

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO SUCKOW DA
FONSECA**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ENGENHARIA MECÂNICA

RAMON ELIAS DE JESUS

**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE REVENIDO NAS FORÇAS
DE USINAGEM GERADAS DURANTE TORNEAMENTO DO AÇO
SAE 4340**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

RIO DE JANEIRO

2021

RAMON ELIAS DE JESUS

**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE REVENIDO NAS FORÇAS
DE USINAGEM GERADAS DURANTE TORNEAMENTO DO AÇO
SAE 4340**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, do Departamento de Engenharia Mecânica, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca.

Orientador: Prof. Tatiane de Campos Chuvas, D. Sc.

RIO DE JANEIRO

2021

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

J58 Jesus, Ramon Elias de
Influência da temperatura de revenido nas forças de usinagem geradas durante torneamento do aço SAE 4340 / Ramon Elias de Jesus – 2021.
73f.: il. color. + apêndices, enc.

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2021.

Bibliografia: f. 70-73

Orientador: Tatiane de Campos Chuvas.

1. Engenharia mecânica. 2. Aço – Tratamento térmico. 3. Torneamento. I. Chuvas, Tatiane de Campos (Orient.). II. Título.

CDD 620.1

AGRADECIMENTOS

A Deus, por toda a sabedoria e por estar ao meu lado em todos os momentos de minha vida.

A professora orientadora D.Sc. Tatiane de Campos Chuvas por acreditar na realização deste trabalho, pela confiança e toda orientação.

Ao M.Sc. Rafael Hamano pelo auxílio nas atividades de laboratório e orientação prestada.

Ao professor D.Sc. Matheus Campolina Mendes por todo auxílio durante a realização dos tratamentos térmicos.

Ao técnico de laboratório Brenno Tavares Duarte pelo auxílio em diversas atividades que compõem este trabalho.

Aos meus familiares, que sempre mantiveram dispostos a colaborar com minha formação profissional, prestando suporte, amor e força para seguir trilhando meu caminho.

Aos meus amigos do CEFET/RJ que compartilharam todos os momentos difíceis e contribuíram para que eu chegasse até aqui.

RESUMO

ELIAS, Ramon. Influência da temperatura de revenido nas forças de usinagem geradas durante torneamento do aço SAE 4340. 2021. 83. Trabalho de Conclusão de Curso – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca. Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2021.

O aumento da demanda de bens de consumo nos últimos anos exigiu que os processos de manufatura se tornassem cada vez mais rápidos e eficientes, com menores custos e tempos de fabricação, o que leva a condições mais severas de usinagem. A análise das forças geradas durante os processos de usinagem é de extrema importância, pois o dimensionamento do motor da máquina-ferramenta depende diretamente dessas forças, assim como a ferramenta precisa suportar os esforços atuantes durante os processos de usinagem, pois podem causar deformação plástica, desgastes ou colapso na ferramenta. Dessa forma, se torna necessário conhecer a magnitude dessas forças pois as mesmas podem inviabilizar um processo. Entre os processos de fabricação por usinagem mais utilizados na indústria está o torneamento, com o qual é possível obter desde geometrias simples até formas mais complexas. Entre os fatores que influenciam as forças de usinagem está o material da peça e, conseqüentemente, os tratamentos térmicos aplicados a esse material. Assim, este trabalho teve como objetivo avaliar a influência da temperatura de revenido na análise das forças de usinagem geradas durante torneamento do aço SAE 4340. Os resultados mostraram que as forças passiva e avanço sofrem maior influência com a variação da temperatura de revenido. Também foi observado que para menores temperaturas de revenido a força de avanço foi superior em comparação com as demais componentes da força de usinagem. Portanto, as melhores condições de usinagem foram encontradas utilizando menores avanços e utilizando a ferramenta de maior raio de ponta, onde foi obtido melhor acabamento superficial das superfícies usinadas.

Palavras-chaves: torneamento, força de usinagem, aço SAE 4340, revenido

ABSTRACT

ELIAS, Ramon. influence of tempering temperature on the analysis of machining forces generated during turning of SAE 4340 steel. 2021. 83. Trabalho de Conclusão de Curso – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca. Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2021.

The increase in demand for consumer goods in recent years has required manufacturing processes to become increasingly faster and more efficient, with lower costs and manufacturing times, which leads to more severe machining conditions. The analysis of the forces generated during the machining processes is extremely important, as the dimensioning of the machine tool motor depends directly on these forces, as well as the tool needs to withstand the efforts acting during the machining processes, as they can cause plastic deformation, tool wear or collapse. Thus, it is necessary to know the magnitude of these forces as they can make a process unfeasible. Among the machining processes most used in the industry is turning, with which it is possible to obtain from simple geometries to more complex shapes. Among the factors that influence machining forces is the workpiece material and, consequently, the heat treatments applied to that material. Thus, this work aimed to evaluate the influence of tempering temperature on the analysis of machining forces generated during turning of SAE 4340 steel. The results showed that passive and feed forces are more influenced by the variation of tempering temperature. It was also observed that for lower tempering temperatures the feed force was higher compared to the other components of the machining force. Therefore, the best machining conditions were found using lower feeds and the tool with the largest nose radius, where a better surface finish of the machined surfaces was obtained.

Keywords: turning, machining force, SAE 4340 steel, tempering

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Principais processos fabricação por usinagem com remoção de material.....	15
Figura 2 – Representação do ponto de referência na cunha cortante.....	17
Figura 3 - Componentes da força de usinagem no torneamento	18
Figura 4 - Influência do raio da ponta da ferramenta na usinagem do aço SAE 4340	22
Figura 5 - Efeito da velocidade de corte nas forças de usinagem no torneamento do aço SAE 4340 endurecido com ferramenta de metal duro com cobertura ISO P15-K15 para amostras de dureza 42 e 50 HRC, com $f = 0,2$ mm/rot e $a_p = 1$ mm	23
Figura 6 – Efeito da velocidade de corte sobre as forças de usinagem, em (I) para diferentes avanços (f) e em (II), para diferentes profundidades de corte (d)	24
Figura 7 - Seção de corte para o torneamento.....	25
Figura 8 - Efeito do avanço nas forças de usinagem no torneamento do aço SAE 4340 endurecido com ferramenta de metal duro de cobertura ISO P15-K15 para amostras de dureza 42 e 50 HRC, com $V_c = 120$ m/min e $a_p = 1$ mm.....	26
Figura 9 - Efeito da profundidade de corte nas forças de usinagem no torneamento do aço SAE 4340 endurecido com ferramenta de metal duro de cobertura ISO P15-K15 para amostras de dureza 42 e 50 HRC, com $V_c = 120$ m/min e $f = 0,2$ mm/rev	26
Figura 10 - Resultado experimental do ensaio 1: $V_c = 80$ m/min e $f = 0,08$ mm/rot. F_c = Força de corte e F_f = Força de avanço	29
Figura 11 - Resultado experimental do ensaio 2: $V_c = 80$ m/min e $f = 0,10$ mm/rot. F_c = Força de corte e F_f = Força de avanço	30
Figura 12 - Resultado experimental do ensaio 3: $V_c = 150$ m/min e $f = 0,08$ mm/rot. F_c = Força de corte e F_f = Força de avanço	30
Figura 13 - Resultado experimental do ensaio 3: $V_c = 150$ m/min e $f = 0,10$ mm/rot. F_c = Força de corte e F_f = Força de avanço	31
Figura 14 - Microestrutura do aço SAE 4340 temperado com aumento de 1000x	33

Figura 15 - Curva de revenimento para aço SAE 4340 com 0,39% C, 0,72% Mn, 0,25% Si, 0,01% P, 0,025% S, 0,75% Cr, 0,24% Mo e 1,72% Ni.....	35
Figura 16 – Desgastes em ferramenta de Ti(C,N)+Al ₂ O ₃ +TiN durante torneamento do aço SAE 4340 com V _c de 150 e 200 m/min e $f = 0,1$ e $f = 0,2$ mm/rot, com $a_p = 0,25$ mm.....	37
Figura 17 - Vida das ferramentas SQ e CQ (com e sem revestimento) no torneamento radial do aço SAE 4340.....	38
Figura 18 - Perfil das superfícies usinadas	39
Figura 19 – Definição dos parâmetros de rugosidade: (a) Rugosidade Ra, (b) Rugosidade Rz, (c) Rugosidade Rt.....	40
Figura 20 - Geometria inicial das amostras.....	41
Figura 21 - Geometria final após preparação das amostras (cotas em milímetros)	42
Figura 22 – Representação dos insertos.....	45
Figura 23 – Sistema de aquisição de dados: dinamômetro e conexões	46
Figura 24 – Ensaio de rugosidade.....	47
Figura 25 - Curva de revenido do aço SAE 4340 obtida pelos ensaios de dureza	49
Figura 26 - Forças de usinagem – Revenido a 600 °C, Re = 0,4 mm, $f = 0,15$ mm/rot.	51
Figura 27 - Forças de usinagem – Revenido a 500 °C, Re = 0,4 mm, $f = 0,11$ mm/rot.	51
Figura 28 - Influência da temperatura de revenido nas forças de corte (F _c): (a) Re = 0,4 mm e (b) Re = 0,8 mm.....	53
Figura 29 - Influência da temperatura de revenido nas forças de avanço (F _a): (a) Re = 0,4 mm e (b) Re = 0,8 mm.....	54
Figura 30 - Influência da temperatura de revenido nas forças passivas (F _p): (a) Re = 0,4 mm e (b) Re = 0,8 mm.....	55
Figura 31 - Influência do avanço nas forças de corte (F _c): (a) Re = 0,4 mm e (b) Re = 0,8 mm.....	57
Figura 32 - Influência do avanço nas forças de avanço (F _a): (a) Re = 0,4 mm e (b) Re = 0,8 mm.	58
Figura 33 - Influência do avanço nas forças passivas (F _p): (a) Re = 0,4 mm e (b) Re = 0,8 mm.....	59

