

IAN GUINÉ DE SOUZA

Processo de torneamento do aço ABNT 4340 utilizando ferramenta de metal duro com revestimento de $Ti(C,N)+Al_2O_3+TiN$

Guaratinguetá - SP
2017

Ian Guiné de Souza

Processo de torneamento do aço ABNT 4340 utilizando ferramenta de metal duro com revestimento de $Ti(C,N)+Al_2O_3+TiN$

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

Orientador: Prof. Dr. Manoel Cleber de Sampaio Alves
Coorientadores: Msc. Marcel Yuzo Kondo e Msc. Cleverson Pinheiro.

Guaratinguetá - SP
2017

S729p Souza, Ian Guiné de
Processo de torneamento do aço ABNT 4340 utilizando ferramenta de metal duro com revestimento de Ti(C,N)+Al₂O₃+ TiN / Ian Guiné de Souza – Guaratinguetá, 2017.
67 f. : il.
Bibliografia: f. 63-65

Trabalho de Graduação em Engenharia de Materiais – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2017.
Orientador: Prof. Dr. Manoel Cleber de Sampaio Alves
Coorientador: Msc. Marcel Yuzo Kondo

1. Usinagem. 2. Aço de alta resistência. 3. Metais – tratamento térmico.
I. Título

CDU 621.9



Luciana Máximo

Bibliotecária/CRB-8 3595

IAN GUINÉ DE SOUZA


ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
“IAN GUINÉ DE SOUZA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS”

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM NOME DO CURSO


Prof. Dr. Miguel Angel Ramirez Gil
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. Manoel Cléber de Sampaio Alves
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. José Vitor Candido de Sousa
UNESP-FEG


Msc. Marcelo Antunes de Paula
Membro Externo

Dezembro de 2017

DADOS CURRICULARES

IAN GUINÉ DE SOUZA

NASCIMENTO 26.03.1993 – São Paulo / SP

FILIAÇÃO Nivaldo Tristão de Souza
Débora Ferreira Guiné

2013/2017 Formação acadêmica (Engenharia de Materiais)
Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá – UNESP.

Dedico este trabalho de modo especial, à minha família, à República Taj Mahal, amigos e professores que fizeram parte desta conquista.

“Sabe o que é mais caro na engenharia? O desconhecimento.”

Luiz Anibal de Oliveira Santos

RESUMO

Uma opção para reduzir os custos de produção, aumentar a produtividade juntamente com a consciência ecológica tem sido a usinagem de materiais sem a utilização de lubrificantes, que encarecem o processo e prejudicam o meio ambiente. A engenharia tem tomado algumas medidas com relação a esse problema, aprimorando o sistema máquina-ferramenta onde ferramentas modernas possuem revestimentos capazes de obter boa qualidade superficial do material, muitas vezes descartando até o uso de lubrificantes. O trabalho realizado busca novos meios de realizar o processo de torneamento do aço ABNT 4340 tanto recozido quanto endurecido (temperado e revenido) utilizando ferramenta de metal duro com revestimento CVD de $Ti(C,N)+Al_2O_3+TiN$ na condição à seco. Este trabalho tem como objetivo viabilizar a usinagem do aço através da análise de variáveis como: rugosidade superficial, potência consumida, vibração, emissão acústica, desgaste da ferramenta e formas e tipos de cavacos gerados em diferentes condições de usinagem. Os ensaios para os dois materiais foram realizados no Centro de Usinagem CNC, com profundidade de corte (a_p) definida em 0,25mm e variação dos parâmetros velocidade de corte (V_c) de 150 m/min e 200 m/min e avanço (f) de 0,1 mm/rot e 0,2 mm/rot. Com a análise dos resultados obtidos no torneamento do aço ABNT 4340, conclui-se que os menores valores de rugosidade R_a e R_t das peças usinadas ocorreram no material endurecido, com V_c de 150 m/min e avanço de 0,1 mm/rot. Observando as variáveis de saída de ambos os materiais nota-se uma interação dos fatores $V_c \times f$, que interferem diretamente nos resultados de cada parâmetro.

PALAVRAS-CHAVE: Usinagem.aço endurecido.aço recozido.revestimento CVD.rugosidade.potência de corte.emissão acústica.vibração.desgaste de flanco.

ABSTRACT

One option to reduce production costs, increase productivity along with ecological awareness has been the machining of materials without the use of lubricants, which make the process more expensive and harm the environment. Engineering has taken some steps with regard to this problem by improving the machine tool system where modern tools have coatings capable of obtaining good surface quality of the material, often discarding even the use of lubricants. The work carried out looked for new ways of performing the turning process of the annealed and hardened (tempered and tempered) SAE 4340 steel using carbide tool with CVD $\text{Ti}(\text{C},\text{N})+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiN}$ coating in dry condition. The objective of this work is to enable the machining of steel through the analysis of variables such as: surface roughness, power consumption, vibration, acoustic emission, tool wear and types and types of chips generated under different machining conditions. The tests for the two materials were performed at the CNC Machining Center, with cut depth (a_p) defined at 0.25mm and variation of the cutting speed (V_c) parameters of 150 m/min and 200 m/min and advance (f) of 0.1 mm/rot and 0.2 mm/rot. With the analysis of the results obtained in SAE 4340 steel turning, it was concluded that the lowest roughness values R_a and R_t of the machined parts occurred in the hardened material, with V_c of 150 m/min and advance of 0.1 mm/rot. Observing the output variables of both materials, an interaction of the factors $V_c \times f$, which interfere directly in the results.

KEYWORDS: Machining.hardened steel.annealed steel.CVD coating.roughness.shear power.acoustic emission.vibration.flank wear.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Representação dos movimentos no processo de torneamento	23
Figura 2: Dimensões e especificações da ferramenta de corte	26
Figura 3: Valores de usinagem da ferramenta T-Max®P para ferros fundidos	29
Figura 4: Rugosidade média R_a	31
Figura 5: Rugosidade total R_t	31
Figura 6: Características que interferem a vibração	33
Figura 7: Formas de cavaco.....	35
Figura 8: Torno Mecânico (Romi GL 240M).....	37
Figura 9: Sensores de medição	37
Figura 10: Rugosímetro Mahr®	37
Figura 11: Estereoscópio Mahr®.....	38
Figura 12: Microscópio óptico Zeiss®	38
Figura 13: Peça recozida.....	39
Figura 14: Peça endurecida.....	39
Figura 15: Ferramentas de corte	39
Figura 16-23: Cavacos obtidos do aço ABNT 4340 recozido.....	51
Figura 24-31: Cavacos obtidos do aço ABNT 4340 endurecido.....	52
Figura 32-39: Desgastes da ferramenta de corte obtidos na usinagem do aço ABNT 4340 recozido	54
Figura 40-47: Desgastes da ferramenta de corte obtidos na usinagem do aço ABNT 4340 endurecido	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição química do aço ABNT 4340	21
Fluxograma 1: Condições de usinagem para os dois materiais	38
Tabela 2: Desgastes aço recozido	57
Tabela 3: Desgastes aço endurecido	57

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Rugosidade R_a em função da velocidade de corte (V_c) para diferentes avanços (f).....	41
Gráfico 2: Principais efeitos individuais para o parâmetro de R_a	42
Gráfico 3: Rugosidade R_t em função da velocidade de corte (V_c) para diferentes avanços (f).....	43
Gráfico 4: Principais efeitos individuais para o parâmetro de R_t	44
Gráfico 5: Valores máximos de emissão acústica (EA) em função da velocidade de corte (V_c) para diferentes avanços (f).....	45
Gráfico 6: Principais efeitos individuais para o parâmetro de máximos de EA.....	46
Gráfico 7: Valores máximos de potência de corte em função da velocidade de corte (V_c) para diferentes avanços (f).....	47
Gráfico 8: Principais efeitos individuais para o parâmetro de máximos de potência de corte.....	48
Gráfico 9: Valores máximos de vibração em função da velocidade de corte (V_c) para diferentes avanços (f).....	49
Gráfico 10: Principais efeitos individuais para o parâmetro de máximos de vibração.....	50
Gráfico 11: Interações Rugosidade R_a	58
Gráfico 12: Interações rugosidade R_t	58
Gráfico 13: Interações Máximos de Emissão Acústica.....	59
Gráfico 14: Interações Máximos de Potência.....	60
Gráfico 15: Interações Máximos de Vibração.....	61

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
SAE	Society of Automotive Engineers
CVD	Chemical Vapor Deposition
Ti(C,N)	Carbonitreto de Titânio
TiCN	Carbonitreto de Titânio
TiC	Carboneto de Titânio
Al ₂ O ₃	Óxido de Alumínio
TiN	Nitreto de Titânio
R _a	Rugosidade aritmética
R _t	Rugosidade total
EA	Emissão acústica
V _c	Velocidade de corte
f	Avanço
a _p	Profundidade de corte
C	Carbono
Si	Silício
Mn	Manganês
Mo	Molibdênio
Cr	Cromo
Ni	Níquel
HIP	Hot Isostatic Pressure

LISTA DE SÍMBOLOS

kgf/mm ²	Quilograma força por milímetro quadrado
m/min	Metro por minuto
mm/min	Milímetro por minuto
mm/rot	Milímetro por rotação
°C	Grau Celsius
mm	Milímetro
®	Marca registrada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
2	OBJETIVO.....	18
2.1	GERAL.....	18
2.2	ESPECÍFICOS.....	18
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
3.1	AÇO ABNT 4340.....	19
3.2	TRATAMENTO TÉRMICO EM AÇOS.....	19
3.2.1	AÇOS RECOZIDOS.....	20
3.2.2	AÇOS ENDURECIDOS.....	20
3.3	PROCESSO DE TORNEAMENTO.....	21
3.4	FERRAMENTA DE METAL DURO.....	23
3.4.1	CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES.....	23
3.4.2	REVESTIMENTO.....	24
3.4.3	FERRAMENTA T-MAX®P (TI(C,N)+AL ₂ O ₃ +TIN).....	26
3.5	VARIÁVEIS DE SAÍDA.....	27
3.5.1	RUGOSIDADE.....	28
3.5.1.1	RUGOSIDADE R _A	28
3.5.1.2	RUGOSIDADE R _T	29
3.5.2	EMISSÃO ACÚSTICA.....	29
3.5.3	POTÊNCIA DE CORTE.....	30
3.5.4	VIBRAÇÃO.....	31
3.5.5	ANÁLISE DO CAVACO.....	32
3.5.6	DESGASTES E AVARIAS DA FERRAMENTA.....	34
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	35

4.1	MÁQUINA E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS.....	35
4.2	PARÂMETROS DE USINAGEM.....	36
4.3	CORPOS DE PROVA.....	37
4.4	FERRAMENTA DE CORTE.....	37
4.5	SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS.....	38
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	39
5.1	RUGOSIDADE R_A	39
5.2	RUGOSIDADE R_T	40
5.3	MÁXIMOS DE EMISSÃO ACÚSTICA.....	42
5.4	MÁXIMOS DE POTÊNCIA DE CORTE.....	44
5.5	MÁXIMOS DE VIBRAÇÃO.....	46
5.6	TIPOS E FORMAS DE CAVACOS.....	48
5.7	DESGASTES DA FERRAMENTA.....	51
5.8	INTERAÇÕES ENTRE OS FATORES.....	55
5.8.1	RUGOSIDADE R_A	55
5.8.2	RUGOSIDADE R_T	56
5.8.3	MÁXIMOS DE EMISSÃO ACÚSTICA.....	57
5.8.4	MÁXIMOS DE POTÊNCIA DE CORTE.....	57
5.8.5	MÁXIMOS DE VIBRAÇÃO.....	58
6	CONCLUSÃO.....	60
	REFERÊNCIAS.....	61
	APÊNDICE A.....	64
	APÊNDICE B.....	64
	APÊNDICE C.....	64
	APÊNDICE D.....	65

APÊNDICE E	65
------------------	----

1 INTRODUÇÃO

O aço ABNT 4340, é um aço muito utilizado no setor industrial, passando por vários processos de fabricação por usinagem, dependendo do componente a ser fabricado. Esse material é muito aplicado na fabricação de virabrequins, trens de pouso de aviões, peças de tratores, eixos com elevada sollicitação mecânica e veículos em geral. O aço ABNT 4340 possui algumas características favoráveis que enaltecem o seu uso, como: elevada temperabilidade, boa forjabilidade e propriedades fundamentais em projetos aeronáuticos, como resistência mecânica, resistência à fadiga e boa tenacidade.

Atualmente os processos de usinagem vêm sendo aprimorados para redução de custos de sua produção, como a eliminação do processo de retificação e a eliminação de lubrificantes. Com isso, o desenvolvimento de máquinas mais rígidas e ferramentas de cortes que não necessitam de lubrificantes são cada vez mais importantes no ponto de vista econômico, produtivo e ambiental. Porém, a usinagem de materiais endurecidos e sem refrigeração provocam desgastes acelerados das ferramentas de corte e o controle dimensional fica prejudicado. Nestas condições de usinagem normalmente se utilizam ferramentas de nitreto cúbico de boro (CBN) ou ferramentas cerâmicas, por apresentarem alta dureza a quente principalmente. No entanto estas ferramentas podem custar até 80 vezes o preço das ferramentas de metal duro.

As ferramentas de metal duro revolucionaram o processo de torneamento nas indústrias metalúrgicas, porque permitiram maiores velocidades de corte e avanços no processo de usinagem quando comparadas com o aço rápido. As ferramentas de metal duro possuem algumas propriedades que aperfeiçoam a usinagem em metais, como: alta densidade e dureza, grande resistência à compressão, alta resistência ao desgaste, boa tenacidade e boas propriedades mecânicas e térmicas em altas temperaturas de trabalho. Além disso, o desenvolvimento de novos revestimentos para ferramentas de corte passaram a deixar as ferramentas de metal duro mais competitivas para usinagens extremas.

O processo de torneamento de aços em geral está cada vez em maior destaque, devido ao desenvolvimento de novos materiais para ferramentas de corte com elevada dureza e resistência ao desgaste em temperaturas elevadas. Com base nessas informações a pesquisa realizada tem o intuito de aperfeiçoar a usinagem do aço e avaliar as variáveis de saída do processo de torneamento, como a potência de corte, vibração durante o processo, emissão acústica, análise de tipos e formas de cavacos e rugosidade do material usinado.

Neste trabalho avaliou-se o processo de torneamento do aço ABNT 4340, tanto recozido quanto endurecido (temperado e revenido), utilizando ferramenta de corte T-Max®P (metal duro) da Sandvik Coromant® com revestimento CVD de $\text{Ti(C,N)+Al}_2\text{O}_3+\text{TiN}$.

2 OBJETIVO

2.1 GERAL

Analisar e comparar o processo de torneamento do aço ABNT 4340 recozido com o endurecido, utilizando a ferramenta de corte T-Max®P (metal duro) da Sandvik Coromant® com revestimento CVD de $Ti(C,N)+Al_2O_3+TiN$ analisando as variáveis de saída do processo.

2.2 ESPECÍFICOS

- Avaliar e comparar o desgaste, avarias da ferramenta;
- Avaliar a formação de cavacos para as diferentes condições de ensaio no aço recozido e endurecido;
- Analisar e comparar a qualidade da usinagem a partir da rugosidade aritmética (R_a), rugosidade total (R_t), potência consumida, emissão acústica e vibração;
- Encontrar as condições de usinagem que viabilizem a utilização desta ferramenta na usinagem do aço ABNT 4340 recozido/endurecido.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica apresentada a seguir aborda os principais assuntos tratados neste trabalho como: materiais analisados, o processo de torneamento, ferramenta de corte (metal duro), revestimento e variáveis de saída.

3.1 AÇO ABNT 4340

Segundo Chiaverini (1986). O aço ABNT 4340 foi desenvolvido inicialmente para ser utilizado em componentes aeronáuticos e mísseis. O aço ABNT 4340 possui médio teor de carbono em sua microestrutura e apresenta simultaneidade de vários elementos de liga que aumentam sua temperabilidade, mesmo que em pequenas proporções.

O aço 4340 é um aço tratável termicamente, com alta resistência mecânica e de baixa liga, resistente à fadiga em elevadas temperaturas, aplicado em estruturas críticas (BHATTACHARYA et al., 2011). Entretanto, esses aços são de baixa soldabilidade e usinabilidade.

É utilizado em componentes para sistemas mecânicos, principalmente estruturais, onde se necessita uma homogeneidade de dureza ao longo da seção transversal em pequenas ou grandes seções. Suas principais aplicações são; eixos, engrenagens, engrenagens planetárias, colunas, mangas e cilindros (GGD METALS, 2015).

Sua composição química está relacionada na Tabela 1:

Tabela 1: Composição química do aço ABNT 4340

ABNT/SAE	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Fe
4340	0,38-0,43	0,15-0,35	0,60-0,80	0,70-0,90	1,65-2,00	0,20-0,30	96,32-95,22

Fonte: Adaptado de ABNT NBR NM 87 (1996)

3.2 TRATAMENTO TÉRMICO EM AÇOS

De modo geral, o tratamento térmico consiste em aquecer e resfriar uma peça de metal para que ela atinja as propriedades mecânicas desejadas como dureza, elasticidade, ductilidade, resistência à tração, que são as chamadas propriedades mecânicas do metal. A peça adquire essas propriedades sem que se modifique o estado físico do metal.

O tratamento térmico provoca mudanças nas propriedades mecânicas do aço. Essas mudanças dependem de três fatores:

- Temperatura de aquecimento;
- Velocidade de resfriamento;
- Composição química do material.

Portanto, antes do tratamento térmico, é preciso conhecer as características do aço, principalmente sua estrutura cristalina (SENAI “LUIZ SCAVONE”, 2000).

