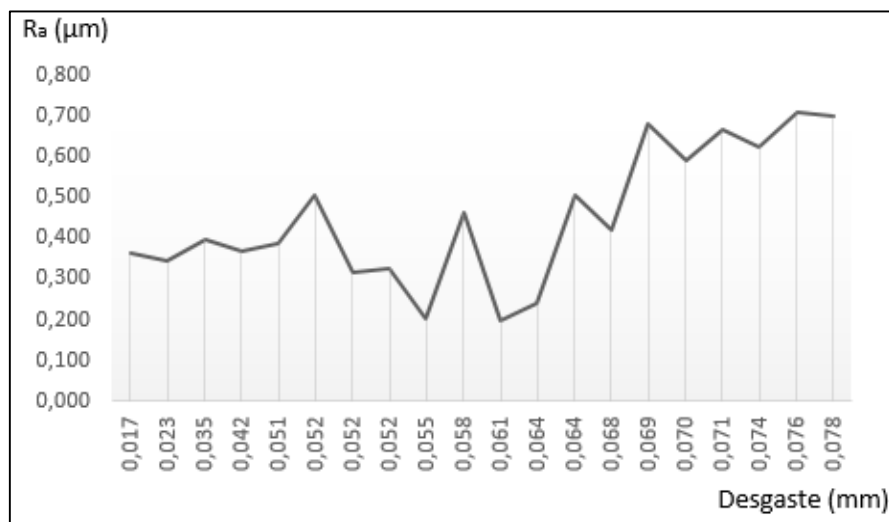


Fonte: Autoria Própria

5.1.1.2 Comportamento da R_a conforme o desgaste

É apresentado na Figura 33, 34, 35 e 36, o comportamento do parâmetro R_a conforme ocorreu o desgaste da ferramenta durante o processo de fresamento do aço 4340 recozido. No qual, cada gráfico apresenta uma condição de usinagem diferente. Ressaltando que, o parâmetro R_a e o desgaste da ferramenta foram mensurados no final de cada ciclo de usinagem.

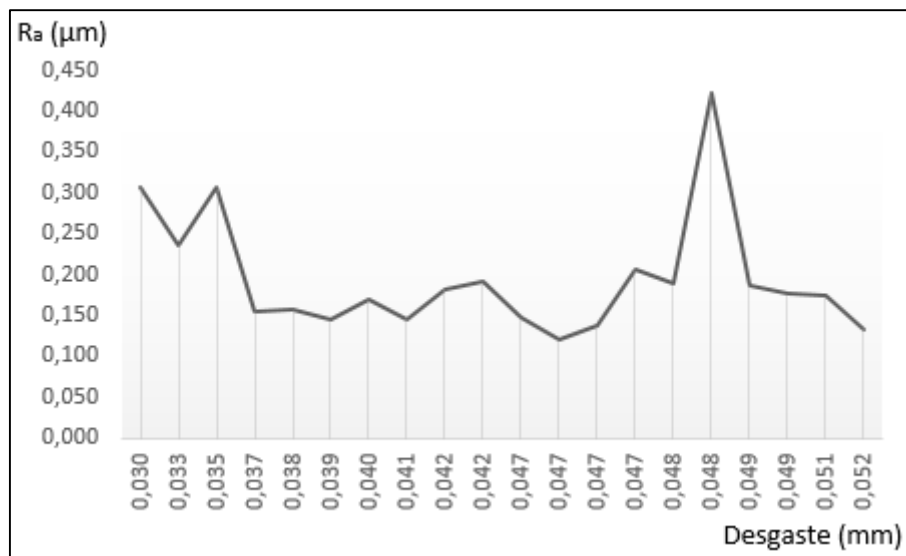
Figura 33: R_a em função do desgaste, obtida no processo de fresamento do aço 4340 nas seguintes condições: $V_c = 200 \text{ m/min}$; $f_z = 0,1 \text{ mm/dente}$.



Fonte: Autoria Própria

Na condição ilustrada na Figura 33, o material em estudo passou por 20 ciclos de usinagem, totalizando 1,603 Km de comprimento de corte. Durante este processo, a Rugosidade R_a variou de 0,199 a 0,709 μm , no qual, ao analisar o gráfico é possível notar que a rugosidade só atingiu valores próximos a 0,7 μm , no momento em que o desgaste de flanco (V_b) da ferramenta atingiu 0,069 mm.

Figura 34: R_a em função do desgaste, obtida no processo de fresamento do aço 4340 nas seguintes condições: $V_c = 300$; $f_z = 0,1$

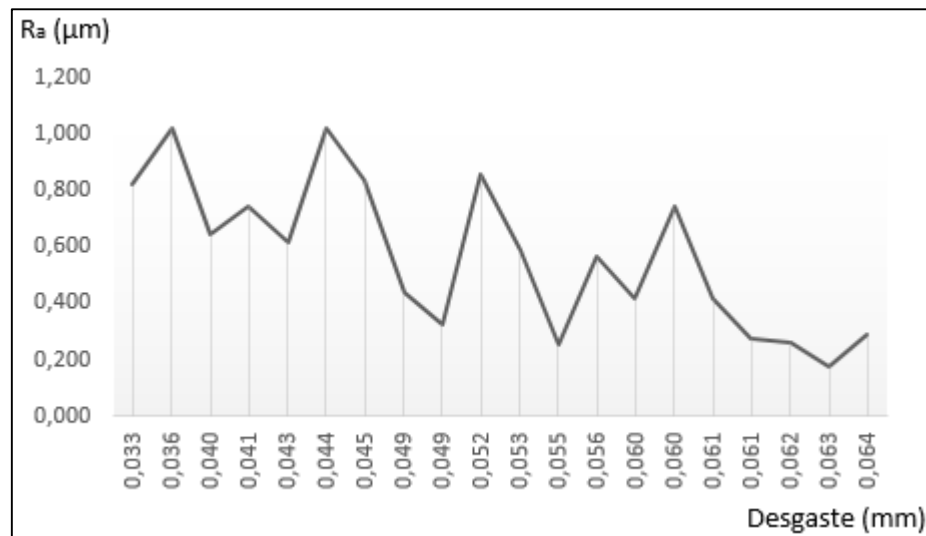


Fonte: Autoria Própria

A condição mostrada na Figura 34, possui o mesmo avanço da condição anterior, no entanto, difere quanto a velocidade de corte, visto que, neste caso a velocidade é igual a 300 m/min.

O comprimento de corte nesta condição foi de aproximadamente 1,626 Km, no qual, durante a usinagem, a rugosidade do material variou de 0,120 a 0,422 μm , intervalo relativamente inferior ao registrado para a usinagem deste material com uma velocidade de corte menor.

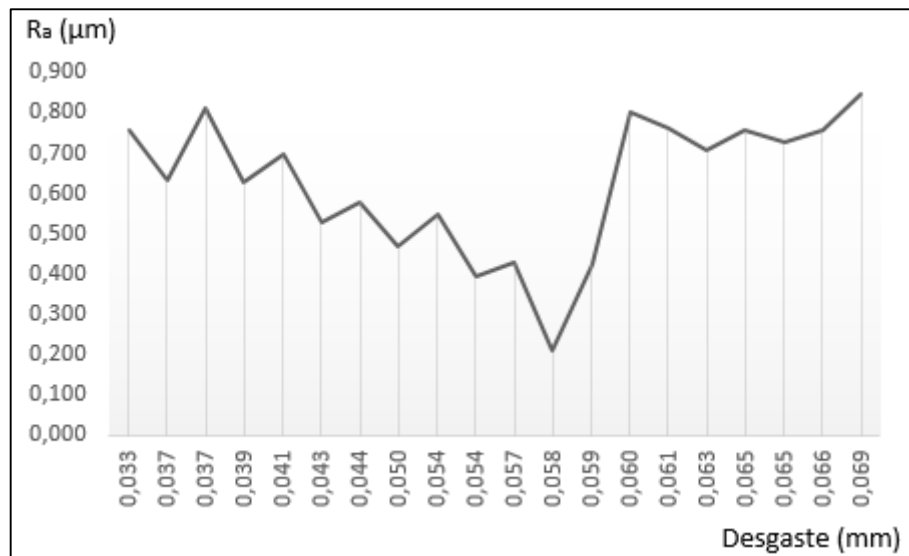
Figura 35: R_a em função do desgaste, obtida no processo de fresamento do aço 4340 nas seguintes condições: $V_c = 300$; $f_z = 0,04$



Fonte: Autoria Própria

Para a condição ilustrada na Figura 35, o material também passou por 20 ciclos de usinagem, no entanto, o comprimento de corte foi de aproximadamente 4,06 Km. Neste caso, a rugosidade R_a variou de 0,179 a 1,023 μm . Este intervalo foi maior do que o obtido na condição anterior, onde a velocidade de corte era igual, mas o avanço utilizado era maior (0,1 mm/dente). O desgaste da ferramenta foi baixo, não prejudicando a rugosidade da peça. Inclusive, a rugosidade do material melhorou à medida que houve uma acomodação da ferramenta ao longo do processo.

Figura 36: R_a em função do desgaste, obtida no processo de fresamento do aço 4340 nas seguintes condições: $V_c = 200$; $f_z = 0,04$



Fonte: Autoria Própria

Na condição exposta na Figura 36, está a combinação do menor nível de velocidade de corte com o menor nível de avanço. Neste caso, o comprimento de corte foi de aproximadamente 4,072 Km, com rugosidade R_a variando de 0,209 a 0,847 μm . Ao observar o gráfico, é possível ver que nesta combinação, a variação da rugosidade ao longo do processo foi menor do que a variação que ocorreu na condição ilustrada na Figura 33, onde a V_c era a mesmas, porém o avanço era maior.

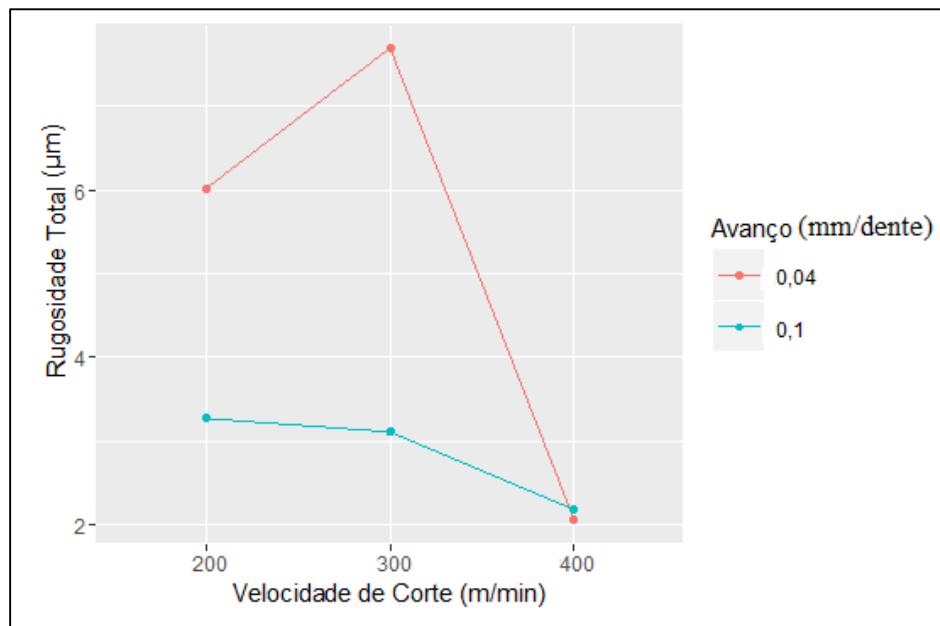
A rugosidade da peça melhorou ao longo do processo, até o momento em que o desgaste da ferramenta atingiu 0,058 mm. A partir deste ponto o desgaste passou a interferir na rugosidade atingindo valores em torno de 0,8 μm até o fim do processo.

5.1.2 Rugosidade Total (R_t)

5.1.2.1 Análise Estatística

Na Figura 37 está ilustrada a interação entre a velocidade de corte e o avanço, para o parâmetro R_t .

Figura 37: Gráfico da interação entre a velocidade de corte e o avanço: Rugosidade Total (R_t) em função da velocidade de corte.

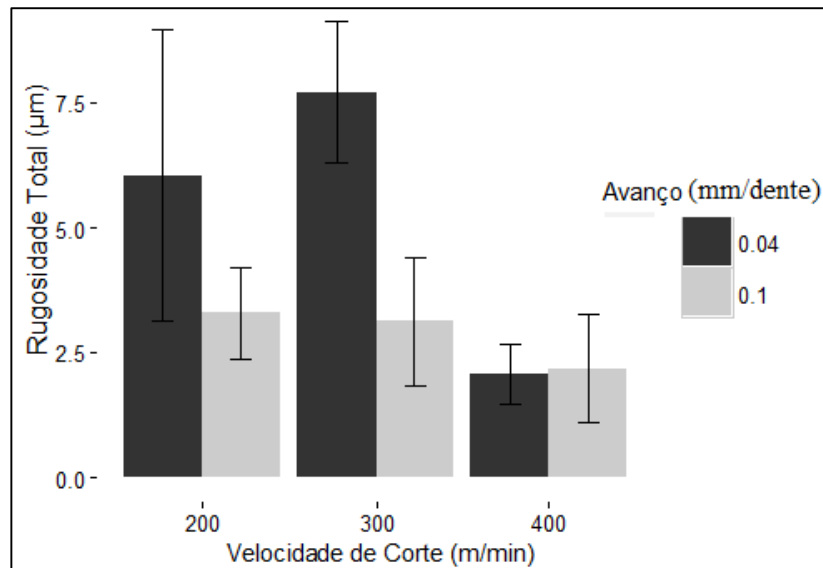


Fonte: Autoria Própria

Na Figura 37 é possível observar que o comportamento da rugosidade R_t foi semelhante ao parâmetro R_a , pois ela obteve menores valores nas mesmas condições que a rugosidade média. Para o avanço de 0,1 mm/dente, a rugosidade diminuiu conforme o aumento da velocidade. E a combinação da velocidade de 300m/min com um avanço de 0,04 mm/dente resultou em uma maior rugosidade total.

A variância obtida em cada condição bem como as respectivas médias está ilustrada na Figura 38.

Figura 38: Média da rugosidade R_t com os desvios padrões para cada condição de usinagem.

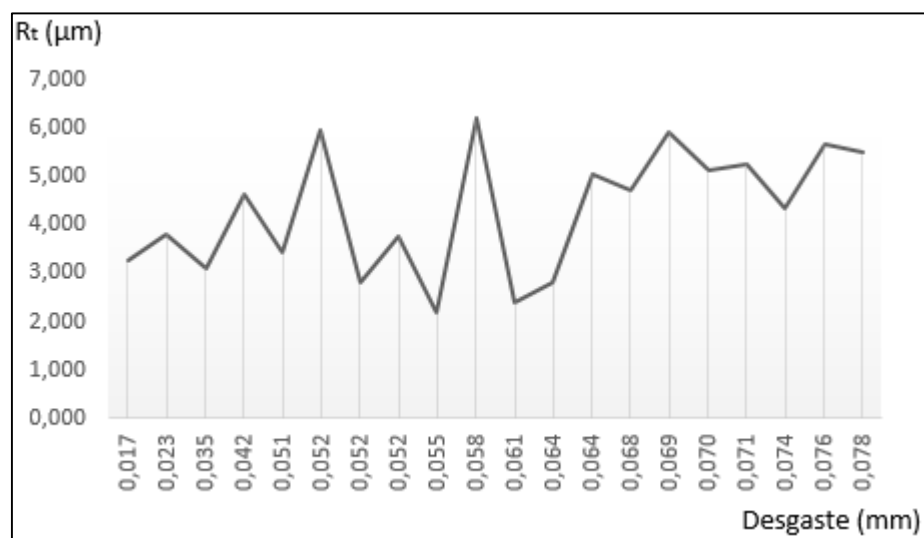


Fonte: Autoria Própria

5.1.2.2 Comportamento da R_t conforme o desgaste

É apresentado na Figura 39, 40, 41 e 42, o comportamento do parâmetro R_t em função do desgaste da ferramenta durante o processo de fresamento do aço 4340 recozido para cada condição de usinagem.

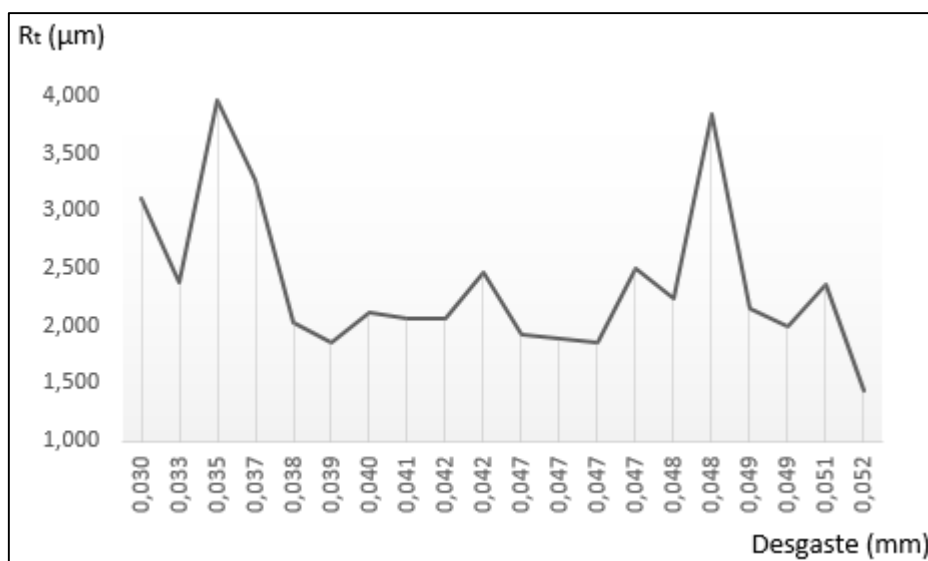
Figura 39: R_t em função do desgaste, obtida no processo de fresamento do aço 4340 nas seguintes condições: $V_c = 200$ m/min; $f_z = 0,1$ mm/dente.



Fonte: Autoria Própria

Na condição de usinagem apresentada na Figura 39, o material passou por 20 ciclos de usinagem obtendo um comprimento de corte de aproximadamente 1,603 Km. Durante este processo a R_t variou de 2,197 a 6,199 μm . A partir do 13º ciclo, quando o V_b médio das três ferramentas era de 0,064 mm, o valor de R_t apresentou-se mais constante, porém, mais elevado.

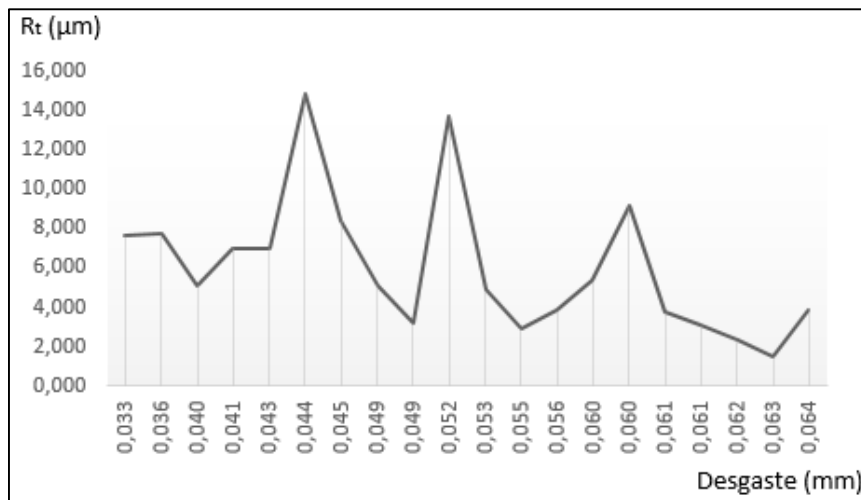
Figura 40: R_t em função do desgaste, obtida no processo de fresamento do aço 4340 nas seguintes condições: $V_c = 300$ m/min; $f_z = 0,1$ mm/dente



Fonte: Autoria Própria

Na Figura 40 está ilustrado o fresamento do aço 4340 recozido, realizado com velocidade de corte de 300 m/min e avanço de 0,1 mm/dente. Neste processo o material foi usinado por 20 ciclos, obtendo um comprimento de corte de aproximadamente 1,63 Km, com parâmetro R_t variando de 1,432 a 3,963 μm . Pode-se observar através da análise gráfica, que assim como ocorreu com o parâmetro R_a , este intervalo foi significativamente menor do que o intervalo obtido na condição ilustrada na Figura 39, onde o avanço era semelhante (0,1 mm/dente) e a V_c era menor (200 m/min). Portanto, pode-se inferir que para este nível de avanço, a velocidade de 300 m/min proporcionou para o material, menores rugosidades R_a e R_t .

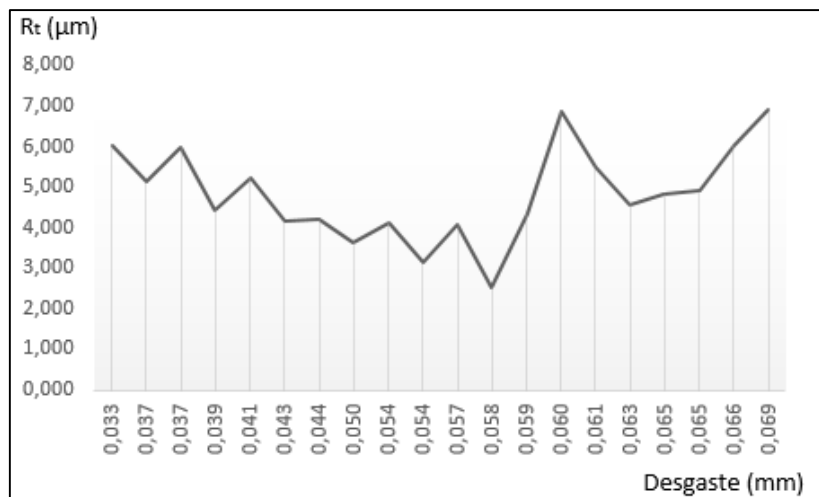
Figura 41 R_t em função do desgaste, obtida no processo de fresamento do aço 4340 nas seguintes condições: $V_c = 300$ m/min; $f_z = 0,04$ mm/dente.



Fonte: Autoria Própria

Na condição mostrada na Figura 41, o material foi usinado com um avanço de 0,04 mm/dente. Neste processo o comprimento de corte foi de aproximadamente 4,062 Km e o parâmetro R_t variou de 1,451 a 14,909 μm . Este intervalo foi muito superior ao obtido no caso anterior, ilustrado na Figura 40. Como este comportamento também ocorreu para o parâmetro R_a na velocidade de 300 m/min, é possível verificar que para este nível de velocidade, o avanço de 0,1 mm/dente proporcionou melhores resultados de rugosidade R_a e R_t para o aço recozido, com tendência a diminuir a rugosidade no final do processo.

Figura 42: R_t em função do desgaste, obtida no processo de fresamento do aço 4340 nas seguintes condições: $V_c = 200$; $f_z = 0,04$ mm/dente.



Fonte: Autoria Própria

Na condição ilustrada na Figura 42, o comprimento de corte obtido ao longo dos 20 ciclos de usinagem, foi de aproximadamente 4,072 Km. Neste processo o parâmetro R_t variou de 2,547 a 6,917 μm . Ao comparar este caso com o ilustrado na Figura 41, onde o que muda é apenas a velocidade de corte, pode-se observar que neste nível de avanço (0,04 mm/dente), o aumento da velocidade de corte prejudicou a rugosidade R_t do material.

É possível comparar este caso também com a condição apresentada na Figura 39, pois a V_c utilizada foi a mesma e o que diferiu nos dois casos foi apenas o avanço. Nesta comparação pode-se inferir que a variação do parâmetro R_t foi semelhante nos dois casos, não tendo interferência do fator avanço.

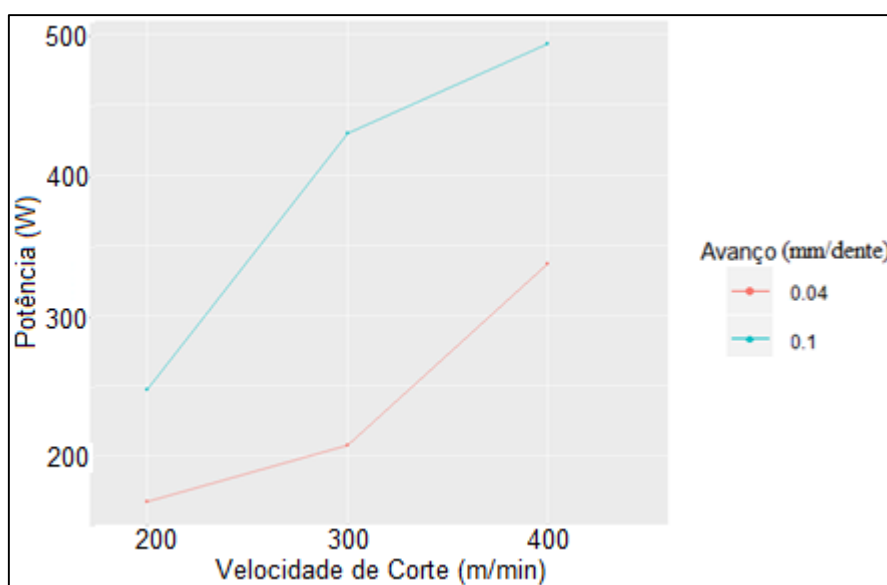
E por fim, assim como aconteceu para o parâmetro R_a nesta mesma condição (ver Figura 36), a rugosidade R_t da peça melhorou ao longo do processo, até o momento em que o desgaste da ferramenta atingiu 0,058 mm. A partir deste ponto, este parâmetro começou a apresentar valores mais altos.

5.1.3 Potência Consumida

5.1.3.1 Análise de Variância

A interação entre os fatores avanço e velocidade de corte, para a potência consumida durante o fresamento do aço 4340 recozido, está ilustrada na Figura 43.