Figura 34 - Amostra temperada: Seções não avaliadas – Re = 0,4 mm, avanços: (a) $f = 0,20$ mm/rot, (b) $f = 0,11$ mm/rot, (c) $f = 0,15$ mm/rot, (d) $f = 0,25$ mm/rot	61
Figura 35 - Rugosidade Ra das amostras usinadas: (a) Re = 0,4 mm e (b) Re = 0,8 mm.	63
Figura 36 - Rugosidade Rz das amostras usinadas: (a) Re = 0,4 mm e (b) Re = 0,8 mm.	65
Figura 37 - Rugosidade Rt máximo das amostras usinadas: (a) Re = 0,4 mm e (b) Re = 0,8 mm.	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química do aço SAE 4340 (em % de peso)	28
Tabela 2 - Identificação das amostras.....	43
Tabela 3 - Condições de análise	44
Tabela 4 - Dimensões dos insertos	45
Tabela 5 - Condições de operação dos insertos	45
Tabela 6 - Amostra teste: avaliação da dureza Rockwell A	48
Tabela 7 - Valores experimentais das forças de usinagem.....	49
Tabela 8 - Rugosidade Ra, Rz e Rt com utilização de inserto com Re = 0,4 mm	60
Tabela 9 - Rugosidade Ra, Rz e Rt com utilização de inserto com Re = 0,8 mm	61
Tabela 10 - Valores ensaios de dureza Rockwell C	74
Tabela 11 - Amostra 1: temperada - Parâmetros de rugosidades.....	75
Tabela 12 - Amostra 2: revenida a 600°C - Parâmetros de rugosidades	75
Tabela 13 - Amostra 3: revenida a 500°C - Parâmetros de rugosidades	76
Tabela 14 - Amostra 4: revenida a 400°C - Parâmetros de rugosidades	77
Tabela 15 - Amostra 5: revenida a 300°C - Parâmetros de rugosidades	77

LISTA DE SÍMBOLOS

Sigla	Descrição	Unidade
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>	-
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas	-
Fa	Força de avanço	N
Fc	Força de corte	N
Fp	Força passiva (ou de profundidade)	N
Ft	Força ativa	N
Fu	Força de usinagem	N
TT	Tratamento Térmico	-
TTT	Temperatura-Tempo-Transformação	-
Va	Velocidade de avanço	mm/min
Vc	Velocidade de corte	m/min
Ve	Velocidade efetiva de corte	m/min
Pc	Potência de corte	kW
Pa	Potência de avanço	kW
Pm	Potência do motor	kW
N	Velocidade de rotação	rpm
φ	Ângulo da direção de avanço	graus
η	Ângulo da direção efetiva de corte	graus
f	Avanço	mm/volta
η_{ef}	Rendimento	-
D	Diâmetro externo	mm
a_p	Profundidade de usinagem	mm
MQL	<i>Minimum Quantity Lubrication</i>	-
A_S	Área da seção de corte	mm ²
b	Largura do cavaco	mm
h	Espessura do cavaco	mm
α	Ângulo de folga	graus
λ	Ângulo de inclinação	graus
γ	Ângulo de saída	graus
χ	Ângulo de posição	graus
DP	Desvio padrão	-
Re	Raio da ponta da ferramenta	mm

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	11
INTRODUÇÃO.....	11
1.1. JUSTIFICATIVA.....	12
1.2. METODOLOGIA.....	12
1.3. OBJETIVOS.....	13
CAPÍTULO 2	14
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1. USINAGEM.....	14
2.1.1. Torneamento cilíndrico	15
2.1.2. Forças de usinagem no torneamento.....	16
2.1.3. FATORES QUE INFLUENCIAM AS FORÇAS DE USINAGEM ...	19
2.1.3.1. Material da peça e tratamentos térmicos	20
2.1.3.2. Geometria da ferramenta.....	21
2.1.3.3. Velocidade de corte	22
2.1.3.4. Seção de corte.....	24
2.1.4. POTÊNCIAS DE CORTE	27
2.2. AÇO SAE 4340.....	28
2.2.1. Torneamento do aço SAE 4340.....	28
2.3. TRATAMENTOS TÉRMICOS.....	31
2.3.1. Têmpera	32
2.3.2. Revenido	33
2.3.3. Tratamento térmico em aços SAE 4340	34
2.3.4. Torneamento de aços temperados e revenidos	35
2.4. RUGOSIDADE.....	38
CAPÍTULO 3	41

MATERIAIS E MÉTODOS.....	41
3.1. PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS	41
3.3. APLICAÇÃO DOS TRATAMENTOS TÉRMICOS.....	42
3.4. ENSAIO DE DUREZA	43
3.5. TORNEAMENTO DAS AMOSTRAS	44
3.6. OBTENÇÃO DAS FORÇAS DE USINAGEM	46
3.7. AVALIAÇÃO DA RUGOSIDADE	46
CAPÍTULO 4	48
RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
4.1. ANÁLISE DA DUREZA.....	48
4.2. ANÁLISE DAS FORÇAS DE USINAGEM	49
4.3. ANÁLISE DA RUGOSIDADE.....	60
CAPÍTULO 5	67
CONCLUSÕES.....	67
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	69
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70
APÊNDICE A – Tabela cálculo de dureza.....	74
APÊNDICE B – Tabelas cálculo de rugosidade	75
APÊNDICE C – Desenho técnico das amostras	79

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O advento industrial, a evolução dos processos de fabricação e a globalização exigem que os métodos para produção de bens de capital se tornem cada vez mais rápidos, eficientes, com menores gastos energéticos, mais baratos, menores perdas e com qualidade aceitável. Desta forma, o conhecimento dos parâmetros que influenciam os meios de produção se torna fundamental para que esse objetivo seja alcançado.

O torneamento cilindro, por ser um método de usinagem amplamente empregado na indústria de transformação de bens, ganha um importante papel na indústria, visto que peças de pequenas e grandes complexidades podem ser fabricadas no torno. Assim sendo, o estudo dos parâmetros de corte neste método de fabricação ganha um destaque significativo.

A avaliação das forças envolvidas é um dos indicadores que pode ser avaliados no torneamento cilíndrico. As forças de usinagem influenciam no dimensionamento do(s) motor(es) do torno, os desgastes nas ferramentas, além de estarem diretamente relacionadas as tolerâncias dimensionais e geométricas do processo de usinagem (Diniz *et al.*, 2013). Desta forma, a avaliação e entendimento dos fatores que influenciam essas forças devem ser conhecidos, para que os processos de usinagem alcancem seus objetivos.

Dentre os fatores que influenciam as forças de usinagem, o material da peça é um dos que mais impactam nessa avaliação, bem como os tratamentos térmicos aplicados ao material. Sendo o aço SAE 4340 amplamente empregado na indústria metal-mecânica, diversos estudos vêm sendo desenvolvidos à fim de avaliar a influência dos parâmetros de corte, tais como a velocidade de corte, avanço, profundidade de corte em relação a essas forças, visando aumentar a produtividade e redução dos custos de fabricação.

1.1. JUSTIFICATIVA

O aço SAE 4340 é utilizado em diversos setores, como nas indústrias aeroespacial, automobilística, equipamentos, estruturas e máquinas. Sendo assim, a determinação das forças resultantes nos processos de usinagem se faz necessário, visto que estas em determinadas circunstâncias podem definir a viabilidade do processo de fabricação.

Além disso, o cálculo das forças de usinagem é fundamental para o dimensionamento do motor máquina-ferramenta, sendo que a potência requerida é produto entre a força de corte (F_c) e velocidade de corte (V_c). Essas forças definem também as tolerâncias geométricas, temperatura de corte, desgaste da ferramenta utilizada, usinabilidade do material, fatores estes que influenciam diretamente na viabilidade do processo.

Existem algumas formas de medir as forças de usinagem, por meio de análises analíticas, experimentais, numéricas e mistas, utilizando dois ou todos os métodos (Araujo *et al.*, 2020). A escolha do método a ser aplicado, dependerá do conhecimento das variáveis dos processos de usinagem, propriedades dos materiais, condições de contorno, recursos computacionais e experimentais, ou seja: quanto mais informações sobre o processo de usinagem for obtido, e maior a capacidade de recursos físicos para realização dos ensaios, menor será o erro entre o valor real e o calculado.

Os testes experimentais, na análise das forças de corte, utilizam dinamômetros e estes, de acordo com Ferraresi (2003), devem satisfazer os seguintes requisitos: sensibilidade, precisão, rigidez, exatidão de reprodução de forças variáveis com o tempo, insensibilidade quanto à variação de temperatura e à unidade. Assim, é possível determinar mais precisamente as forças atuantes no processo de fabricação.

1.2. METODOLOGIA

O desenvolvimento deste trabalho consiste em analisar as forças atuantes durante torneamento do aço SAE 4340, após ser submetido aos tratamentos térmicos de tempera, seguido de revenido a diferentes temperaturas, avaliando a influência do

avanço e do raio de ponta da ferramenta de corte em cada condição de tratamento térmico. As forças de usinagem foram medidas experimentalmente. Durante toda a confecção deste projeto, foram feitas revisões bibliográficas à fim de embasar os dados obtidos.

Após a preparação das amostras, estas serão submetidas aos tratamentos térmicos de têmpera, seguido de revenido nas seguintes temperaturas: 200°C, 300°C, 400°C, 500°C e 600°C. Após os tratamentos térmicos foram medidos os valores de dureza afim de tentar obter uma correlação entre esses valores e as forças de usinagem, além de uma análise de rugosidade para verificar a influência das condições de usinagem no acabamento final da peça.