3.2.1 AÇOS RECOZIDOS

Quando uma peça sai do processo inicial de fabricação (fundição, prensagem, forjamento, laminação), terá de passar por outros processos mecânicos antes de ficar pronta. Por meio do recozimento pleno do aço é possível diminuir sua dureza, aumentar a ductilidade, melhorar a usinabilidade e ajustar o tamanho do grão. Também são eliminadas as irregularidades resultantes de tratamento térmico ou mecânico, sofridas anteriormente. O tratamento consiste em aquecer o aço num forno, numa temperatura acima da zona crítica, após certo tempo, o forno é desligado e a peça é resfriada no seu interior (SENAI “LUIZ SCAVONE”, 2000).

3.2.2 AÇOS ENDURECIDOS

Houve um grande avanço tecnológico quando o homem descobriu como conferir dureza ao aço. Os dentes da engrenagem, o engate do trem, o amortecedor do carro, as brocas devem ser fabricados com aço endurecido, para suportarem os esforços a que são submetidos (SENAI “LUIZ SCAVONE”, 2000). Os aços endurecidos passam por um processo de têmpera seguido de um revenimento.

A têmpera é um processo de tratamento térmico do aço destinado à obtenção de dureza. Uma têmpera feita corretamente possibilita vida longa à ferramenta, que não se desgasta nem se deforma rapidamente. O processo consiste em aquecer o aço num forno com temperatura acima da zona crítica, que varia de 750° a 900°C. O que distingue essa forma de tratamento é

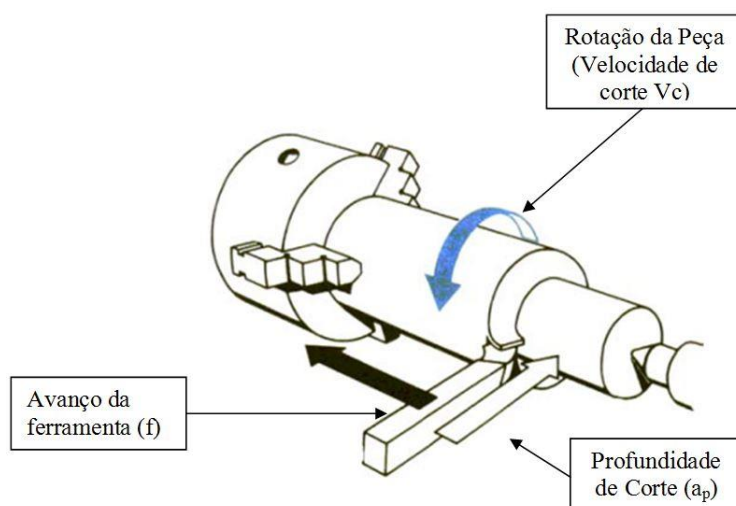
o seu processo de resfriamento, onde a peça é retirada do forno e mergulhada em água com a temperatura caindo de 850°C para 20°C. Quando a austenita é resfriada muito rapidamente, não há tempo para que se transforme em ferrita, cementita ou perlita. A austenita se transforma num novo constituinte do aço chamado martensita (SENAI “LUIZ SCAVONE”, 2000).

Para corrigir suas tensões, é preciso revenir o material. O revenimento tem a finalidade de corrigir a dureza excessiva da têmpera, aliviar ou remover as tensões internas. É um processo sempre posterior à têmpera, onde a peça é levada ao forno em temperatura abaixo da zona crítica, variando de 100°C a 700°C, dependendo da futura utilização do aço. Decorrido algum tempo (de uma a três horas), retira-se a peça do forno e deixa-se que ela esfrie por qualquer meio (SENAI “LUIZ SCAVONE”, 2000).

3.3 PROCESSO DE TORNEAMENTO

O torneamento é um processo mecânico de usinagem com uma geometria definida, destinado a obtenção de superfícies de revolução com o auxílio de ferramentas monocortantes. Nesse processo, a peça gira em torno do eixo principal de rotação da máquina e a ferramenta se desloca simultaneamente segundo uma trajetória coplanar com o eixo referido (Figura 1). Com relação à forma da trajetória, o torneamento pode ser retilíneo ou curvilíneo (COSTA *et al*, 2006).

Figura 1: Representação dos movimentos no processo de torneamento.



Fonte: Souza (2011).

No processo de torneamento, a peça a ser usinada é rotacionada executando o movimento de corte e a ferramenta de corte avança em sentido retilíneo, executando o movimento de avanço, sendo geralmente utilizado na fabricação de peças simétricas de revolução (STOETERAU).

O torneamento é realizado em uma máquina na qual sua operação requer apenas três parâmetros de ajustes: velocidade de avanço (f), velocidade de corte (V_c) e profundidade de corte (a_p). Os parâmetros podem ser definidos da seguinte forma (AMORIM, 2002):

- Velocidade de corte (V_c) é a taxa na qual a superfície não cortada da peça passa pela aresta de corte da ferramenta, expressa normalmente em [m/min];
- A velocidade de avanço (f) é a velocidade de deslocamento da ferramenta em cada volta de 360° de uma peça (avanço em [mm/rotação]), ou por unidade de tempo (avanço em [mm/minuto]);
- Profundidade de corte (a_p) é a profundidade de penetração da ferramenta medida perpendicularmente ao plano de trabalho, que é definido pelas direções de avanço e velocidade da ferramenta.

O torno mecânico pode utilizar de comando computadorizados chamados de CNC (comando numérico computadorizado) para realizar a usinagem de peças. Atualmente é praticamente impossível pensar na indústria moderna, principalmente os setores mecânico e metalúrgico, sem a presença de máquinas-ferramenta CNC (COSTA et al, 2006).

As vantagens de se trabalhar com máquinas-ferramentas tipo CNC é a fabricação de peças com geometrias complexas, com alta precisão e bom acabamento. A fabricação de peças com as mesmas características e redução de mão de obra são alguns dos benefícios trazidos pela utilização dessas máquinas. Porém o uso destas trouxe algumas desvantagens, como a necessidade de elevados investimentos em maquinário, capacitação de profissionais para utilização efetiva da nova tecnologia ocasionando o desligamento da mão de obra não especializada (COSTA et al, 2006).

3.4 FERRAMENTA DE METAL DURO

Ferramentas de metal duro são materiais da metalurgia do pó; um composto de partículas de carboneto de tungstênio (WC) e um ligante rico em cobalto metálico (Co). Essas ferramentas para aplicações de usinagem de metal representam mais de 80% do carboneto de tungstênio (WC) fase dura. Carbonitreto cúbico adicional são outros componentes importantes, especialmente em classes com gradiente sinterizado. O corpo do metal duro é conformado, através de prensagem do pó ou técnicas de molde por injeção, dentro de um corpo que é então sinterizado até densidade total (Sandvik Coromant).

3.4.1 CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES

Indústrias que fabricam ferramentas de usinagem (torneamento) realizam diversos esforços para desenvolver ferramentas cada vez mais adequadas às exigências do mercado. Basicamente, uma ferramenta de usinagem deve obter tais propriedades fundamentais (SHU, 1980):

- Resistência à deformação plástica;
- Boa dureza;
- Boa tenacidade;
- Resistência ao desgaste;
- Resistência à compressão e cisalhamento;
- Boas propriedades mecânicas e térmicas a altas temperaturas;
- Resistência ao choque térmico;
- Inércia química.

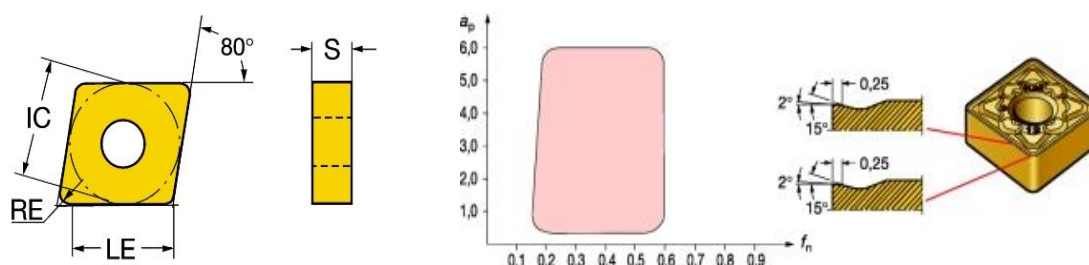
Características cristalográficas do metal duro como o tamanho do grão do carboneto de tungstênio (WC), é um dos parâmetros mais importantes para ajuste da relação de dureza/tenacidade de uma classe; o tamanho do grão mais fino significa maior dureza a um determinado teor da fase ligante. A quantidade e composição do ligante rico em cobalto (CO) controla a tenacidade e a resistência da classe quanto à deformação plástica. Com um tamanho de grão igual ao WC, um aumento na quantidade de ligante resultará em uma classe mais

tenaz, mais propícia ao desgaste por deformação plástica. Um teor de ligante muito baixo pode resultar em um material quebradiço (Sandvik Coromant).

Carbonitreto cúbico, também conhecidos como fase γ , são geralmente adicionados para aumentar dureza a quente e a formar gradientes que são usados para combinar melhor resistência à deformação plástica com tenacidade da aresta. Carbonitreto cúbico concentrado na aresta de corte melhora a dureza a quente quando necessário. Além da aresta de corte, um ligante rico em estrutura de carboneto de tungstênio inibe trincas e quebras por martelamento de cavacos (Sandvik Coromant).

Após todo o processo de fabricação da ferramenta, com sua geometria e propriedades estabelecidas, obtêm-se as seguintes especificações de trabalho definidos segundo o fabricante (Figura 2):

Figura 2: Dimensões e especificações da ferramenta de corte.



Fonte: Sandvik Coromant® (1995).

3.4.2 REVESTIMENTO

A pastilha utilizada T-Max®P (metal duro) da Sandvik Coromant® teve seu revestimento feito pelo método CVD (*Chemical Vapor Deposition*) de $Ti(C,N)+Al_2O_3+TiN$.

A cobertura CVD é gerada por reações químicas a temperaturas de 700-1050°C, possuem alta resistência ao desgaste e excelente adesão ao metal duro. O primeiro metal duro revestido CVD era de uma única camada de cobertura de carboneto de titânio (TiC). Coberturas de óxido de alumínio (Al_2O_3) e coberturas de nitreto de titânio (TiN) foram introduzidas posteriormente. Mais recentemente, as coberturas de carbonitreto de titânio (MT-Ti (C, N)) ou MT-TiCN, também chamado de MT-CVD, foram desenvolvidas para melhorar as propriedades da classe devido à sua habilidade em manter intacta a interface de metal duro (Sandvik Coromant).

As modernas coberturas CVD combinam $Ti(C,N)$, Al_2O_3 e TiN . As propriedades da cobertura foram melhoradas continuamente quanto às propriedades de adesão, tenacidade e desgaste em virtude de otimizações e tratamentos posteriores micro-estruturais (Sandvik Coromant).

- $Ti(C,N)$: Sua dureza oferece resistência ao desgaste por abrasão, resultando na redução do desgaste de flanco.
- Al_2O_3 : Quimicamente inerte com baixa condutividade térmica, tornando-o resistente à craterizações. Atua também como uma barreira térmica para melhorar a resistência à deformação plástica.
- TiN : Melhora a resistência ao desgaste e é usada para detecção de desgaste.
- Tratamentos posteriores: Melhoram a tenacidade da aresta em cortes interrompidos e reduz as tendências à abrasão.

O óxido de alumínio, também chamado de alumina, é ideal para muitas aplicações dentro da usinagem porque é, como a cerâmica, muito duro, portanto resistente ao desgaste; com baixa condutividade térmica, ou seja, oferece boa barreira térmica; e alta estabilidade química, não reagindo prontamente com os materiais das peças. Embora sua resistência às altas temperaturas seja digna de nota, sua maior vantagem é ser pouco quebradiço em volume. Como cobertura, porém, o óxido de alumínio tem bom desempenho uma vez que é suportado por um tenaz substrato de metal duro. A cobertura de alumina tem sido aplicada em várias gerações de classes tipo GC e também é o principal material da cobertura das classes série GC 4000, que hoje lideram a usinagem em termos de desempenho (LOCATELI, 2009).

Quanto à sua cobertura, a mudança é mais visível: a pastilha ganhou uma camada de nitreto de titânio, perdendo a coloração até então escura e se aproximando do brilho dourado. Mais que uma questão de estética, a nova camada visa a favorecer a usinagem sem refrigeração, já que o titânio, por ser um lubrificante sólido que melhora o escoamento dos cavacos, minimiza seu atrito com a pastilha, e, portanto, diminui a geração de calor. E mais uma vez a cor amarelo-dourado atua como agente técnico: permite uma melhor identificação do desgaste gerado pelo calor, cuja coloração é escura (BOTTURA, 2000).

A excessiva preocupação com as taxas de remoção de metal durante os últimos cinco anos é resultado, principalmente, das contínuas melhorias das tecnologias de metal duro e de cobertura das ferramentas. Por outro lado, as novas tecnologias de materiais e processos têm permitido que as classes com cobertura também fossem aplicadas ampla e sucessivamente em operações onde se exige tenacidade. Não é de estranhar, portanto, que a Sandvik Coromant® desenvolva classes e geometrias específicas, feitas sob medida, cujo objetivo é proporcionar o melhor desempenho em cada uma das principais áreas de aplicação em usinagem. Tais classes também abrangem aquelas desenvolvidas para usinar materiais adicionais, sendo, por isso, aprimoradas para aplicações ainda mais específicas. As classes de pastilhas assim desenvolvidas já provaram ser, de longe, o melhor caminho para que o usuário obtenha reduções significativas de custos de produção em razão de produtividade mais alta, qualidade melhorada do produto e uma vida confiável e previsível das ferramentas (BOTTURA, 2000).

A vantagem de ter desenvolvido a capacidade de aplicar coberturas de óxido de alumínio mais espessas da melhor maneira em substratos melhores e mais resistentes à deformação plástica nos proporcionou classes idealmente apropriadas também para usinagem sem refrigeração (BOTTURA, 2000).

3.4.3 FERRAMENTA T-MAX®P (Ti(C,N)+Al₂O₃+TiN)

A T-Max®P (código: CNMG 12 04 08-KM 3210) é a sua primeira escolha para torneamento geral e abrange desde a usinagem de peças pequenas até a usinagem pesada. As pastilhas se encaixam em sistemas de fixação de alto desempenho Sandvik Coromant® e podem ser usadas em uma variedade de aplicações em todos os materiais (Sandvik Coromant).

Classes de pastilhas com cobertura CVD são as primeiras escolhas em uma ampla variedade de aplicações onde é importante a resistência ao desgaste. Tais aplicações são encontradas em torneamento geral e mandrilamento de aços, com resistência à craterizações oferecida pelas coberturas CVD espessas (Sandvik Coromant).

A indústria de usinagem produz uma variedade extremamente ampla de peças usinadas em materiais muito diferentes. Cada material possui suas características exclusivas que são influenciadas pelos elementos de liga, tratamento térmico, dureza, etc. A combinação desses influencia significativamente a escolha da geometria da ferramenta de corte, a classe e os dados de corte (Sandvik Coromant).

Portanto, os materiais da peça foram divididos em seis grupos principais, de acordo com a norma ISO e cada grupo possui suas propriedades exclusivas referentes à usinabilidade (Sandvik Coromant):

A ferramenta de corte utilizada (T-Max®P) pertence à norma ISO K, específica para ferros fundidos cinzentos e nodulares com as seguintes condições de usinagem (Figura 3), segundo o fabricante.

Figura 3: Valores de usinagem da ferramenta T-Max®P para ferros fundidos.



Fonte: Sandvik Coromant® (1995).

Características:

- Pastilhas dupla face com arestas robustas;
- Fixação por alavanca para usinagem com refrigeração, fixação RC para usinagem sem refrigeração e materiais com cavacos curtos, fixação por cunha para melhor acessibilidade;
- Olhais de precisão e geometrias melhoradas para usinagem com refrigeração de alta precisão.

3.5 VARIÁVEIS DE SAÍDA

As variáveis de saída listadas abaixo serão analisadas na pesquisa buscando entender os efeitos da ferramenta T-Max®P no torneamento. A interação entre a ferramenta e a peça possui uma influência direta nestas variáveis, tais como o consumo de energia e rugosidade (HECKER et al. 2007). Serão verificadas também as correlações entre as variáveis de emissão, potência vibração, cavacos e desgaste da ferramenta.

3.5.1 RUGOSIDADE

A importância do estudo do acabamento superficial é bastante significativa, uma vez que a boa qualidade superficial é exigida em peças onde houver atrito, desgaste, corrosão, resistência à fadiga, entre outros.

As maiores partes dos estudos de usinagem que objetivam a análise da qualidade das peças produzidas analisam as imperfeições e a topografia deixada nestas peças. Esta topografia das peças produzidas é denominada de rugosidade e é caracterizada como erros microgeométricos, sendo um resultado do processo de usinagem (AGOSTINHO, 1981).

As superfícies de peças, quando observadas de perto, em detalhes mostram que apresentam, sempre após um tipo de usinagem, irregularidades. Estas por si causam imperfeições ou marcas deixadas pela ferramenta de corte que atuam sobre tal superfície da peça. Partindo disso vê-se a importância do estudo do acabamento superficial na medida da necessidade de precisão, que aumenta com a funcionalidade das peças (PALMA, 2006).