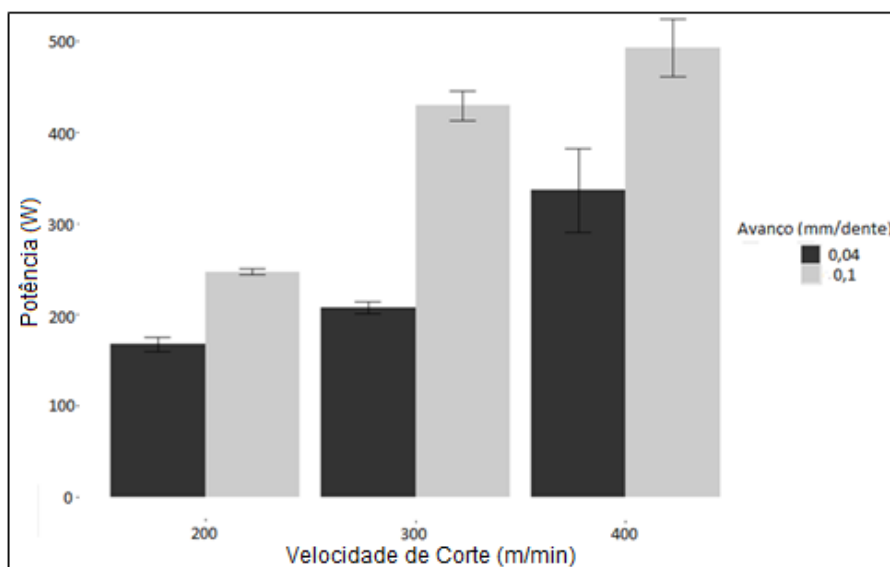
Figura 43: Gráfico da interação entre a velocidade de corte e o avanço: Potência Consumida em função da velocidade de corte



Fonte: Autoria Própria

De acordo com a análise gráfica da Figura 43, é possível inferir que os maiores níveis de V_c , assim como, o maior nível de avanço (0,1 mm/dente), proporcionaram maiores valores de potência consumida durante o processo. Na Figura 44, além de permitir observar estes comportamentos, é apresentada a variância obtida em cada condição.

Figura 44: Média da potência com os desvios padrões para cada condição de usinagem.



Fonte: Autoria Própria

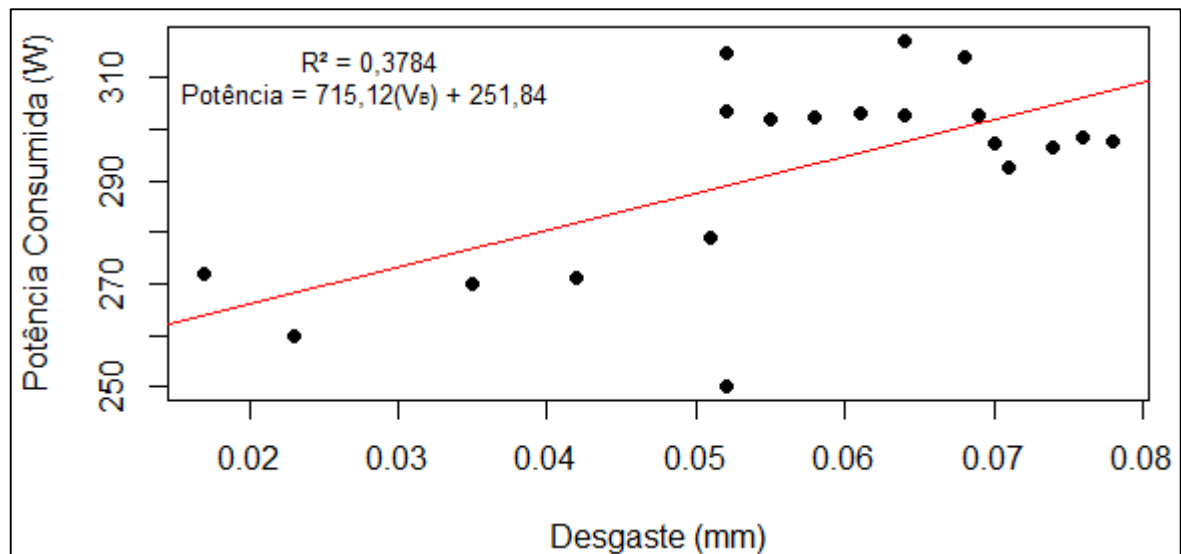
5.1.3.2 Análise de Regressão

No gráfico da Figura 45, 46 e 47 é apresentada a reta ajustada da regressão linear referente aos resultados da relação entre a potência de corte e o desgaste da ferramenta (V_B), para cada condição de usinagem que apresentou correlação dos dados. Além disso, em cada figura está ilustrado a equação que descreve a potência em função do desgaste da ferramenta, bem como, o coeficiente de determinação R^2 .

O R^2 indica o quanto o modelo consegue explicar os valores obtidos, ele é representado de 0 a 1 e pode ser expresso também em porcentagem. Quanto mais próximo de 1 for o R^2 , maior será a correlação dos dados.

Das quatro condições analisadas, apenas a combinação da V_c de 200 m/min com o avanço de 0,04 mm/dente não apresentou correlação dos dados

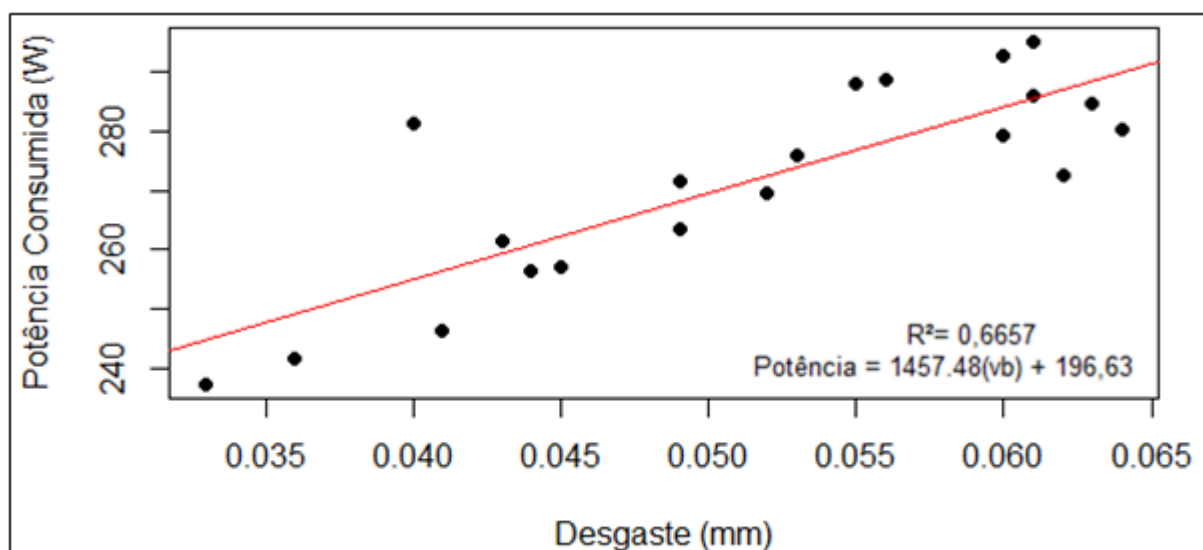
Figura 45: Potência consumida em função do desgaste da ferramenta, no processo de fresamento do aço SAE 4340 recozido, com $V_c = 200$ m/min e $f_z = 0,1$ mm/dente.



Fonte: Autoria Própria

A análise de variância da regressão ($F_{19} = 12,57$; $P\text{-valor} < 5\%$) a um nível de significância de 5%, mostrou que houve relação entre a potência consumida e o desgaste da ferramenta. No entanto, dentre as três condições que apresentou correlação, a equação obtida, neste caso, foi a menos precisa (37,84%).

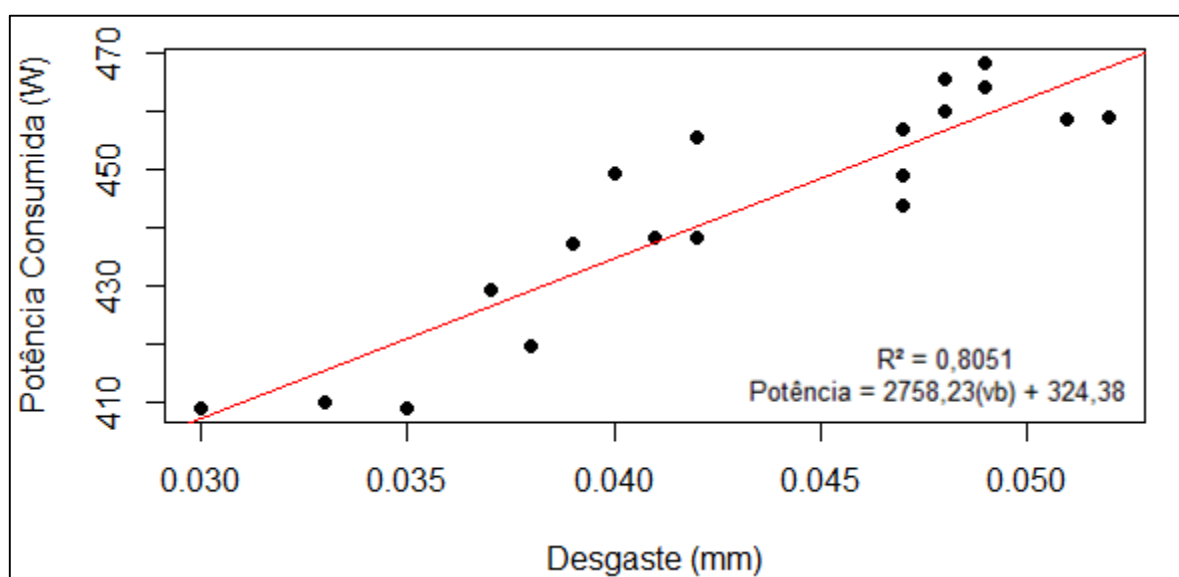
Figura 46: Potência consumida em função do desgaste da ferramenta, no processo de fresamento do aço SAE 4340 recozido, com $V_c = 300$ m/min e $f_z = 0,04$ mm/dente.



Fonte: Autoria Própria

Nesta condição de usinagem, de acordo com a análise de variância da regressão realizada ($F_{19} = 38,84$; $P\text{-valor} < 5\%$), houve relação entre a potência consumida e o desgaste da ferramenta, a um nível de significância de 5%. Ao observar o gráfico que ilustra esta correlação, vê-se que os dados estão mais próximos da linha ajustada. Portanto, a equação encontrada é mais precisa do que o caso anterior.

Figura 47: Potência consumida em função do desgaste da ferramenta, no processo de fresamento do aço SAE 4340 recozido, com $V_c = 300$ m/min e $f_z = 0,1$ mm/dente.



Fonte: Autoria Própria

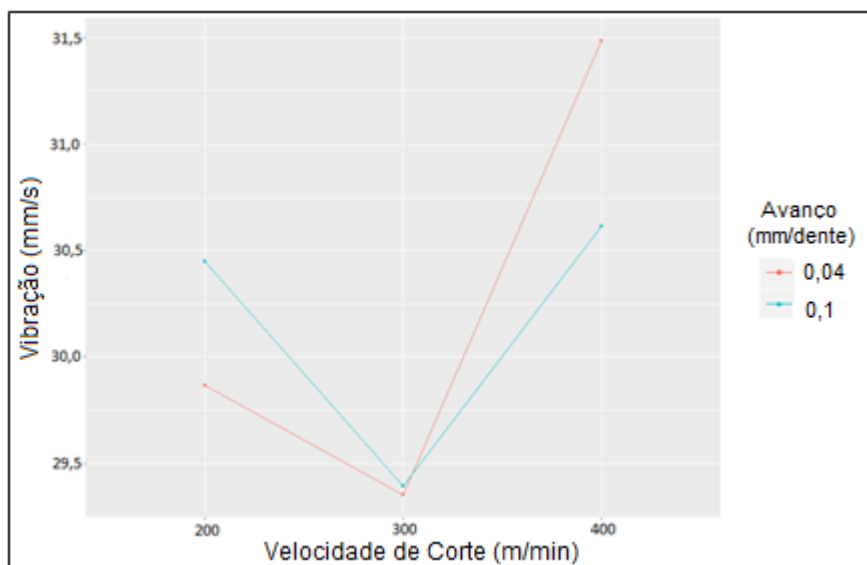
Por fim, na última condição analisada também houve correlação entre as variáveis de saída do processo, conforme pode ser observado no gráfico. No qual, de acordo com a análise de regressão ($F_{19} = 2,082$; $P\text{-valor} < 5\%$, $\alpha = 5\%$), esta correlação foi a mais precisa, com um coeficiente (R^2) de 80,51%.

5.1.4 Vibração

5.1.4.1 Análise de Variância

A interação entre a velocidade de corte e o avanço, para a vibração produzida durante o processo de fresamento, está ilustrada na Figura 48.

Figura 48: Gráfico da interação entre a V_c e o avanço: Vibração em função da V_c .



Fonte: Autoria Própria

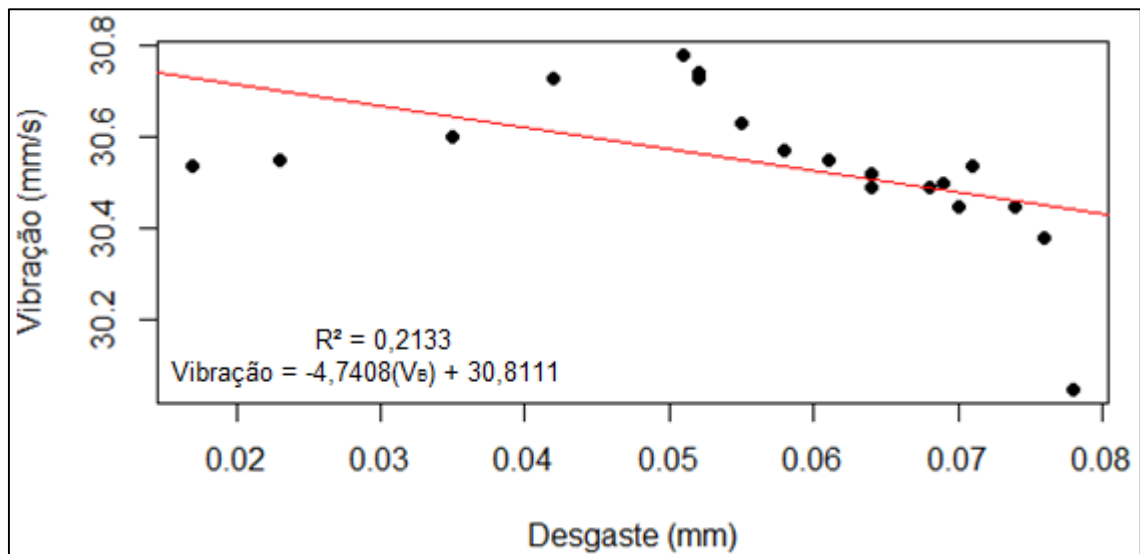
Ao observar a Figura 48, é possível notar que não ocorreu um padrão nos dados obtidos. No qual, as menores vibrações produzidas durante o processo foram na combinação da velocidade de corte de 300 m/min com os dois níveis de avanço. E a combinação que se mostrou menos favorável, neste caso, foi o avanço de 0,04 mm/dente com a velocidade de 400 m/min.

5.1.4.2 Análise de Regressão

No gráfico da Figura 49, 50 e 51 é apresentada a reta ajustada da regressão linear referente aos resultados da relação entre a vibração produzida e o desgaste da ferramenta (V_B), para cada condição de usinagem que apresentou correlação dos dados. No qual, das quatro condições analisadas, apenas a combinação da V_c de 200 m/min com o avanço de 0,04 mm/dente não apresentou correlação dos dados.

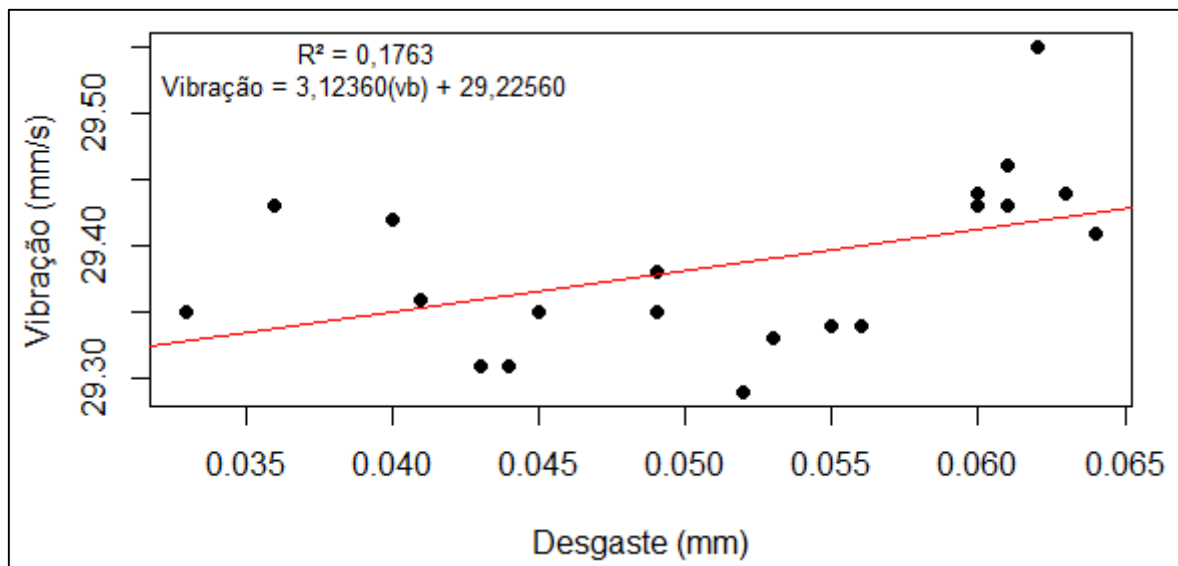
De acordo com as análises de variância da regressão ilustradas na Figura 49 ($F_{19} = 5,879$; P-valor < 5%) e 50 ($F_{19} = 5,066$ P-valor < 5%), houve correlação entre a vibração produzida e o desgaste da ferramenta, com um nível de significância de 5%. Entretanto, nas duas situações o coeficiente R^2 apresentou valores menores que 50%.

Figura 49: Vibração produzida em função do desgaste da ferramenta, no processo de fresamento do aço SAE 4340 recozido, com $V_c = 200$ m/min e $f_z = 0,1$ mm/dente.



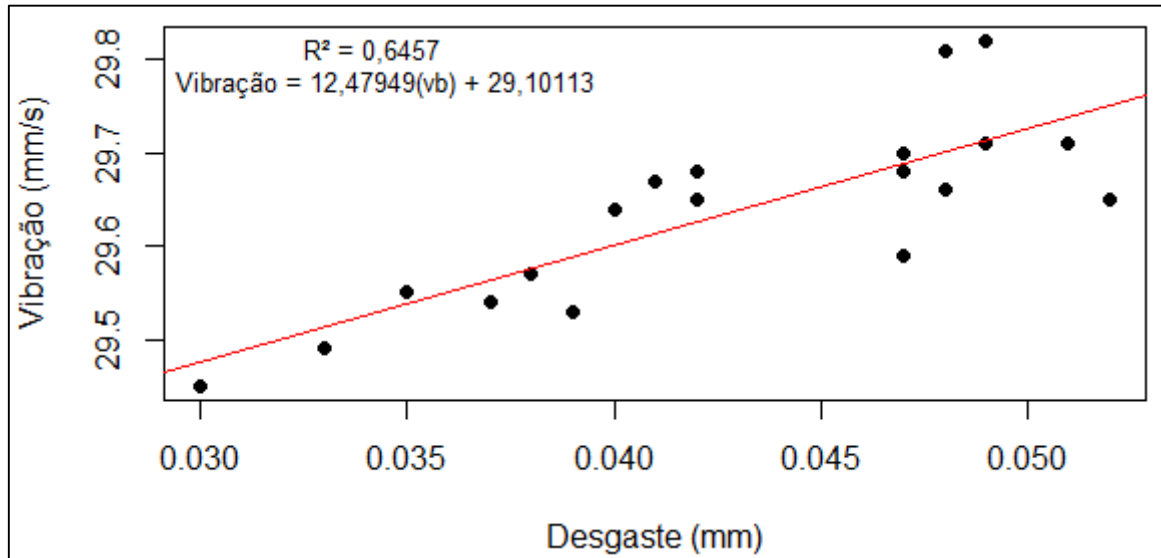
Fonte: Autoria Própria

Figura 50: Vibração produzida em função do desgaste da ferramenta, no processo de fresamento do aço SAE 4340 recozido com $V_c = 300$ m/min e $f_z = 0,04$ mm/dente.



Fonte: Autoria Própria

Figura 51: Vibração produzida em função do desgaste da ferramenta, no processo de fresamento do aço SAE 4340 recozido, nas seguintes condições: $V_c = 300$ m/min e $f_z = 0,1$ mm/dente.



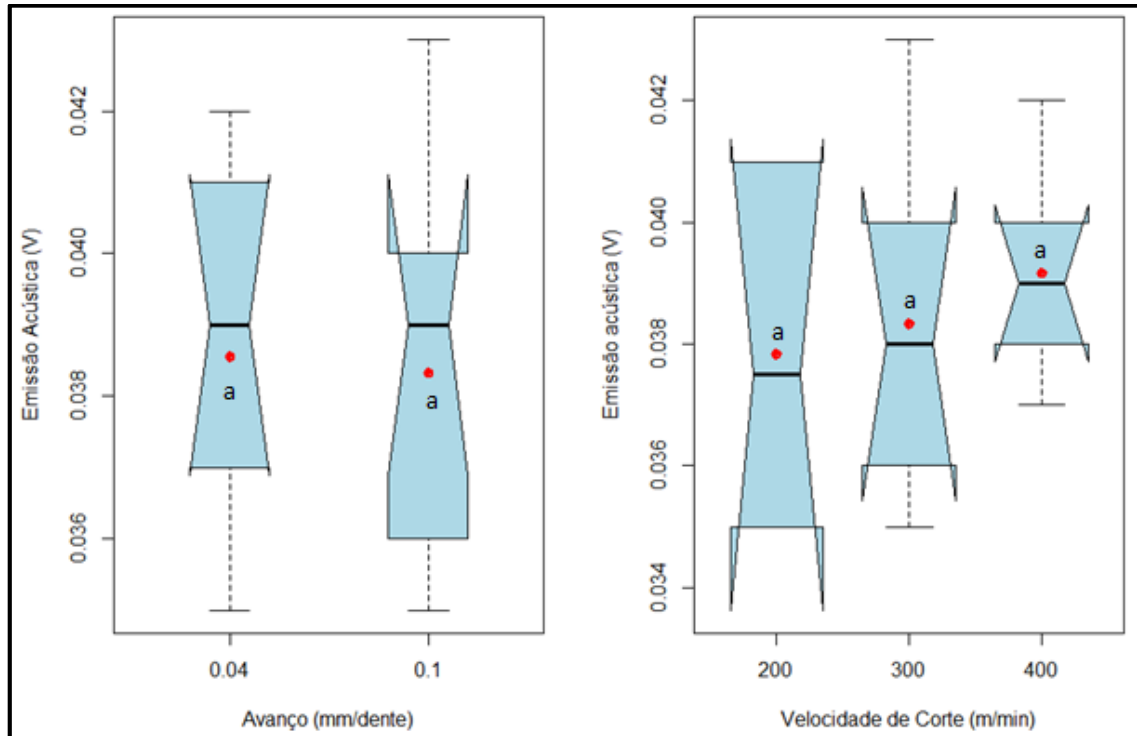
Fonte: Autoria Própria

Na condição ilustrada na Figura 51, houve uma maior correlação entre a vibração produzida e o desgaste ($F_{19} = 35,62$; P-valor < 5%, $\alpha = 5\%$). Como este comportamento também aconteceu para a análise de regressão entre a potência consumida e o desgaste. É possível inferir que houve uma maior influência do desgaste da ferramenta sobre a potência e vibração produzida durante o processo.

5.1.5 Emissão Acústica

A Figura 52 apresenta dois gráficos do tipo Boxplot e Wiskers para o conjunto de velocidades de corte e avanços, o qual representa a distribuição dos dados. Este tipo de gráfico contém cinco linhas, onde: a primeira linha situada mais abaixo representa o valor mínimo dos dados; a segunda linha é o primeiro quartil (25% dos valores ficam abaixo desta linha); a terceira linha é o segundo quartil, também é chamada de mediana, pois 50% dos dados estão abaixo dela; a quarta linha é o terceiro quartil (75% dos dados ficam abaixo dela); e a quinta linha representa o valor máximo dos dados obtidos. O ponto vermelho em cada nível representa a média

Figura 52: Distribuição da emissão acústica das amostras de aço recozido, fresadas com diferentes velocidades de corte e vanços: (a) EA em diferentes avanços; (b) EA em diferentes velocidades de corte. Diferentes letras representam diferença significativa ($P\text{-valor} < 0,05$) entre grupos.



Fonte: Autoria Própria

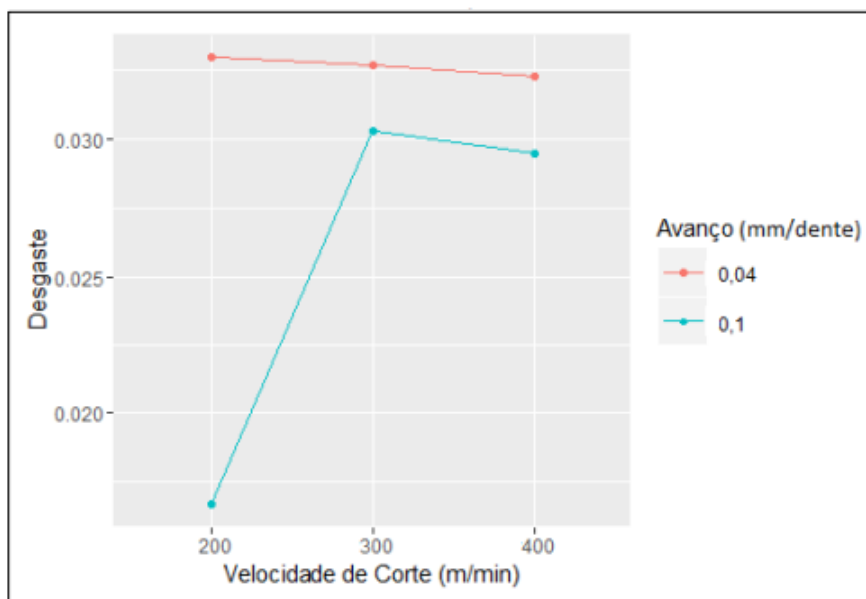
Ao analisar a Figura 52 nota-se que no fresamento frontal do aço SAE 4340 recozido, nenhum dos níveis de avanço testados interferiram de forma significativa na E.A. Em relação as velocidades, é possível inferir graficamente que conforme ocorre o aumento da velocidade, há uma leve tendência a aumentar a E.A. produzida durante o processo.