1.3. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo analisar a influência da temperatura de revenido nas forças de usinagem geradas no torneamento do aço SAE 4340. Por ser um aço classificado como alta temperabilidade, a magnitude das forças de usinagem variou de acordo com a temperatura de revenido aplicado a cada amostra. Complementarmente foi avaliada a dureza (após tratamentos térmicos) e a avaliação da rugosidade das amostras (após as etapas de usinagem).

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. USINAGEM

Segundo Santos & Sales (2007), a usinagem consiste em todo processo de fabricação que tem como característica a remoção de material da peça na forma de cavaco.

Ainda de acordo com os autores, estes processos de usinagem com remoção de material são divididos em três grupos, de acordo com a energia empregada: convencional, que representa o grupo de operações com remoção de cavaco por cisalhamento, não-convencionais que utiliza diferentes modalidades de energia para realizar a remoção do material, e os processos abrasivos que possuem ferramentas de arestas com geometrias indefinidas, como por exemplo a retificação que utiliza o rebolo como ferramenta. A Figura 1, lista os processos de usinagem com remoção de cavaco atualmente desenvolvidos.

O estudo dos movimentos entre peça-ferramenta nos processos de usinagem, são de grande importância pois definem os planos de trabalho, e estes contêm as velocidades de corte, avanço e efetiva de corte. Na usinagem, a remoção do cavaco é feita a partir da ação de uma ferramenta sobre a peça, dando a esta geometrias e dimensões bem definidas. Conforme ABNT (1989) os movimentos que contribuem para a remoção de material em forma de cavaco são aqueles que se apresentam sobre o plano de trabalho e estes são definidos abaixo:

- Movimento de corte: movimento entre a aresta de corte e a peça, o qual sem o movimento de avanço, origina somente uma única remoção de cavaco, durante uma rotação ou um curso.
- Movimento de avanço: movimento entre a aresta de corte e a peça, que juntamente com o movimento de corte, possibilita uma remoção contínua de cavaco, durante várias rotações ou cursos. Este movimento pode ser contínuo ou intermitente.

- Movimento efetivo de corte: movimento entre a aresta de corte e a peça, do qual resulta o processo de usinagem. Este movimento é resultante do movimento de corte e avanço.

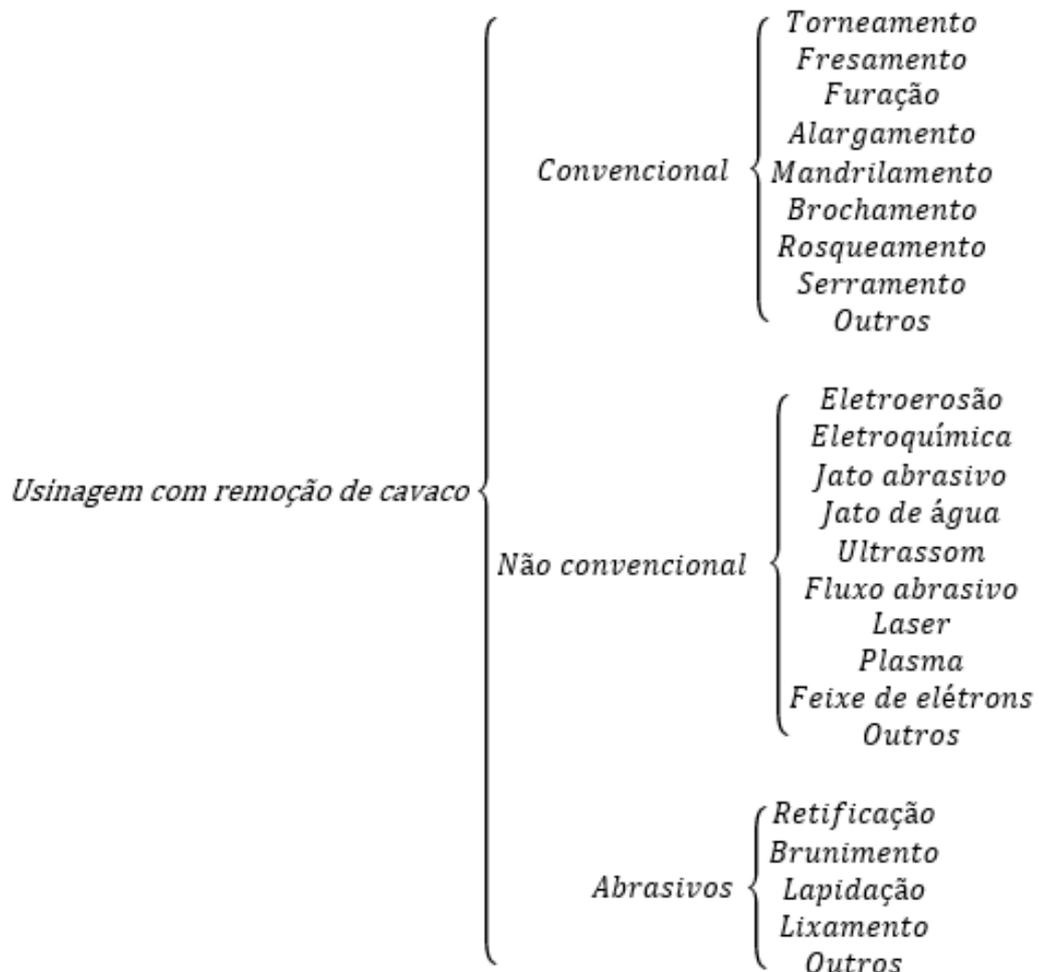


Figura 1 - Principais processos fabricação por usinagem com remoção de material.

(Fonte: Santos & Sales, 2007 modificado)

2.1.1. Torneamento cilíndrico

Segundo ABNT (1971), o torneamento consiste no processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de superfícies de revolução com o auxílio de uma ou mais ferramentas monocortantes. Nesta operação, a peça gira em torno de seu eixo principal de rotação e a ferramenta se desloca simultaneamente segundo uma trajetória coplanar com o referido eixo.

Neste processo, o plano de trabalho é obtido através da definição da direção de corte (plano de rotação da peça) e da direção de avanço da ferramenta. Por definição, o plano de trabalho no torneamento é definido pelo plano que contenha a direção de corte e a direção de avanço, e este passa sobre um ponto de referência da cunha cortante.

No torneamento, há dois ângulos situados sobre o plano de trabalho: ângulo da direção de avanço (φ) e ângulo da direção efetiva de corte (η). O ângulo φ está situado entre a direção de avanço e direção de corte, sendo na operação de torneamento $\varphi = 90^\circ$, já o ângulo η entre a direção de corte e a direção efetiva de corte.

Na operação de torneamento, a velocidade de corte (V_c) é calculada pelo produto entre o diâmetro da peça (D) e a velocidade de rotação (N) do torno e a velocidade de avanço (V_a) é calculada pelo produto entre o avanço (f) e a velocidade de rotação do torno (N), e estas velocidades atuam nas direções de corte e avanço, respectivamente. As equações 2.1 e 2.2 apresentam as fórmulas para cálculo das velocidades.

$$V_c = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{1000} \text{ [m/min]} \quad (2.1)$$

$$V_a = f \cdot N \text{ [mm/min]} \quad (2.2)$$

2.1.2. Forças de usinagem no torneamento

O conhecimento das forças nos processos de usinagem é de suma importância para averiguar a viabilidade do processo de usinagem. Nestas análises é possível definir alguns parâmetros: tipo de ferramenta que será utilizada para realizar a operação, estimar a potência necessária do motor da máquina-ferramenta, temperatura de corte, determinar a usinabilidade dos materiais e a capacidade de obtenção de tolerâncias precisas.

Como simplificação para a análise das forças de usinagem, considera-se um ponto localizado na cunha cortante da ferramenta, de acordo com a Figura 2, visto

que na prática o processo de usinagem ocorre em uma área de contato entre peça-ferramenta, e esta simplificação, de acordo com a norma DIN (1982), aplica-se a todos os outros processos de usinagem. Segundo Ferraresi (2003), a componente da força de usinagem atua em um plano ou uma direção qualquer, e esta é obtida através de uma decomposição ortogonal em duas direções conhecidas, nas direções do plano de trabalho e na direção perpendicular ao plano de trabalho.