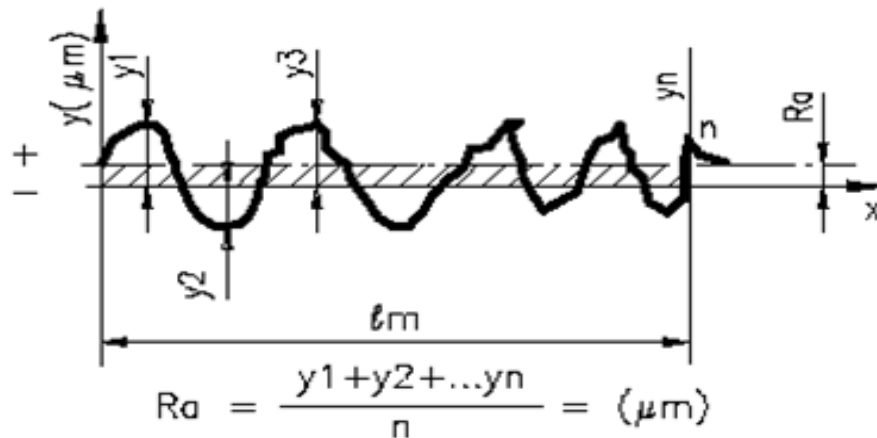
O acabamento da superfície é um importante parâmetro para avaliar a produtividade de máquinas-ferramentas, assim como componentes usinados, pois o comportamento das partes mecânicas depende de uma boa qualidade de superfície para uma funcionalidade adequada (BERNARDOS e VOSNIAKOS, 2003).

As indústrias vêm dando grande importância ao acabamento superficial e precisão dimensional das peças usinadas. Portanto, medir e caracterizar o acabamento das superfícies torna-se o diferencial no processo de usinagem (REDDY e RAO, 2005).

3.5.1.1 RUGOSIDADE R_a

Média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento (y_i), dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, dentro do percurso de medição (l_m). Esta grandeza pode ser representada como sendo a altura de um retângulo, cuja área é igual à soma absoluta das áreas delimitadas entre o perfil de rugosidade e a linha média, tendo por comprimento, o percurso de medição (l_m) (COSTA, 2017). A Figura 4 ilustra faixas de rugosidade médias típicas de alguns processos de fabricação.

Figura 4: Rugosidade média R_a .

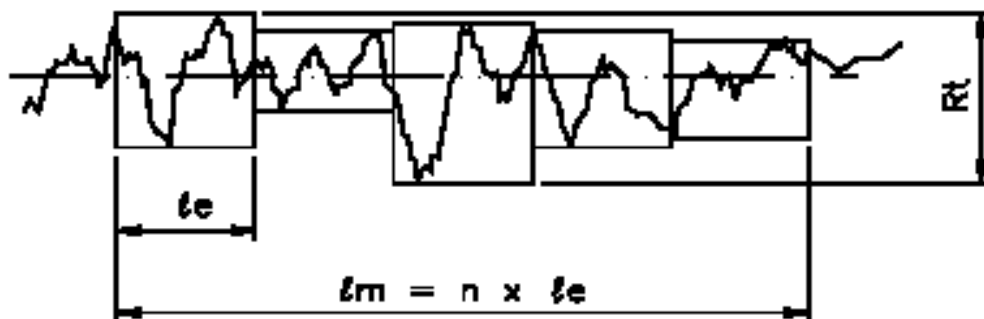


Fonte: (ROSA, 2009).

3.5.1.2 RUGOSIDADE R_t

A profundidade total da rugosidade R_t está definida como a distância vertical entre o pico mais alto e o vale mais profundo dentro do comprimento total de avaliação (cinco cut-off). O exemplo da Figura 5 corresponde à distância vertical formada pelo pico mais alto (que está localizado no trecho Z1) e o vale mais profundo (que está localizado no trecho Z3) (COSTA, 2017).

Figura 5: Rugosidade total R_t .



Fonte: (ROSA, 2009).

3.5.2 EMISSÃO ACÚSTICA

Emissão acústica é a propagação de uma onda vibracional na rede dos materiais cristalinos, devido ao rearranjo da estrutura interna do material que foi deformado

(WILLIANS, 1968). Estes sinais são captados por meio de um sensor piezoelétrico que transformam sinais mecânicos em sinais elétricos.

Segundo Mechefske et al. (2002), o estudo dos fenômenos de desgaste pelo monitoramento da emissão acústica tem uma grande correlação, sendo as emissões acústicas geradas em um material que está sendo usinado, provendo assim indicações do estado físico da peça. As EA podem ser vistas como uma descrição do processo, que é mais estreitamente relacionado com o processo de estrutura do material ou características de sua geometria.

Ultimamente, a análise de emissões acústicas é uma ferramenta de grande importância para detecção de falhas em equipamentos, estudos de fenômenos, desgaste de ferramentas entre outros. Uma das principais vantagens do uso dela como ferramenta advém do fato de ser um ensaio não destrutivo, e que pode facilmente ser aplicado em um sistema, sem ter que fazer grandes adaptações nele (MAIA, 2009).

3.5.3 POTÊNCIA DE CORTE

O nível de remoção de material de uma determinada peça pode ser diretamente associado ao consumo de potência do equipamento (GONÇALVES et al., 2010).

Segundo Souza (2004), o estudo das forças de usinagem é importante para assegurar a integridade do sistema máquina-ferramenta-peça, uma vez que influenciam as deflexões na ferramenta e na peça, afetando as dimensões finais do componente usinado, sendo, ainda, responsáveis pelos fenômenos de vibração.

Há diversas maneiras de mensurar a potência de corte de um equipamento. Na usinagem com metais é comum a instrumentação dos processos de usinagem.

Para a medição do consumo de potência em seu trabalho, Gonçalves et al. (2006), instrumentou o equipamento de usinagem com aparelho de controle eletrônico microprocessado, indicado para medição e registro de grandezas da rede elétrica que alimenta a máquina.

O sensor de potência mede a potência consumida pelo motor ou a variação de frequência do motor, onde sua medição consiste em medir a corrente e a tensão do motor. Devido à fácil instalação em equipamentos, os sensores de potência são usados em grande escala no monitoramento de equipamentos de usinagem (JEMIELNIAK, 1999).

3.5.4 VIBRAÇÃO

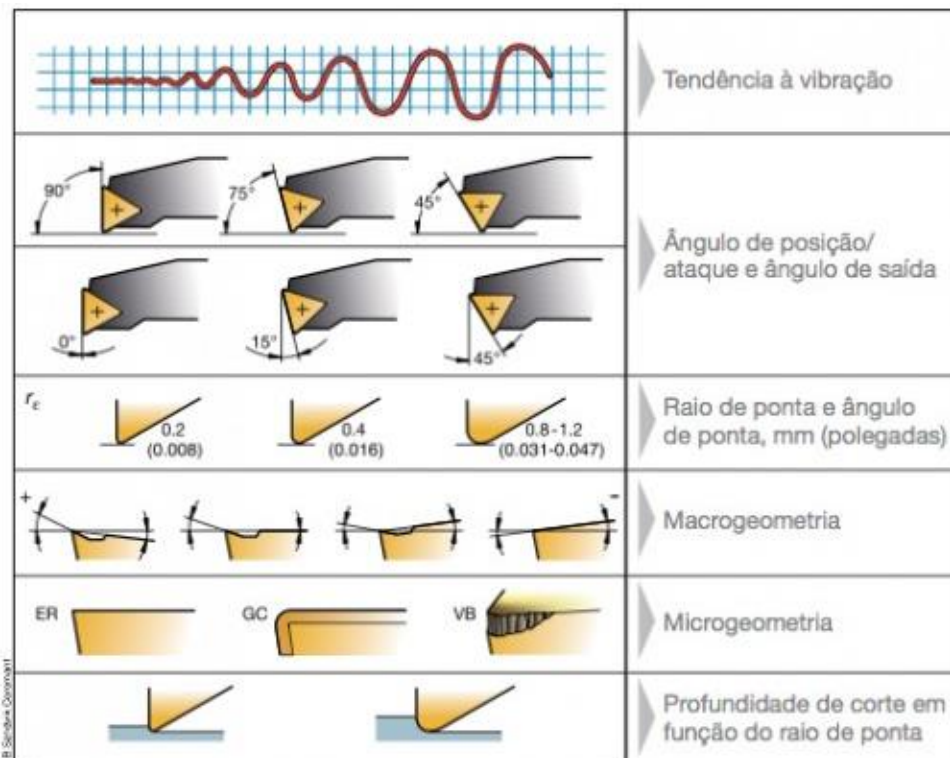
Vibração é definida como sendo o movimento dinâmico em torno de sua posição estática (SOUTO, 2004).

Na usinagem, as vibrações estão presentes em todos os processos e convivem bem de uma maneira geral com o processo em si. Segundo Polli (2005), o máximo nível de vibrações tolerável, ou seja, sua máxima amplitude depende da sua aplicação. Algumas características que interferem diretamente na vibração durante o processo de usinagem podem ser observadas na Figura 6.

Vittorino (2008) comenta sobre a importância da análise de vibrações em vários processos experimentais e industriais. Com a análise de vibrações é possível detectar em uma máquina quais de seus componentes apresenta defeitos relacionados a problemas elétricos, problemas com componentes como correias, engrenagens e rolamentos, folgas, excentricidade, falta de rigidez, desalinhamentos, desbalanceamentos etc.

Vibrações excessivas comprometem a qualidade da superfície usinada, diminui a vida da ferramenta, acelera o seu lascamento e ainda pode danificar rolamentos do eixo-árvore e ainda aumentar o consumo de energia da máquina (KING, 1985).

Figura 6: Características que interferem a vibração.



Fonte: Sandvik Coromant® (2005).

3.5.5 ANÁLISE DO CAVACO

Diversos problemas podem ocorrer em função do tipo de cavaco produzido no processo de usinagem. Controles de cavaco não-efetivos não resultarão apenas em baixa produtividade e pobre acabamento superficial de componentes, mas também poderão prejudicar ferramentas, máquinas e peças, assim como poderão causar ferimentos em operadores (WANG, 2001).

Em geral, a formação do cavaco pode ser descrita através dos seguintes passos:

- A partir da penetração da ferramenta, uma porção de material é recalcada contra a superfície de saída da ferramenta;
- Tal porção sofre deformação plástica, a qual aumenta até atingir certo valor de tensão de cisalhamento, iniciando-se um deslizamento entre o material recalcado e a peça. Este deslizamento ocorre segundo as direções dos planos de cisalhamento dos cristais da porção recalcada;
- Haverá então ruptura parcial ou completa na região de cisalhamento, realizando-se esta somente perto da aresta cortante para materiais altamente deformáveis, formando cavaco contínuo. Para materiais frágeis, o cavaco originado é de cisalhamento ou ruptura;
- Continuando-se o movimento relativo entre ferramenta e peça, inicia-se um escorregamento da porção do material cisalhado sobre a superfície da ferramenta. Enquanto isso, uma nova porção do material está se formando e cisalhando.

Conta-se também com o modelo de Time, onde se considera a interação ferramenta-peça-cavaco: a ferramenta começa a penetrar na peça, ultrapassando sua resistência. A resistência à penetração cresce proporcionalmente à área de compressão do material da peça, o que resulta em um aumento na força de penetração. Esse processo continua até que a força se torne suficientemente grande para quebrar um pequeno fragmento do material da peça, que se move ao longo de um plano de escorregamento particular em certo ângulo. A força de penetração decresce abruptamente e um novo ciclo de formação do cavaco começa a ocorrer (TIME, 1997).

Os diferentes tipos de cavacos podem ser classificados em:

- Cavaco contínuo: camadas de material de cavaco justapostas em uma disposição contínua e alocadas em agrupamentos distintos. Tal cavaco se forma na usinagem de materiais dúcteis e homogêneos.
- Cavaco de cisalhamento: agrupamentos de material de cavaco bem distintos e justapostos. Sua formação ocorre a partir da diminuição da resistência do material no plano de cisalhamento devido ao aumento da deformação ou à heterogeneidade da estrutura metalográfica.
- Cavaco de ruptura: fragmentos arrancados da peça usinada. Os agrupamentos de material de cavaco permanecem separados. Ocorre a partir de materiais frágeis ou de estrutura heterogênea.

Os cavacos ainda podem ser classificados em função da sua forma, de acordo com a Figura 7.

Figura 7: Formas de cavaco.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
em fita	emaranhado fita	hélice plana	hélice oblíqua	hélice cil. longa	hélice cil. curta	hélice espiral	espiral	vírgula	arrancados
desfavorável			útil		bom			útil	

Fonte: König (2002).

A seção transversal do cavaco mesmo na usinagem ortogonal não é exatamente retangular. Ao contrário, tanto a espessura quanto a largura do cavaco são geralmente maiores que a espessura e a largura teóricas de usinagem. Este fato é consequente ao escoamento da porção de material arrancado estar restringida somente pela face da ferramenta, podendo o metal mover-se livremente em todas as outras direções durante a formação do cavaco (TRENT, 2000).

3.5.6 DESGASTES E AVARIAS DA FERRAMENTA

Dependendo das grandezas de entrada do processo de usinagem, a ferramenta sofrerá uma determinada carga mecânica e térmica. Estas solicitações da ferramenta conduzirão aos chamados desgastes ou avarias.

Desgaste é a perda progressiva de material devido ao movimento relativo entre a superfície e o material da ferramenta com a qual entra em contato (BLAU, 1995). Estão relacionados com interações entre as superfícies e, mais especificamente, a remoção e a deformação do material sobre uma superfície como resultado da ação mecânica da superfície oposta (RABINOWICZ, 1995).

O desgaste de flanco ou frontal, tipo que surge com maior frequência nas operações de torneamento, é causado, principalmente, pelo atrito da peça com a superfície de folga da ferramenta. É comumente utilizado como critério de fim de vida quando se deseja monitorar diretamente a vida de uma ferramenta, visto a facilidade de verificação e medição da largura da região do desgaste. Indiretamente, pode-se também acompanhar a evolução desse desgaste através do monitoramento das forças de corte e de avanço, da vibração da ferramenta e/ou da potência elétrica consumida pelo processo, uma vez que o desgaste frontal afeta tanto a superfície usinada, como aumenta a área de contato ferramenta – peça elevando os níveis de força, vibração e potência consumida no processo (COSTA, 1995).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MÁQUINA E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Estudo da Usinagem na UNESP (Campus de Guaratinguetá), utilizando Centro de Torneamento CNC Romi modelo GL 240M. Representado na Figura 8.

Figura 8: Torno Mecânico (Romi GL 240M).

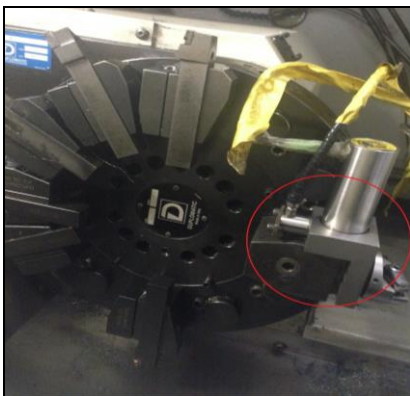


Fonte: Autor.

Sensores (Figura 9) foram acoplados no centro de torneamento e utilizados para realizar as medições de EA, potência e vibração durante os ensaios.

Utilizou-se o rugosímetro da marca Mahr®, modelo MarSurf M300 (Figura 10) para realizar as medições de rugosidade, entre os intervalos de ensaio. O equipamento foi usado para obtenção dos dados de R_a e R_t das superfícies pós usinagem.

Figura 9: Sensores de medição.



Fonte: Autor.

Figura 10: Rugosímetro Mahr®.



Fonte: Autor.

Os desgastes e avarias da ferramenta de corte foram averiguados quantitativamente utilizando o estereoscópico da marca Mahr®, modelo MarVision MM200 (Figura 11).

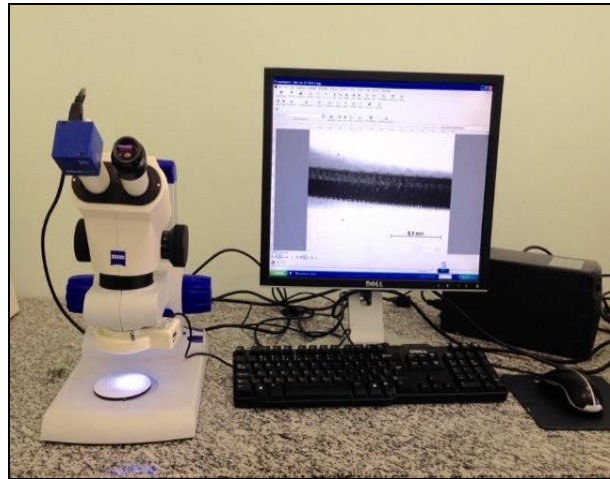
Imagens de microscopia tanto da ferramenta quanto dos cavacos gerados pela usinagem foram feitas no microscópio óptico da marca Carl Zeiss®, modelo Stemi 2000 (Figura 12).

Figura 11: Estereoscópico Mahr®.



Fonte: Autor.

Figura 12: Microscópio óptico Zeiss®.

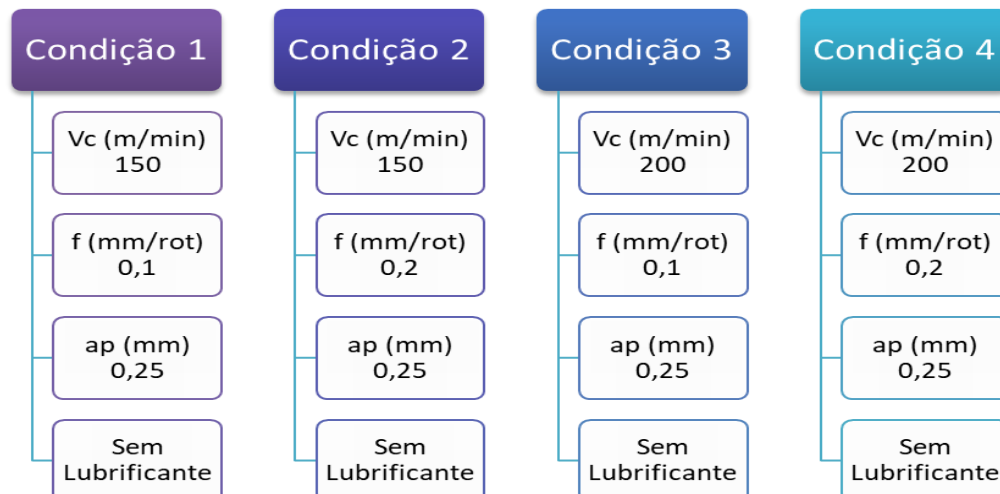


Fonte: Autor.