5.1.6 Desgaste da ferramenta

5.1.6.1 Análise Estatística

Na Figura 53 está ilustrada a interação entre a velocidade de corte e o avanço para o desgaste de flanco da ferramenta utilizada durante o processo de fresamento.

Figura 53: Gráfico da interação entre a velocidade de corte e o avanço: Desgaste da ferramenta em função da velocidade de corte.



Fonte: Autoria Própria

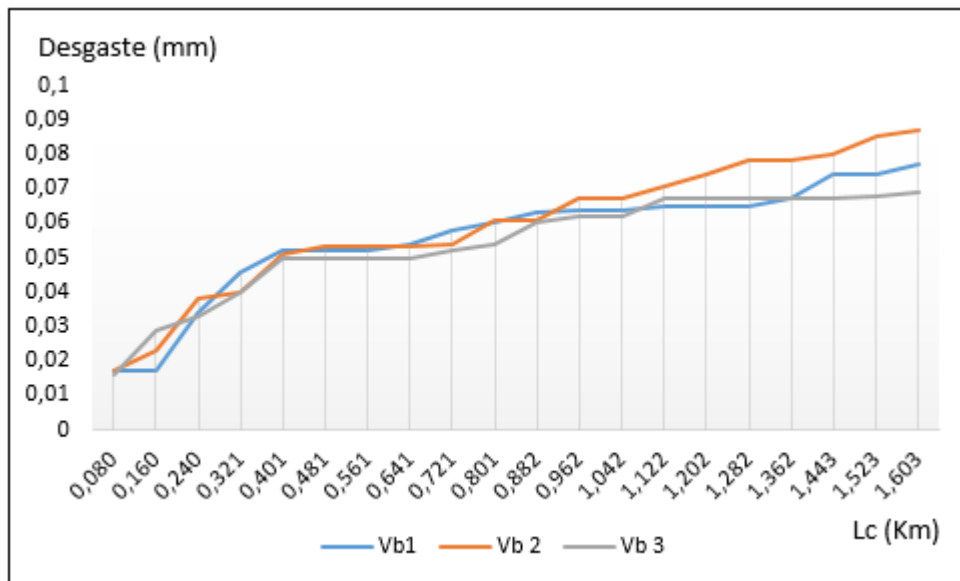
Ao analisar a Figura 53 é possível observar que o avanço 0,1 mm/dente, combinado com os três níveis de velocidade, proporcionou um menor desgaste da ferramenta no primeiro ciclo de usinagem, quando comparado com o avanço de 0,04 mm/dente. E a combinação que proporcionou menor desgaste foi a velocidade de 200 m/min com o avanço de 0,1 mm/dente. Nas demais combinações o desgaste foi semelhante.

5.1.6.2 Desgaste da Ferramenta em função do comprimento usinado

Comportamento das 03 ferramentas conforme o comprimento usinado:

O comportamento do desgaste em função do comprimento usinado das 03 ferramentas de corte utilizadas no fresamento do aço 4340 recozido está ilustrado na Figura 54, 55, 56 e 57. No qual, cada gráfico representa uma condição de usinagem.

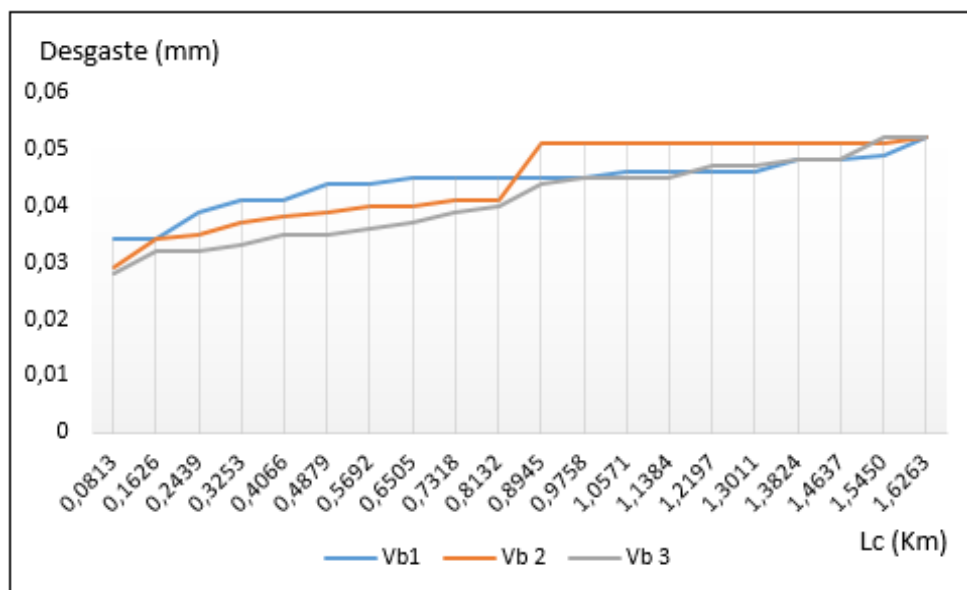
Figura 54: Desgaste das 03 Ferramentas de corte em função de L_c para o aço SAE 4340 recozido: ($V_c = 200$ m/min e $f_z = 0,1$ mm/dente)



Fonte: Autoria Própria

Ao observar o comportamento ilustrado na Figura 54 é possível ver que o desgaste cresceu de forma mais acentuada nos primeiros 0,401 Km usinados, após isto, ele foi constante até atingir 0,721 Km e progrediu até o fim do processo, obtendo um desgaste médio de 0,078 mm.

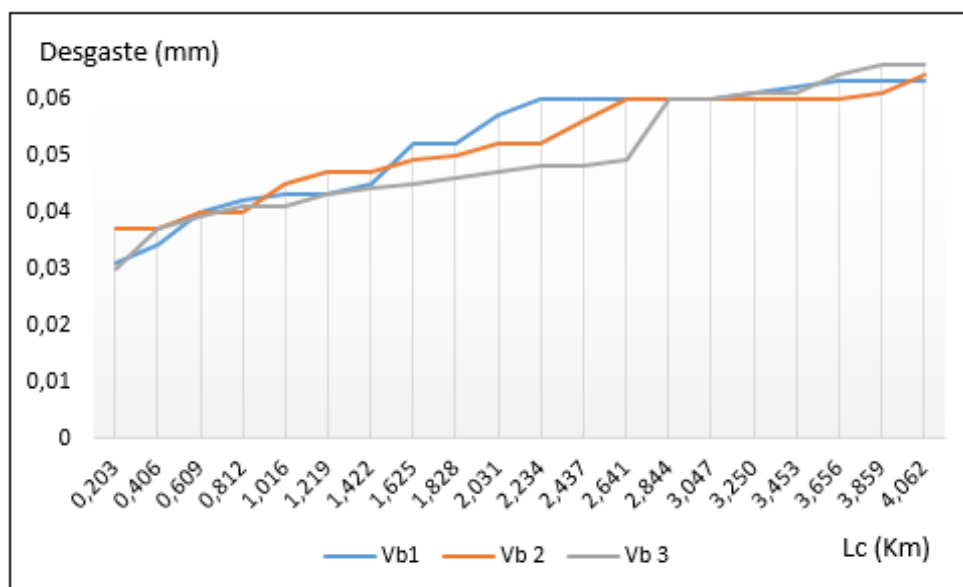
Figura 55: Desgaste das 03 Ferramentas de corte em função de L_c para o aço SAE 4340 recozido: ($V_c = 300$ m/min e $f_z = 0,1$ mm/dente)



Fonte: Autoria Própria

No caso ilustrado na Figura 55, o desgaste verificado após o primeiro ciclo de usinagem foi superior ao observado no gráfico anterior. Isto pode ter ocorrido por causa da velocidade de corte utilizada, pois, como neste caso ela foi maior, isto pode ter gerado uma maior quantidade de calor e, conseqüentemente, isso pode ter influenciado na progressão do desgaste. Entretanto, ao longo do processo o desgaste não progrediu muito, chegando ao fim da usinagem com um desgaste médio de 0,064 mm. Portanto, embora o desgaste inicial tenha sido maior, a sua progressão no decorrer da usinagem foi menos acentuado do que quando se utilizou uma V_c menor.

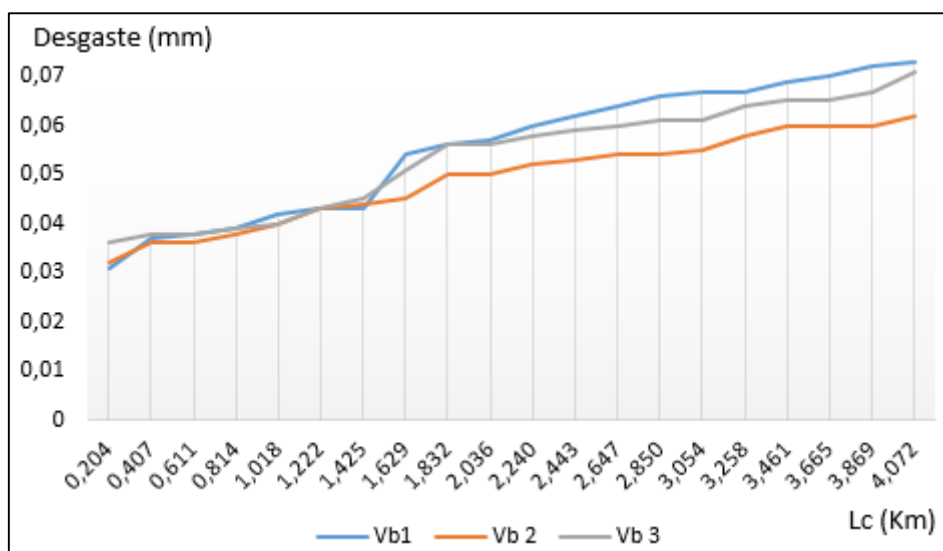
Figura 56: Desgaste das 03 Ferramentas de corte em função de L_c para o aço SAE 4340 recozido: ($V_c = 300$ m/min e $f_z = 0,04$ mm/dente)



Fonte: Autoria Própria

Na condição ilustrada na Figura 56, o comprimento usinado foi superior aos demais por causa do avanço utilizado. Neste caso, pode-se observar que o desgaste progrediu rapidamente até 2,234 Km e depois foi se estabilizando até fim do processo.

Figura 57: Desgaste das 03 Ferramentas de corte em função de L_c para o aço SAE 4340 recozido: ($V_c = 200$ m/min e $f_z = 0,04$ mm/dente)



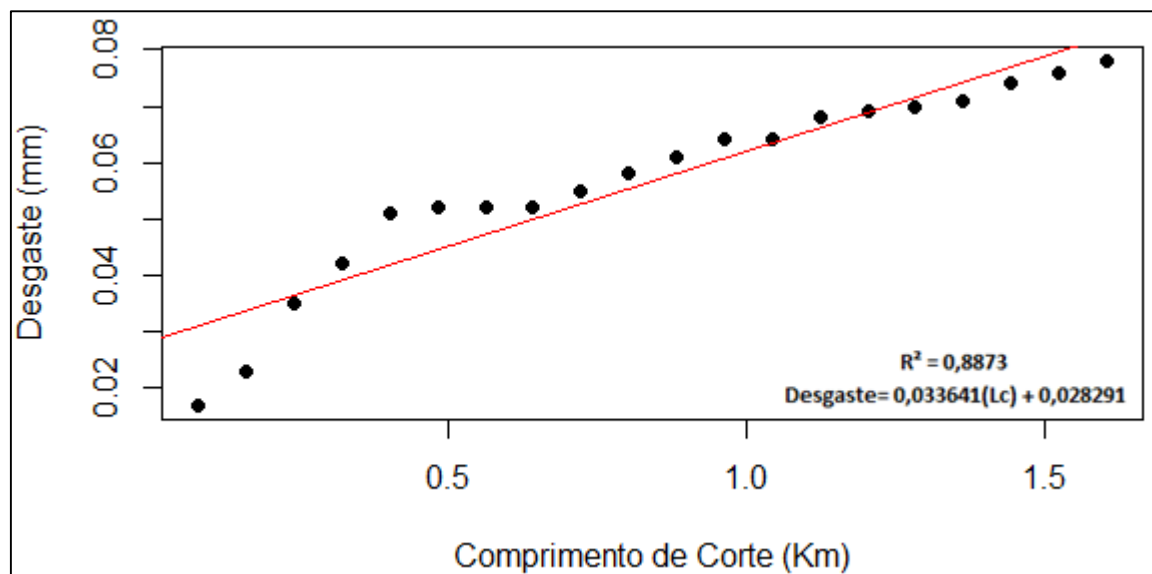
Fonte: Autoria Própria

Na Figura 57 está ilustrado o comportamento do desgaste da ferramenta ao usinar o aço 4340 recozido com uma V_c de 200 m/min e um avanço de 0,04 mm/dente. Se comparar este caso com o analisado na Figura 56, pode-se dizer que a progressão do desgaste nesta condição foi mais acentuada. Esta observação é semelhante a encontrada na comparação das condições com avanço de 0,1 mm/dente. Portanto, para este material, o aumento da V_c não proporcionou um maior desgaste ao longo do processo.

5.1.6.3 Análise de Regressão

No gráfico da Figura 58, 59, 60 e 61 é apresentada a reta ajustada da regressão linear referente aos resultados da relação entre o desgaste da ferramenta e o comprimento de corte (L_c), para cada condição de usinagem. Além disso, em cada figura está ilustrado a equação que descreve o desgaste em função do comprimento de corte, bem como, o coeficiente de determinação R^2 .

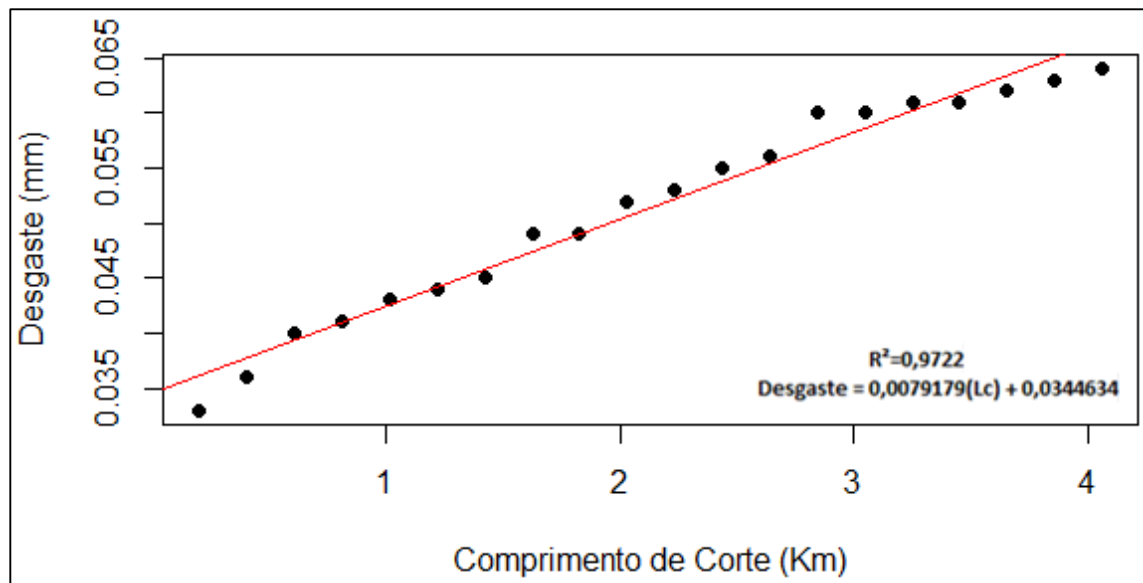
Figura 58: Desgaste da Ferramenta em função de L_c para o aço SAE 4340 recozido: ($V_c = 200$ m/min e $f_z = 0,1$ mm/dente)



Fonte: Autoria Própria

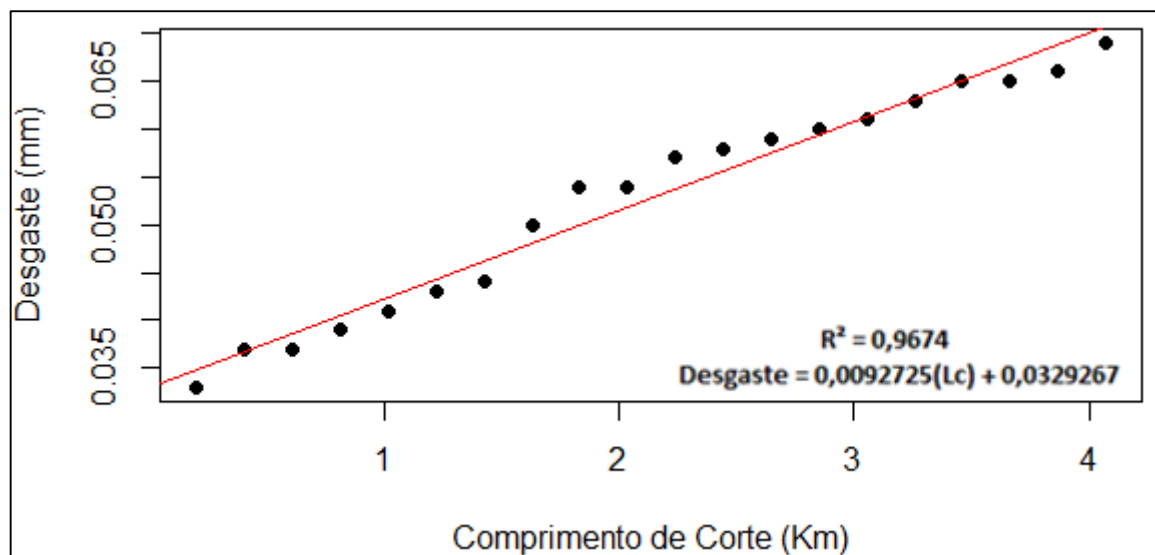
A análise de variância da regressão ($F_{19} = 150,6$; P-valor < 5%) a um nível de significância de 5%, mostrou que houve relação entre o desgaste e o comprimento de corte. E que a equação que descreve essa relação possui uma precisão de 88,73%. Ao analisar o gráfico, nota-se que os pontos estão mais dispersos da reta ajustada até 0,6 Km. A partir disso, a precisão da reta em relação aos pontos aumentou.

Figura 59: Desgaste da Ferramenta em função de L_c para o aço SAE 4340 recozido: ($V_c = 300$ m/min e $f_z = 0,04$ mm/dente)



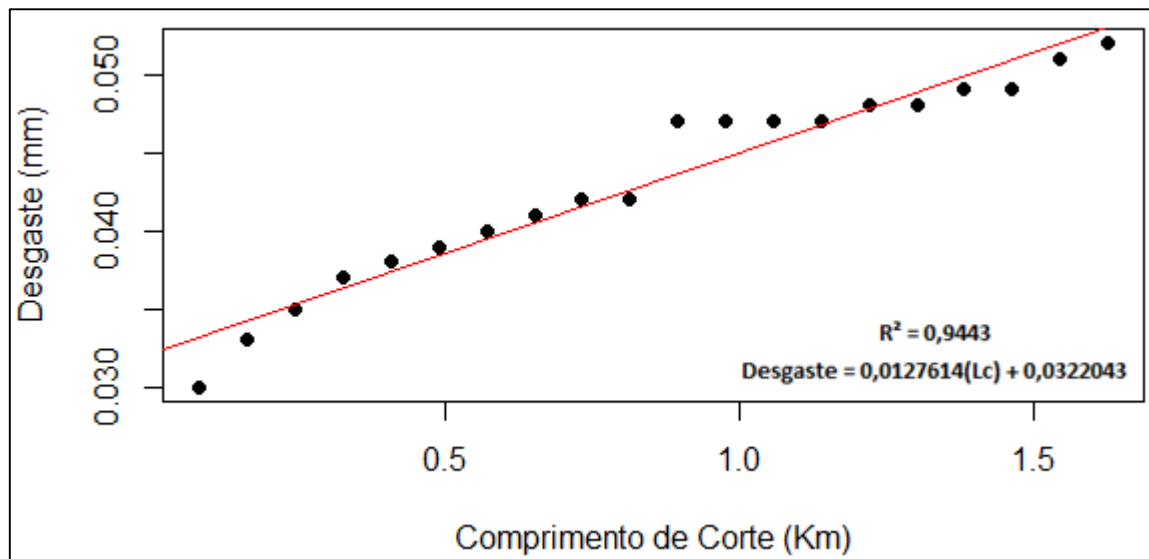
Fonte: Autoria Própria

Figura 60: Desgaste da Ferramenta em função de L_c para o aço SAE 4340 recozido: ($V_c = 200$ m/min e $f_z = 0,04$ mm/dente)



Fonte: Autoria Própria

Figura 61: Desgaste da Ferramenta em função de L_c para o aço SAE 4340 recozido: ($V_c = 300$ m/min e $f_z = 0,1$ mm/dente)



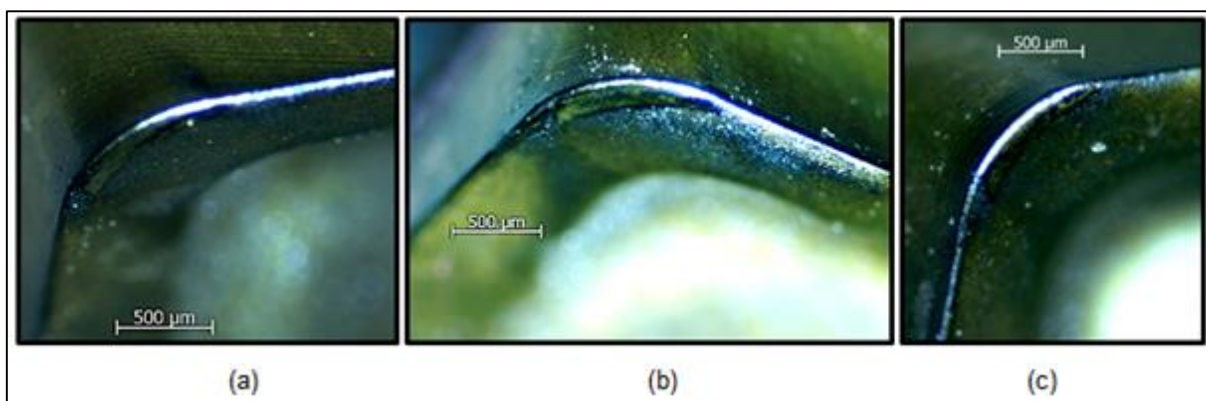
Fonte: Autoria Própria

E por fim, as três análises de correlação ilustradas nas Figuras 59 ($F_{19} = 666,4$; P-valor $< 5\%$), 60 ($F_{19} = 565,4$; P-valor $< 5\%$) e 61 ($F_{19} = 323,2$; P-valor $< 5\%$), também apresentaram correlações entre o desgaste da ferramenta e o comprimento de corte, a um nível de significância de 5%. No entanto, a equação obtida nos três casos foi mais precisa do que a condição analisada anteriormente, com um R^2 superior a 90%

5.1.6.4 Análise Qualitativa

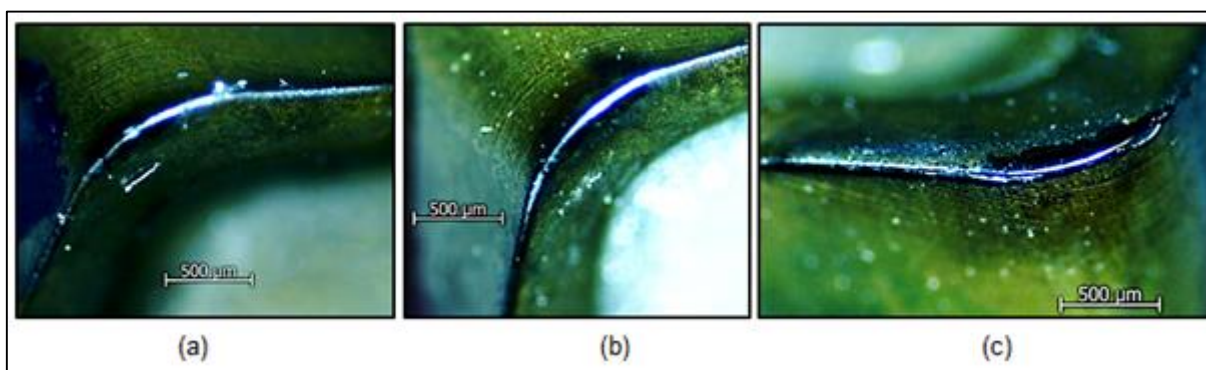
Os desgastes ilustrados numericamente no gráfico da Figura 61 e 60, foram fotografados após o término do processo de fresamento e estão ilustrados, respectivamente, nas Figuras 62 e 63.

Figura 62: Desgaste das ferramentas utilizadas para o fresamento frontal do aço 4340 recozido nas seguintes condições: $V_c = 300$ m/min e $f_z = 0,1$ mm/dente



Fonte: Autoria Própria

Figura 63: Desgaste das ferramentas utilizadas para o fresamento frontal do aço 4340 recozido nas seguintes condições: $V_c = 200$ m/min e $f_z = 0,04$ mm/dente.