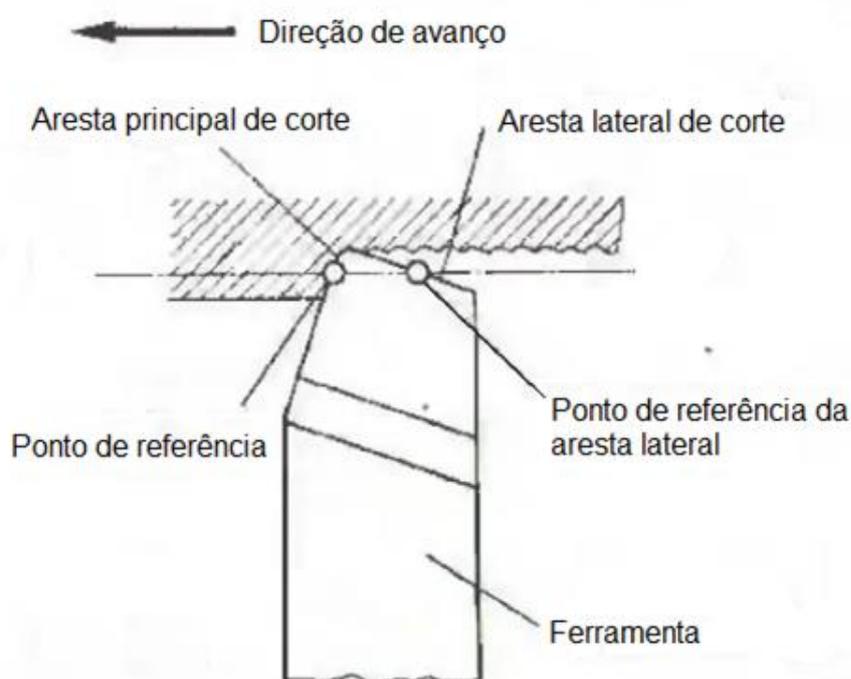


Figura 2 – Representação do ponto de referência na cunha cortante
(Fonte: Ferraresi, 2003 modificado)

As forças principais de usinagem são aquelas que se apresentam no plano de trabalho ou perpendicular ao mesmo, desta forma, forças secundárias não serão consideradas neste estudo. Conforme mencionado anteriormente, a decomposição ortogonal da força de usinagem (F_u) produz dois vetores de força, um vetor projetado perpendicular ao plano de trabalho – força de profundidade ou passiva (F_p), e outro vetor projetado sobre o plano de trabalho – força ativa (F_t). Bem como, a força ativa é decomposta em dois outros vetores, gerando o vetor força de corte (F_c), projetado sobre a direção de corte; e o vetor força de avanço (F_a), projetado na direção de avanço. A decomposição da força de usinagem no torneamento é representada de

acordo com a Figura 3. A força de usinagem possui notação vetorial conforme a equação 2.3.

$$\vec{F}_u = \vec{F}_c + \vec{F}_a + \vec{F}_p \quad (2.3)$$

As forças de trabalho, que contribuem para o cálculo da potência do motor da máquina-ferramenta, são aquelas que se apresentam acima do plano de trabalho, logo, a força passiva ou de profundidade, não contribuiu para esta determinação. Entretanto, de acordo com Diniz *et al.* (2013), a força passiva é responsável pela deflexão elástica da peça e da ferramenta durante o corte e, desta maneira, é responsável pela dificuldade de obtenção de tolerâncias de forma e dimensão apertadas, portanto, sua avaliação também se torna extremamente importante.

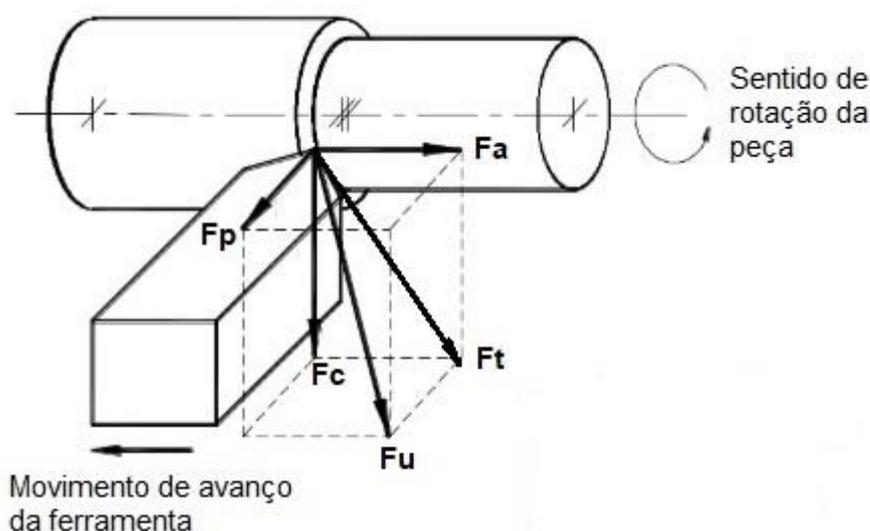


Figura 3 - Componentes da força de usinagem no torneamento

(Fonte: da Silva *et al.*, 2009)

De acordo com Ferraresi (2003), define-se:

- Força de usinagem (F_u) – força total que atua sobre uma cunha cortante durante a usinagem
- Força ativa (F_t) – projeção de F_u sobre o plano de trabalho
- Força de corte (F_c) – também conhecida por força principal de corte, é a projeção de F_u sobre a direção de corte
- Força de avanço (F_a) – projeção da F_u sobre a direção de avanço

- Força passiva (F_p) – também conhecida como força de profundidade, é a projeção de F_u sobre uma perpendicular ao plano de trabalho.

Após a definição e decomposição das forças atuantes no processo de torneamento e utilizando a definição do triângulo retângulo, encontra-se as relações atuantes no processo. Entre a força de apoio, força de corte e força de avanço, vale a relação:

$$F_t^2 = F_c^2 + F_a^2 \quad (2.4)$$

$$F_t = \sqrt{F_c^2 + F_a^2} \quad (2.5)$$

Desta forma, também vale a relação entre a força de usinagem, força ativa e força passiva:

$$F_u^2 = F_t^2 + F_p^2 \quad (2.6)$$

Substituindo (2.4) em (2.6), obtêm-se a fórmula para cálculo da força total de usinagem:

$$F_u^2 = F_c^2 + F_a^2 + F_p^2 \quad (2.7)$$

$$F_u = \sqrt{F_c^2 + F_a^2 + F_p^2} \quad (2.8)$$

2.1.3. FATORES QUE INFLUENCIAM AS FORÇAS DE USINAGEM

Como mencionado anteriormente, o conhecimento das forças de usinagem se faz fundamental para os processos de manufatura, nos quais é exigido, cada vez mais, peças com melhores acabamentos, redução ou a não utilização de fluidos lubrificantes durante a usinagem, redução dos tempos e custos de fabricação, assim, exigindo a utilização de ferramentas mais resistentes e que suportem as cargas de trabalho durante processo de usinagem.

Assim como as forças de usinagem, o conhecimento dos fatores que contribuem para a variação dessas componentes ganha sua devida importância, visto que, por ser um processo de natureza dinâmica, diversos fatores podem contribuir

para a elevação ou redução dessas forças. Diniz *et al.* (2013) e Ferraresi (2003) indicam que os principais fatores que influenciam as forças de usinagem: material da peça, geometria da ferramenta, velocidade de corte e seção de corte, além das condições de lubrificação e estado de fiação da ferramenta.

2.1.3.1. Material da peça e tratamentos térmicos

A composição química da peça é um dos principais fatores que influenciam as forças de usinagem. Para os aços é visto que o aumento do percentual de carbono contribui para o aumento da resistência mecânica, gerando forças superiores na usinagem. Dentre as principais propriedades dos materiais, a que mais pode ser relacionada com a grandeza das forças de usinagem é a tensão de ruptura ao cisalhamento, visto que a usinagem é um processo que envolve muito cisalhamento (Diniz *et al.*, 2013).

Outro fator importante é a presença de elementos de liga na composição do material, nos quais podem contribuir para o aumento ou diminuição dos esforços. Segundo Diniz *et al.* (2013) a presença de fósforo, chumbo, boro e o composto químico sulfeto de manganês, tendem a contribuir para a redução das forças de usinagem, visto que estes elementos se deformam plasticamente, durante a formação do cavaco, produzindo planos de baixa resistência, onde a energia requerida para a ruptura do cavaco é menor.

Os tratamentos térmicos aplicados aos materiais também contribuem para a intensidade das forças de usinagem, mesmo não alterando a composição química do material, porém modifica sua estrutura cristalina, conferindo à peça alterações nas propriedades mecânicas, em maior ou menor grau, dependendo do tratamento térmico e a forma como são realizados.

2.1.3.2. Geometria da ferramenta

As ferramentas de corte tem sido fontes de estudos durante os últimos anos, à medida que, gradativamente, é exigido que ferramentas de corte suportem maiores esforços, tenham maior vida útil e que produzam melhores acabamentos superficiais, em processos de fabricação cada vez mais rápidos e eficientes. Estas exigências promovem a necessidade de avaliar a geometria das ferramentas de corte, à fim de minimizar efeitos nocivos aos processos de usinagem, promovendo robustez e eficácia nas ferramentas para desempenharem sua função durante os processos de corte (Droga *et al.*, 2011).

Santos & Sales (2007) afirmam que os fatores que contribuem para a movimentação livre do cavaco, atuam no sentido de diminuir as forças de usinagem. Assim, os principais ângulos das ferramentas de corte são os ângulos de saída, inclinação, folga e posição, estes terão influência direta sobre os efeitos citados anteriormente.

A definição do raio da ponta da ferramenta também se faz fundamental para controle do processo de usinagem, visto que esse parâmetro além de contribuir para a variação das forças de usinagem, influencia diretamente no acabamento superficial do produto usinado. A Figura 4 apresenta a influência raio da ponta da ferramenta na usinagem do aço SAE 4340, onde percebe-se que para maiores raios de ponta o acabamento superficial melhora.