4.2 PARÂMETROS DE USINAGEM

Para o processo de torneamento dos dois materiais estudados utilizou-se as condições representadas no Fluxograma 1, com uma réplica para cada condição (recozido/endurecido).

Fluxograma 1: Condições de usinagem para os dois materiais.



Fonte: Autor.

4.3 CORPOS DE PROVA

Foram utilizados corpos de prova tanto do aço ABNT 4340 recozido (Figura 13) quanto do aço ABNT 4340 endurecido (Figura 14), cujas dimensões iniciais da peça foram:

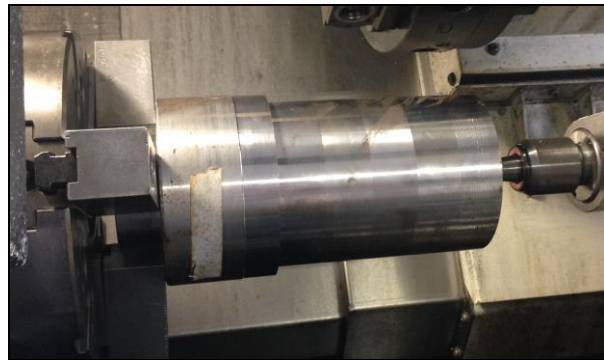
- Diâmetro: 122 [mm];
- Comprimento: 250 [mm].

Figura 13: Peça recozida.



Fonte: Autor.

Figura 14: Peça endurecida.

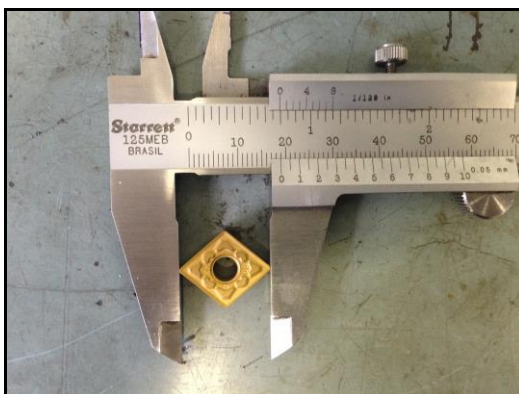


Fonte: Autor.

4.4 FERRAMENTA DE CORTE

A ferramenta de corte (Figura 15) utilizada no processo de usinagem por torneamento foi a T-Max®P feita de metal duro da empresa Sandvik Coromant® com revestimento CVD de $Ti(C,N)+Al_2O_3+TiN$.

Figura 15: Ferramentas de corte.



Fonte: Autor.

4.5 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Para determinar os valores das respostas captadas pelos sensores e equipamentos, foi utilizado o software MATLAB da MathWorks para facilitar a leitura dos dados obtidos. O software Minitab 17 também foi usado para tratamento estatístico dos dados, realizando um Experimento Fatorial Completo com análise de variância (ANOVA), que inclui todas as possíveis combinações entre os níveis dos fatores do experimento. A partir dos valores obtidos utilizou-se o Excel 2010 para facilitar a interpretação e visualização dos dados na forma de gráficos.

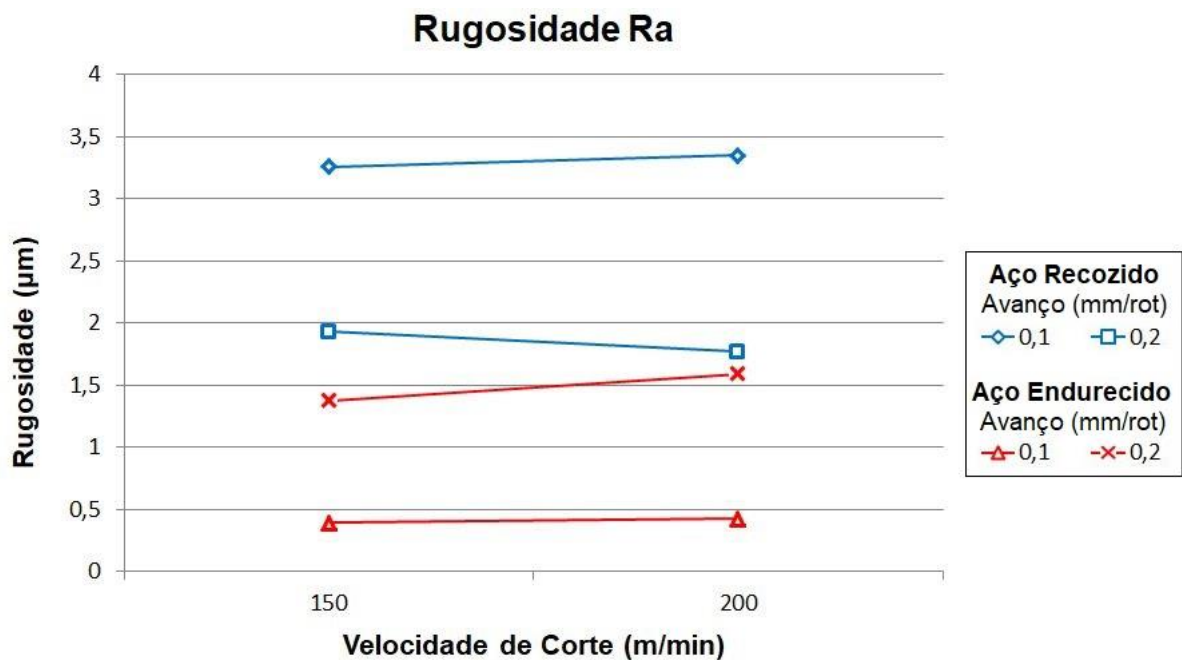
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados e discussões apresentados nos tópicos a seguir expressam valores obtidos durante o processo de torneamento dos materiais recozido e endurecido, juntamente com a utilização de gráficos, ferramentas estatísticas para melhores análises e compreensões de seus dados. Também foram averiguados resultados da combinação do aço recozido com o aço endurecido em função de suas variáveis de saída, apresentados a partir do tópico 5.8.

5.1 RUGOSIDADE R_a

As repostas apresentadas a seguir foram obtidas durante os ensaios de torneamento do aço ABNT 4340 recozido e endurecido. Analisando a interação entre a velocidade de corte e avanço, durante a usinagem, com nível de significância de 5% para o parâmetro R_a (Gráfico 1). Apresentam-se também os principais efeitos individuais de cada variável (Gráfico 2).

Gráfico 1: Rugosidade R_a em função da velocidade de corte (V_c) para diferentes avanços (f).



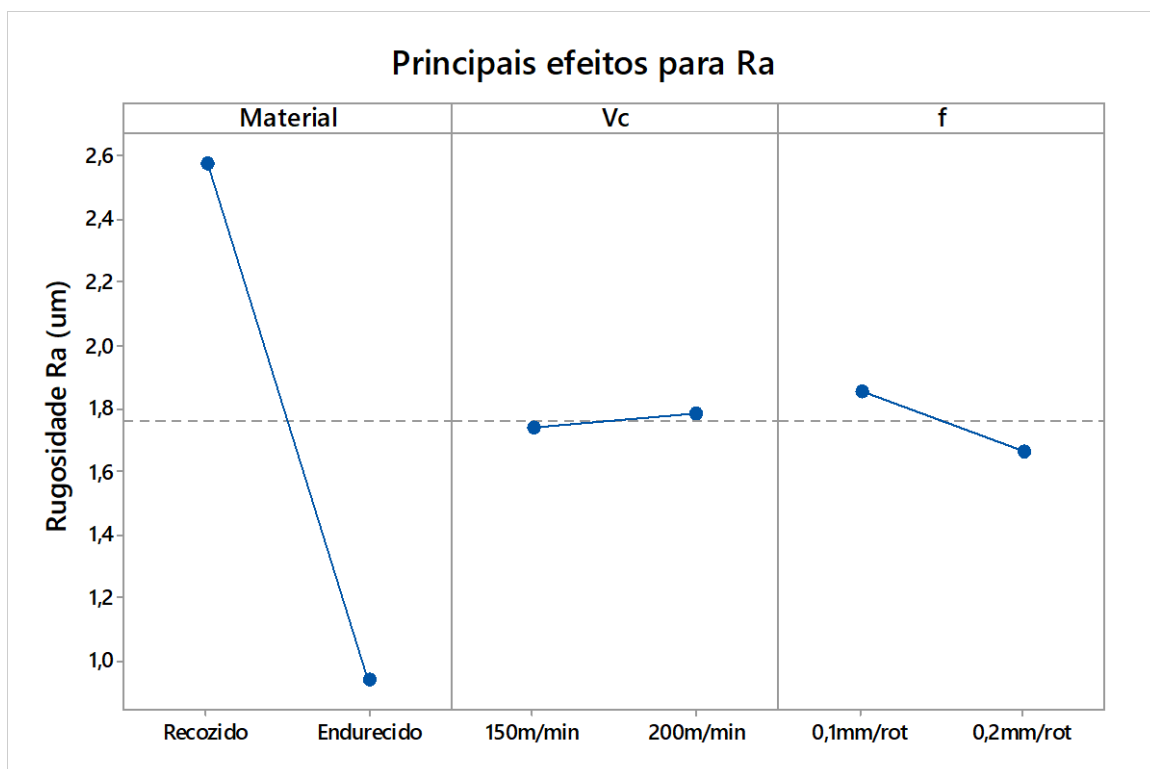
Fonte: Autor.

Pela análise do Gráfico 1, nota-se menores valores de rugosidade do aço ABNT 4340 recozido com o avanço de 0,2 mm/rot e velocidade de corte de 200 m/min. Tanto na

utilização do avanço de 0,1 e 0,2 mm/rot para o aço recozido apresentaram elevados valores de R_a , com isso, dependendo da aplicabilidade final do material usinado um processo posterior de retifica é recomendado para diminuir a rugosidade superficial da peça.

É possível verificar também que dentre os dois materiais usinados, o que apresentou menores valores de rugosidade foi o aço endurecido, mais especificamente com velocidade de corte de 150 mm/min independente do avanço utilizado. Já para o avanço de 0,2 mm/rot, a rugosidade aumentou conforme elevamos a velocidade de corte deste mesmo aço.

Gráfico 2: Principais efeitos individuais para o parâmetro de R_a .



Fonte: Autor.

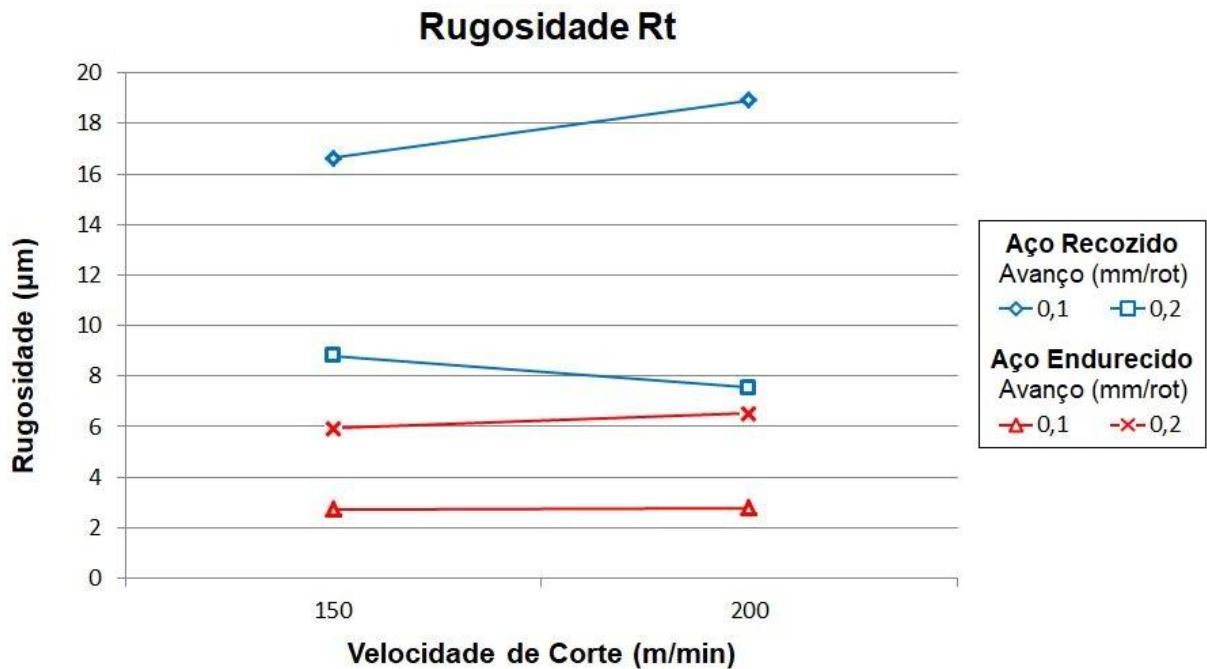
Analisando os principais efeitos individualmente, percebe-se menor rugosidade no material endurecido, na V_c de 150 m/min e no avanço de 0,2 mm/min.

5.2 RUGOSIDADE R_t

A interação entre a velocidade de corte e avanço, durante a usinagem do aço ABNT 4340 recozido e endurecido para o parâmetro R_t está representada abaixo (Gráfico 3), com

nível de significância de 5%, juntamente com os principais efeitos individuais de cada variável (Gráfico 4).

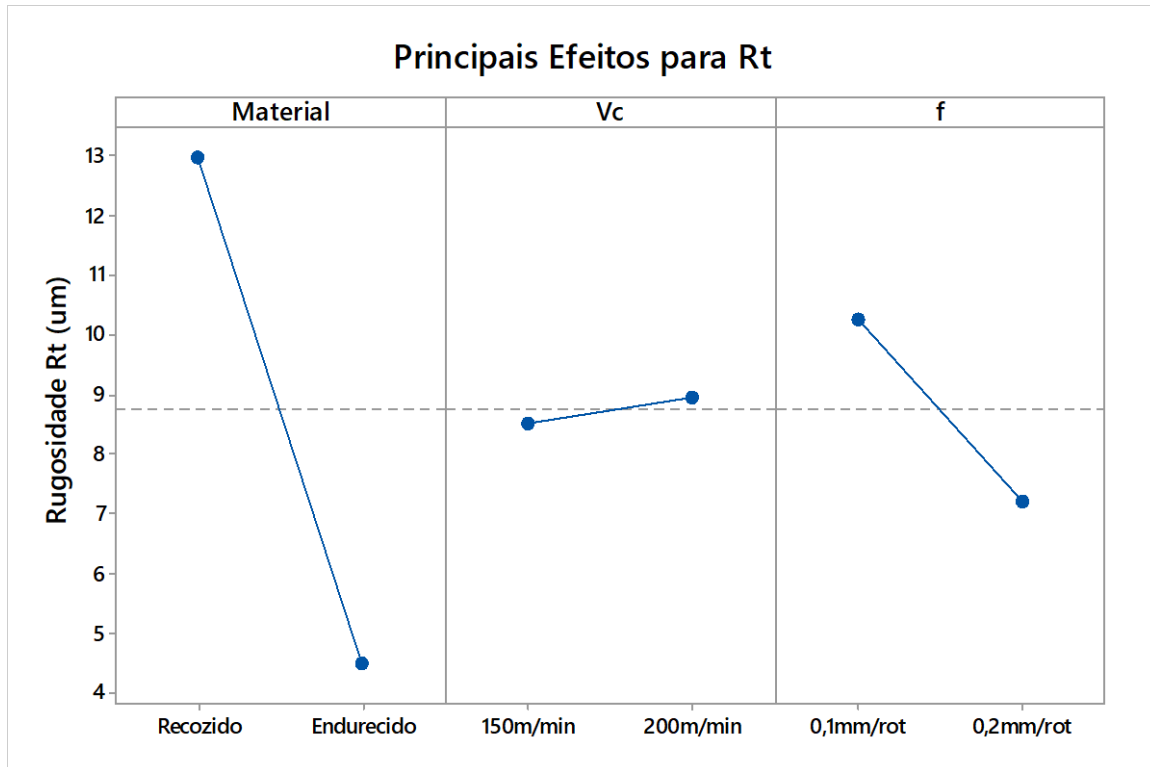
Gráfico 3: Rugosidade R_t em função da velocidade de corte (V_c) para diferentes avanços (f).



Fonte: Autor.

Os valores da rugosidade R_t encontrados nos dois materiais se assemelham com os resultados do parâmetro de R_a , possuem proporções equivalentes nas mesmas condições da rugosidade aritmética.

Novamente apresentando menores valores de rugosidade para o material endurecido, devido à ferramenta de corte ser específica para materiais com elevada dureza. Assim, proporcionando melhores resultados superficiais para o torneamento do aço ABNT 4340 endurecido.

Gráfico 4: Principais efeitos individuais para o parâmetro de R_t .