Fonte: Autoria Própria

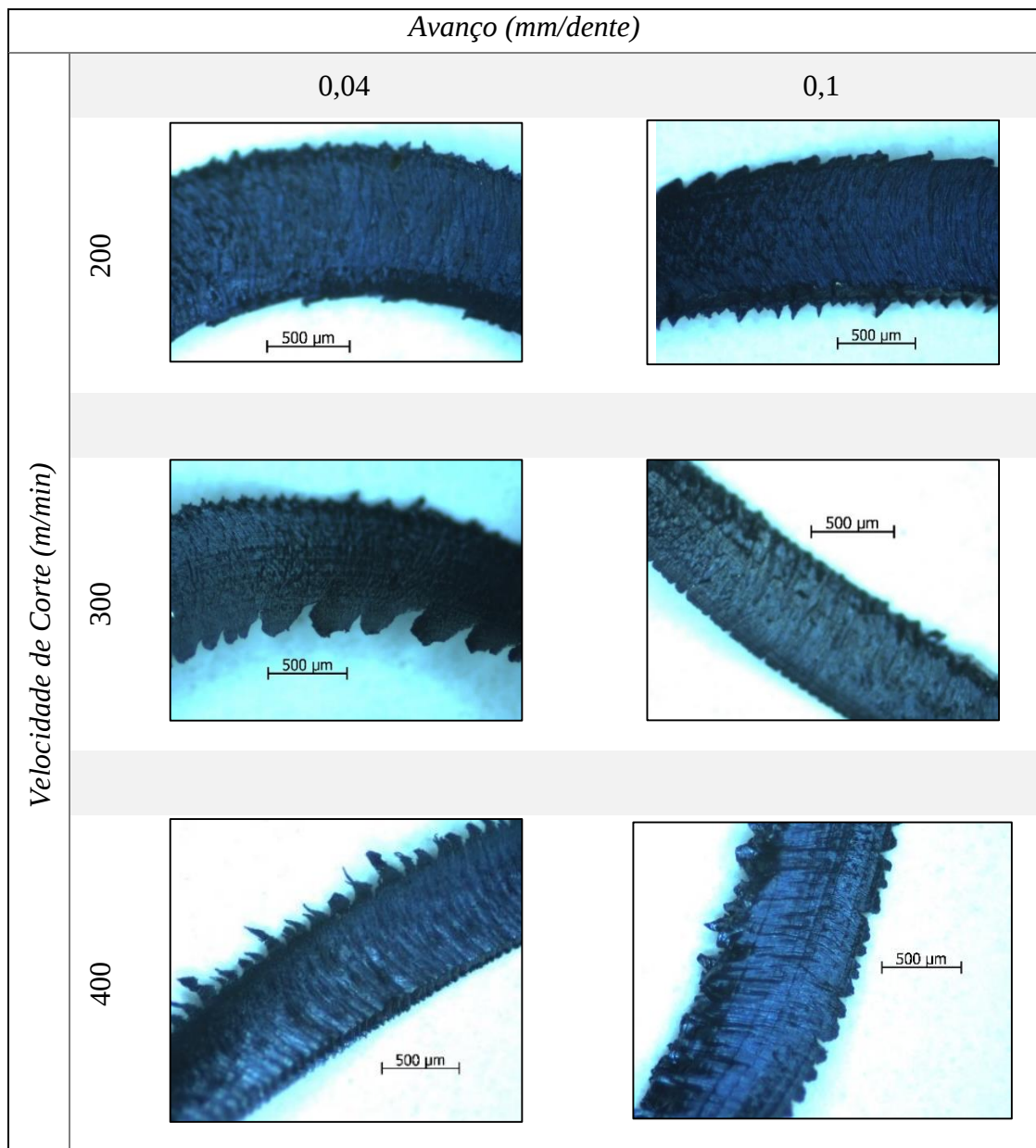
Na Figura 62 os desgastes ilustrados foram registrados após um comprimento de corte de aproximadamente 1,63 Km. E na Figura 63, este registro foi realizado após 4,062 Km.

Nos dois casos ilustrados, o desgaste de flanco foi mínimo. Isso pode ter acontecido porque a temperatura no processo não foi alta o suficiente para que a dureza a quente do recobrimento diminuísse.

5.1.7 Tipos e formas dos cavacos

Na Figura 64 está ilustrado os tipos de cavacos formados em cada condição de usinagem testada para o aço 4340 recozido, no qual, nota-se que os cavacos formados durante o fresamento frontal do aço 4340 recozido com V_c de 200 e 300 m/min, em ambos os avanços, são contínuos. Enquanto que, na V_c de 400 m/min houve ligeiras formações de lamelas no cavaco, começando a se caracterizar como um cavaco cisalhado.

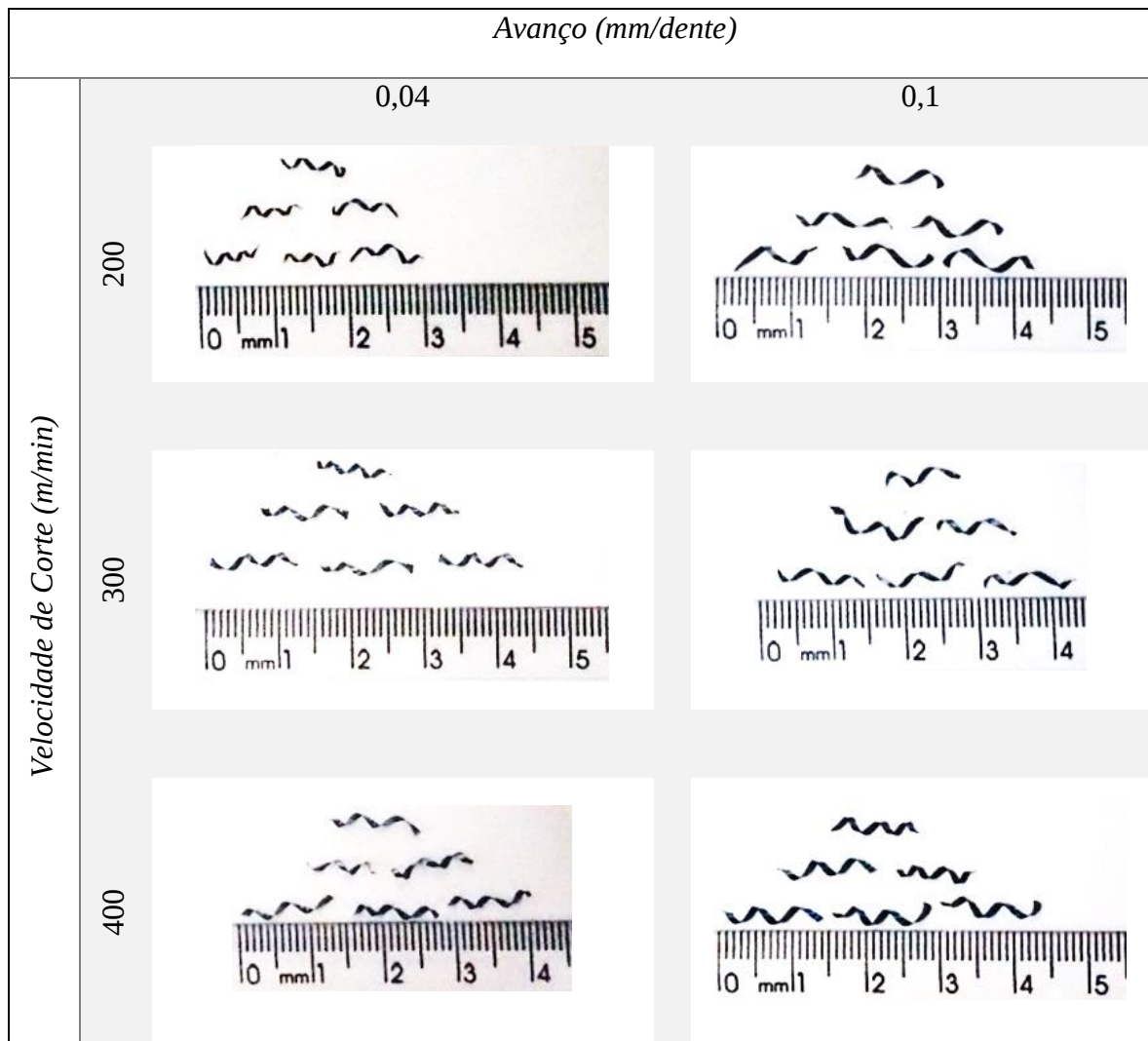
Figura 64: Tipos de cavacos formados em cada condição de usinagem do aço 4340 recozido.



Fonte: Autoria Própria

Os cavacos ilustrados na Figura 65, formados nas diferentes condições analisadas, não apresentaram diferença entre os níveis de V_c e avanço, no qual, todos possuem formato helicoidal curto

Figura 65: Influência da velocidade de corte e do avanço no cavaco formado durante o fresamento frontal do aço 4340 recozido.



Fonte: Autoria Própria

5.2 Aço SAE 4340 Temperado e Revenido

As análises de variância ANOVA dos resultados obtidos no fresamento frontal do aço SAE 4340 Temperado e Revenido demonstraram que, para a Rugosidade Média - R_a (Tabela A2 – Apêndice A), Potência Consumida (Tabela C2 – Apêndice C), Vibração (Tabela

D2 – Apêndice D), Emissão Acústica – EA (Tabela E2 – Apêndice E) e Desgaste da Ferramenta (Tabela F2 – Apêndice F), houve interação entre os fatores velocidade de corte e avanço, com nível de significância de 5%.

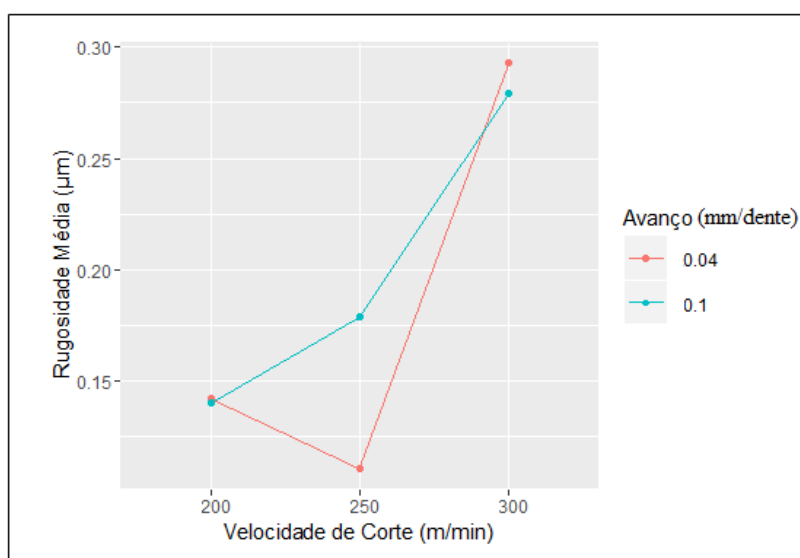
Em relação a análise da Rugosidade Total - R_t (Tabela B2 – Apêndice B) produzida durante o processo, não foi observada interação significativa entre os fatores velocidade de corte e o avanço, ao nível de significância de 5%. Devido a isto, foram analisados os efeitos principais destes fatores, no qual, a velocidade de corte apresentou diferença estatística entre seus níveis (p -valor < 5%).

5.2.1 Rugosidade Média (R_a)

5.2.1.1 Análise Estatística

A interação entre o avanço e a velocidade de corte, para variável de saída R_a , está ilustrada na Figura 66.

Figura 66: Gráfico da interação entre a velocidade de corte e o avanço: Rugosidade média em função da velocidade de corte.

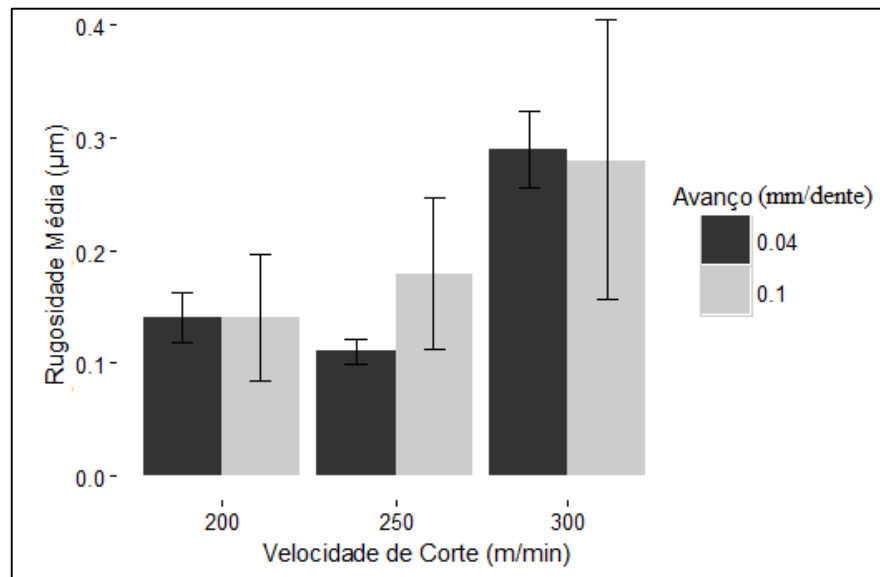


Fonte: Autoria Própria

Ao analisar o gráfico da Figura 66 é possível notar que: a menor rugosidade foi obtida na combinação da velocidade de 250 m/min com um avanço de 0,04 mm/dente; em

relação ao avanço de 0,1 mm/dente, a rugosidade aumentou conforme o aumento da velocidade; e na velocidade de 300 m/min, foram obtidos os maiores valores de rugosidade, independente do avanço utilizado. Na Figura 67, é possível verificar estes comportamentos, além de observar a variância obtida em cada condição. No qual, a combinação que proporcionou a menor rugosidade foi a que também apresentou menor variabilidade dos dados.

Figura 67: Média da rugosidade Ra com os desvios padrões para cada condição de usinagem

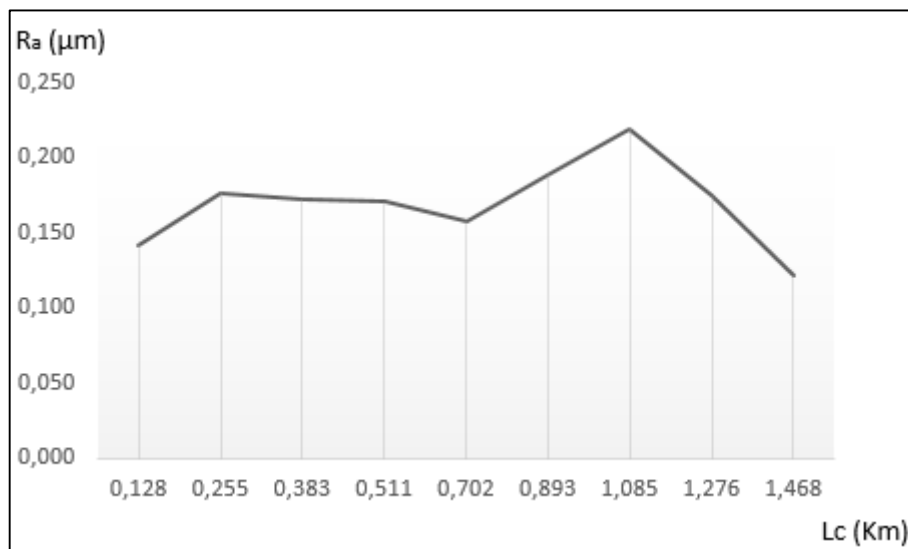


Fonte: Autoria Própria

5.2.1.2 Comportamento da Ra conforme o desgaste

É apresentado na Figura 68 o comportamento do parâmetro Ra conforme o comprimento de corte no processo de fresamento do aço 4340 endurecido. Os dados do parâmetro Ra e do desgaste foram mensurados no final de cada ciclo de usinagem.

Figura 68: R_a em função do comprimento de corte, obtida no processo de fresamento do aço 4340 endurecido nas seguintes condições: $V_c = 200$ m/min e $f_z = 0,04$ mm/dente.



Fonte: Autoria Própria

O parâmetro R_a na condição de usinagem ilustrada na Figura 68 variou de 0,122 a 0,219 μm ao longo dos 1,468 Km usinados. A partir de 0,702 Km a rugosidade teve um crescimento, atingindo um valor máximo, em 1,085 Km. E depois disso, ela decresceu até o fim do processo.

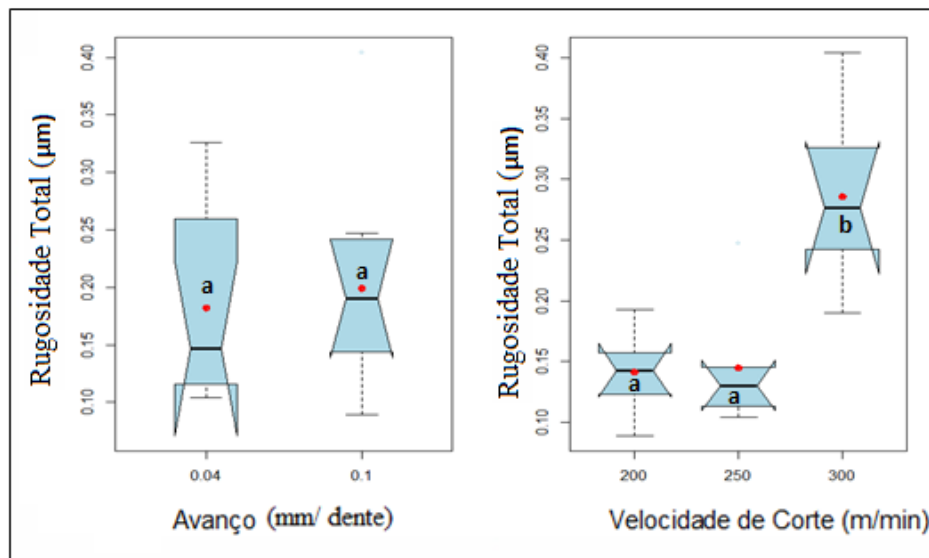
Ao comparar os resultados obtidos nesta condição, com um processo de retificação, onde a rugosidade média varia de 0,2 a 1,6 μm no campo de aplicação usual. Vê-se que os resultados, para fresamento frontal do aço 4340 endurecido, foram satisfatórios, chegando a ser, na maioria das vezes, menor do que o esperado em um processo de retificação.

5.2.2 Rugosidade Total (R_t)

5.2.2.1 Análise Estatística

A distribuição dos dados de rugosidade R_t , bem como as diferenças estatísticas entre as velocidades estão ilustradas na Figura 69.

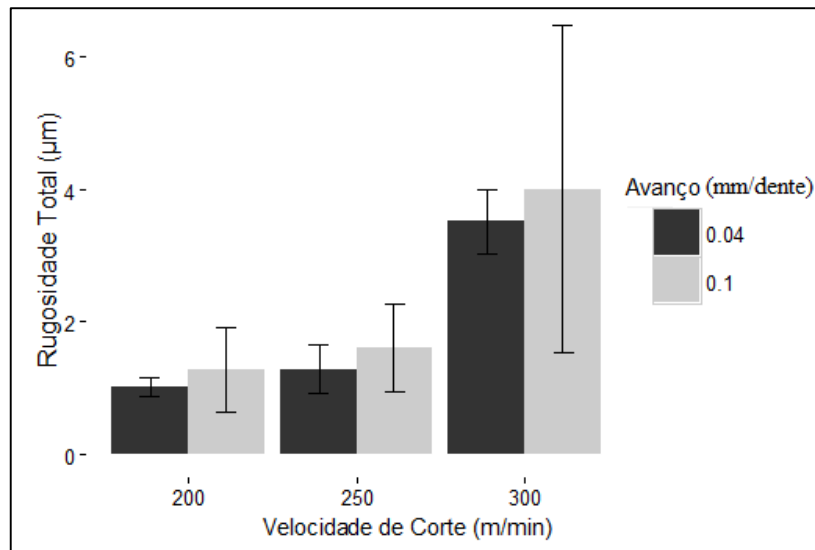
Figura 69: Distribuição da vibração das amostras de aço temperado, fresadas com diferentes velocidades de corte e vanços: (a) R_t em diferentes avanços; (b) R_t em diferentes velocidades de corte. Diferentes letras representam diferença significativa (P -valor $<0,05$) entre grupos.



Fonte: Autoria Própria

É possível inferir através da análise estatística que as velocidades de 200 e 250 m/min proporcionaram menores rugosidades totais nas superfícies usinadas. Já os diferentes níveis de avanço não interferiram neste parâmetro. Na Figura 70 também são mostrados estes comportamentos, além de ilustrar que na combinação da velocidade de 300 m/min com avanço de 0,1 mm houve uma grande variabilidade dos dados.

Figura 70: Média da rugosidade R_t com os desvios padrões para cada condição de usinagem.

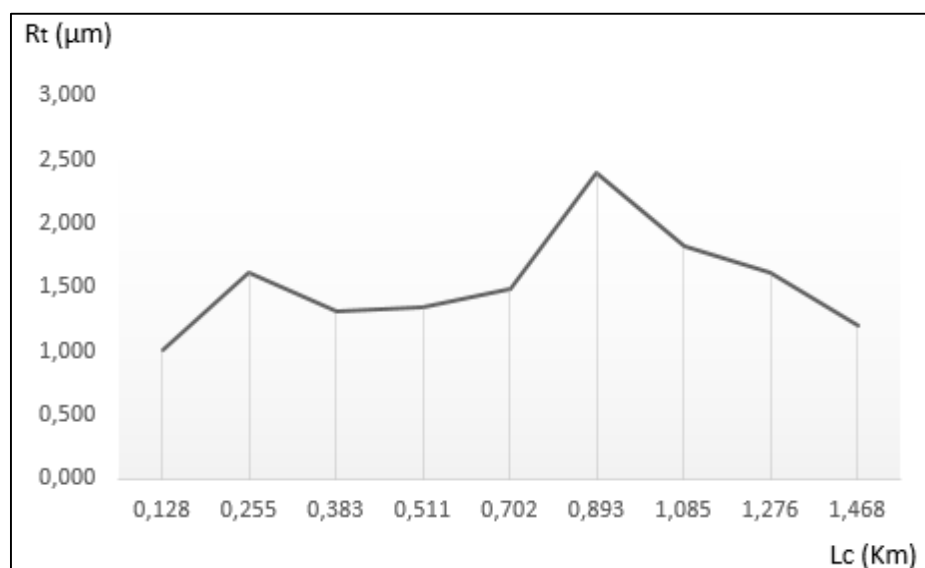


Fonte: Autoria Própria

5.2.2.2 Comportamento da R_t conforme o desgaste

É apresentado na Figura 71, o comportamento do parâmetro R_t em função do desgaste da ferramenta durante o processo de fresamento do aço 4340 temperado para uma condição de usinagem.

Figura 71: R_t em função do comprimento de corte, obtida no processo de fresamento do aço 4340 temperado nas seguintes condições: $V_c = 200$ m/min; $f_z = 0,04$ mm/dente.



Fonte: Autoria Própria

O parâmetro R_t no caso ilustrado na Figura 71 variou de 1,013 a 2,401 μm ao longo dos 1,468 Km usinados. No qual, a partir de 0,893 Km a rugosidade foi decrescente até o fim do processo.

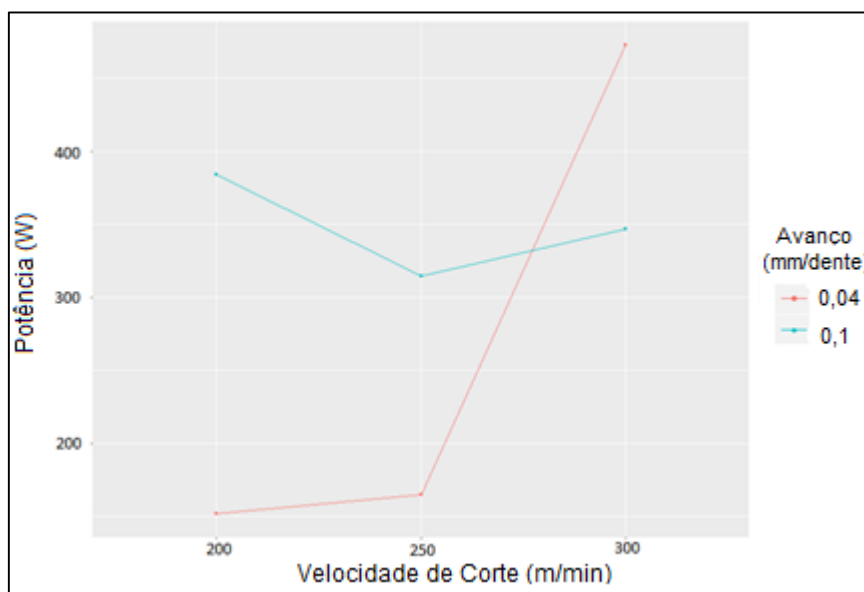
Ao comparar estes resultados com o obtido no fresamento frontal do aço 4340 recozido, nas mesmas condições de usinagem, vê-se que os valores de R_t obtidos para o aço endurecido foram bem inferior ao recozido. Este comportamento também aconteceu para o parâmetro R_a . Portanto, o endurecimento deste aço contribui para uma menor rugosidade.

5.2.3 Potência Consumida

5.2.3.1 Análise Estatística

Está ilustrado na Figura 72 a potência consumida em função da velocidade de corte para os dois níveis de avanço utilizados no experimento.

Figura 72: Gráfico da interação entre a velocidade de corte e o avanço: Potência consumida em função da velocidade de corte.



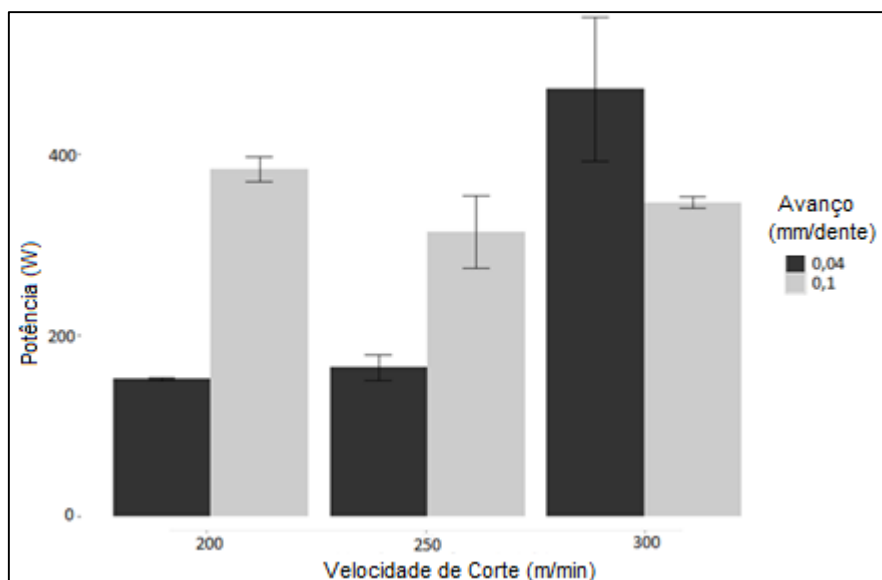
Fonte: Autoria Própria

Ao analisar a Figura 72 nota-se que os resultados obtidos para a V_c de 200 e 250 m/min aconteceram conforme o esperado, pois, quanto maior o avanço, maior foi a potência consumida. Entretanto, na V_c de 300 m/min o mesmo não aconteceu, pois na combinação desta

velocidade com o avanço de 0,04 mm/dente o valor da potência consumida foi acima do esperado. Isto pode ter acontecido porque nesta condição ocorreu um maior desgaste da ferramenta (Tabela F2- Anexo F), provavelmente porque nesta velocidade a alta temperatura durante o processo fez com que o recobrimento da ferramenta diminuísse sua função de isolante térmico.