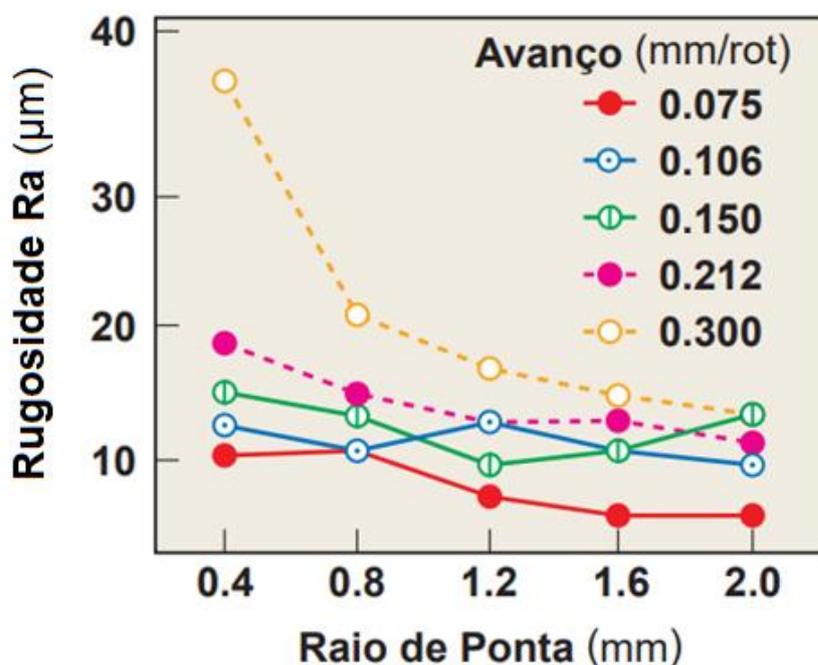


Figura 4 - Influência do raio da ponta da ferramenta na usinagem do aço SAE 4340
(Fonte: Mitsubishi Materials, 2021 modificado)

2.1.3.3. Velocidade de corte

A velocidade de corte nos processos de usinagem está intimamente ligada a temperatura de usinagem, visto que quase toda a energia consumida é convertida em energia térmica (Santos & Sales, 2007). A elevação da temperatura na interface peça-cavaco-ferramenta é importante pois contribui para a redução da resistência ao cisalhamento do material e para a redução das forças de usinagem, contudo contribui para o aumento dos desgastes térmicos nas ferramentas de corte, reduzindo sua vida útil.

Lima *et al.* (2015) apresentou um estudo sobre a influência dos parâmetros de usinagem no torneamento do aço SAE 4340 e observou o efeito da variação da velocidade de corte sobre as forças de usinagem, Figura 5. Observa-se à medida que a velocidade aumenta, há uma redução nas forças de usinagem para as três componentes – sendo Força de corte média (F_c), Força de avanço (F_f) e Força de

profundidade (F_p) – devido provavelmente, ao aumento da temperatura no plano de cisalhamento, contribuindo para a redução da resistência ao cisalhamento do material. Para o aço de 50 HRC nota-se redução em todas as três componentes da força de usinagem, porém para o aço de dureza 42 HRC, houve apenas redução da força de corte, enquanto que as forças de avanço e profundidade apresentaram comportamento estável. Observa-se também que o aço de menor dureza, apresentou maiores forças de usinagem, Lima *et al.* (2015) concluiu que esse fato pode ter ocorrido devido ao aumento da área de aderência na região de saída da ferramenta.

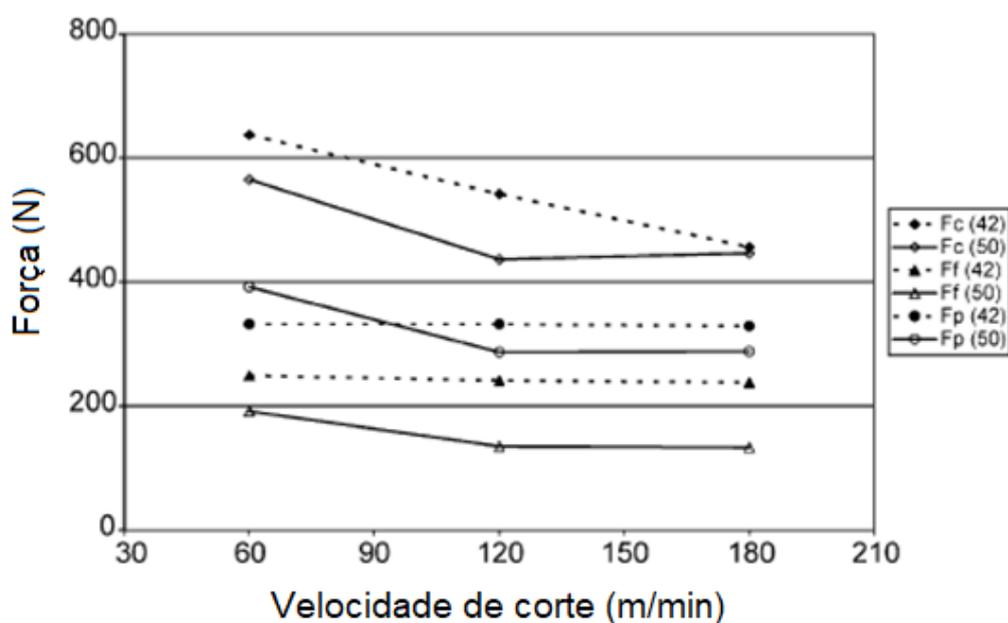


Figura 5 - Efeito da velocidade de corte nas forças de usinagem no torneamento do aço SAE 4340 endurecido com ferramenta de metal duro com cobertura ISO P15-K15 para amostras de dureza 42 e 50 HRC, com $f = 0,2$ mm/rot e $a_p = 1$ mm

(Fonte: Lima *et al.*, 2015)

Suresh *et al.* (2012), também realizou uma investigação sobre a influência da velocidade de corte sobre as forças de usinagem do aço SAE 4340 endurecido com ferramenta usando inserto de metal duro revestido, observa-se na Figura 6 em (I), que o aumento da velocidade de corte para os diferentes avanços, reduziu os esforços de usinagem. Bem como, em (II), para os diferentes tipos de profundidade de corte, o aumento da velocidade de corte diminuiu as forças de usinagem em variação linear.

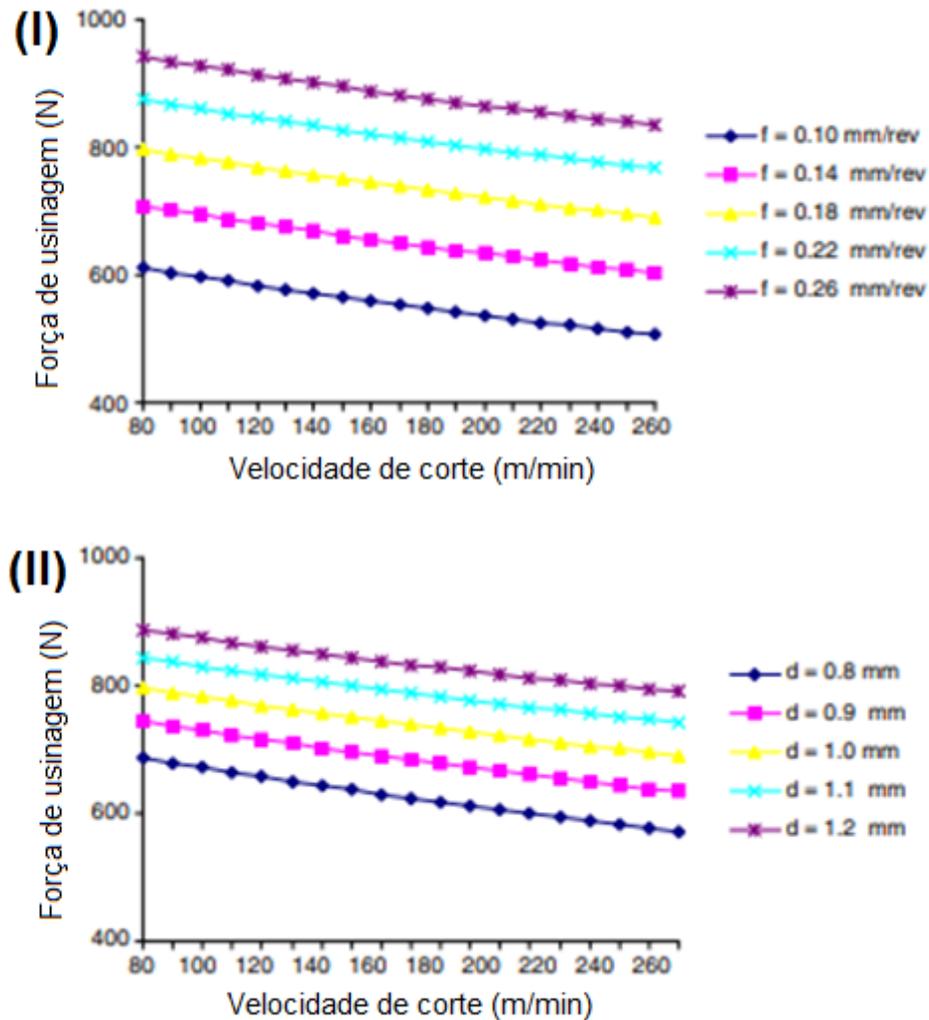


Figura 6 – Efeito da velocidade de corte sobre as forças de usinagem, em (I) para diferentes avanços (f) e em (II), para diferentes profundidades de corte (d)
(Fonte: Suresh *et al.*, 2012)

2.1.3.4. Seção de corte

Outro fator influenciador das forças de usinagem é a área da seção de corte, quanto maior a área da seção de corte, superiores serão os esforços, tendo em vista que uma maior porção de material está sendo cisalhado durante o processo de usinagem. Santos e Sales (2007) apontam que o aumento destes dois fatores eleva os esforços em uma proporção quase linear. A fórmula 2.9 representa a área da seção

de corte e a Figura 7 representa a seção de corte durante operação de torneamento cilíndrico externo.

$$A_s = f \cdot a_p = b \cdot h \quad (2.9)$$

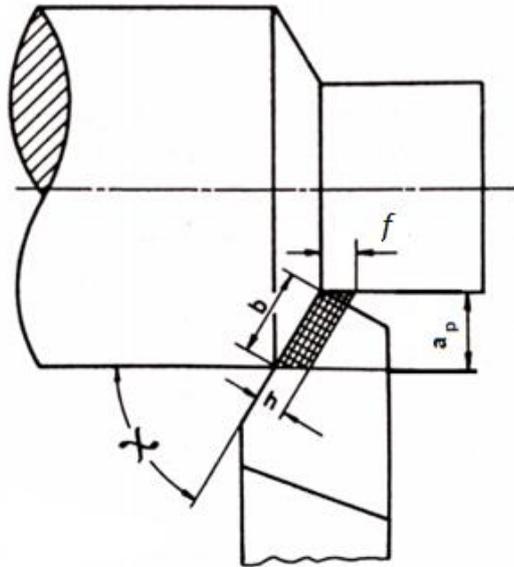


Figura 7 - Seção de corte para o torneamento
(Fonte: Ferraresi, 2003 modificado)

Na avaliação das forças de usinagem no torneamento do aço SAE 4340, Lima *et al.* (2015) apresentou resultados experimentais das forças de usinagem variando os parâmetros de corte, entre eles a profundidade de corte e o avanço. Como esperado, o aumento desses parâmetros contribuiu para a elevação dos esforços de corte, pois consequentemente aumentam a área de seção de corte.