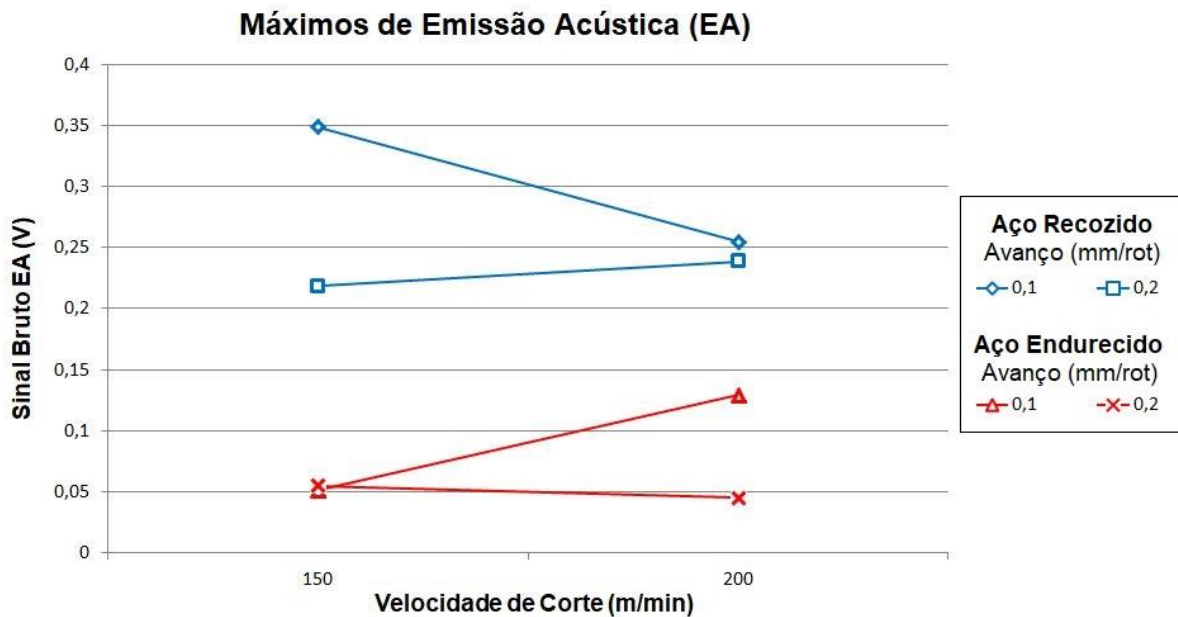
Fonte: Autor.

Analisando individualmente os resultados de cada fator, assim como na R_a , a rugosidade R_t no material endurecido, na V_c de 150 m/min e no avanço de 0,2 mm/min são de menores valores.

5.3 MÁXIMOS DE EMISSÃO ACÚSTICA

Os dados apresentados a seguir do parâmetro Emissão Acústica (Gráfico 5) foram obtidos durante os ensaios de torneamento do aço ABNT 4340 recozido e endurecido. Analisando a interação entre a velocidade de corte e avanço, durante a usinagem, com nível de significância de 5%. Apresenta-se também os principais efeitos individuais de cada variável (Gráfico 6).

Gráfico 5: Valores máximos de emissão acústica (EA) em função da velocidade de corte (V_c) para diferentes avanços (f).

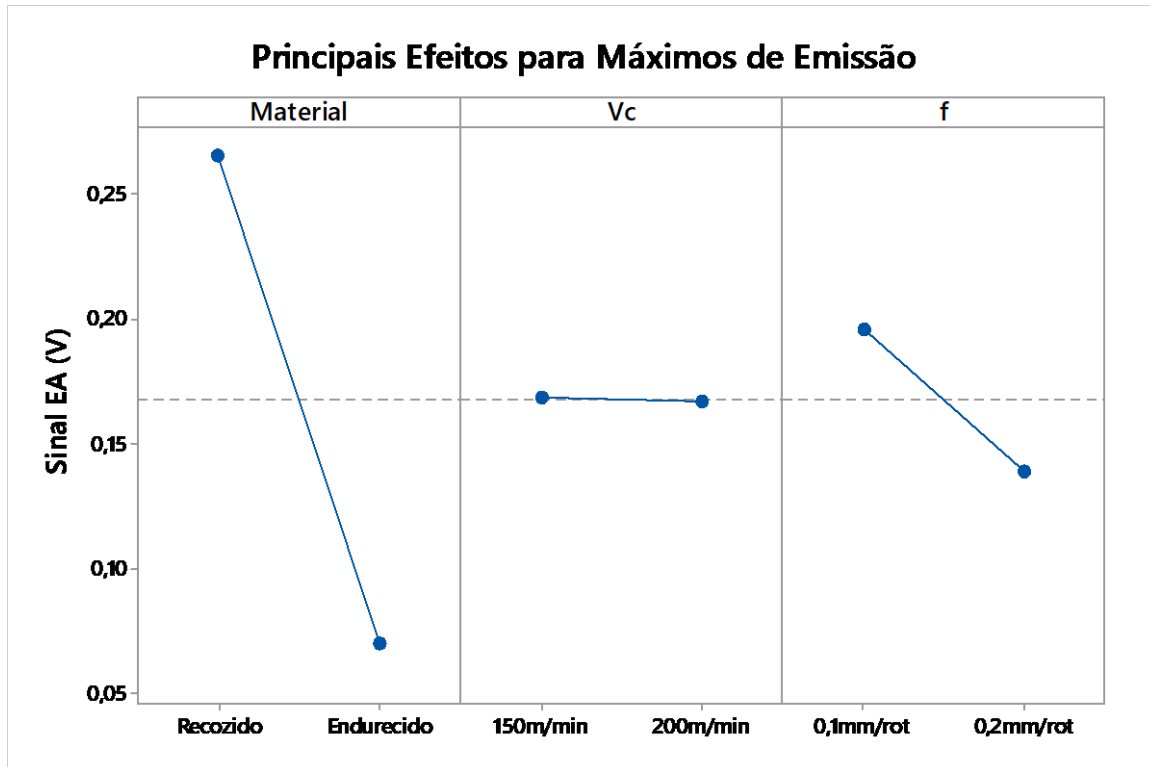


Fonte: Autor.

Os máximos valores encontrados na EA do aço recozido ocorreram na velocidade de corte de 150 m/min com avanço de 0,1 mm/rot. Foram obtidos menores respostas de EA nesse mesmo material quando aumentamos o avanço para 0,2 mm/rot no processo de torneamento, indicando um possível desgaste menor da ferramenta nessas condições.

Assim como na Rugosidade R_a e R_t , os melhores valores obtidos do parâmetro EA foram do aço endurecido, que teve dados muito aproximados com a V_c de 150 m/min tanto com avanço de 0,1 e 0,2 mm/rot.

Gráfico 6: Principais efeitos individuais para o parâmetro de máximos de EA.

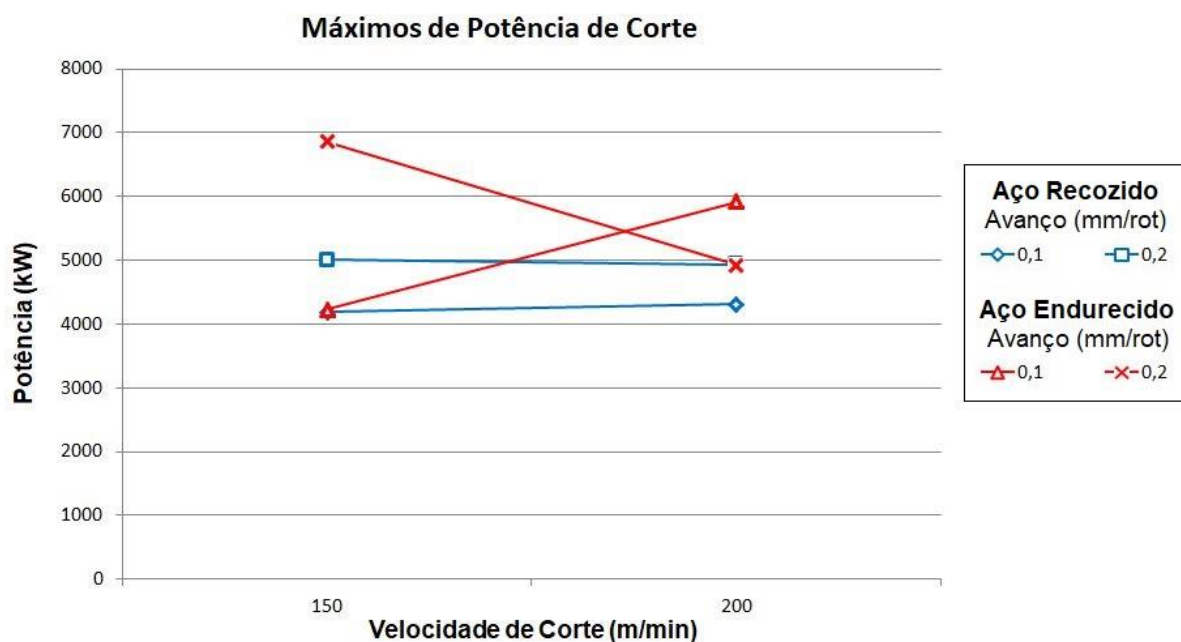


Na análise dos principais efeitos dos máximos valores de emissão acústica individualmente, percebem-se melhores resultados no processo de usinagem com a utilização do aço ABNT 4340 endurecido e no avanço de 0,2 mm/min.

5.4 MÁXIMOS DE POTÊNCIA DE CORTE

A interação entre a velocidade de corte e avanço, durante a usinagem do aço ABNT 4340 recozido e endurecido analisando o parâmetro da Potência de Corte está representada abaixo (Gráfico 7), com nível de significância de 5%. Apresentam-se também os principais efeitos individuais de cada variável durante o torneamento dos aços recozido e endurecido (Gráfico 8).

Gráfico 7: Valores máximos de potência de corte em função da velocidade de corte (V_c) para diferentes avanços (f).



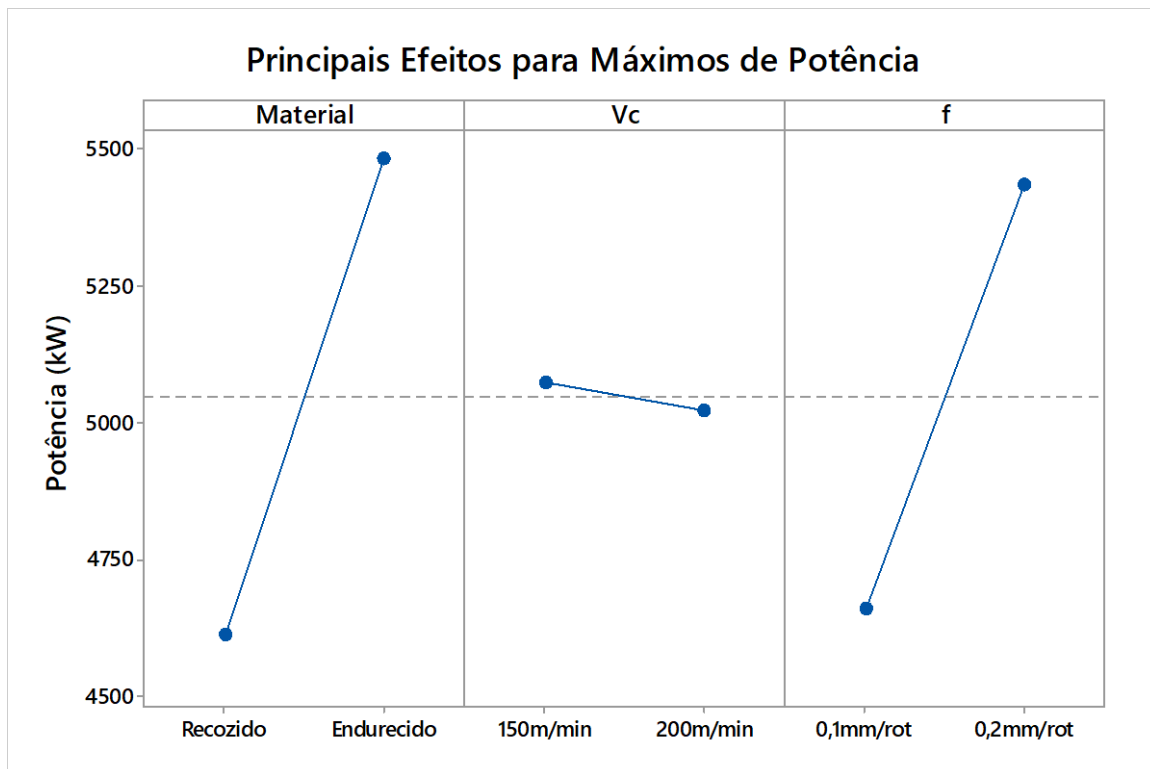
Fonte: Autor.

Nota-se na usinagem do aço recozido uma relativa constante na potência de corte consumida em diferentes avanços. A variação de V_c não é um fator significativo para o parâmetro da potência de corte no torneamento do aço ABNT 4340 recozido.

Com o endurecimento do material, observam-se maiores potência de corte com as condições de avanço 0,2 mm/rot e V_c de 150 m/min e também com avanço 0,1 mm/rot e V_c de 200 m/min. Esse consumo demasiado de potência nessas condições está relacionado com a quebra da ferramenta que ocorreu durante a usinagem do aço endurecido (assunto mais detalhado no tópico 5.7).

No aço endurecido, as condições de usinagem que apresentaram potências relativamente próximas da usinagem do material recozido foram aquelas em que as arestas da ferramenta de corte não apresentaram quebra.

Gráfico 8: Principais efeitos individuais para o parâmetro de máximos de potência de corte.



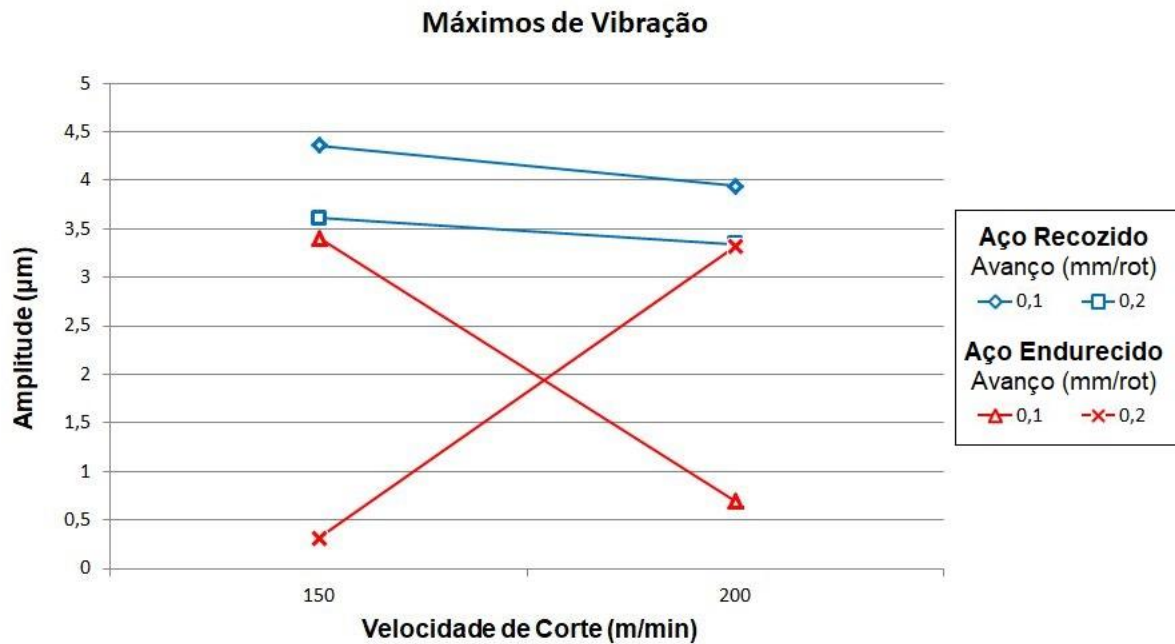
Fonte: Autor.

A usinagem do material recozido apresentou menor consumo de potência durante o corte do aço, juntamente com uma maior velocidade de corte e um baixo avanço.

5.5 MÁXIMOS DE VIBRAÇÃO

Os valores apresentados respectivos ao parâmetro Máximos de Vibração (Gráfico 9) foram obtidos durante os ensaios de torneamento do aço ABNT 4340 recozido e endurecido, com nível de significância de 5%. Apresentam-se também os principais efeitos individuais de cada variável durante o processo de usinagem (Gráfico 10).

Gráfico 9: Valores máximos de vibração em função da velocidade de corte (V_c) para diferentes avanços (f).