Os comportamentos discutidos para a potência consumida durante o fresamento frontal do aço endurecido podem ser observados também na Figura 73.

Figura 73: Média da potência com os desvios padrões para cada condição de usinagem

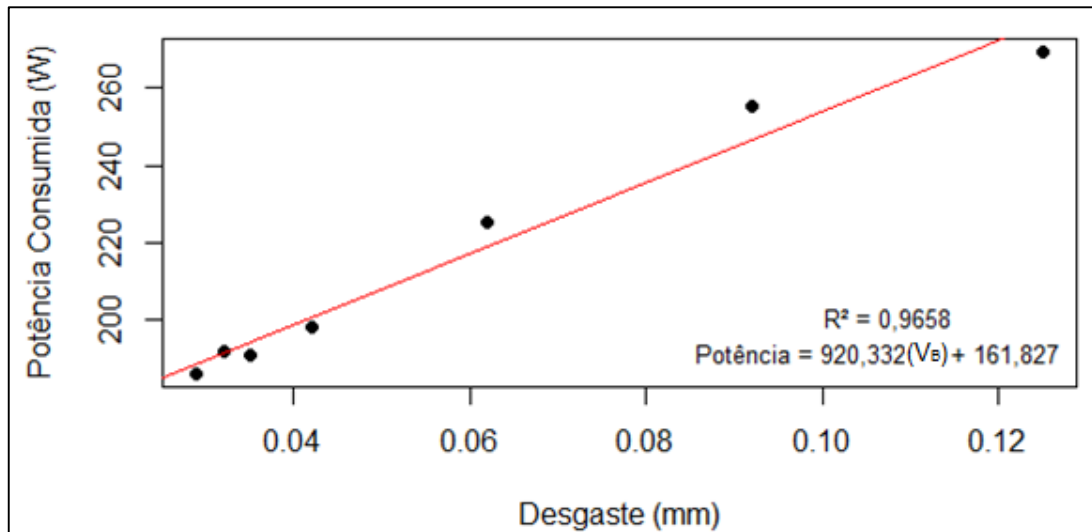


Fonte: Autoria Própria

5.2.3.2 Análise de regressão

No gráfico da Figura 74 está apresentada a reta ajustada da regressão linear referente aos resultados da relação entre a potência de corte e o desgaste da ferramenta (V_B), na seguinte condição de usinagem: $V_c = 200$ m/min e $f_z = 0,04$ mm/dente. Além disso, na figura está ilustrado o coeficiente de determinação R^2 , bem como, a equação que descreve a potência em função do desgaste da ferramenta. No qual, de acordo com a análise de variância da regressão ($F_6 = 170,6$; P-valor < 5%) a um nível de significância de 5%, houve relação entre a potência consumida e o desgaste da ferramenta. E a equação que descreve esta correlação possui uma precisão de 96,58%.

Figura 74: Potência consumida em função do desgaste da ferramenta, no processo de fresamento do aço SAE 4340 temperado, com $V_c = 200$ m/min e $f_z = 0,04$ mm/dente.



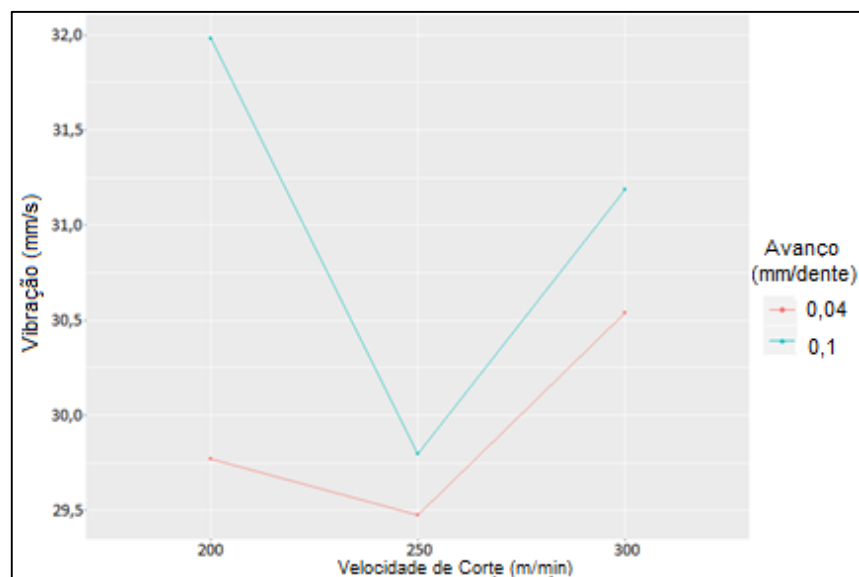
Fonte: Autoria Própria

5.2.4 Vibração

5.2.4.1 Análise Estatística

A interação que ocorreu entre a velocidade de corte e o avanço na vibração produzida durante o fresamento do aço endurecido, está ilustrada no gráfico da Figura 75.

Figura 75: Gráfico da interação entre a velocidade de corte e o avanço: Vibração produzida em função da velocidade de corte.



Fonte: Autoria Própria

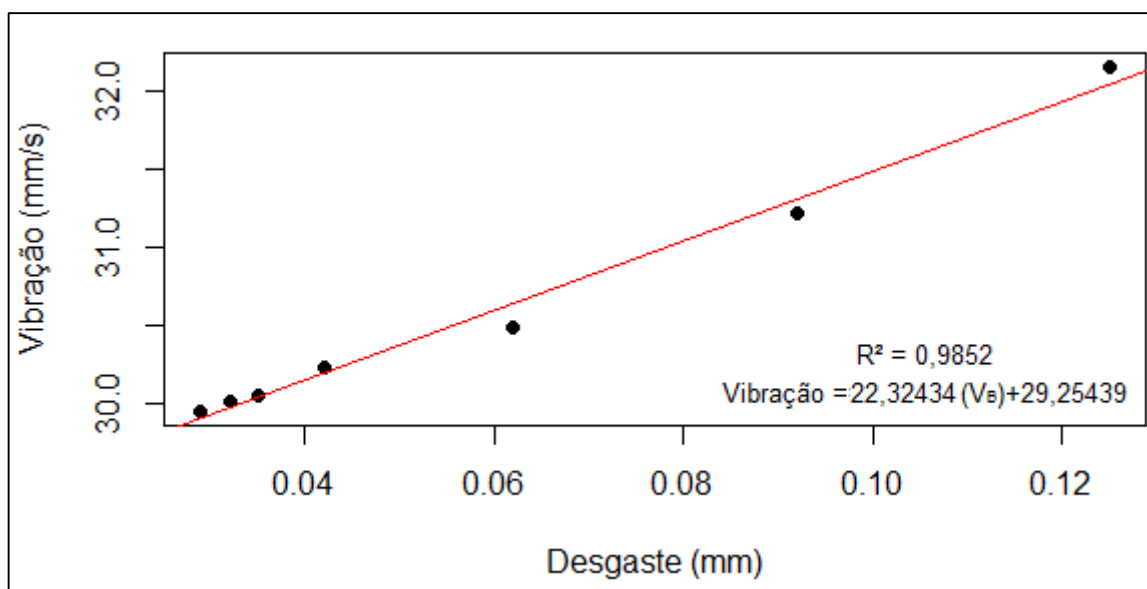
Ao analisar a Figura 75 nota-se que os menores valores obtidos para a vibração durante o processo de fresamento do aço 4340 endurecido, foram na combinação da V_c de 250 m/min com ambos os avanços.

Na usinagem do aço recozido, as menores vibrações também foram produzidas em um nível intermediário de velocidade, provavelmente porque neste nível a ferramenta ficou mais estável.

5.2.4.2 Análise de regressão

A reta ajustada da regressão linear referente ao resultado da relação entre a vibração produzida durante o processo e o desgaste da ferramenta (V_B) está apresentada no gráfico da Figura 76. Além disso, na figura está ilustrado a equação que descreve a vibração em função do desgaste da ferramenta, bem como, o coeficiente de determinação R^2 .

Figura 76: Vibração produzida em função do desgaste da ferramenta, no processo de fresamento do aço SAE 4340 temperado, com $V_c = 200$ m/min e $f_z = 0,04$ mm/dente.



Fonte: Autoria Própria

A análise de variância da regressão ($F_6 = 399,1$; P-valor < 5%; $\alpha = 5\%$) mostrou que houve relação entre a vibração produzida e o desgaste da ferramenta.

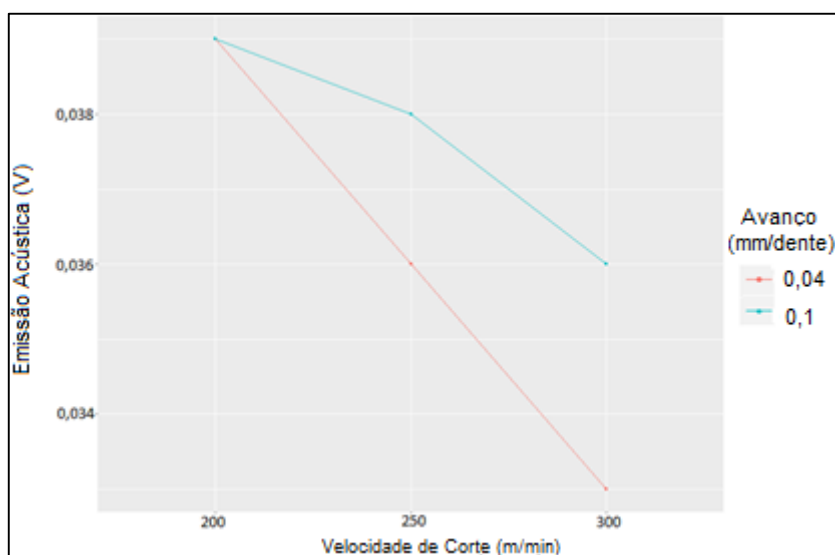
A equação que descreve esta relação possui uma precisão de 98,52%. No qual, conforme ocorreu o desgaste da ferramenta ao longo do processo, aumentou a vibração produzida durante o fresamento.

5.2.5 Emissão Acústica

5.2.5.1 Análise Estatística

A interação entre o avanço e a velocidade de corte, na variável de saída EA, está ilustrada na Figura 77.

Figura 77: Gráfico da interação entre a velocidade de corte e o avanço: EA em função da V_c .



Fonte: Autoria Própria

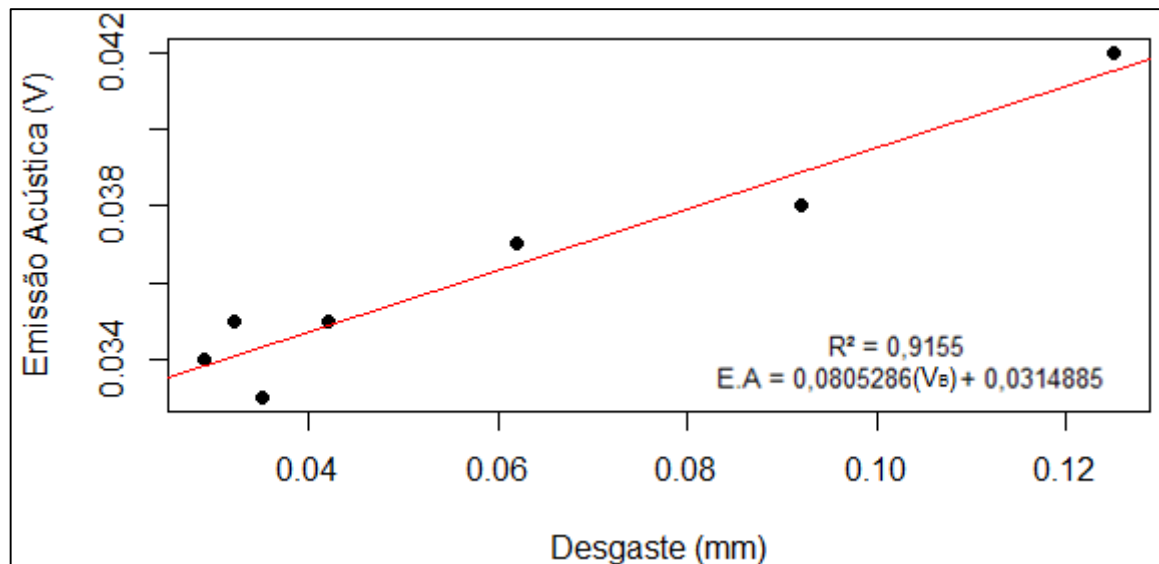
Ao analisar a Figura 77 é possível inferir graficamente que o aumento da velocidade, combinada com os dois níveis de avanço, proporcionou menores EA durante o processo. E a combinação que apresentou menor EA foi a velocidade de corte de 300 m/min combinada com o avanço de 0,04 mm/dente.

5.2.5.2 Análise de Regressão

A regressão linear entre a emissão acústica produzida durante o processo e o desgaste da ferramenta (V_B) está ilustrada na Figura 78. Os resultados desta regressão

mostraram que houve correlação entre estes dois fatores ($F_6 = 66,03$; P-valor < 5%) a um nível de significância de 5%. No qual, a equação que descreve esta correlação possui uma precisão de 91,55%.

Figura 78: E. A. em função do desgaste da ferramenta, no processo de fresamento do aço SAE 4340 temperado, nas seguintes condições: $V_c = 200$ m/min e $f_z = 0,04$ mm/dente.



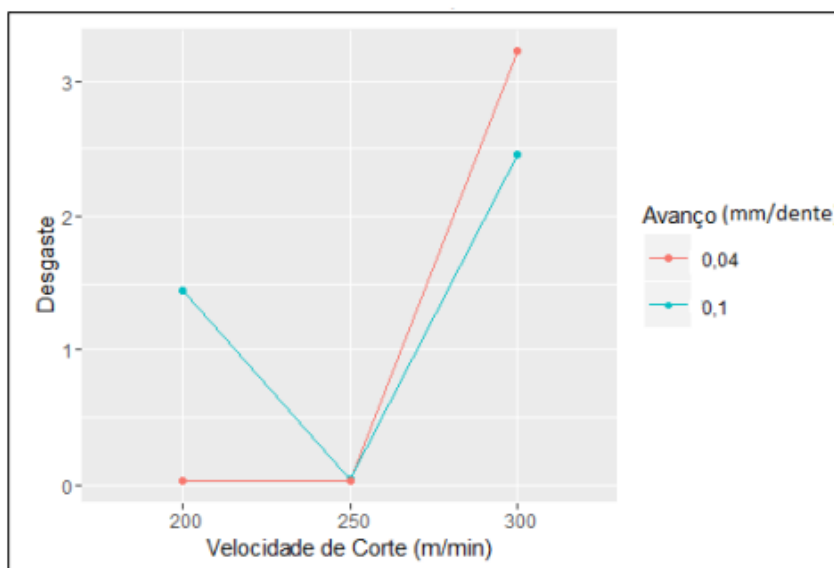
Fonte: Autoria Própria

5.2.6 Desgaste da ferramenta

5.2.6.1 Análise Estatística

Na Figura 79 está ilustrada a interação entre a velocidade de corte e o avanço para o desgaste das ferramentas.

Figura 79: Gráfico da interação entre a velocidade de corte e o avanço: Desgaste da ferramenta em função da velocidade de corte



Fonte: Autoria Própria

No fresamento do aço endurecido, a velocidade de 300 m/min combinada com ambos os avanços, bem como, a velocidade de 200 m/min combinada com o avanço de 0,1 mm/dente proporcionaram maiores desgastes na ferramenta, além do que, nestas condições as ferramentas de corte apresentaram avarias logo após o primeiro ciclo de usinagem. Nas demais condições o desgaste foi semelhante e inferior aos 0,3 mm sugeridos pela norma.

Além do desgaste ter sido semelhante, nestes casos a rugosidade obtida foi inferior a 0,2 μm , e isto se torna vantajoso, pois mostra que há a possibilidade de se trabalhar com velocidade mais alta (25% maior) sem afetar, de forma significativa, a rugosidade do aço 4340 endurecido.

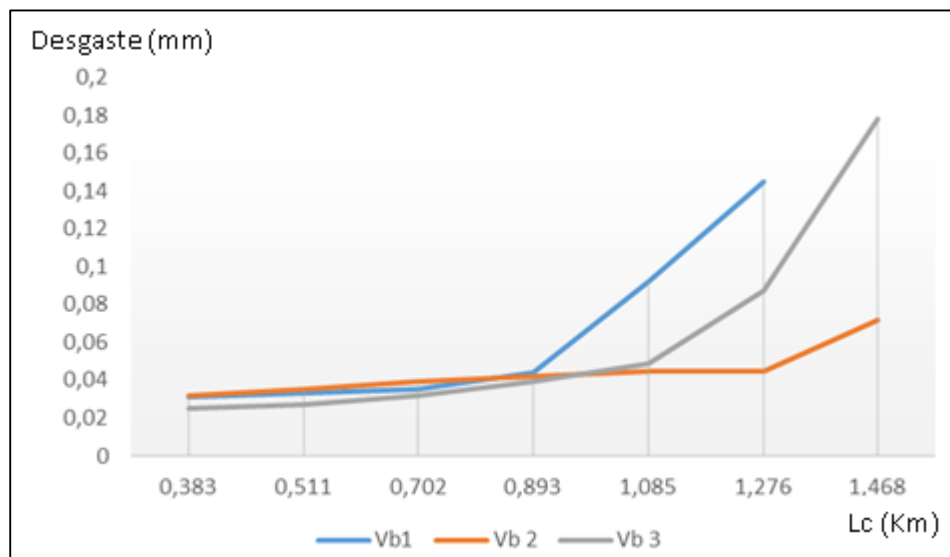
5.2.6.2 Desgaste da Ferramenta em função do comprimento usinado

Comportamento das 03 ferramentas conforme o comprimento usinado:

Na Figura 80 está ilustrado o desgaste que ocorreu nas três ferramentas conforme o comprimento usinado. No qual, é possível notar que as três ferramentas desgastaram de forma semelhante e menos acentuada até 0,893 Km. A partir deste ponto os desgastes não foram

homogêneos. A aresta 1, por exemplo, teve um crescimento acentuado até 1,276 Km e sofreu avaria no último ciclo de usinagem.

Figura 80: Desgaste das 03 Ferramentas de corte em função de L_c para o aço SAE 4340
Temperado: ($V_c = 200$ m/min e $f_z = 0,04$ mm/dente)



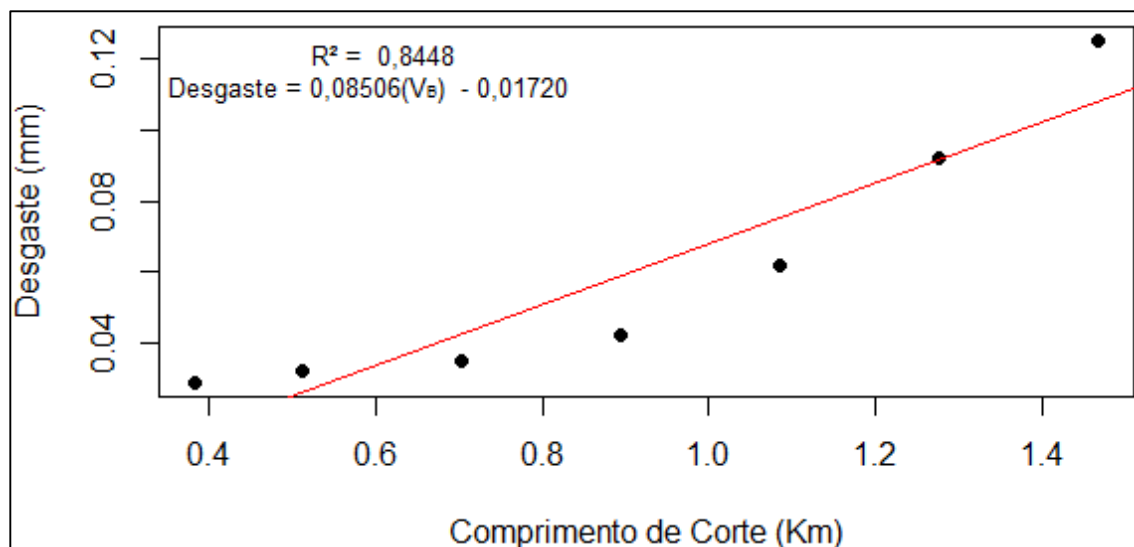
Fonte: Autoria Própria

Análise de Regressão:

No gráfico da Figura 81 está apresentada a reta ajustada da regressão linear referente aos resultados da relação entre o desgaste da ferramenta e o comprimento de corte (L_c), na seguinte condição de corte: $V_c = 200$ m/min e $f_z = 0,04$ mm/dente.

Além disso, na figura está ilustrado a equação que descreve o desgaste em função do comprimento de corte, bem como, o coeficiente de determinação R^2 .

Figura 81: Desgaste da Ferramenta em função de L_c para o aço SAE 4340 Temperado: ($V_c = 200$ m/min e $f_z = 0,04$ mm/dente)



Fonte: Autoria Própria

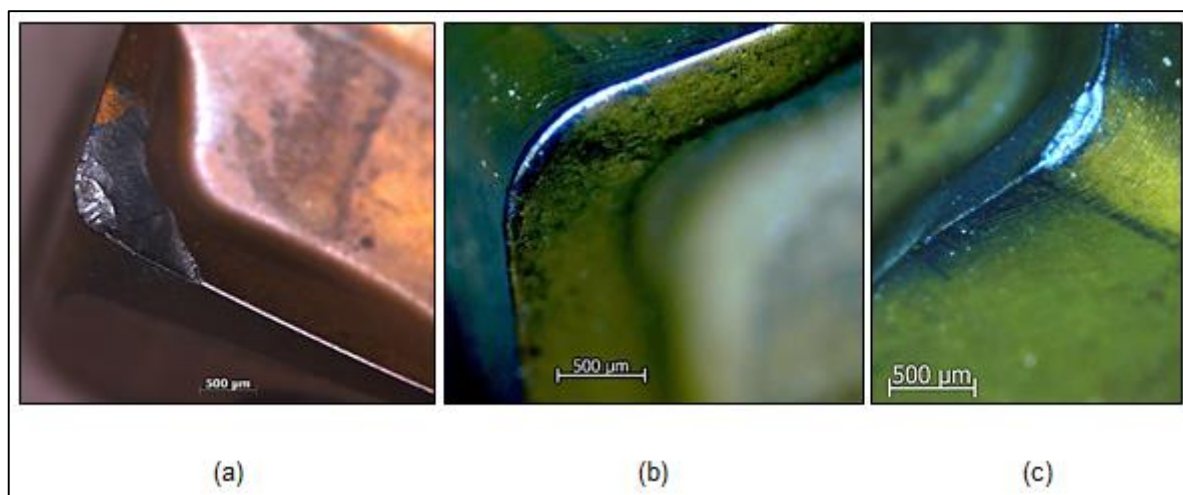
A análise de variância da regressão ($F_6 = 33,65$; P-valor < 5%; $\alpha = 5\%$) mostrou que houve relação entre o desgaste da ferramenta e o comprimento de corte, com um coeficiente R^2 de 84,48%.

Ao observar o gráfico, nota-se que o desgaste teve um crescimento mais acentuado a partir de aproximadamente 0,9 Km, porque provavelmente do início do processo até este ponto houve uma acomodação da ferramenta.

5.2.6.3 Análise Qualitativa

Nas Figuras 82, 83, 84 e 85 estão ilustrados os desgastes que ocorreram nas três ferramentas de corte, em cada condição de usinagem analisada.

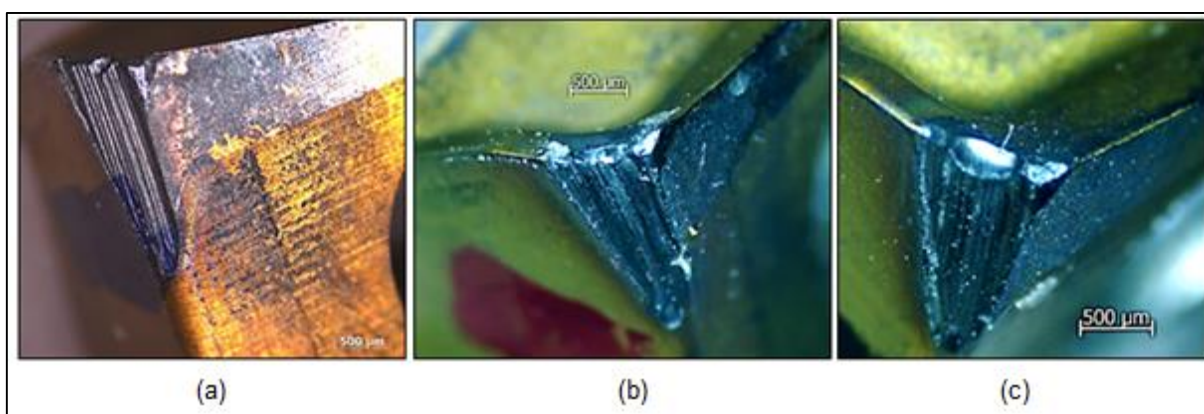
Figura 82: Desgaste ocorrido durante o fresamento frontal do aço 4340 endurecido com $V_c = 200$ m/min e $f_z = 0,04$ mm/dente na (a) aresta 1; (b) aresta 2 e (c) aresta 3.