Com a Figura 8 é possível concluir que houve a elevação das três componentes de força de usinagem à medida que o avanço aumenta, devido ao aumento da área da seção de corte. Percebe-se que para o aço de dureza 42 HRC a variação de forças comportou-se de forma praticamente linear, já para o aço de dureza 50HRC demonstrou redução das forças de usinagem entre $f = 0,1$ mm/rev e $f = 0,2$ mm/rev e aumento significativo entre $f = 0,2$ mm/rev e $0,3$ mm/rev.

Com a Figura 9 é possível concluir que com o aumento da profundidade de corte, elevou as três componentes de força de usinagem, tanto para o aço de 42 HRC quanto para o de 50 HRC, sendo essas componentes de forças maiores para o aço

de dureza superior. Outro ponto a ser observado, é que quanto maior a profundidade de corte, maior é a diferença de forças entre os dois níveis de dureza.

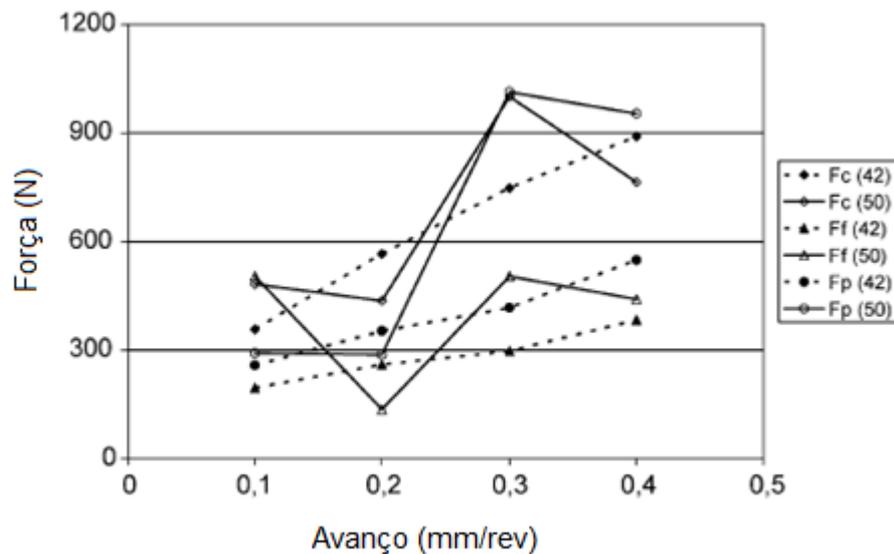


Figura 8 - Efeito do avanço nas forças de usinagem no torneamento do aço SAE 4340 endurecido com ferramenta de metal duro de cobertura ISO P15-K15 para amostras de dureza 42 e 50 HRC, com $V_c = 120$ m/min e $a_p = 1$ mm (Fonte: Lima *et al.*, 2015)

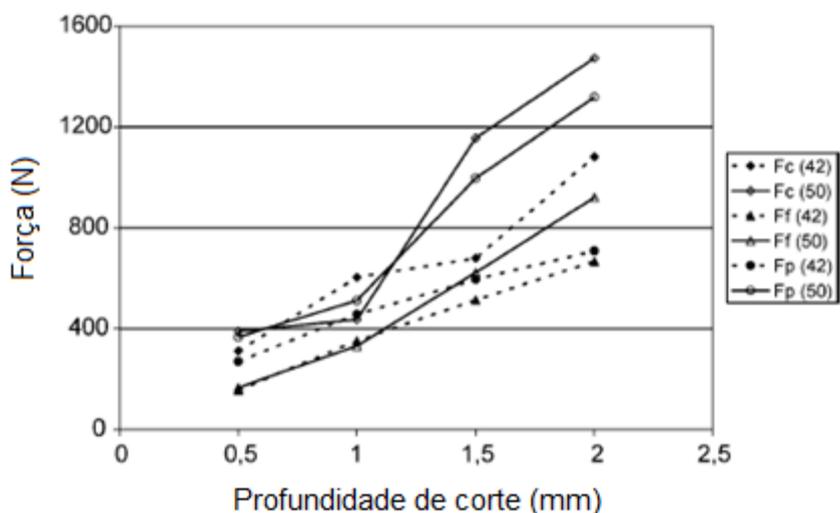


Figura 9 - Efeito da profundidade de corte nas forças de usinagem no torneamento do aço SAE 4340 endurecido com ferramenta de metal duro de cobertura ISO P15-K15 para amostras de dureza 42 e 50 HRC, com $V_c = 120$ m/min e $f = 0,2$ mm/rev (Fonte: Lima *et al.*, 2015)

2.1.4. POTÊNCIAS DE CORTE

As forças de usinagem determinam diretamente o dimensionamento do motor da máquina-ferramenta, visto que a potência para realizar o processo de usinagem é calculada pela relação direta entre a força de usinagem e as velocidades atuantes no processo. O cálculo da potência de corte (P_c) é realizado pelo produto da força de corte (F_c) e a velocidade de corte (V_c), e o cálculo da potência de avanço (P_a) é realizado pelo produto entre a força de avanço (F_a) e velocidade de avanço (V_a), conforme as fórmulas 2.10 e 2.11.

$$P_c = \frac{F_c.V_c}{60.10^3} \text{ [kW]} \quad (2.10)$$

$$P_a = \frac{F_a.V_a}{60.10^6} \text{ [kW]} \quad (2.11)$$

De acordo com Diniz *et al.* (2013) e Ferraresi (2003), para atividades de torneamento, vale a relação aproximada entre a força de corte e a força de avanço, onde $F_c \cong 4,5 F_a$. Desta forma, avaliando a razão P_c/P_a , pode-se observar que para valores de $D = 10\text{mm}$ e $f = 1 \text{ mm/rot}$, sendo estes valores considerados extremos para essa análise, obtêm-se uma razão de aproximadamente 140, ou seja, a potência de corte é 140 vezes maior que a potência de avanço.

Em máquinas que possuem apenas um motor para realizar os movimentos de corte e avanço, apenas o valor da potência de corte é utilizado para cálculo da potência do motor, entretanto, para máquinas que possuem motores independentes, observa-se que o de avanço sempre é muito menor que o motor que realiza o movimento de corte. Sendo assim, para cálculo da potência do motor, para máquinas que possuem apenas um motor, utiliza-se a seguinte fórmula, sendo η_{ef} o rendimento do motor normalmente entre 60% e 80%:

$$Pm = \frac{Pc}{\eta_{ef}} \quad (2.12)$$

2.2. AÇO SAE 4340

Com ampla aplicação na industrial metal-mecânica, o aço SAE 4340 é utilizado nas indústrias aeroespacial, petrolífera, automobilística, equipamentos, estruturas e máquinas, sendo empregados na construção de virabrequins e árvore de manivelas de caminhões, tratores e automóveis, bielas, engrenagens, braços e pontas de eixo (TENAX, 2021).

Sendo um dos aços da família 43XX, o aço SAE 4340 é um aço Níquel-Cromo-Molibdênio, classificado como médio carbono – possuindo em média 0,40%C, e apresenta composição química conforme Tabela 1, podendo apresentar em sua composição Fósforo (P) e Enxofre (S), com percentual máximo de 0,03% e 0,04%, respectivamente.

Tabela 1 – Composição química do aço SAE 4340 (em % de peso)
(Fonte: ABNT, 2000 modificado)

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

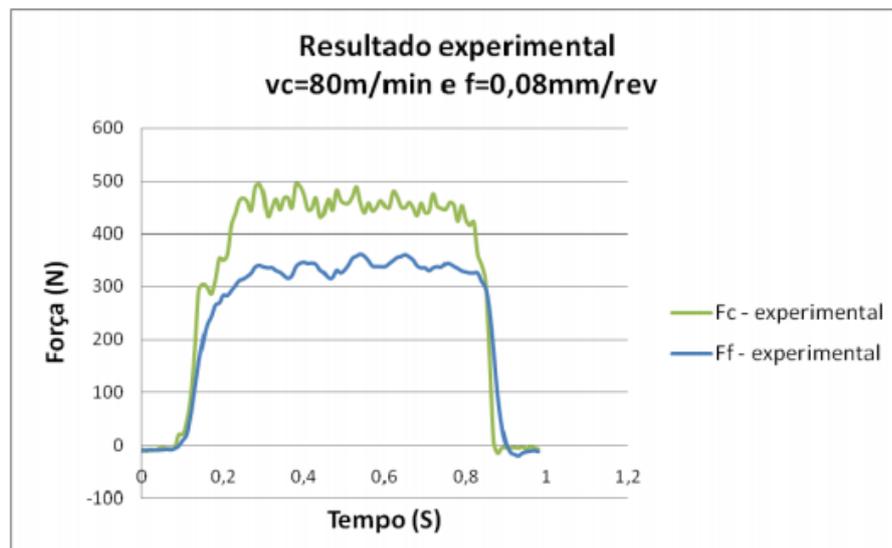
Os elementos de liga encontrados na composição química do aço SAE 4340 aumentam sua propriedade de temperabilidade, sendo possível obter maior homogeneidade de dureza para peças de maiores dimensões. Este aço apresenta combinações de elevada dureza, resistência mecânica e tenacidade, de acordo com os ciclos de tratamento térmico aplicados.