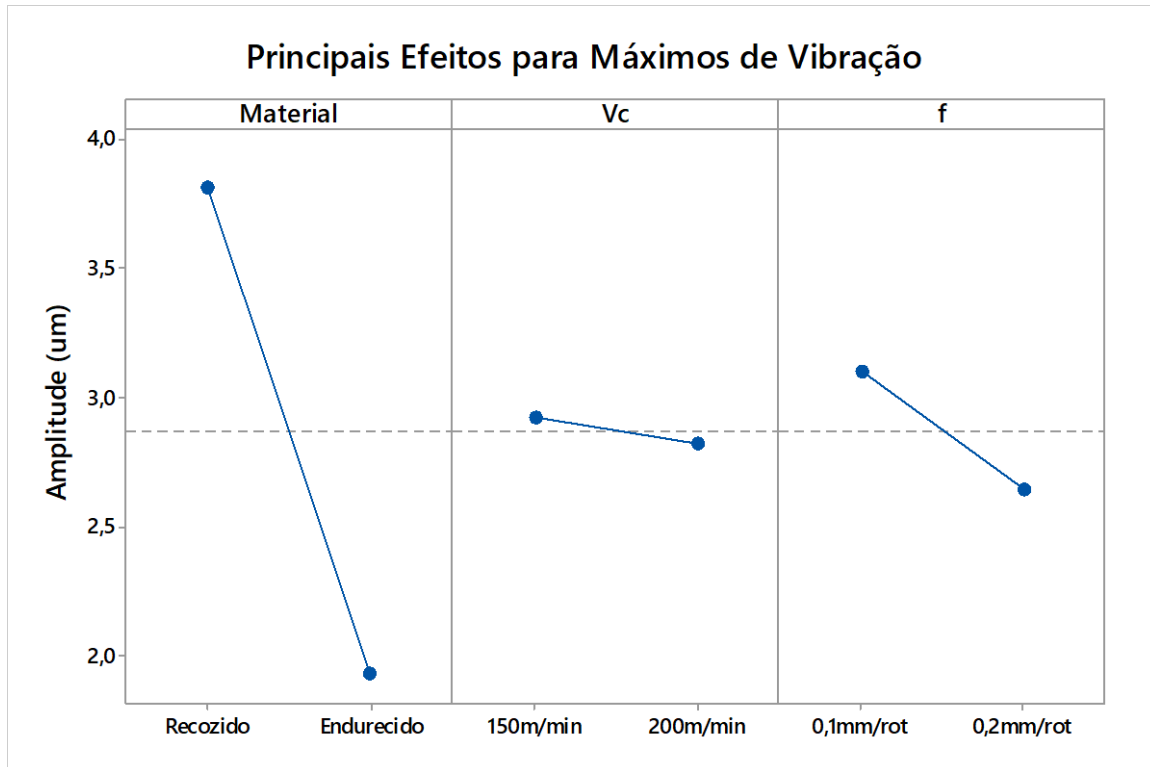


Fonte: Autor.

Nota-se uma diminuição da vibração durante a usinagem do aço recozido quando aumentamos a velocidade de corte de 150 para 200 m/min, para ambos os avanços.

Para o aço ABNT 4340 endurecido obtemos melhores valores de vibração quando combinamos altos valores de avanço com baixa V_c ou com baixos valores de avanço junto com alta V_c .

Gráfico 10: Principais efeitos individuais para o parâmetro de máximos de vibração.



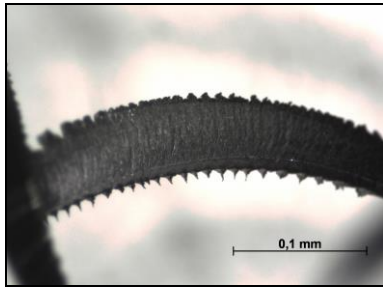
Fonte: Autor.

Os menores valores de vibração durante o processo de torneamento analisando seus fatores individualmente ocorreram no aço endurecido, na V_c de 200 m/min e no avanço de 0,2 mm/rot.

5.6 TIPOS E FORMAS DE CAVACOS

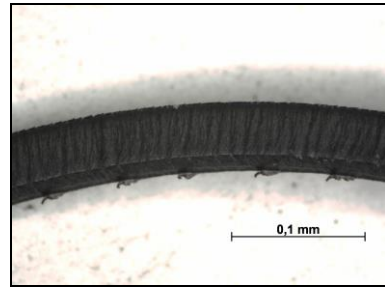
Cavacos obtidos pelo processo de torneamento do aço ABNT 4340 recozido (Figura 16-23) nas seguintes condições:

Figura 16: Aresta 1

 $V_c = 150 \text{ m/min}$ $f = 0,1 \text{ mm/rot}$


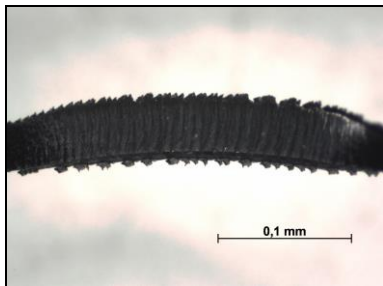
Fonte: Autor.

Figura 17: Aresta 2

 $V_c = 150 \text{ m/min}$ $f = 0,2 \text{ mm/rot}$


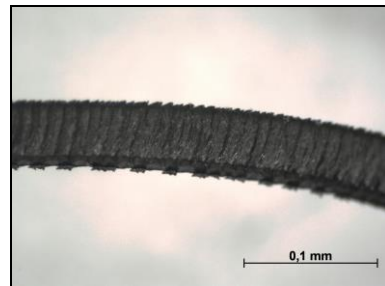
Fonte: Autor.

Figura 18: Aresta 3

 $V_c = 200 \text{ m/min}$ $f = 0,1 \text{ mm/rot}$


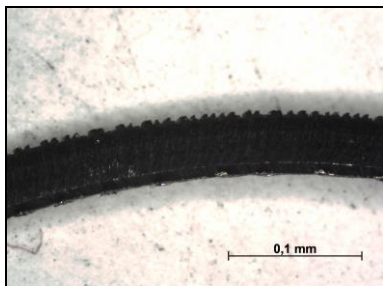
Fonte: Autor.

Figura 19: Aresta 4

 $V_c = 200 \text{ m/min}$ $f = 0,2 \text{ mm/rot}$


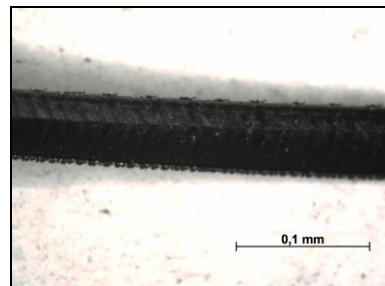
Fonte: Autor.

Figura 20: Réplica Aresta 1

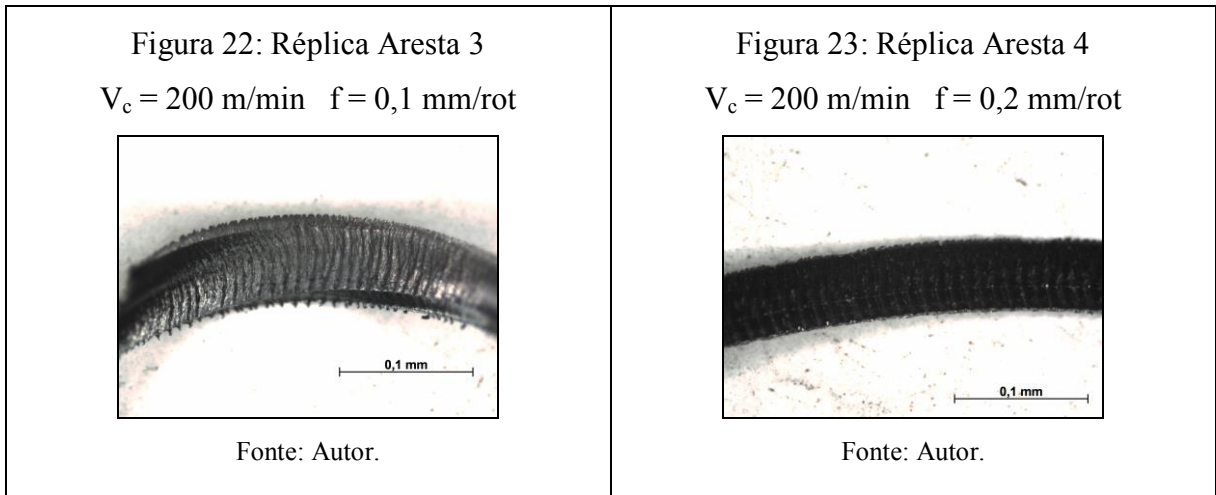
 $V_c = 150 \text{ m/min}$ $f = 0,1 \text{ mm/rot}$


Fonte: Autor.

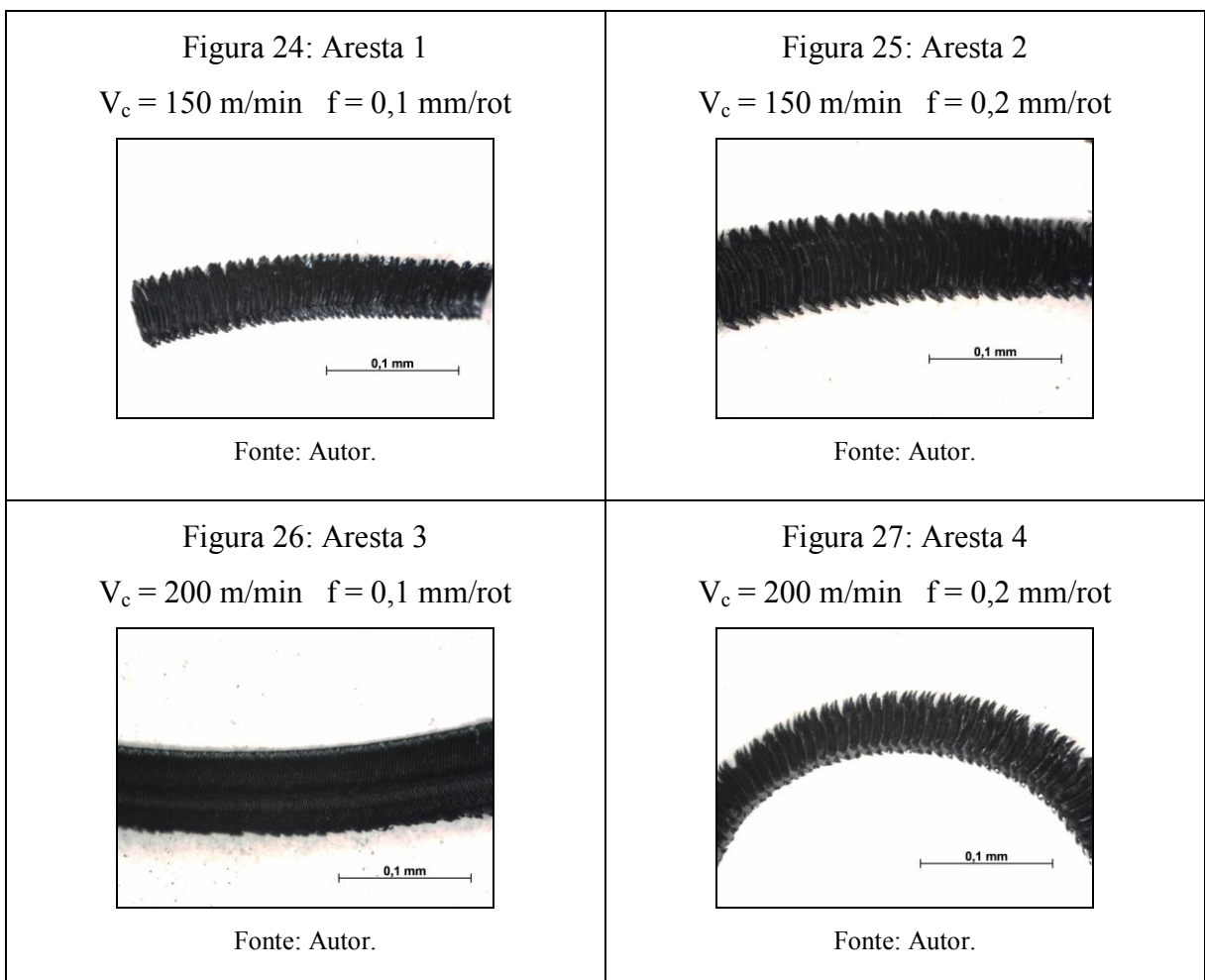
Figura 21: Réplica Aresta 2

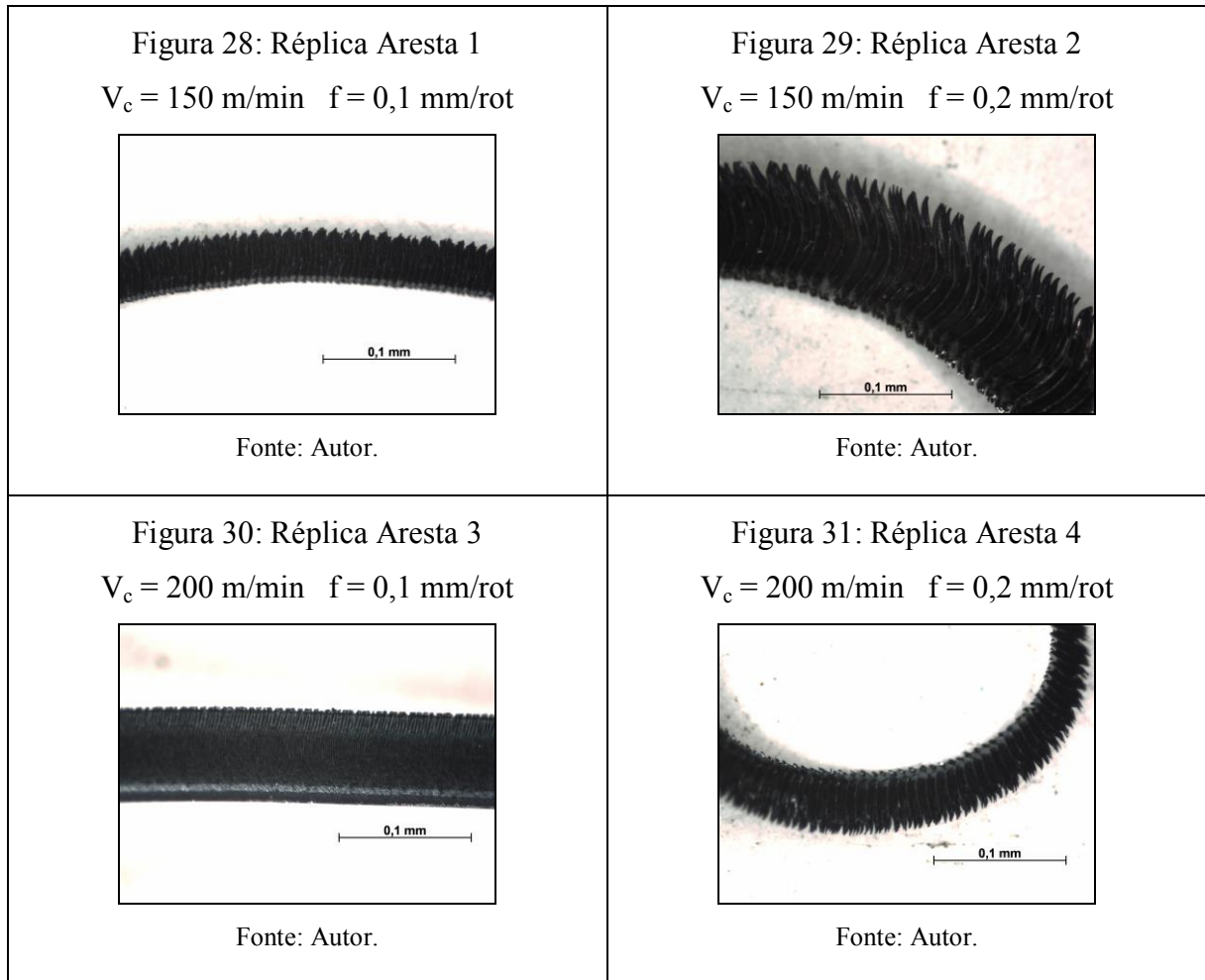
 $V_c = 150 \text{ m/min}$ $f = 0,2 \text{ mm/rot}$


Fonte: Autor.



Cavacos obtidos pelo processo de torneamento do aço ABNT 4340 endurecido (Figura 24-31) nas seguintes condições:





Todos os cavacos obtidos a partir da usinagem do aço recozido e endurecido são classificados como cavacos de cisalhamento, onde há um agrupamento de lamelas justapostas no cavaco, devido à deformação plástica que o material sofre durante sua usinagem.

5.7 DESGASTES DA FERRAMENTA

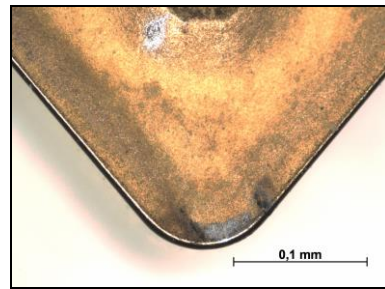
Desgastes e avarias da ferramenta de corte obtidas pelo processo de torneamento do aço ABNT 4340 recozido (Figura 32-39) nas seguintes condições:

Figura 32: Aresta 1

 $V_c = 150 \text{ m/min}$ $f = 0,1 \text{ mm/rot}$ 

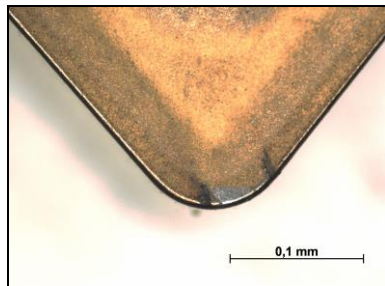
Fonte: Autor.

Figura 33: Aresta 2

 $V_c = 150 \text{ m/min}$ $f = 0,2 \text{ mm/rot}$ 

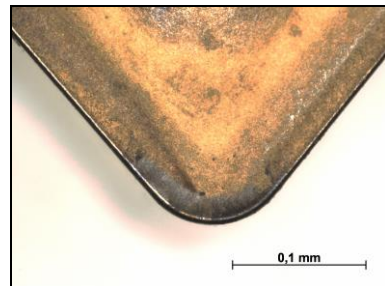
Fonte: Autor.

Figura 34: Aresta 3

 $V_c = 200 \text{ m/min}$ $f = 0,1 \text{ mm/rot}$ 

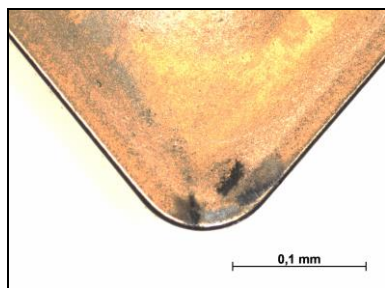
Fonte: Autor.