Fonte: Autoria Própria

Nesta condição de usinagem as ferramentas realizaram 46 passadas sobre a peça e o comprimento usinado foi de 1,468 Km. Ao observar as imagens, nota-se que na aresta 1 ocorreu o deslocamento do revestimento e isso determinou o término do processo. Na aresta 3 ocorreu o desgaste de flanco e de cratera. E por fim, na aresta 2 o desgaste de flanco foi mínimo. A progressão destes desgastes pode ser observada na Figura 80.

Figura 83: Desgaste ocorrido durante o fresamento frontal do aço 4340 endurecido com $V_c = 300$ m/min e $f_z = 0,1$ mm/dente na (a) aresta 1; (b) aresta 2 e (c) aresta 3.

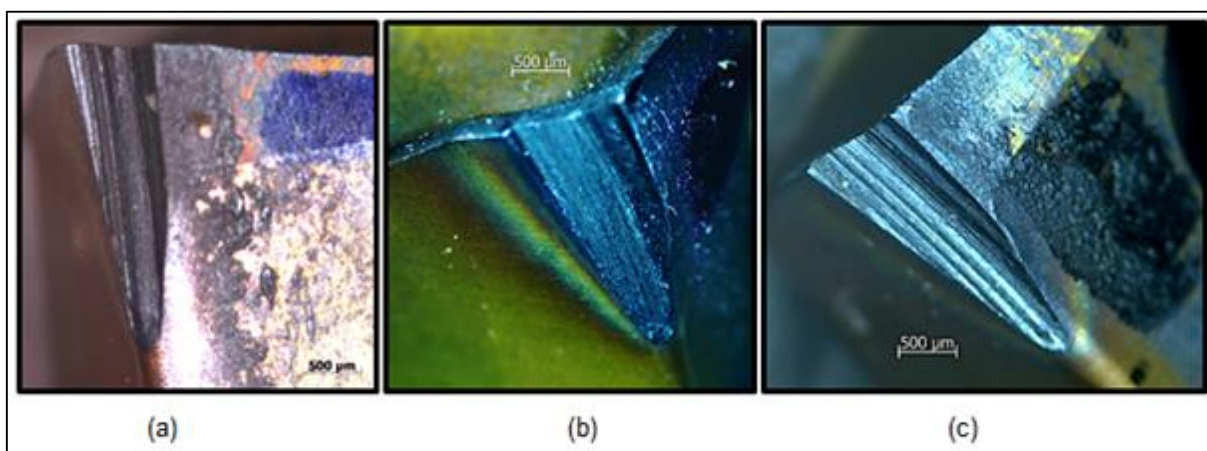


Fonte: Autoria Própria

Neste caso, as ferramentas foram desgastadas já no primeiro ciclo de usinagem. Portanto, elas realizaram apenas 6 passadas pela peça, totalizando 0,079 Km.

Na aresta 1 e 2 há a presença de desgaste de flanco e lascamentos. Enquanto que na aresta 3 há desgaste de flanco e cratera.

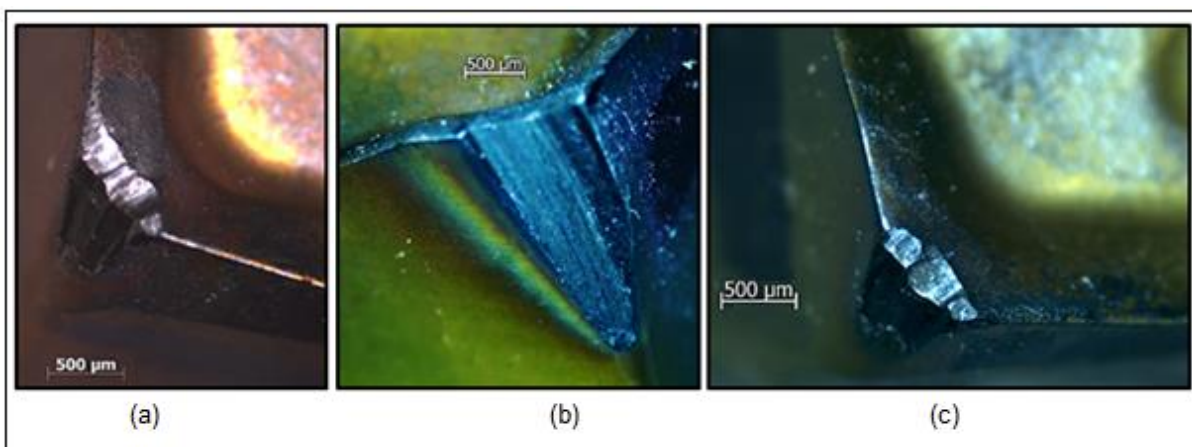
Figura 84: Desgaste ocorrido durante o fresamento frontal do aço 4340 endurecido com $V_c = 300$ m/min e $f_z = 0,04$ mm/dente na (a) aresta 1; (b) aresta 2 e (c) aresta 3.



Fonte: Autoria Própria

Na condição ilustrada na Figura 84, foi onde o desgaste de flanco atingiu maiores valores já no primeiro ciclo de usinagem (ver Tabela F2 – Apêndice F). Isto aconteceu provavelmente por causa da combinação de uma alta velocidade de corte com um maior comprimento usinado (aproximadamente 0,193 Km). Para Seco Tools AB (2016), é necessário reduzir a velocidade de corte e aumentar o avanço para evitar que ocorra um desgaste de flanco acelerado, conforme ocorreu nesta condição de usinagem.

Figura 85: Desgaste ocorrido durante o fresamento frontal do aço 4340 endurecido com $V_c = 200$ m/min e $f_z = 0,1$ mm/dente na (a) aresta 1; (b) aresta 2 e (c) aresta 3.



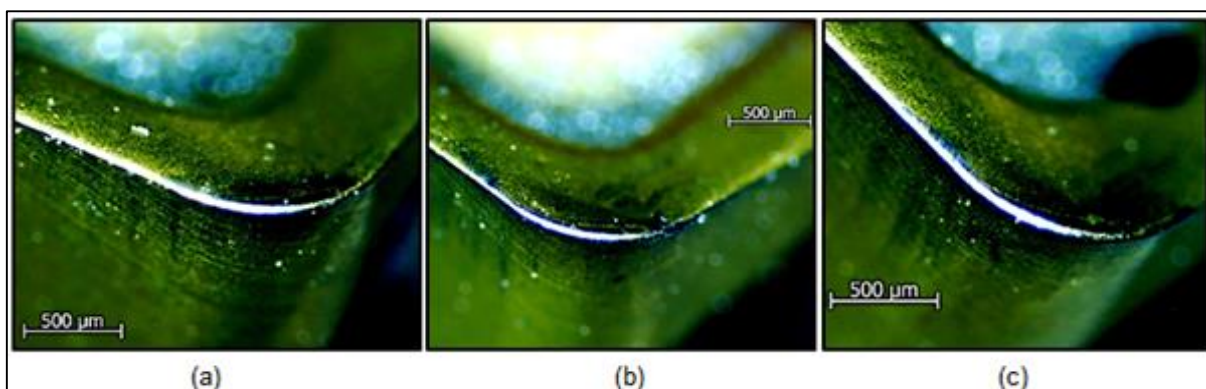
Fonte: Autoria Própria

Ao observar a Figura 85, vê-se que nas três arestas há desgastes de flanco. No qual, após o primeiro ciclo de usinagem esses desgastes já apresentaram valores maiores do que o estipulado pela norma. Além do mais, ocorreram quebras aresta 1 e 3. Portanto, estas ferramentas realizaram apenas seis passadas sobre o material usinado, totalizando um L_c igual a 0,077Km.

Nas condições ilustradas na Figura 86 e 87, foram realizadas apenas seis passadas da ferramenta sobre a peça para verificar como era o comportamento da ferramenta em uma velocidade intermediária (250 m/min). Visto que, das quatro condições apresentadas anteriormente, apenas em uma condição ($V_c = 200$ m/min e $f_z = 0,04$ mm/dente) os resultados foram satisfatórios.

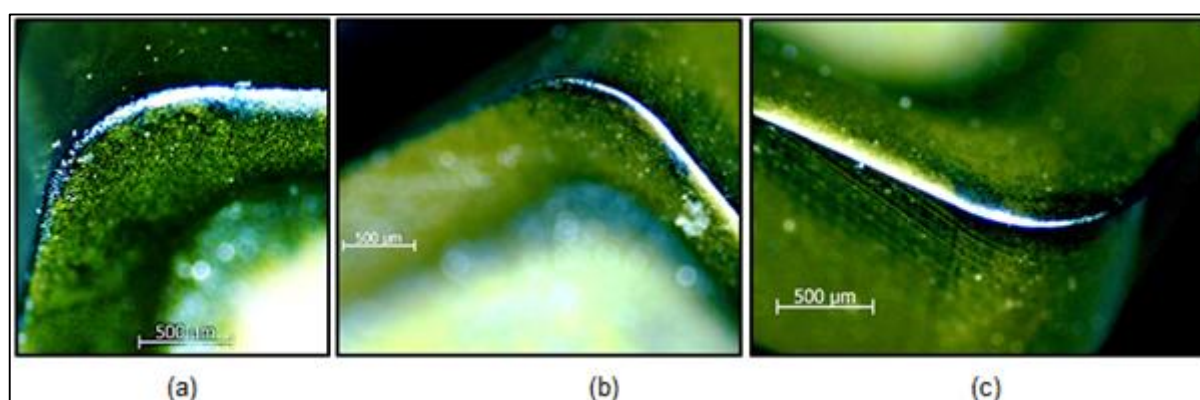
A resposta obtida nestas duas condições foi positiva, visto que o desgaste de flanco foi mínimo em todas as arestas de corte utilizadas.

Figura 86: Desgaste das ferramentas utilizadas para o fresamento frontal do aço 4340 endurecido nas seguintes condições: $V_c = 250$ m/min; $f_z = 0,1$ mm/dente



Fonte: Autoria Própria

Figura 87: Desgaste das ferramentas utilizadas para o fresamento frontal do aço 4340 endurecido nas seguintes condições: $V_c = 250$ m/min; $f_z = 0,04$ mm/dente

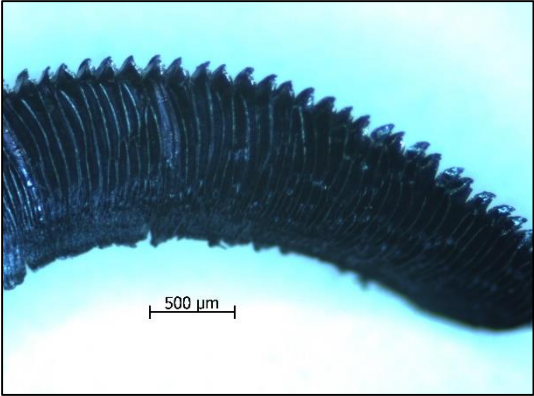
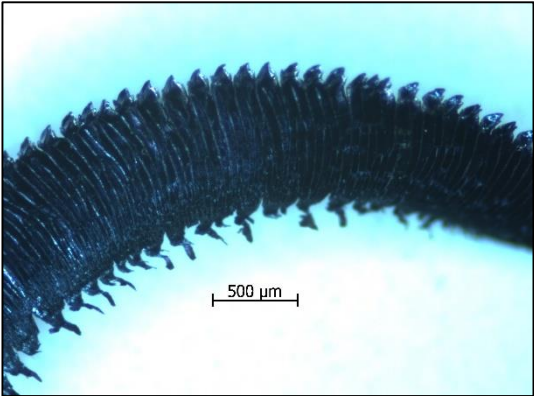
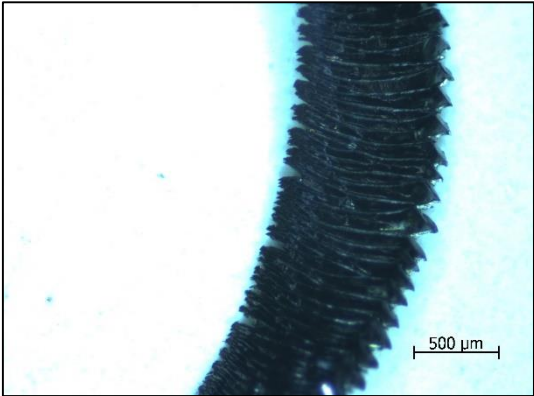
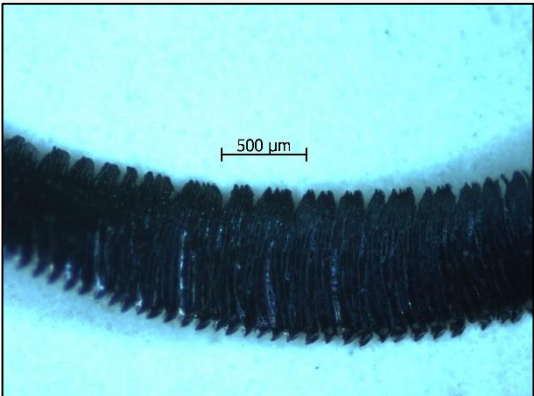
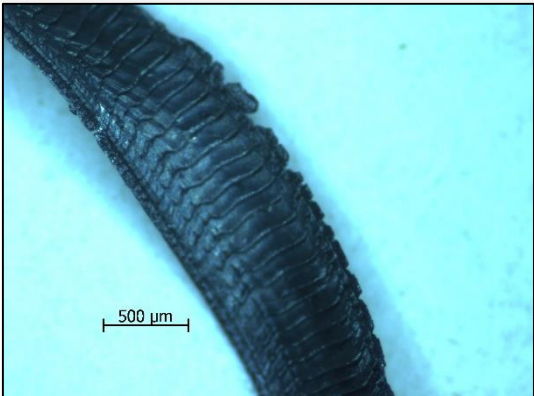


Fonte: Autoria Própria

5.2.7 Tipos e formas dos cavacos

Na Figura 88 está apresentado os tipos de cavacos formados em cada condição de usinagem realizada para o aço 4340 endurecido. No qual, é possível observar que o cavaco ficou mais cisalhado conforme aumentou o avanço.

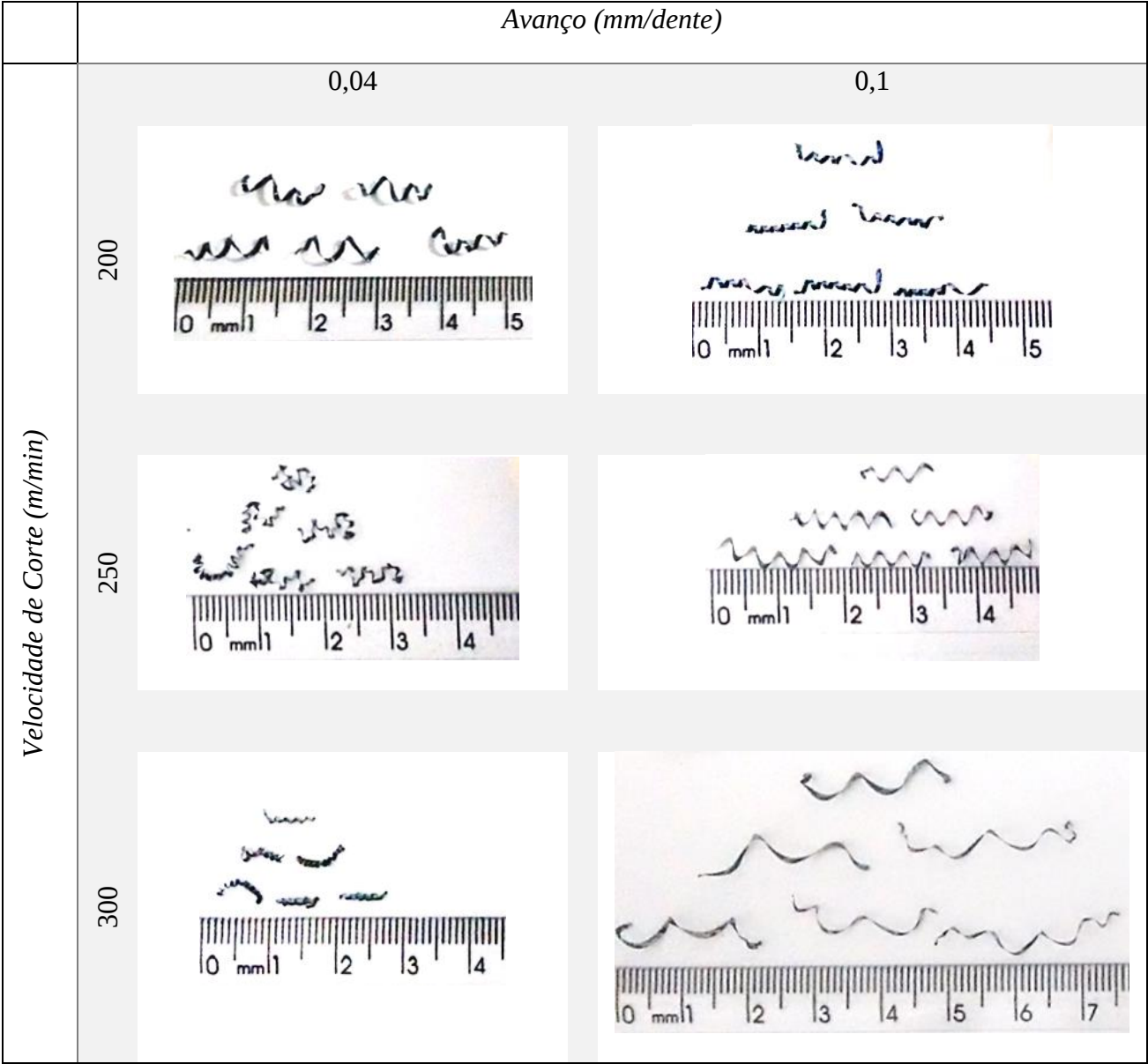
Figura 88: Tipos de cavacos formados em cada condição de usinagem do aço 4340 endurecido.

Avanço (mm/dente)	
0,04	0,1
200 	
250 	
300 	

Fonte: Autoria Própria

Na Figura 89 está ilustrado a influência da V_c e do avanço no formato dos cavacos. No qual, nota-se que os cavacos formados no maior nível de avanço possuem um comprimento maior. E o formato dos cavacos formados na V_c de 250 e 300 m/min combinado com o avanço de 0,04 mm/dente é helicoidal emaranhado. Enquanto que nas demais combinações eles são helicoidais curtos. Por fim, observa-se que no avanço de 0,1 mm/dente, o comprimento dos cavacos foi maior conforme o aumento da velocidade.

Figura 89: Influência da velocidade de corte e do avanço no cavaco formado durante o fresamento frontal do aço 4340 temperado.



5.3 Comparação entre os materiais

Para poder comparar os resultados obtidos no fresamento do aço 4340 recozido com os resultados do aço 4340 endurecido, foi necessário isolar uma das variáveis de entrada (velocidade de corte e avanço). Portanto, as análises a seguir estão apresentadas separadas por avanço e após, separadas por nível de velocidade.

5.3.1 Rugosidade Média (R_a)

O comportamento do parâmetro (R_a) em função das velocidades de corte e em função do avanço, para cada material usinado, está ilustrado nas Figuras 90 e 91, respectivamente. No qual, a análise de variância mostrou que houve diferença significativa da rugosidade média entre os materiais usinados no avanço de 0,04 mm/dente ($t_{6,7242} = 6,2582$; P-valor < 5%). Entretanto, no avanço de 0,1 mm/dente, não teve diferença significativa ($t_{5,764} = 0,21046$; P-valor > 5%).

Em relação as velocidades, na V_c de 200 m/min, a análise de variância mostrou que houve diferença significativa da rugosidade média entre os materiais analisados ($t_{5,1431} = 3,5073$; P-valor < 5%). O mesmo não ocorreu para a V_c de 300 m/min ($t_{9,6421} = 2,3559$; P-valor > 5%).

Figura 90: Gráfico do parâmetro R_a em função das velocidades de corte, para cada material, com avanço de: (a) 0,04 mm/dente e (b) 0,1 mm/dente.

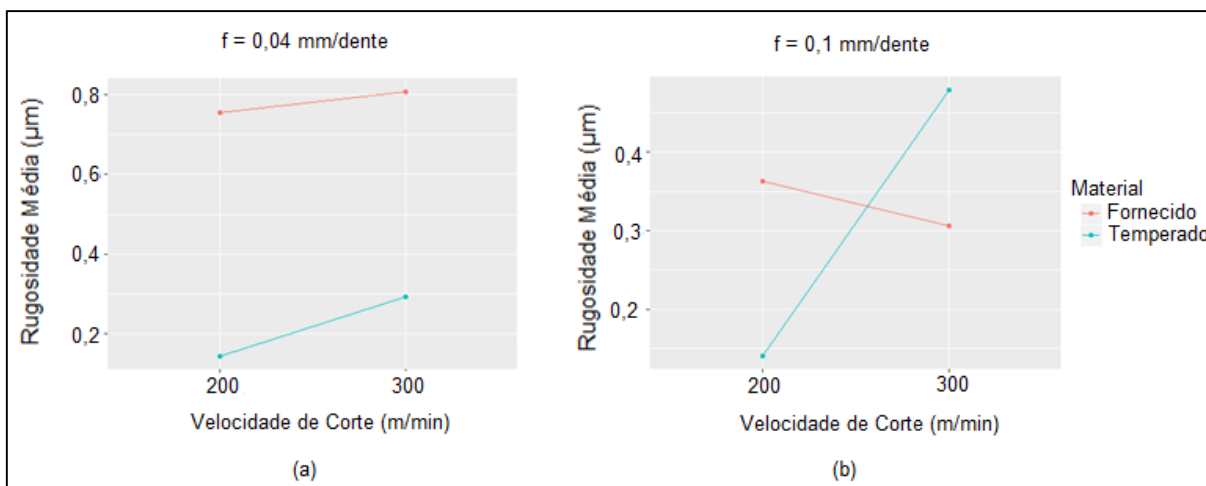
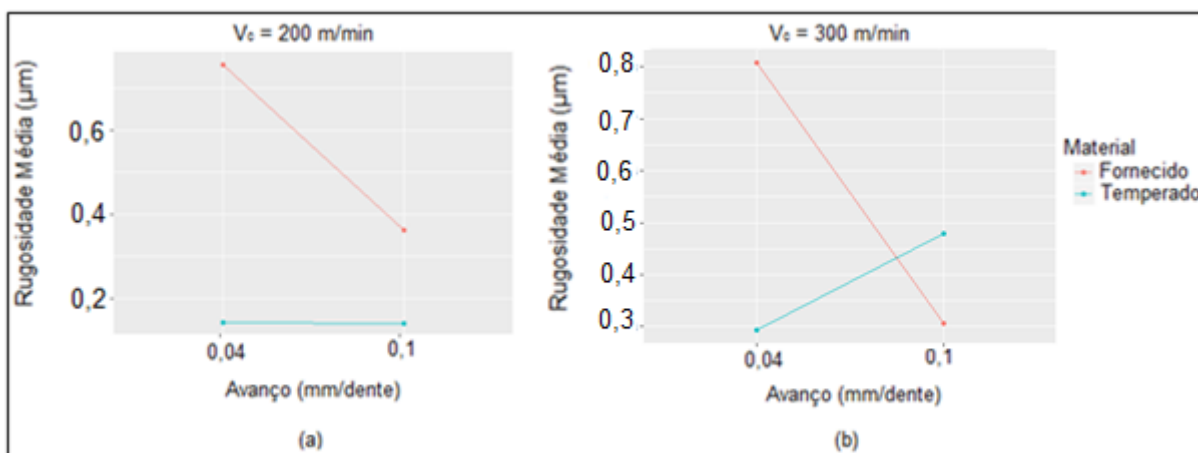


Figura 91: Gráfico do parâmetro R_a em função do avanço, para cada material, com V_c de: (a) 200 m/min e (b) 300 m/min.

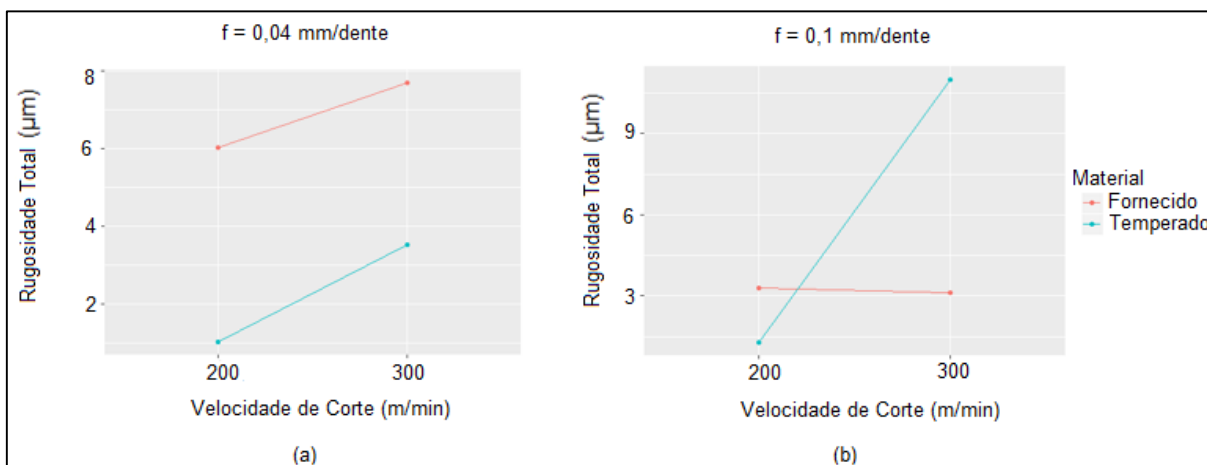


Fonte: Autoria Própria

5.3.2 Rugosidade Total (R_t)

O comportamento do parâmetro (R_t) em função das velocidades de corte e em função do avanço, para cada material, está ilustrado nas Figuras 92 e 93, respectivamente.

Figura 92: Gráfico do parâmetro R_t em função das velocidades de corte, para cada material, com avanço de: (a) 0,04 mm/dente e (b) 0,1 mm/dente.