2.2.1. Torneamento do aço SAE 4340

A usinabilidade do aço SAE 4340 é considerada baixa, pois dependendo ciclo de tratamento térmico ao qual é submetido pode apresentar elevada dureza,

dificultando o processo de usinagem. Devido a complexidade e aos altos custos na usinagem dos materiais de elevada dureza, a avaliação dos parâmetros de corte se faz fundamental.

Um estudo apresentado por Cervelin (2009), investigou a influência da velocidade de corte e do avanço nas forças de usinagem durante torneamento do aço SAE 4340. As Figuras 10 a 13 ilustram os valores de forças de corte e avanço obtidos experimentalmente.



**Figura 10 - Resultado experimental do ensaio 1: $V_c = 80$ m/min e $f = 0,08$ mm/rot. F_c = Força de corte e F_f = Força de avanço
(Fonte: Cervelin, 2009)**

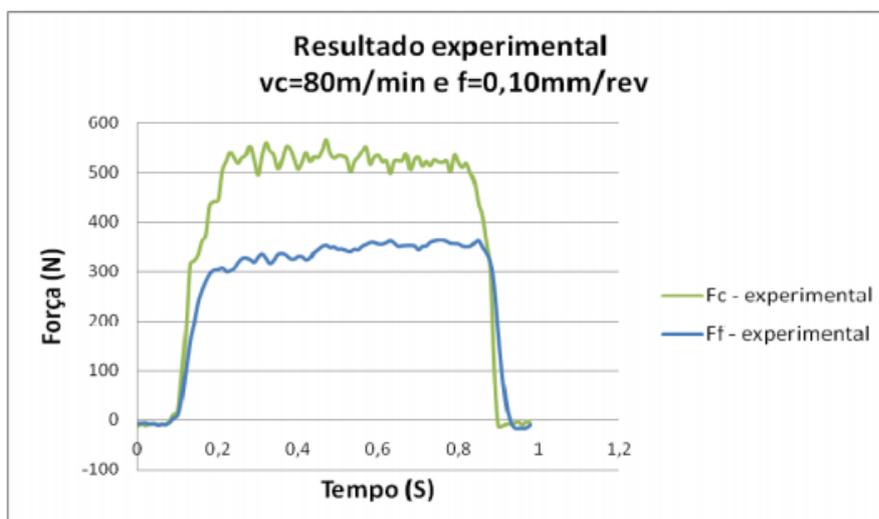


Figura 11 - Resultado experimental do ensaio 2: $V_c = 80$ m/min e $f = 0,10$ mm/rot. F_c = Força de corte e F_f = Força de avanço
(Fonte: Cervelin, 2009)

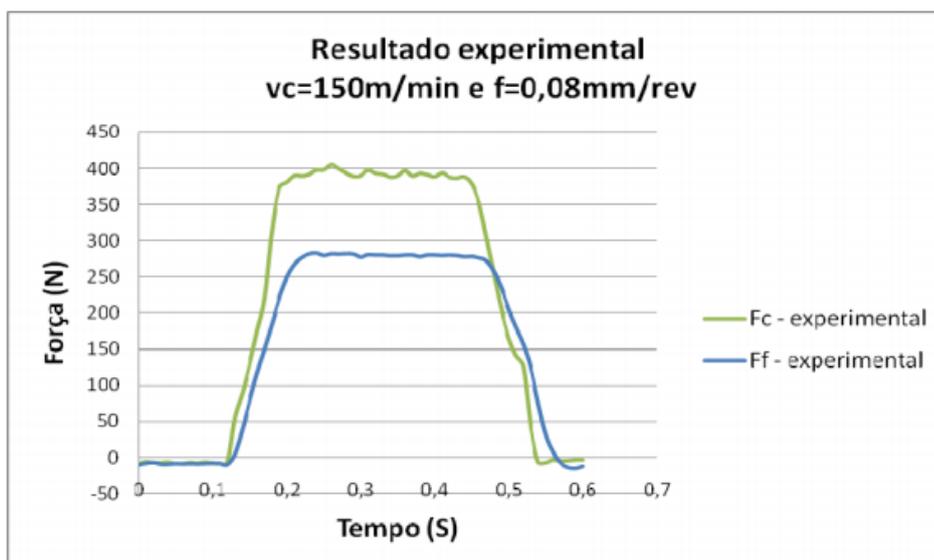


Figura 12 - Resultado experimental do ensaio 3: $V_c = 150$ m/min e $f = 0,08$ mm/rot. F_c = Força de corte e F_f = Força de avanço
(Fonte: Cervelin, 2009)

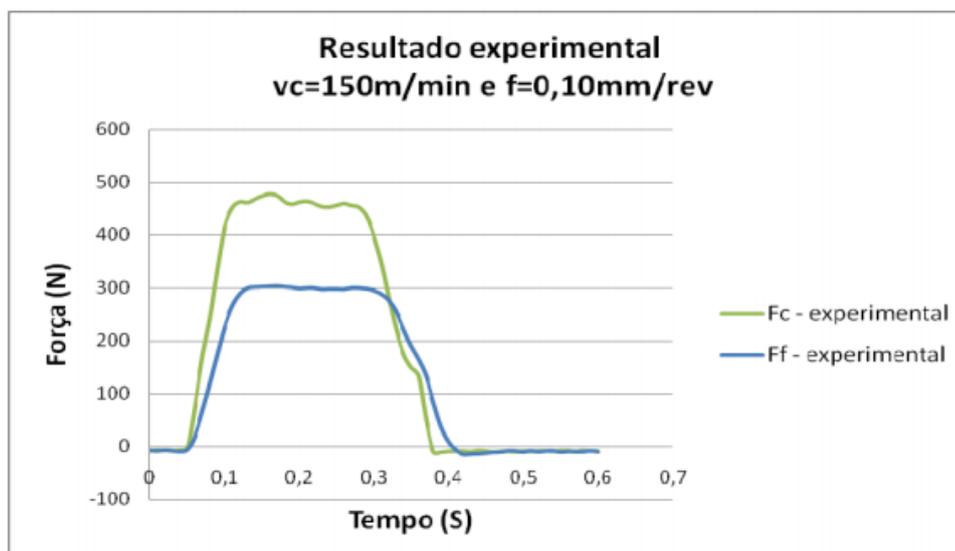


Figura 13 - Resultado experimental do ensaio 3: $V_c = 150$ m/min e $f = 0,10$ mm/rot. F_c = Força de corte e F_f = Força de avanço (Fonte: Cervelin, 2009)

Com Cervelin (2009), foi possível observar que o aumento do avanço, para a mesma velocidade de corte, aumentou consideravelmente as forças de corte e forças de avanço, em contrapartida, o aumento da velocidade de corte – para o mesmo avanço – resultou no decréscimo das forças em questão. Observa-se também, que os valores das forças praticamente se estabilizam após determinado tempo durante a usinagem.

2.3. TRATAMENTOS TÉRMICOS

Para Chaverini (1996), tratamento térmico (TT) é o conjunto de operações de aquecimento e resfriamento a que são submetidos os metais, sob condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de resfriamento, com o objetivo de alterar as suas propriedades ou conferir-lhes determinadas características.

As propriedades dos aços dependem, basicamente, de suas estruturas cristalinas e estas são transformadas de acordo com o TT aplicado a eles. Vale salientar que os tratamentos térmicos não contribuem na alteração química dos aços, mas os confere uma série de características, conforme descrito a seguir (Chaverini, 1996):

- Alívio de tensões internas proveniente de TT ou trabalho mecânicos anteriores
- Aumento ou redução da dureza, resistência mecânica, ductilidade, usinabilidade
- Melhora na resistência ao desgaste, à corrosão e resistência ao calor
- Melhora as propriedades de corte

Dado os expostos acima, fica evidente a importância dos tratamentos térmicos na indústria de transformação de materiais. A aplicação dos tratamentos térmicos nos metais possibilita a obtenção de uma ou mais propriedades mecânicas, o que confere uma maior aplicabilidade desses materiais de acordo com as necessidades de projeto. É importante salientar que os TT devem ser escolhidos e aplicados cautelosamente, visto que a obtenção de certas propriedades pode gerar prejuízo em outras, por exemplo, um aço que foi submetido ao tratamento térmico de têmpera terá sua dureza aumentada e contrariamente, sua ductilidade diminuirá. Fica evidente, portanto, a importância dos conhecimentos de todos os fenômenos que envolvem os tratamentos térmicos.