Figura 35: Aresta 4

 $V_c = 200 \text{ m/min}$ $f = 0,2 \text{ mm/rot}$ 

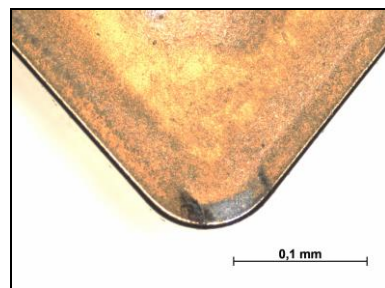
Fonte: Autor.

Figura 36: Réplica Aresta 1

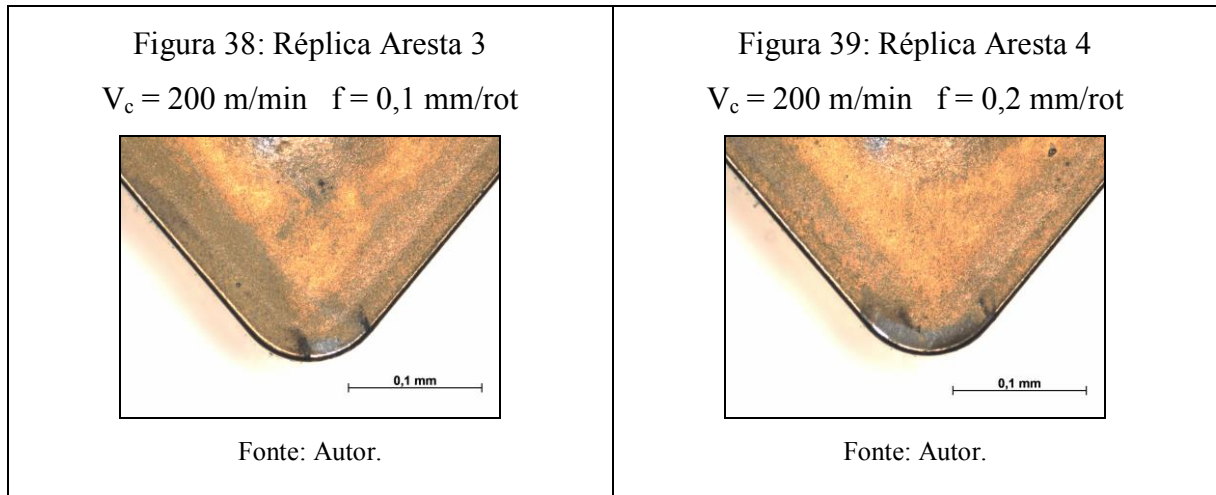
 $V_c = 150 \text{ m/min}$ $f = 0,1 \text{ mm/rot}$ 

Fonte: Autor.

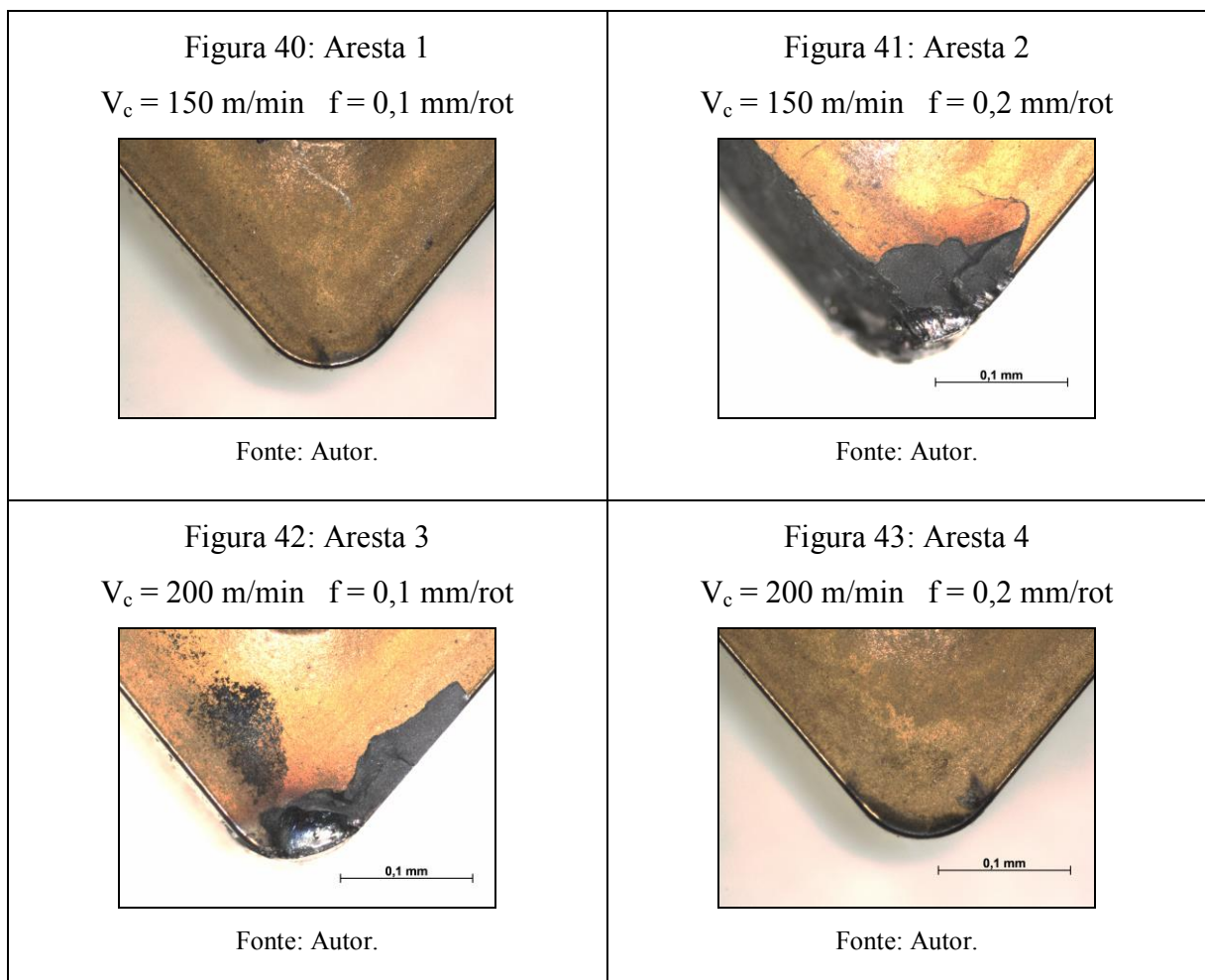
Figura 37: Réplica Aresta 2

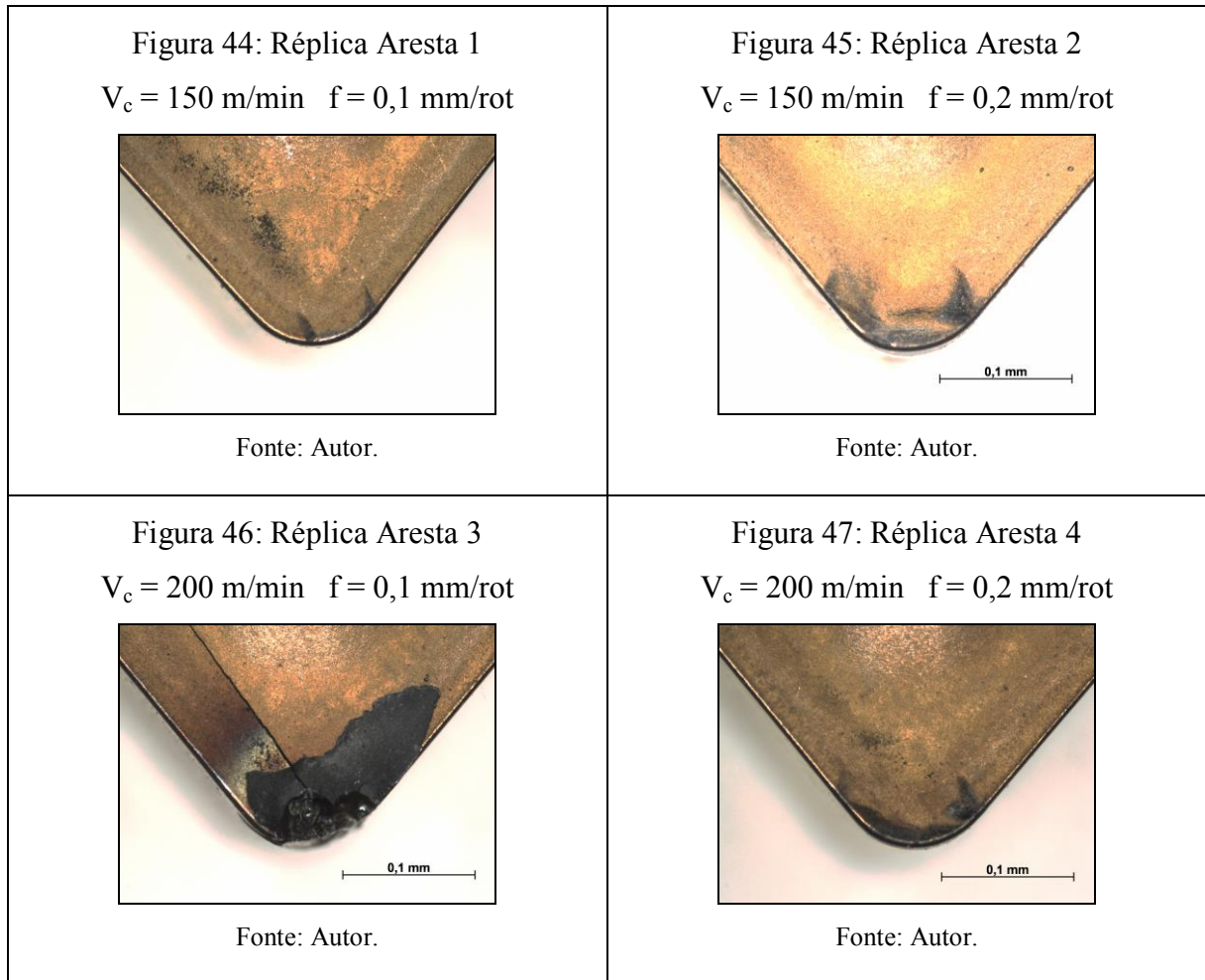
 $V_c = 150 \text{ m/min}$ $f = 0,2 \text{ mm/rot}$ 

Fonte: Autor.



Desgastes e avarias da ferramenta de corte obtidas pelo processo de torneamento do aço ABNT 4340 endurecido (Figura 40-47) nas seguintes condições:





Houve pequenos desgastes de flanco na ferramenta utilizada para usinar o aço recozido (Figura 32-39), visto que, as condições de usinagem da ferramenta são para materiais de elevada dureza, portanto o torneamento do aço ABNT 4340 recozido não resultou em grandes desgastes da ferramenta. Já para o material endurecido, notam-se em algumas arestas da ferramenta formação de trincas, entalhes e quebra (Figura 41/42/46). Situações que não deveriam ocorrer na usinagem deste material com esta ferramenta, segundo suas especificações. Uma plausível justificativa para o ocorrido são defeitos de processamento da ferramenta ou problemas durante a cobertura CVD no substrato, já que nucleações de trincas não devem acontecer para ferramentas de corte em geral.

Observa-se que nas demais arestas onde não tiveram defeitos primários (Figura 40/43/44/45/47) a usinagem do aço ABNT 4340 endurecido gerou pequenos desgastes de flanco assim como na usinagem do material recozido.

Os dados a seguir (Tabela 2 e 3) apresentam as medidas de desgaste e o tipo para cada condição de usinagem, tanto para o aço recozido quanto para o endurecido.

Tabela 2: Desgastes aço recozido.

AÇO ABNT 4340 RECOZIDO		
Condição	Aresta	V_B máx
$V_c=150 / f=0,1$	1	0,031 mm
$V_c=150 / f=0,2$	2	0,043 mm
$V_c=200 / f=0,1$	3	0,036 mm
$V_c=200 / f=0,2$	4	0,035 mm
$V_c=150 / f=0,1$	R1	0,033 mm
$V_c=150 / f=0,2$	R2	0,034 mm
$V_c=200 / f=0,1$	R3	0,038 mm
$V_c=200 / f=0,2$	R4	0,031 mm

Fonte: Autor.

Tabela 3: Desgastes aço endurecido.

AÇO ABNT 4340 ENDURECIDO		
Condição	Aresta	V_B máx
$V_c=150 / f=0,1$	1	0,054 mm
$V_c=150 / f=0,2$	2	Quebra
$V_c=200 / f=0,1$	3	Quebra
$V_c=200 / f=0,2$	4	0,080 mm
$V_c=150 / f=0,1$	R1	0,052 mm
$V_c=150 / f=0,2$	R2	0,157 mm
$V_c=200 / f=0,1$	R3	Quebra
$V_c=200 / f=0,2$	R4	0,040 mm

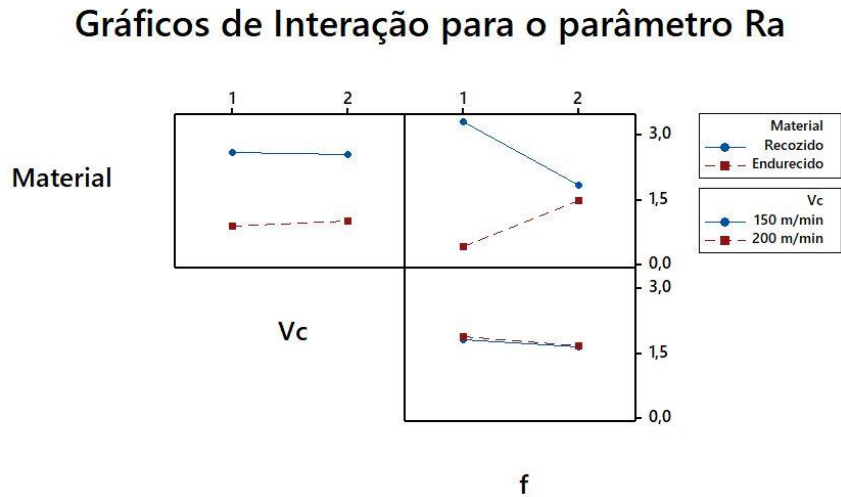
Fonte: Autor.

5.8 INTERAÇÕES ENTRE OS FATORES

Os resultados a serem apresentados nos próximos tópicos utilizam de comparação de fatores para analisar as possíveis interações existentes durante o processo de torneamento do aço 4340 recozido e endurecido, dessa forma possibilita uma melhor análise entre os fatores que apresentarem interações como: material, velocidade de corte e avanço.

5.8.1 RUGOSIDADE R_a

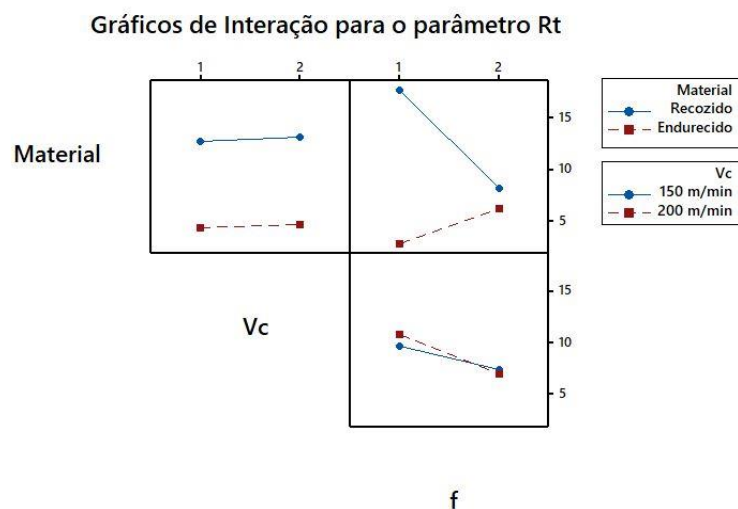
Na análise do Gráfico 11 (Análise de Variância – APÊNDICE A) nota-se que dentre as interações observadas, a única que se manteve praticamente equivalente para os dois materiais foi a interação $V_c \times f$. Os menores valores de rugosidade R_a ocorreram com a usinagem do aço endurecido e a maior discrepância de rugosidade acontece com variação da interação Material $\times f$ durante o processo de torneamento.

Gráfico 11: Interações Rugosidade R_a .

Fonte: Autor.

5.8.2 RUGOSIDADE R_t

Há uma interação dos fatores V_c x f para o parâmetro R_t , onde o Gráfico 12 (Análise de Variância – APÊNDICE B) indica que com um avanço de 0,1 mm/rot possui menores valores de rugosidade R_t com V_c de 150 m/min do que com 200 m/min. Porém com o aumento do avanço para 0,2 mm/rot temos melhores resultados de rugosidade R_t com a V_c de 200 m/min.

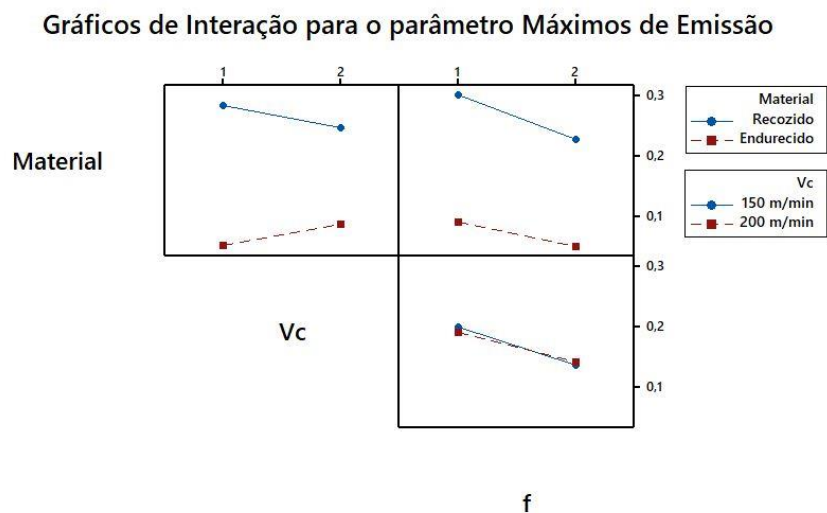
Gráfico 12: Interações rugosidade R_t .