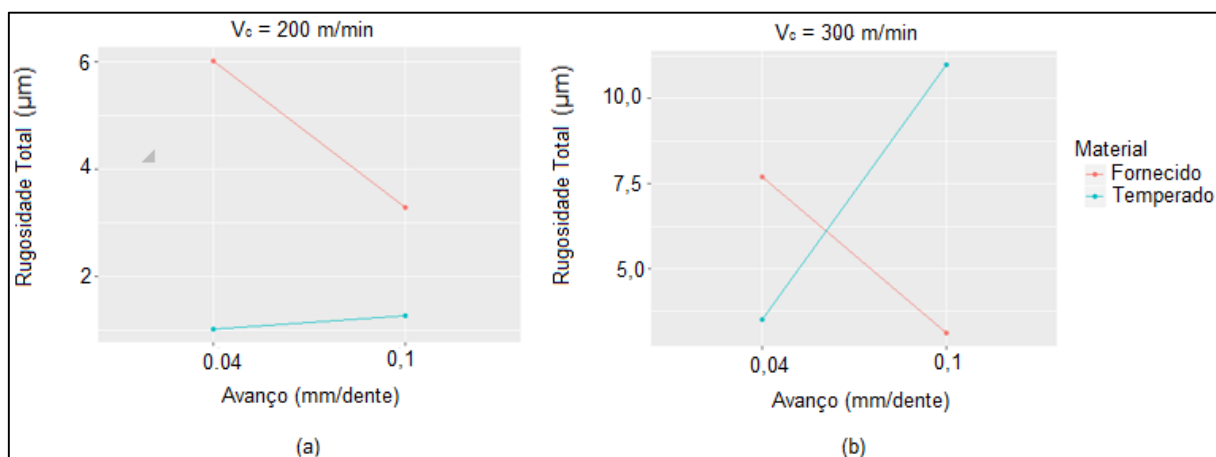


Fonte: Autoria Própria

Houve diferença significativa do parâmetro R_t entre os materiais usados com avanço de 0,04 mm/dente, de acordo com a análise de variância realizada ($t_{8,8742} = 4,5557$; P-

valor < 5%). Entretanto, no avanço de 0,1 mm/dente o parâmetro não apresentou ($t_{5,09} = -0,76056$; P-valor > 5%).

Figura 93: Gráfico do parâmetro R_t em função do avanço, para cada material, com V_c de: (a) 200 m/min e (b) 300 m/min.



Fonte: Autoria Própria

Em relação as velocidades, ocorreu o mesmo relatado para o parâmetro R_a , pois, houve diferença significativa na V_c de 200 m/min ($t_{5,1431} = 3,5073$; P-valor < 5%). Porém, o mesmo não ocorreu na V_c de 300 m/min ($t_{9,5946} = 1,125$; P-valor > 5%).

Por fim, ao verificar as comparações realizadas entre os materiais, para os parâmetros R_a e R_t , nota-se que o fresamento frontal do aço 4340 endurecido, contribuiu para um melhor acabamento superficial nas seguintes condições de usinagem:

- V_c de 200 m/min combinada com ambos os avanços; e
- Avanço de 0,04 mm/dente combinada com ambos os níveis de V_c .

Por eliminação, a única condição em que não ocorreu diferença significativa foi na combinação V_c de 300 m/min com o avanço de 0,1 mm/dente. E isto ocorreu porque o material endurecido não teve bons resultados ao ser trabalhado com uma V_c de 300 m/min, ao mesmo tempo que, a usinagem do material recozido se mostrou favorável no maior nível de avanço.

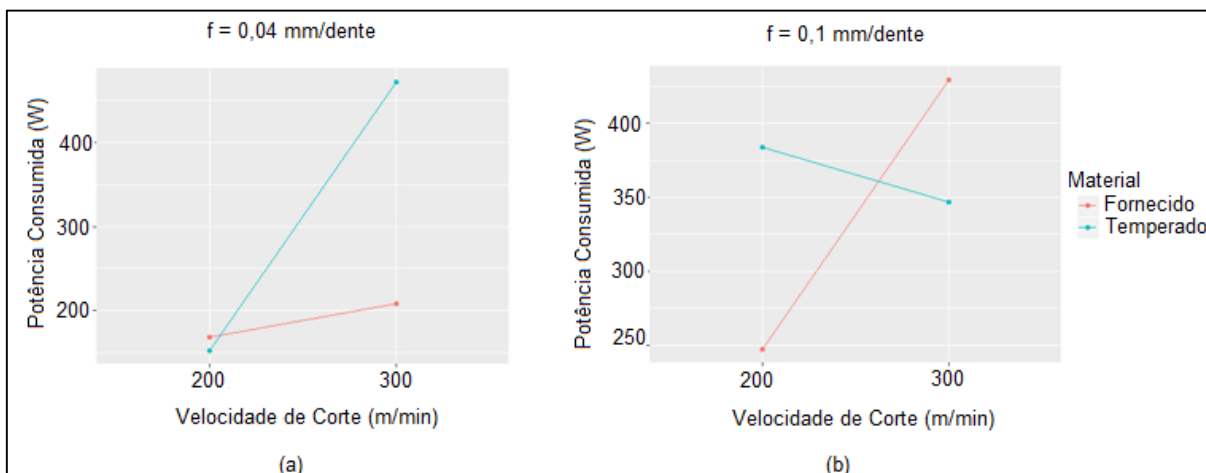
5.3.3 Potência Consumida

Nas Figuras 94 e 95 estão ilustrados o comportamento da potência em função das velocidades de corte e em função do avanço para cada material usinado. No qual, de acordo com a análise estatística realizada, a potência consumida durante o processo de fresamento de ambos os materiais não diferiu significativamente nos dois níveis de velocidade e avanço. Isto mostra que a dureza do material, bem como, os fatores analisados (avanço e velocidade de corte) não tiveram influência sobre a potência.

Os resultados obtidos em cada nível testado foram:

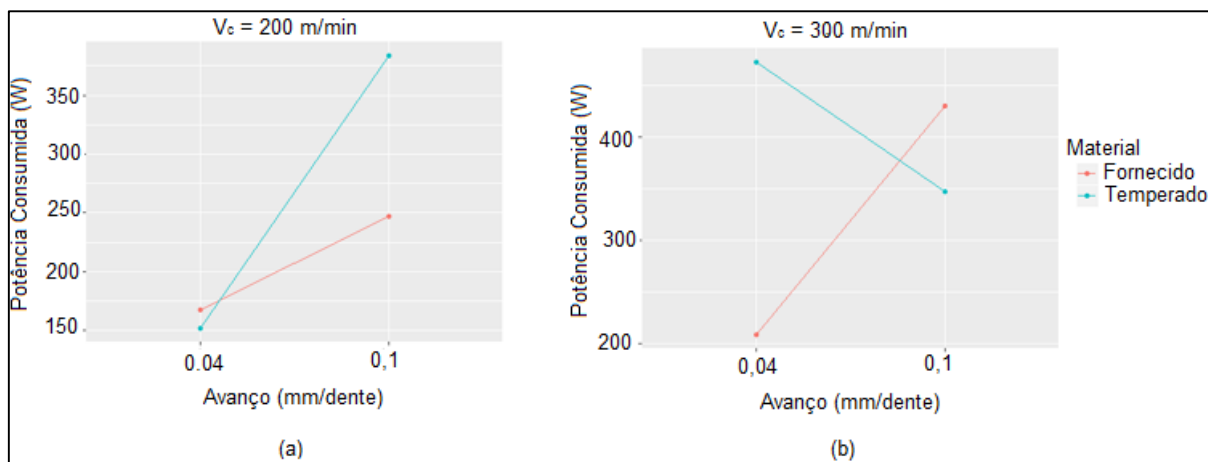
- Avanço de 0,04 mm/dente ($t_{5,1592} = -1,6673$; P-valor > 5%)
- Avanço de 0,1 mm/dente ($t_{5,4748} = -0,64644$; P-valor > 5%)
- Vc de 200 m/min ($t_{6,1697} = -1,0991$; P-valor > 5%)
- Vc de 300 m/min ($t_{8,7653} = -1,519$; P-valor > 5%)

Figura 94: Gráfico da potência em função das velocidades de corte, para cada material, com avanço de: (a) 0,04 mm/dente e (b) 0,1 mm/dente.



Fonte: Autoria Própria

Figura 95: Gráfico da potência em função do avanço, para cada material, com V_c de: (a) 200 m/min e (b) 300 m/min.



Fonte: Autoria Própria

5.3.4 Vibração

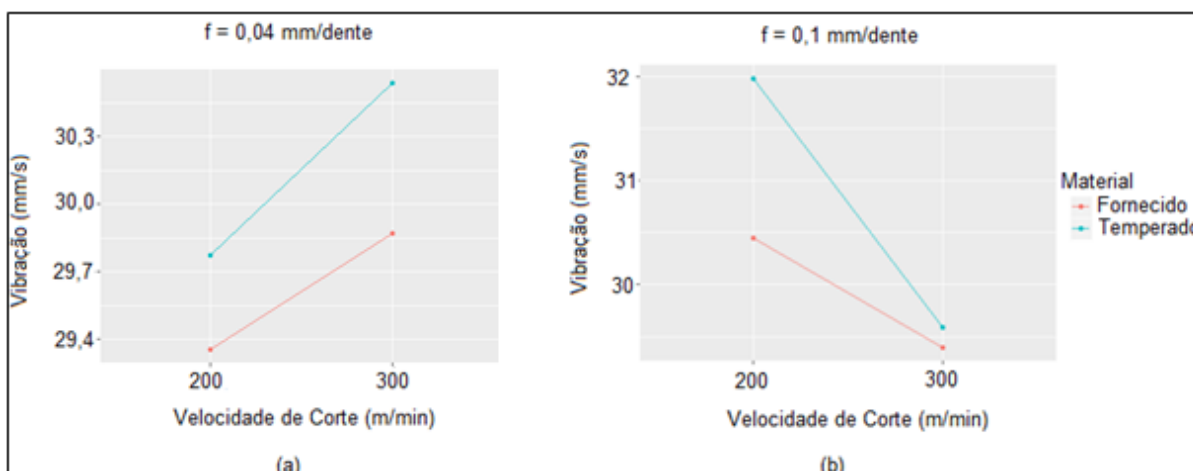
Na Figura 96 e 97 está ilustrado o comportamento da vibração em função das velocidades de corte e em função do avanço, respectivamente.

Ao comparar a vibração produzida durante o fresamento dos dois materiais, não houve diferença significativa no avanço de 0,1 mm/dente e na velocidade de 200 m/min. Nos demais níveis analisados, as vibrações foram menores durante a usinagem do aço recozido, certamente porque este material apresenta uma menor dureza.

Os resultados obtidos em cada nível testado foram:

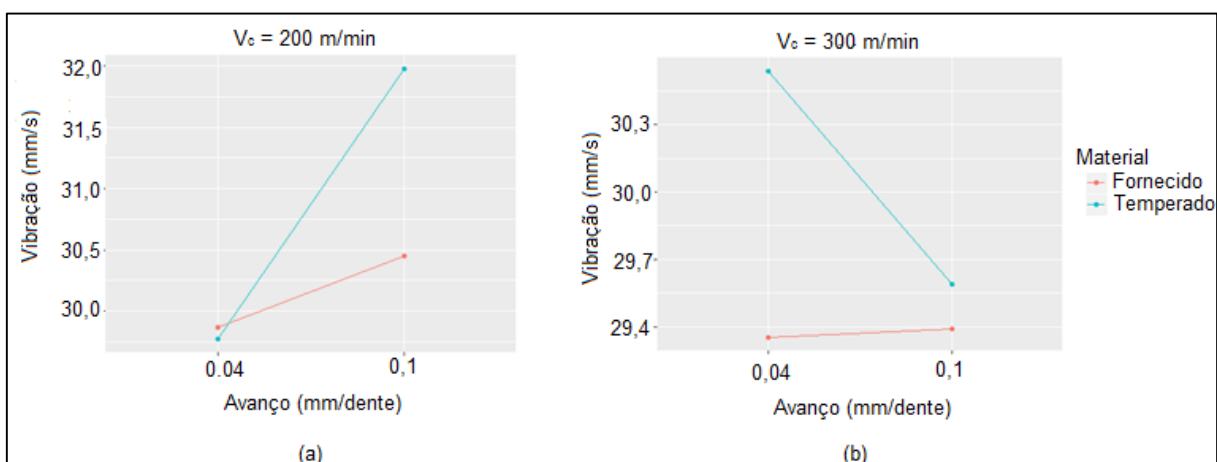
- Avanço de 0,04 mm/dente ($t_{8,4881} = -2,3674$; P-valor < 5%)
- Avanço de 0,1 mm/dente ($t_{6,8787} = -1,4707$; P-valor > 5%)
- V_c de 200 m/min ($t_{5,7789} = -1,4048$; P-valor > 5%)
- V_c de 300 m/min ($t_{5,0948} = -2,944$; P-valor < 5%)

Figura 96: Gráfico da vibração em função das velocidades de corte, para cada material, com avanço de: (a) 0,04 mm/dente e (b) 0,1 mm/dente.



Fonte: Autoria Própria

Figura 97: Gráfico da vibração produzida em função do avanço, para cada material, com V_c de: (a) 200 m/min e (b) 300 m/min.



Fonte: Autoria Própria

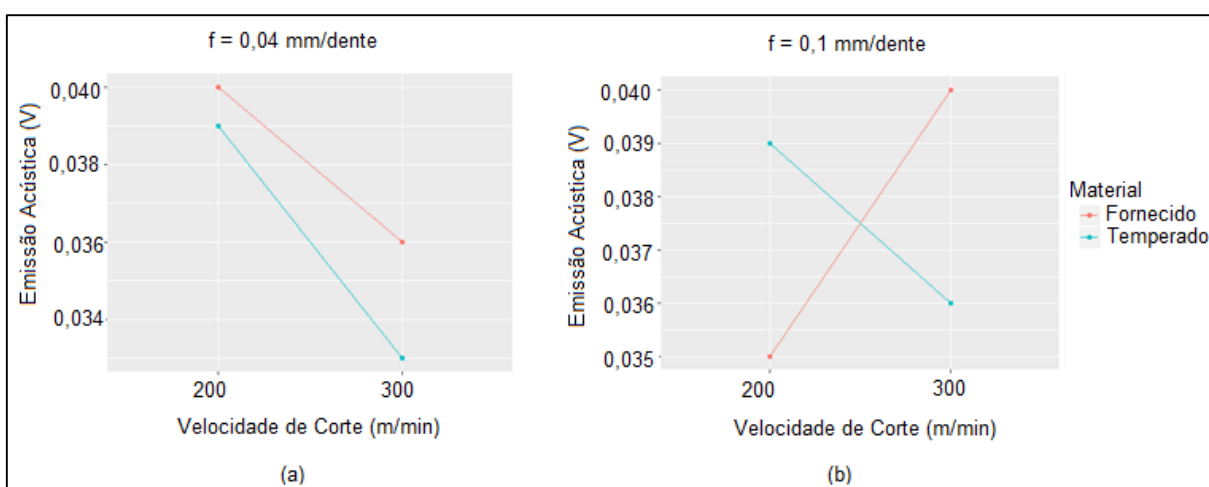
5.3.5 Emissão Acústica

O comportamento da emissão acústica em função das velocidades de corte e do avanço está ilustrado, respectivamente, na Figura 98 e 99. Para esta variável de saída, os resultados da análise realizada mostraram que apenas na V_c de 300 m/min houve diferença significativa entre a E. A. produzida no fresamento do aço 4340 recozido com a produzida no fresamento deste aço na forma endurecida. No qual, na usinagem do material recozido, a E.A. foi maior.

Os resultados obtidos em cada nível testado foram:

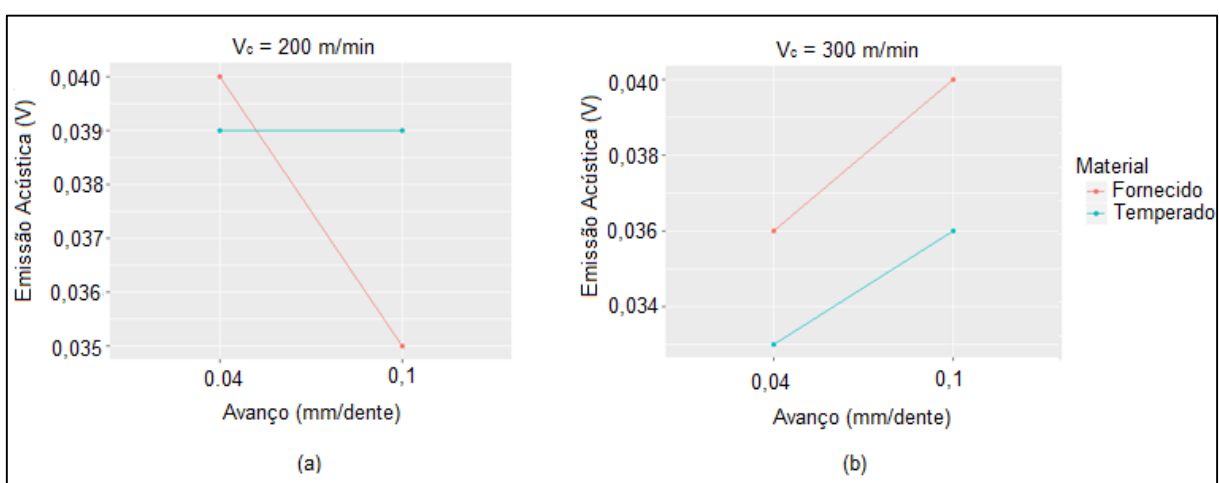
- Avanço de 0,04 mm/dente ($t_{9,1358} = 1,2186$; P-valor > 5%)
- Avanço de 0,1 mm/dente ($t_{8,7528} = 0,31518$; P-valor > 5%)
- V_c de 200 m/min ($t_{7,4786} = -0,762$; P-valor > 5%)
- V_c de 300 m/min ($t_{9,6421} = 2,3559$; P-valor < 5%)

Figura 98: Gráfico da Emissão Acústica em função das velocidades de corte, para cada material, com avanço de: (a) 0,04 mm/dente e (b) 0,1 mm/dente.



Fonte: Autoria Própria

Figura 99: Gráfico da Emissão Acústica em função do avanço, para cada material, com V_c de: (a) 200 m/min e (b) 300 m/min.



Fonte: Autoria Própria

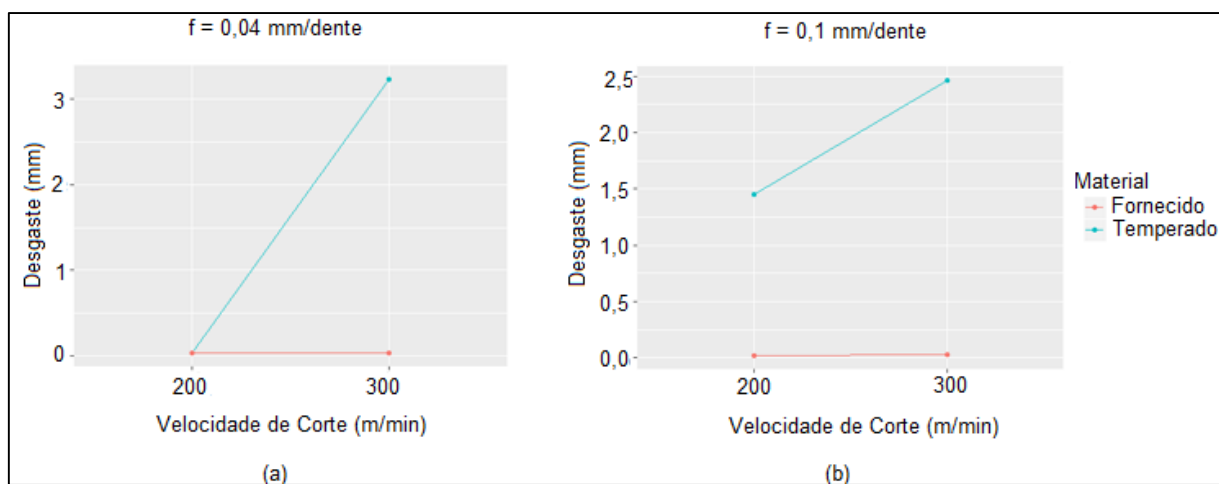
5.3.6 Desgaste da Ferramenta

Nas Figuras 100 e 101 estão ilustrados o comportamento do desgaste da ferramenta em função das velocidades de corte e em função do avanço para cada material usinado. No qual, de acordo com a análise estatística realizada, o desgaste diferiu significativamente apenas no avanço de 0,1 mm/dente e na V_c de 300 m/min, que foram os parâmetros que mostraram ser não-favoráveis para a usinagem do aço endurecido, pois os desgastes nestas condições foram superiores ao estipulado pela norma como critério para o fim da vida da ferramenta.

Os resultados obtidos em cada nível testado foram:

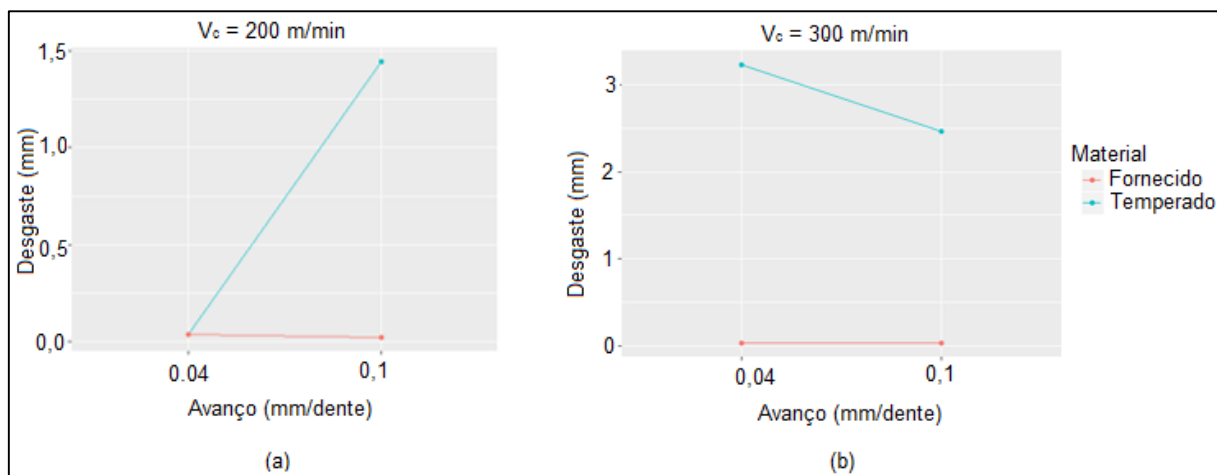
- Avanço de 0,04 mm/dente ($t_5 = -2,2365$; P-valor $> 5\%$)
- Avanço de 0,1 mm/dente ($t_{5,0019} = -8,3176$; P-valor $< 5\%$)
- V_c de 200 m/min ($t_{5,0014} = -2,2617$; P-valor $> 5\%$)
- V_c de 300 m/min ($t_{5,006} = -15,828$; P-valor $< 5\%$)

Figura 100: Gráfico do desgaste da ferramenta em função das velocidades de corte, para cada material, com avanço de: (a) 0,04 mm/dente e (b) 0,1 mm/dente.



Fonte: Autoria Própria

Figura 101: Gráfico do desgaste da ferramenta em função do avanço, para cada material, com V_c de: (a) 200 m/min e (b) 300 m/min.



Fonte: Autoria Própria

5.4 Comentários em geral

Em suma, no fresamento frontal, em processo de abertura de canal, do aço 4340 recozido, foram observados os seguintes comportamentos:

- Os parâmetros R_a e R_t obtiveram melhores resultados quando o material foi usinado em maior nível de velocidade (V_c de 400 m/min);
- A potência consumida aumentou conforme o aumento do avanço e da velocidade de corte;
- Os fatores analisados não interferiram significativamente na emissão acústica durante o processo;
- Em todas as condições analisadas, os desgastes das ferramentas verificados após o primeiro ciclo de usinagem, foram inferiores ao estabelecido pela norma (0,3 mm) como critério para o fim da vida da ferramenta;
- Na V_c de 400 m/min os cavacos formados começaram a ter características de um cavaco cisalhado, com presença de ligeiras lamelas; e,
- Foi possível encontrar equações que descreveram a potência consumida e a vibração produzida durante o processo em função do desgaste ocorrido na ferramenta.

Em relação ao fresamento do aço 4340 endurecido:

- A usinagem com uma V_c de 300 m/min, à seco, não se mostrou favorável para a rugosidade média e total da peça, pois, com o aumento da V_c ocorreu também o aumento da rugosidade. Hassanpour *et al.* (2016), obtiveram um resultado contrário a este, ao analisarem a rugosidade em diferentes níveis de V_c (50, 100 e 150 m/min). No entanto, além de eles utilizarem a técnica da MQF para fresar o aço 4340, este material possuía uma dureza menor (450 ± 5 HV) do que o aço em estudo. Como estes fatores contribuem para um menor atrito entre a ferramenta e a peça, é normal que os resultados sejam diferentes.
- A potência consumida durante o fresamento nos níveis de V_c iguais a 200 e 250 m/min, ocorreu conforme o esperado, pois, a potência aumentou conforme o avanço;
- O aumento da velocidade proporcionou menores E. A. durante o processo;
- Os desgastes das ferramentas de corte, ao se utilizar uma V_c de 300 m/min para usinar o aço endurecido, foram muito acentuados e bem acima do estabelecido pela norma. Isso ocorreu provavelmente por causa do aumento da velocidade de corte, porque, de acordo com Seco Tools AB (2016), a V_c possui grande influência sobre os fenômenos de desgaste, visto que esta grandeza está relacionada diretamente com a temperatura e, conseqüentemente, com a quantidade de calor gerada durante o fresamento.
- Os cavacos formados durante o processo apresentaram ser mais cisalhados conforme o aumento do avanço; e,
- A potência consumida, a vibração produzida e a E. A. apresentaram correlações com o desgaste da ferramenta, o que demonstra que o desgaste influenciou nestas variáveis de saída.

Por fim, ao comparar os dois materiais, foi observado que:

- O endurecimento do aço 4340 contribuiu para uma menor rugosidade (R_a e R_t). Além disso, no fresamento frontal do aço 4340 endurecido, os resultados do parâmetro R_a foram, na maioria das vezes, menor do que o esperado em um processo de retificação. Banin Jr (2009), ao analisar as influências dos parâmetros de corte (V_c , avanço e profundidade de corte) sobre a integridade superficial do aço

SAE 4340 endurecido (52 HRC), no fresamento de topo, também verificou os resultados de rugosidade obtidos foram similares aos de operações de usinagem fina.

- A potência consumida não diferiu entre os processos;
- Na usinagem de ambos os materiais, as menores vibrações foram produzidas em um nível intermediário de V_c , provavelmente porque neste nível a ferramenta ficou mais estável. Para Stemmer (1993), com o aumento da V_c , as vibrações deveriam diminuir. No entanto, os maiores níveis de velocidade testados para cada material podem ter sido acima do ideal para o equilíbrio entre energia em que a ferramenta/peça estava sujeita e o amortecimento da mesma;
- Ao comparar a vibração produzida nos dois processos, observa-se que quando foi utilizado uma V_c de 300 m/min e avanço de 0,04 mm/dente, as vibrações produzidas durante a usinagem do aço recozido foram, provavelmente devido a menor dureza do material;
- Em relação a E.A., houve diferença significativa apenas na V_c de 300 m/min; e,
- Os desgastes provocados nas ferramentas de corte utilizadas no fresamento do aço endurecido, foram bem superiores aos desgastes analisados nas ferramentas que usinaram o aço recozido. Isso ocorreu, devido a diferença de dureza que há entre os dois materiais em estudo. Pois, segundo a Seco Tools AB (2016), a dureza do material da peça é um dos fatores que contribuem para a variabilidade da vida de uma ferramenta de corte.

6 CONCLUSÃO

Com as análises dos resultados obtidos no fresamento frontal a seco do aço 4340, utilizando ferramentas de metal duro revestidas com TiAlN e TiN, é possível concluir em relação ao aço recozido que os maiores níveis de V_c proporcionaram melhores rugosidades (R_a e R_t) para a peça usinada. Entretanto, o aumento desta velocidade não foi favorável para a potência consumida durante o processo. Em relação a E.A. e ao desgaste, as diferentes condições de usinagem analisadas não interferiram significativamente nos resultados obtidos.

Para o processo realizado com o aço temperado e revenido, conclui-se que o endurecimento do aço 4340 contribuiu para uma menor rugosidade (R_a e R_t). Comprovando, através dos valores obtidos para o parâmetro R_a no fresamento com uma V_c de 200 m/min e avanço de 0,04 mm/dente, que a usinagem do aço endurecido possibilita a eliminação do processo de retificação na maioria das aplicações. Em relação as V_c analisadas, o nível de 300 m/min não foi favorável para o fresamento deste material, pois ele afetou a rugosidade da peça, proporcionou maior desgaste das ferramentas de corte, além do que, nesta velocidade, a potência consumida foi maior.

Os desgastes das ferramentas de corte utilizadas influenciaram nas variáveis de saída do processo, com exceção da E.A. no fresamento do aço recozido. No qual, as melhores correlações apresentadas foram na usinagem do aço endurecido. Portanto, neste processo, o desgaste teve maior influência, e, conseqüentemente, as equações obtidas foram mais precisas.

E por fim, os cavacos formados na usinagem do aço recozido foram contínuos, com formação de ligeiras lamelas quando se utilizou uma V_c de 400 m/min. Já no caso do fresamento do aço endurecido, o aumento do avanço proporcionou a formação de cavacos mais cisalhados.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 87**: Aço carbono e ligados para construção mecânica - Designação e composição química. Rio de Janeiro, 1996
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12545**: Conceitos da técnica de usinagem - Forças, energia, trabalho e potências - Terminologia. Rio de Janeiro, 1991
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 4287**: Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade. Rio de Janeiro, 2002
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 4288**: Especificações geométricas de produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Regras e procedimentos para avaliação de rugosidade. Rio de Janeiro, 2008
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6175**: Usinagem- Processos mecânicos. Rio de Janeiro, 2015
- ÀVILA, R. F. ABRÃO, A. M. The effect of cutting fluids on the machining of hardened AISI 4340 steel. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 119, p. 21–26, 2001.
- BANIN JR, J. R. ANALISE DE TENSÕES RESIDUAIS, INTEGRIDADE SUPERFICIAL E FORÇAS DE USINAGEM NO FRESAMENTO DE TOPO DE AÇO SAE 4340 ENDURECIDO. 2009. 115 f. **Dissertação** (Mestrado em Materiais e Processos) – Centro Universitário da FEI de São Bernardo do Campo, 2009.
- BHATTACHARYA, S. et al. Microstructural evolution of AISI 4340 steel during Direct Metal Deposition process. **Materials Science and Engineering A**, v. 528, n. 6, p. 2309–2318, 2011.
- CALLISTER JR, W D; RETHWISCH, D. G. Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora SA (LTC), 8ª edição, 2013. 817p.
- CARPINETTI, L. C. R.; GONÇALVES FILHO, E. V.; PORTO, A. J. V.; JASINEVICIUS, R. G. **Rugosidade Superficial**: Conceitos e Princípios de Medição. São Carlos: Apostila, pp. 51, Seção de Publicações da EESC-USP, 1996.
- CATAPAN, M. F. **Apostila de desenho técnico 1**: III parte. Paraná: UFPR, 2013. 42 p. Apostila. Disponível em: <
https://docs.google.com/viewer?url=http://www.exatas.ufpr.br/portal/degraf_marcio/wp-content/uploads/sites/13/2014/10/Apostila-Desenho-Mecanico-1-III-Parte-Copy.pdf>. Acesso em: 25 mai. 2016.
- CHAKRABORTY, P. et al. Modeling tool wear progression by using mixed effects modeling technique when end-milling AISI 4340 steel. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 205, n. 1-3, p. 190–202, 2008.
- CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica**: Materiais de Construção Mecânica. Vol III, 2ª Ed., McGraw-Hill, 1986.
- CIMM. **Variáveis e parâmetros de corte**. Disponível em:

<http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/4861-variaveis-e-parametros-de-corte#.V21C6PkrLIV>. Acesso em: 30 mar. 2016.

DAVIM, J. P. (Ed). *Tribology in manufacturing technology*. Springer, 2012.

DE VOS, P; STÅHL, J-E. **Tool deterioration**: Best Practices, Seco Tools AB: versão 1.2. Fagersta, Sweden, 2014

DESHPANDE, N.; FOFANA, M. S. Nonlinear regenerative chatter in turning. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 17, n. 1-2, p. 107–112, 2001.

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

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 8. ed. São Paulo: Art Liber, 2013. 272 p.

DUARTE COSTA, D. M. et al. A normal boundary intersection with multivariate mean square error approach for dry end milling process optimization of the AISI 1045 steel. **Journal of Cleaner Production**, 2015.

EL RAYES, M. M.; EL-DANAF, E. A.; ALMAJID, A. A. Ultrasonic characterization of heat-treatment effects on SAE-1040 and -4340 steels. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 216, p. 188–198, 2015.

FAVORIT. **Placas SAE 4340**. Disponível em: <<http://www.favorit.com.br/produtos/placas-1045-4140-8620-8640-4340/placas-sae-4340>> Acesso em: 23 fev. 2016.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 16ª reimpressão, p. 751, 2013.

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

GGD METALS. **Catálogo Técnico: Aços e Metais**. Disponível em: <<http://www.ggdmetals.com.br/wp-content/uploads/2016/01/Construcao-ecanica.pdf?x99575>>. Acesso em: 11 dez. 2016.

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

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

HOSSEINI, A.; KISHAWY, H. A.; MOETAKEF-IMANI, B. Effects of Broaching Operations on the Integrity of Machined Surface. **Procedia CIRP**, v. 45, p. 163–166, 2016.

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

KALPAKJIAN, S; SCHMID, S. **Manufacturing, Engineering and Technology**. Editora: Pearson Education, 2009.

KANT, G. SANGWAN, K. S. Prediction and optimization of machining parameters for minimizing power consumption and surface roughness in machining. **Journal of Cleaner Production**, v. 83, p. 151 – 164, 2014.

KANZLER, G. **Cobertura em pastilhas intercambiáveis**. Disponível em: <http://usinagemvirtual.blogspot.com.br/2009/09/cobertura-em-pastilhas-intercambiaveis.html>. Acesso em: 20 de novembro de 2016.

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**, v. 58, p. 73–86, 2014.

LI, X. A brief review: Acoustic emission method for tool wear monitoring during turning. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 42, n. 2, p. 157–165, 2002.

LIMA, F. E; CORRÊA, M. **Usinagem de materiais endurecidos**. Revista tecnologia,Fortaleza-CE, v. 23, n. 1, p. 38-44, 2002.

MACHADO, A. R; ABRÃO, A. M; COELHO, R. T; DA SILVA, M. B. **Teoria da usinagem dos materiais**. São Paulo: Editora Blucher, p.371, 2009

MAIA, L. H. A; ABRAO, A. M; VASCONCELOS, W. L; SALES, W. F; MACHADO, A. R. A new approach for detection of wear mechanisms and determination of tool life in turning using acoustic emission. **Tribology International**, v. 92, p. 519–532, 2015.

MEENA, A.; EL MANSORI, M. Study of dry and minimum quantity lubrication drilling of novel austempered ductile iron (ADI) for automotive applications. **Wear**, v. 271, n. 9-10, p. 2412–2416, 2011.

MORADI, H; VOSSOUGH, G; BEHZAD, M; MOVAHHEDY, M. R. Vibration absorber design to suppress regenerative chatter in nonlinear milling process: Application for machining of cantilever plates. **Applied Mathematical Modelling**, v. 39, n. 2, p. 600–620, 2015.

PIRATELLI FILHO, A., **Rugosidade Superficial**, 3º Seminário de Metrologia da Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil, 2011.

ROMEIRO, S. B. B. **Química na Siderurgia**. Porto Alegre. UFRGS, 1977.

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

SAHU, S.; CHOUDHURY, B. B. Optimization of Surface Roughness Using Taguchi Methodology & Prediction of Tool Wear in Hard Turning Tools. **Materials Today: Proceedings**, v. 2, n. 4-5, p. 2615–2623, 2015.

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

SHARMA, V.; PANDEY, P. M. Optimization of machining and vibration parameters for residual stresses minimization in ultrasonic assisted turning of 4340 hardened steel. **Ultrasonics**, v. 70, p. 172–182, 2016.

- SILVA, L.R. ; BIANCHI, E.C. ; CATAI, R.E. ; FUSSE, R.Y. ; FRANÇA, T.V. ; AGUIAR, P.R.. Study on the behavior of the minimum quantity lubricant - MQL technique under different lubricating and cooling conditions when grinding ABNT 4340 steel. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 27, n. 2, p. 192–199, jun. 2005.
- SMITH, W. F.; HASHEMI, J. **Fundamentos de engenharia e ciência dos materiais**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 734 p, 2012.
- SIMUNOVIC, K.; SIMUNOVIC, G.; SARIC, T. Single and multiple goal optimization of structural steel face milling process considering different methods of cooling / lubricating. **Journal of Cleaner Production**. v. 94, p. 1–9, 2015.
- SONG, Q; JU, G; LIU, Z; AI, X. Subdivision of chatter-free regions and optimal cutting parameters based on vibration frequencies for peripheral milling process. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 83, p. 172–183, 2014.
- SREEJITH, P.S.; NGOI, B. K. A. “Dry machining: Machining of the future”. **Journal of Materials Processing Technology**, v.101, p. 287-291, 2000.
- STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte I**. 3ª Edição, Florianópolis: editora da UFSC, 1993, 249 p.
- STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte II**. 3ª Edição, Florianópolis: editora da UFSC, 2005, 314 p.
- SURESH, R.; BASAVARAJAPPA, S.; SAMUEL, G. L. Some studies on hard turning of AISI 4340 steel using multilayer coated carbide tool. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, v. 45, n. 7, p. 1872–1884, 2012.
- TRENT, E.M; WRIGHT, P. K. “**Metal Cutting**”, 2ª ed., Butterworth-Heinemann, Woburn, USA, 2000.
- VIKRAM, K. A.; RATNAM, C.; NARAYANA, K. S. Vibration Diagnosis and Prognostics of Turn-milling Operations using HSS and Carbide End Mill Cutters. **Procedia Technology**, v. 23, p. 217–224, 2016.
- WEINERT, K; INASAKI, I; SUTHERLAND, J.W; WAKABAYASHI, T. Dry Machining and Minimum Quantity Lubrication. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 53, n. 2, p. 511–537, 2004.
- WEREMCZUK, A.; RUSINEK, R.; WARMINSKI, J. The Concept of Active Elimination of Vibrations in Milling Process. **Procedia CIRP**, v. 31, p. 82–87, 2015.
- WOO, W. S.; LEE, C. M. A study of the machining characteristics of AISI 1045 steel and Inconel 718 with a cylindrical shape in laser-assisted milling. **Applied Thermal Engineering**, v. 91, p. 33–42, 2015.

APÊNDICE A

Tabela A1 - Aço 4340 Recozido: Valores das médias e desvios padrões para a R_a nas diferentes condições de usinagem do aço recozido.

Fator		Número de amostras	Rugosidade média (μm)	Desvio padrão (σ_2)	Erro Padrão (σ_n)
Vc	F				
200	0,1	3	0,363	0,0399	0,0231
300	0,04	3	0,808	0,0778	0,0449
200	0,04	3	0,756	0,2483	0,1434
300	0,1	3	0,306	0,0833	0,0481
400	0,04	3	0,162	0,0391	0,0226
400	0,1	3	0,219	0,0868	0,0501
Análise de variância					
ANOVA	GL	SQ	QM	F valor	Pr (>F)
Fatores					
Velocidade de corte	2	-	-	-	-
Avanço	1	-	-	-	-
Velocidade*Avanço	2	-	-	10,83	0.00040638*
Resíduos	12	-			
Total	17	-			

GL: graus de liberdade, SQ: soma dos quadrados, QM: quadrado médio. F- e P-valores são expressos com níveis de significância *, $P < 0,05$. Intervalos de confiança utilizados de 95%.

Tabela A2 - Aço 4340 Endurecido: Valores das médias e desvios padrões para a rugosidade R_a .

Fator		Número de amostras	Rugosidade média (μm)	Desvio padrão (σ_2)	Erro Padrão (σ_n)
Vc	F				
200	0,1	3	0,140	0,01426729	0,008237224
200	0,04	3	0,142	0,052028838	0,030038864
300	0,1	3	0,297	0,033	0,019052559
300	0,04	3	0,293	0,151320851	0,087365134
250	0,1	3	0,146	0,00212132	0,001224745
250	0,04	3	0,111	0,006244998	0,003605551
Análise de Variância					
ANOVA	GL	SQ	QM	F valor	Pr (>F)
Fatores					
Velocidade de corte	2	-	-	-	-
Avanço	1	-	-	-	-
Velocidade*Avanço	2	-	-	5.303	0,008423*
Resíduos	12	-			
Total	17	-			

GL: graus de liberdade, SQ: soma dos quadrados, QM: quadrado médio. F- e P-valores são expressos com níveis de significância *, $P < 0,05$. Intervalos de confiança utilizados de 95%.

APÊNDICE B

Tabela B1 - Aço 4340 Recozido: Valores das médias e desvios padrões para a R_t nas diferentes condições de usinagem do aço recozido.

Fator		Número de amostras	Média da R_t (μm)	Desvio padrão (σ_2)	Erro Padrão (σ_n)
Vc	F				
200	0,1	3	3,278	0,6731	0,3886
300	0,04	3	7,699	1,0149	0,5860
200	0,04	3	6,016	2,1076	1,2168
300	0,1	3	3,107	0,9302	0,5370
400	0,04	3	2,064	0,4236	0,2446
400	0,1	3	2,173	0,7773	0,4488
Análise de variância					
ANOVA	GL	SQ	QM	F valor	Pr (>F)
Fatores					
Velocidade de corte	2	-	-	-	-
Avanço	1	-	-	-	-
Velocidade*Avanço	2	-	-	8,281	0.001369*
Resíduos	12	-			
Total	17	-			

GL: graus de liberdade, SQ: soma dos quadrados, QM: quadrado médio. F- e P-valores são expressos com níveis de significância *, $P < 0,05$. Intervalos de confiança utilizados de 95%.

Tabela B2 - Aço 4340 Endurecido: Valores das médias e desvios padrões para a R_t .

Fator		Número de amostras	Média da R_t (μm)	Desvio padrão (σ_2)	Erro Padrão (σ_n)
Vc	F				
200	0,1	3	1,268	0,4548	0,2626
200	0,04	3	1,013	0,1040	0,0600
300	0,1	3	10,996	10,0265	5,7888
300	0,04	3	3,519	0,3462	0,1999
250	0,1	3	1,599	0,4787	0,2764
250	0,04	3	1,276	0,2644	0,1526
Análise de Variância					
ANOVA	GL	SQ	QM	F valor	Pr (>F)
Fatores					
Velocidade de corte	2	24,639	12,319	12,928	0,00101*
Avanço	1	0,557	0,557	0,584	0,45951
Velocidade*Avanço	2	0,039	0,019	0,020	0,97980
Resíduos	12	11,435	0,953		
Total	17	36,67			

GL: graus de liberdade, SQ: soma dos quadrados, QM: quadrado médio. F- e P-valores são expressos com níveis de significância *, $P < 0,05$. Intervalos de confiança utilizados de 95%.

APÊNDICE C

Tabela C1 - Valores das médias e desvios padrões para a potência nas diferentes condições de usinagem do aço recozido.

Fator		Número de amostras	Média da potência (W)	Desvio padrão (σ_2)	Erro Padrão (σ_n)
Vc	F				
200	0,1	3	247,107	2,72	1,57
300	0,04	3	207,959	5,63	3,25
200	0,04	3	167,495	6,92	3,99
300	0,1	3	429,395	14,60	8,43
400	0,04	3	336,694	40,62	23,45
400	0,1	3	493,060	28,07	16,21

Análise de variância					
ANOVA	GL	SQ	QM	F valor	Pr (>F)
Fatores					
Velocidade de corte	2	-	-	-	-
Avanço	1	-	-	-	-
Velocidade*Avanço	2	-	-	67,77	1.405e-08*
Resíduos	12	-			
Total	17	-			

GL: graus de liberdade, SQ: soma dos quadrados, QM: quadrado médio. F- e P-valores são expressos com níveis de significância *, $P < 0,05$. Intervalos de confiança utilizados de 95%.

Tabela C2 - Valores das médias e desvios padrões para a R_t nas diferentes condições de usinagem do aço endurecido

Fator		Número de amostras	Média da potência (W)	Desvio padrão (σ_2)	Erro Padrão (σ_n)
Vc	F				
200	0,04	3	151,695	0,965036279	0,557163956
200	0,1	3	383,769	5,629378296	3,250123075
300	0,04	3	472,448	70,44495245	40,67141226
300	0,1	3	346,907	5,629378296	3,250123075
250	0,1	3	314,498	35,75439973	20,64281231
250	0,04	3	164,720	12,66985793	7,314945887

Análise de Variância					
ANOVA	GL	SQ	QM	F valor	Pr (>F)
Fatores					
Velocidade de corte	2	-	-	-	-
Avanço	1	-	-	-	-
Velocidade*Avanço	2	-	-	43,37	2,844e-07*
Resíduos	12	-			
Total	17	-			

GL: graus de liberdade, SQ: soma dos quadrados, QM: quadrado médio. F- e P-valores são expressos com níveis de significância *, $P < 0,05$. Intervalos de confiança utilizados de 95%.

APÊNDICE D

Tabela D1 - Aço 4340 Recozido: Valores para a vibração nas diferentes condições de usinagem do aço recozido.

Fator		Número de amostras	Vibração (mm/s)	Desvio padrão (σ^2)	Erro Padrão (σ)
Vc	F				
200	0,1	3	30,448	0,05	0,03
300	0,04	3	29,352	0,04	0,02
200	0,04	3	29,868	0,18	0,10
300	0,1	3	29,392	0,07	0,04
400	0,04	3	31,483	0,38	0,22
400	0,1	3	30,615	0,14	0,08
Análise de variância					
ANOVA	GL	SQ	QM	F valor	Pr (>F)
Fatores					
Velocidade de corte	2	-	-	-	-
Avanço	1	-	-	-	-
Velocidade*Avanço	2	-	-	59.46	4,755e-08*
Resíduos	12	-			
Total	17	-			

GL: graus de liberdade, SQ: soma dos quadrados, QM: quadrado médio. F- e P-valores são expressos com níveis de significância *, $P < 0,05$. Intervalos de confiança utilizados de 95%.

Tabela D2 - Aço 4340 Endurecido: Valores das médias e desvios padrões para a vibração nas diferentes condições de usinagem do aço endurecido

Fator		Número de amostras	Vibração mm/s	Desvio padrão (σ^2)	Erro Padrão (σ)
Vc	F				
200	0,04	3	29,771	0,042380158	0,024468196
200	0,1	3	31,979	0,012028131	0,006944444
300	0,04	3	30,540	0,362057221	0,209033834
300	0,1	3	29,587	0,012028131	0,006944444
250	0,1	3	29,798	0,10286733	0,059390481
250	0,04	3	29,475	0,073584902	0,042484263
ANOVA	GL	SQ	QM	F valor	Pr (>F)
Fatores					
Velocidade de corte	2	-	-	-	-
Avanço	1	-	-	-	-
Velocidade*Avanço	2	-	-	111,2	1.267e-09*
Resíduos	12	-			
Total	17	-			

GL: graus de liberdade, SQ: soma dos quadrados, QM: quadrado médio. F- e P-valores são expressos com níveis de significância *, $P < 0,05$. Intervalos de confiança utilizados de 95%.

APÊNDICE E

Tabela E1 - Aço 4340 Recozido: Valores das médias e desvios padrões para a emissão acústica nas diferentes condições de usinagem do aço recozido.

Fator		Número de amostras	Média da EA (V)	Desvio padrão (σ^2)	Erro Padrão (σ_n)
Vc	F				
200	0,1	3	0,035	0,0006	0,00036
300	0,04	3	0,036	0,0006	0,00035
200	0,04	3	0,040	0,0009	0,00052
300	0,1	3	0,040	0,0021	0,00123
400	0,04	3	0,039	0,0023	0,00130
400	0,1	3	0,039	0,0006	0,00036
Análise de Variância					
ANOVA	GL	SQ	QM	F valor	Pr (>F)
Fatores					
Velocidade de corte	2	0,3426	0,1713	2,122	0,1626
Avanço	1	0,4544	0,4544	5,628	0,0353*
Velocidade*Avanço	2	0,0663	0,0332	0,411	0,6721
Resíduos	12	0,9690	0,0808		
Total	17				

GL: graus de liberdade, SQ: soma dos quadrados, QM: quadrado médio. F- e P-valores são expressos com níveis de significância *, $P < 0,05$. Intervalos de confiança utilizados de 95%.

Tabela E2 - Aço 4340 Endurecido: Valores das médias e desvios padrões para a EA.

Fator		Número de amostras	Média da EA (V)	Desvio padrão (σ^2)	Erro Padrão (σ_n)
Vc	F				
200	0,04	3	0,039	0,00011547	6,66667E-05
200	0,1	3	0,039	0,001589899	0,000917928
300	0,04	3	0,033	0,00177365	0,001024017
300	0,1	3	0,036	0,001589899	0,000917928
250	0,1	3	0,038	0,001500771	0,000866471
250	0,04	3	0,036	0,000609659	0,000351987
Análise de Variância					
ANOVA	GL	SQ	QM	F valor	Pr (>F)
Fatores					
Velocidade de corte	2	-	-	-	-
Avanço	1	-	-	-	-
Velocidade*Avanço	2	-	-	6,474	0,003865*
Resíduos	12	-			
Total	17	-			

GL: graus de liberdade, SQ: soma dos quadrados, QM: quadrado médio. F- e P-valores são expressos com níveis de significância *, $P < 0,05$. Intervalos de confiança utilizados de 95%.

APÊNDICE F

Tabela F1 - Aço 4340 Recozido: Valores das médias e desvios padrões para o desgaste da ferramenta.

Fator		Número de amostras	Desgaste médio (mm)	Desvio padrão (σ_2)	Erro Padrão (σ_n)
Vc	F				
200	0,1	3	0,0167	0,00047	0,000272
300	0,04	3	0,0327	0,00309	0,001785
200	0,04	3	0,0330	0,00216	0,001247
300	0,1	3	0,0303	0,00262	0,001515
400	0,04	3	0,0323	0,00262	0,001515
400	0,1	3	0,0295	0,00250	0,001443
Análise de Variância					
ANOVA	GL	SQ	QM	F valor	Pr (>F)
Fatores					
Velocidade de corte	2	-	-	-	-
Avanço	1	-	-	-	-
Velocidade*Avanço	2	-	-	13,22	0,0002427*
Resíduos	12	-			
Total	17	-			

GL: graus de liberdade, SQ: soma dos quadrados, QM: quadrado médio. F- e P-valores são expressos com níveis de significância *, $P < 0,05$. Intervalos de confiança utilizados de 95%.

Tabela F2 - Aço 4340 endurecido: Valores das médias e desvios padrões para o desgaste da ferramenta.

Fator		Número de amostras	Desgaste médio (mm)	Desvio padrão (σ_2)	Erro Padrão (σ_n)
Vc	F				
200	0,04	3	0,0337	0,00579	0,003344
200	0,1	3	1,4467	0,04383	0,025304
300	0,04	3	3,2283	0,05570	0,032160
300	0,1	3	2,4633	0,14290	0,082506
250	0,1	3	0,0400	0,00572	0,003300
250	0,04	3	0,0340	0,00589	0,003399
Análise de Variância					
ANOVA	GL	SQ	QM	F valor	Pr (>F)
Fatores					
Velocidade de corte	2	-	-	-	-
Avanço	1	-	-	-	-
Velocidade*Avanço	2	-	-	924,1	4,416e-15*
Resíduos	12	-			
Total	17	-			

GL: graus de liberdade, SQ: soma dos quadrados, QM: quadrado médio. F- e P-valores são expressos com níveis de significância *, $P < 0,05$. Intervalos de confiança utilizados de 95%.