Fonte: Autor.

5.8.3 MÁXIMOS DE EMISSÃO ACÚSTICA

Os menores valores observados dos máximos de EA no Gráfico 13 (Análise de Variância – APÊNDICE C) ocorreram para o aço ABNT 4340 endurecido, onde as melhores condições de uso da ferramenta de corte são para usinagem de materiais com maior dureza, como o ferro fundido cinzento e nodular, sendo assim, proporcionando menores valores de EA para o material endurecido.

Gráfico 13: Interações Máximos de Emissão Acústica.



Fonte: Autor.

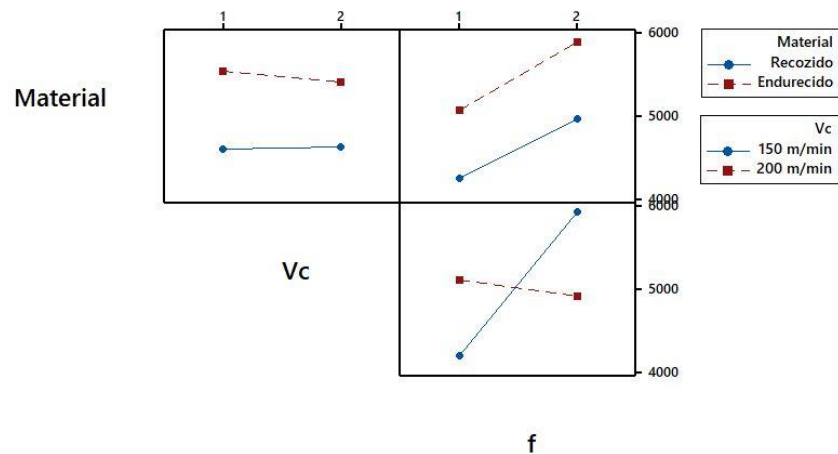
5.8.4 MÁXIMOS DE POTÊNCIA DE CORTE

No Gráfico 14 (Análise de Variância – APÊNDICE D), assim como nos demais parâmetros é possível notar uma interação entre os fatores V_c x f durante o processo de torneamento.

Na análise das condições de velocidade de corte e avanço separadamente, nota-se que o aço ABNT 4340 recozido apresenta menores valores de potência consumida no processo de usinagem, devido à sua menor dureza quando comparado com o material endurecido que exige maiores esforços e conseqüentemente maior potência de corte para seu processo de torneamento.

Gráfico 14: Interações Máximos de Potência.

Gráficos de Interação para o parâmetro Máximos de Potência



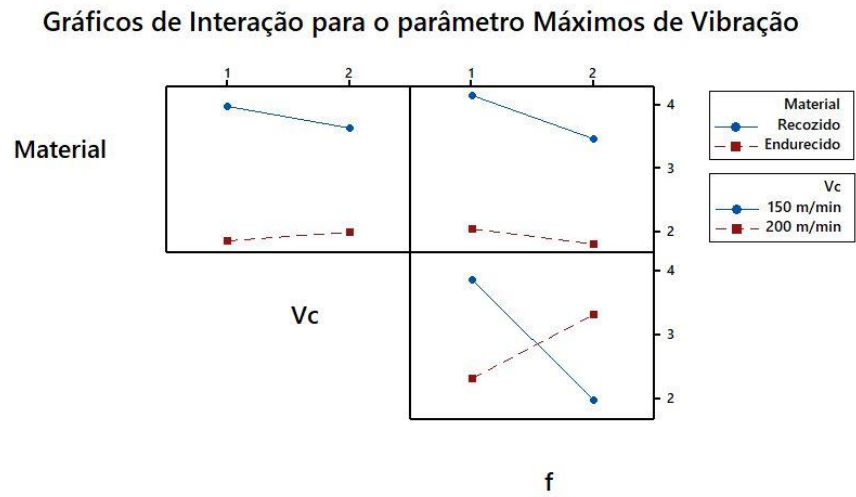
Fonte: Autor.

5.8.5 MÁXIMOS DE VIBRAÇÃO

De acordo com o Gráfico 15 (Análise de Variância – APÊNDICE E) é possível observar uma interação de fatores V_c x f para o parâmetro de vibração. Verifica-se após o aumento do avanço de 0,1 para 0,2 mm/rot, os menores valores de vibração ocorreram com V_c de 150 m/min.

Os melhores resultados em relação ao material foram do aço ABNT 4340 recozido, onde houve menor potência consumida durante sua usinagem.

Gráfico 15: Interações Máximos de Vibração.



Fonte: Autor.

6 CONCLUSÃO

Nas análises realizadas no processo de torneamento a seco do aço ABNT 4340, utilizando ferramenta de metal duro (T-Max®P) revestida com Ti(C,N)+ Al₂O₃+TiN, pode-se concluir que os melhores resultados de rugosidade R_a e R_t ocorreram no aço endurecido com menores níveis de V_c , ocasionando em melhor qualidade superficiais para a peça usinada quando comparado com o material recozido.

Com relação ao desgaste da ferramenta, as diferentes condições de usinagem para os dois materiais geraram pequenos desgaste de flanco que não comprometem o uso da ferramenta em grandes períodos de uso (os resultados obtidos com a ferramenta que sofreu quebra foram rejeitados na análise).

Na realização do processo de torneamento do aço ABNT 4340 recozido, conclui-se que as melhores condições de usinagem utilizando a ferramenta de metal duro revestida ocorreram com o avanço de 0,2 mm/rot e V_c de 200 m/min, onde os valores de rugosidade (R_a e R_t), emissão acústica e vibração são menores. Porém tal condição requer maior consumo de potência durante a usinagem do material recozido.

Para o aço ABNT 4340 temperado e revenido (endurecido), os melhores parâmetros de corte para esse material ocorrem com o avanço de 0,1 mm/rot e 150 m/min, utilizando a mesma ferramenta de corte. Obteve-se melhores resultados de R_a , R_t , EA e potência de corte do que em outras condições de usinagem.

Os cavacos formados a partir do processo de torneamento de ambos os materiais foram cisalhados, tendo variação apenas da forma de cavaco gerado com condições adversas de usinagem. As lamelas de cisalhamento são mais perceptíveis nos cavacos gerados do aço endurecido do que aço recozido.

REFERÊNCIAS

- AGOSTINHO, O. L.; RODRIGUES, A. C. S., LIRANI, J. **Tolerância, ajuste, desvios e análise de dimensões**. São Paulo: Edgard Blücher, 1981.
- AMORIM, H. J. **Estudo da relação entre velocidade de corte, desgaste de ferramenta, rugosidade e forças de usinagem em torneamento com ferramenta de metal duro**. 2002. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR : **6162/88**: Rio de Janeiro, 1988.
- BERNARDOS, P. G., VOSNIAKOS, G. S., 2003. Predicting surface roughness in machining: a review. **Int. J. Mach. Tools Manuf.** v.43, p. 833-844, 1977.
- BLAU, J. P. **Friction, Lubrication and Wear Technology**. ASM Handbook. v.18, p 20, 1995.
- BOTTURA, M. C. **O mundo da usinagem**.2000. p.19-20.
- CHINCHANIKAR, S., CHOUDHURY, S.K. Machining of hardened steel : experimental investigations, performance modeling and cooling techniques: a review. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**. v. 89, 2015.
- COSTA, C. E. **Monitoramento do processo de torneamento via corrente elétrica do motor principal da máquina e via vibração da ferramenta**; Dissertação de Mestrado; UNICAMP; pp. 3 - 13; 1995.
- COSTA, H. N. **Parâmetros de avaliação da rugosidade**: acabamento superficial. Disponível em: <<http://moldesinjecaoplasticos.com.br/parametros-de-avaliacao-da-rugosidade-acabamento-superficial/>>. Acesso em: 15 ago 2017
- SENAI “LUIZ SCAVONE”. **Tratamento Térmico**. São Paulo, 2000. (apostila)
- GGD METALS. **SAE 4340**. Disponível em: <<http://www.ggdmetals.com.br/produto/sae-4340/>>. Acesso em: 10 maio 2017.
- GONÇALVES, F.B.; SASAKI, M.Y.; SALOMÃO, R. Novos desafios e oportunidades nos processos de abrasão por lixamento. In: FEIRA E CONGRESSO USINAGEM, 6., São Paulo, 2010. **Anais...** São Paulo, 2010.

GONÇALVES, M.T.T.; CAGNON, J. A.; TIBÚRCIO, U. F de. O.; SOUZA, A. J. D de. Consumo de potência no torneamento cilíndrico de madeiras de eucalipto. In: EBRAMEM, 10. São Pedro, SP, 2006. **Anais...** São Pedro, 2006.

HECKER, R.L.; LIANG, S.Y.; WU, X.J.; Grinding force and power modeling based on chip thickness Analysis. **Int J Adv Manuf Technol** v. 33, p. 449–459, 2007.

JEMIELNIAK, K. Commercial Tool Condition Monitoring Systems, **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 15, p. 711-721, 1999.

KING, D. A., **Vibrations at surfaces**. Windermere, United Kingdom, 1985.

KONIG, W.; KLOCKE, F. **Fertigungsverfahren: Drehen, Fräsen, Bohren**. korrigierte Aufl. Berlin: Springer Verlag, 2002.

LOCATELI, D. **Trabalho de TCM Desenvolvimento**. São Paulo: Ebah, 2009.

MAIA, L. H. A. **Influência das condições de corte do fresamento do aço baixa liga nos sinais vibracionais e de emissão acústica**. Belo Horizonte, 2009.

MECHEFSKE, C. K.; SUM G. ; SHEASBY J. Using acoustic emission to monitor sliding **Wear**, p. 1-8, 2002.

PALMA, E. S, **Tolerância de acabamento: rugosidade**. PUC MINAS, 2006. (Apostila de Metrologia).

POLLI, M. L. **Análise da Estabilidade Dinâmica do Processo de Fresamento a Altas Velocidades de Corte**. Universidade Federal de Santa Catarina, 2005.

REDDY, N. S. e RAO, P. V. **Selection of optimum tool geometry and cutting conditions using a surface roughness prediction model for end milling**. Int. J. Adv. Manuf. Technol, 2005.

RABINOWICZ, E. **Friction and Wear of Materials**. New York: John Wiley and Sons, 1995.

ROSA, Luís Carlos. **Acabamento de superfícies: rugosidade superficial**. São Paulo: Universidade Estadual Paulista, 2009.

SANDVIK, C.: **Ferramentas para torneamento**; Catálogo Geral; 1995.

Sandvik Coromant. **Cobertura CVD**. Disponível em: <http://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/materials/cutting_tool_materials/coated_cemented_carbide/pages/coating-%E2%80%93cvd.aspx>. Acesso em: 20 jun. 2017.

SANDVIK COROMANT. **T-Max P**, disponível em: <http://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/products/t-max_p/>. Acesso em: 12 maio 2017.

SANDVIK COROMANT, **Manual técnico de usinagem**, AB Sandvik Coromant, Sandviken, Sweden. 2005.

SHU, N. P.: New theories of wear and their implications for tool material. **Wear** . v. 62, p. 1 – 20, 1980.

SILVA, L. R.; ABRÃO, A.M. Torneamento e retificação do aço 4340 temperado. In: CONGRESSO CHILENO DE INGENIERIA MECÁNICA, 8., Chile, 1998. **Anais...** Chile, 1998, p. 663 - 668.

SOUTO, U. B. et al, Avaliação do Perfil de Rugosidade Através do Sinal de Emissão Acústica, In: SIMPÓSIO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, 14., 2004, Brasil. **Anais...** Brasil, 2004.

SOUZA, A. J. **Aplicação de multisensores no prognóstico da vida da ferramenta de corte no torneamento**. 2004. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianopolis, 2004.

STOETERAU, P. D. **Usinagem com ferramentas de geometria definida**. São Paulo, SP, Brasil.

TIME, I. I. On the resistance of metals and wood to cutting. **Journal of Materials Processing Technology**, v.71, p. 247-257, 1997.

TRENT, E. M., WRIGHT, P. K. **Metal Cutting**. 4th ed. Woburn: Butterworth Heinemann, 2000, 446p.

VITTORINO, M. A. **Manutenção preditiva: análise de vibração**. 2008. Disponível em: <<http://www.mantenimentomundial.com/sites/mmnew/bib/notas/Apostila.pdf>>. Acesso em: 06 maio 2010.

WANG, J. Development of a chip flow model for turning operations. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v.41, p.1265-1274, 2001.

WILLIAMS, J. A. The action of the lubricants in metal cutting. **Journal Mechanical Engineering Science**. v. 19, n. 5, p. 202-212, 1968.

WILLIAMS, J. A. Wear and wear particles: some fundamentals. **Tribology International**. v. 38, n. 10, p. 863-870, 2005.

APÊNDICE A

Fatorial de Regressão: Ra versus Material; Vc; f

Análise de Variância

Fonte	DF	Adj SS	Adj MS	F-Valor	P-Valor
Modelo	7	51,752	7,3931	3,21	0,008
Linear	3	32,337	10,7789	4,69	0,007
Material	1	31,880	31,8795	13,86	0,001
Vc	1	0,024	0,0242	0,01	0,919
f	1	0,433	0,4328	0,19	0,667
2 - Modo Interações	3	19,278	6,4261	2,79	0,053
Material*Vc	1	0,077	0,0774	0,03	0,855
Material*f	1	19,198	19,1976	8,35	0,006
Vc*f	1	0,003	0,0032	0,00	0,970
3 - Modo Interações	1	0,137	0,1372	0,06	0,808
Material*Vc*f	1	0,137	0,1372	0,06	0,808
Erro	40	92,006	2,3001		
Total	47	143,758			

APÊNDICE B

Fatorial de Regressão: Rt versus Material; Vc; f

Análise de Variância

Fonte	DF	Adj SS	Adj MS	F-Valor	P-Valor
Modelo	7	1509,46	215,637	3,46	0,005
Linear	3	977,87	325,955	5,23	0,004
Material	1	862,68	862,679	13,84	0,001
Vc	1	2,04	2,042	0,03	0,857
f	1	113,14	113,145	1,82	0,185
2 - Modo Interações	3	519,23	173,077	2,78	0,054
Material*Vc	1	0,10	0,099	0,00	0,968
Material*f	1	512,35	512,351	8,22	0,007
Vc*f	1	6,78	6,782	0,11	0,743
3- Modo Interações	1	12,36	12,360	0,20	0,658
Material*Vc*f	1	12,36	12,360	0,20	0,658
Erro	40	2492,88	62,322		
Total	47	4002,34			

APÊNDICE C

Fatorial de Regressão: Máximos de Emissão versus Material; Vc; f

Análise de Variância

Fonte	DF	Adj SS	Adj MS	F-Valor	P-Valor
Modelo	7	0,544570	0,077796	21,53	0,000
Linear	3	0,495198	0,165066	45,69	0,000
Material	1	0,456300	0,456300	126,29	0,000
Vc	1	0,000024	0,000024	0,01	0,935
f	1	0,038874	0,038874	10,76	0,002
2 - Modo Interações	3	0,018768	0,006256	1,73	0,176
Material*Vc	1	0,014981	0,014981	4,15	0,048
Material*f	1	0,003267	0,003267	0,90	0,347
Vc*f	1	0,000520	0,000520	0,14	0,706
3 - Modo Interações	1	0,030603	0,030603	8,47	0,006

Material*Vc*f	1	0,030603	0,030603	8,47	0,006
Erro	40	0,144524	0,003613		
Total	47	0,689094			

APÊNDICE D

Fatorial de Regressão: Máximos de Potência versus Material; Vc; f

Análise de Variância

Fonte	DF	Adj SS	Adj MS	F-Valor	P-Valor
Modelo	7	36157762	5165395	29,89	0,000
Linear	3	16289633	5429878	31,42	0,000
Material	1	9087512	9087512	52,59	0,000
Vc	1	30706	30706	0,18	0,676
f	1	7171416	7171416	41,50	0,000
2 - Modo Interações	3	11064862	3688287	21,34	0,000
Material*Vc	1	67793	67793	0,39	0,535
Material*f	1	30706	30706	0,18	0,676
Vc*f	1	10966364	10966364	63,46	0,000
3 - Modo Interações	1	8803267	8803267	50,94	0,000
Material*Vc*f	1	8803267	8803267	50,94	0,000
Erro	40	6912614	172815		
Total	47	43070376			

APÊNDICE E

Fatorial de Regressão: Máximos de Vibração versus Material; Vc; f

Análise de Variância

Fonte	DF	Adj SS	Adj MS	F-Valor	P-Valor
Modelo	7	95,448	13,6355	106,05	0,000
Linear	3	44,942	14,9808	116,52	0,000
Material	1	42,369	42,3693	329,54	0,000
Vc	1	0,119	0,1191	0,93	0,342
f	1	2,454	2,4540	19,09	0,000
2 - Modo Interações	3	27,209	9,0696	70,54	0,000
Material*Vc	1	0,717	0,7168	5,57	0,023
Material*f	1	0,591	0,5914	4,60	0,038
Vc*f	1	25,900	25,9005	201,45	0,000
3 - Modo Interações	1	23,297	23,2974	181,20	0,000
Material*Vc*f	1	23,297	23,2974	181,20	0,000
Erro	40	5,143	0,1286		
Total	47	100,591			