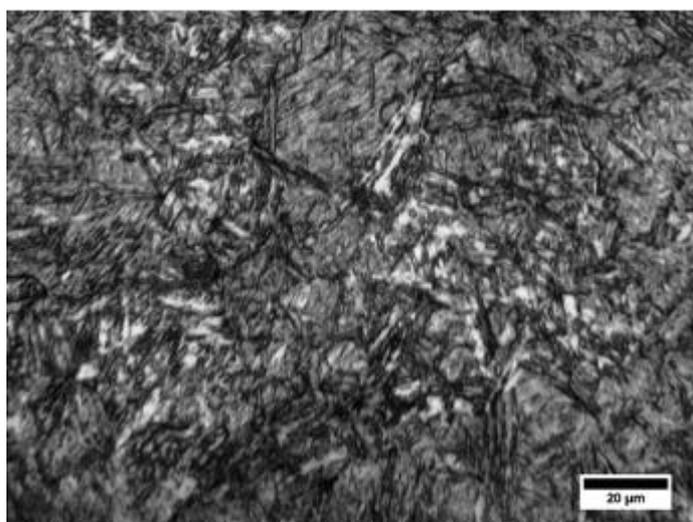
2.3.1. Têmpera

Segundo Chaverini (1996), têmpera é um tipo de tratamento térmico que consiste em submeter o aço a um determinado ciclo térmico, que consiste em elevar a peça a temperaturas acima da temperatura de transição/crítica, para transformação dos constituintes em austenita. Para o aço SAE 4340 é recomendado que a temperatura de austenitização seja superior a 845 °C. Em seguida a peça é submetida a um resfriamento rápido, de acordo com a curva de resfriamento do material, obtendo então, a fase martensítica.

A transformação total do aço em martensita, dependerá do grau de resfriamento, em água ou óleo, para que a peça ultrapasse a temperatura final de transformação (M_f) de acordo com a curva de resfriamento (Chaverini, 1996). Em peças de grandes dimensões é possível obter somente a fase martensita, como também é possível obter fases mistas em sua microestrutura, sendo que na superfície

da peça, obtêm-se a martensita desejada e no seu núcleo, pode-se obter transformações mistas, dependendo do grau de resfriamento, o que pode ser ajustado com a adição de elementos de liga.

Normalmente a têmpera é a primeira fase de uma série de TT aplicado ao aço, embora os conceda elevadas propriedades de dureza e resistência, sua ductilidade e tenacidade diminuem, tornando-se quase impossível sua aplicação. Desta forma, são feitos um ou mais TT de revenido, à fim de obter melhores combinações de propriedades como dureza, resistência mecânica, tenacidade, usinabilidade e ductilidade, de acordo com a necessidade de aplicação. A Figura 14 apresenta a microestrutura do aço SAE 4340 na condição temperada, onde é possível notar as ripas de martensita.



**Figura 14 - Microestrutura do aço SAE 4340 temperado com aumento de 1000x
(Fonte: Ladeira *et al.*, 2017)**

2.3.2. Revenido

Segundo ABNT (2000), o revenido é o tratamento térmico efetuado sobre um produto temperado, com a finalidade de obter modificações que lhe confirmem determinadas combinações de propriedade mecânicas, de acordo com a aplicação. Normalmente, o revenido é realizado após a têmpera e este tratamento provoca um estado mais próximo ao equilíbrio físico-químico, em comparação com a têmpera. O

produto deste conjunto de operações gera a estrutura cristalina conhecida como martensita revenida.

O ciclo térmico do revenido consiste no aquecimento da peça em uma determinada temperatura, inferior a temperatura de transformação de fase, manutenção nesta temperatura por um determinado tempo e resfriamento ao ar livre ou forçado. O estágio do resfriamento pode ser realizado em uma ou várias etapas até a temperatura ambiente, gerando a martensita revenida com diferentes propriedades mecânicas.

Ainda de acordo com ABNT (2000) este TT pode produzir as seguintes características: aumento da ductilidade, aumento da tenacidade, diminuição da dureza e resistência ao choque, diminuição ou eliminação das tensões internas produzidas pela têmpera, diminuição da fragilidade e aumento de dureza secundária (transformação da austenita residual em martensita ou pela precipitação de constituintes). Sendo assim, quanto maior à temperatura do revenido, conforme ilustra a Figura 15, menor será a dureza do material.

2.3.3. Tratamento térmico em aços SAE 4340

O aço SAE 4340 é um aço para beneficiamento com elevada temperabilidade e manifesta excelente resposta aos tratamentos térmicos. Desta forma, é possível obter diferentes propriedades mecânicas de acordo com os ciclos de TT aplicados.

Para a realização da têmpera, é recomendado que o aquecimento seja realizado a temperaturas acima de 845°C à fim de garantir total austenitização, para realização da têmpera. O revenido pode ser executado logo após a têmpera, na temperatura de acordo com as propriedades mecânicas desejadas.

A Figura 15, apresenta um estudo realizado por Ladeira *et al.* (2017) onde o aço SAE 4340, após têmpera foi submetido a diferentes temperaturas de revenido, com tempo de tratamento térmico de 30 e 60 minutos, onde concluiu-se que o aumento do tempo de encharque somente influenciou após 500°C, bem como pode-se notar a grande influência da temperatura de revenido na dureza dos corpos de prova. Como também, foi pontuado que baixas temperaturas de revenido não

promovem redução significativa da dureza, visto que não ocorre recuperação e recristalização da martensita.

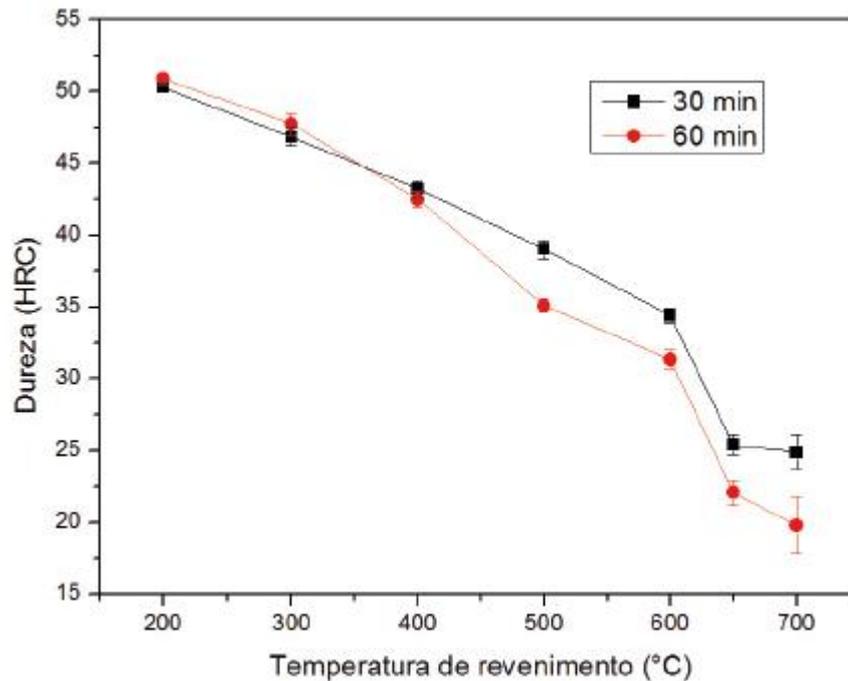


Figura 15 - Curva de revenimento para aço SAE 4340 com 0,39% C, 0,72% Mn, 0,25 Si, 0,01% P, 0,025% S, 0,75% Cr, 0,24% Mo e 1,72% Ni (Fonte: Ladeira *et al.*, 2017)

2.3.4. Torneamento de aços temperados e revenidos

A usinabilidade é um indicativo da capacidade de um material ser cortado/usinado sem afetar as propriedades mecânicas, e esta grandeza é de difícil apuração, visto que diversos fatores influenciam para sua obtenção. Este indicador, de acordo com Ferraresi (2003), está relacionado com:

- Composição química da peça
- Microestrutura da peça
- Dureza da peça
- Propriedades das tensões e deformações da peça
- Rigidez da peça

- Material da ferramenta
- Parâmetros de usinagem
- Fluido de corte
- Rigidez da máquina, ferramenta e sistema de fixação

Como foi mencionado, o material da peça influencia na propriedade de usinabilidade dos aços e por consequência, os tratamentos térmicos aplicados também são parâmetros importantes. A têmpera influencia diretamente na capacidade de torneamento dos aços, uma vez que ela aumenta drasticamente a dureza e resistência mecânica da peça, e reduz à praticamente zero a ductilidade. Desta forma, o revenido tem importância fundamental nos processos de usinagem dos aços temperados e revenidos, para equilibrar a relação dureza x ductilidade x tenacidade dos materiais.

A usinabilidade dos aços temperados e revenidos, dependerá do(s) ciclo(s) de revenido aplicado a eles, uma vez que apresentam diferentes graus de dureza dependendo da aplicação desses ciclos. A dureza do material da peça influencia diretamente nos desgastes das ferramentas de corte, no qual muitas vezes pode inviabilizar o processo de usinagem, quando as operações causam grandes desgastes ou quebram diversas ferramentas, tornando o processo muito caro.

Um estudo realizado por Souza (2017) apresentou os desgastes gerados durante operações de torneamento do aço SAE 4340 endurecido (temperado e revenido), Figura 16, utilizando ferramenta de metal duro com revestimento CVD de $Ti(C,N)+Al_2O_3+TiN$ na condição a seco, no qual é possível perceber a ocorrência de desgastes de flanco, entalhes e trincas nas arestas de corte. Embora a ferramenta possua revestimento e ser especialmente aplicável para materiais de elevada dureza, ocorreu essas deteriorações, nas quais, de acordo com Souza (2017), podem ter sido geradas por defeitos de processamento da ferramenta ou problemas durante a cobertura CVD no substrato.

Com Souza (2017), pode-se observar que a escolha das ferramentas de corte são fundamentais nos processos de usinagem, visto que estas quando mal selecionadas, podem sofrer grande desgastes por abrasão, diminuindo muito sua vida útil e conseqüentemente, aumentando os custos de fabricação.

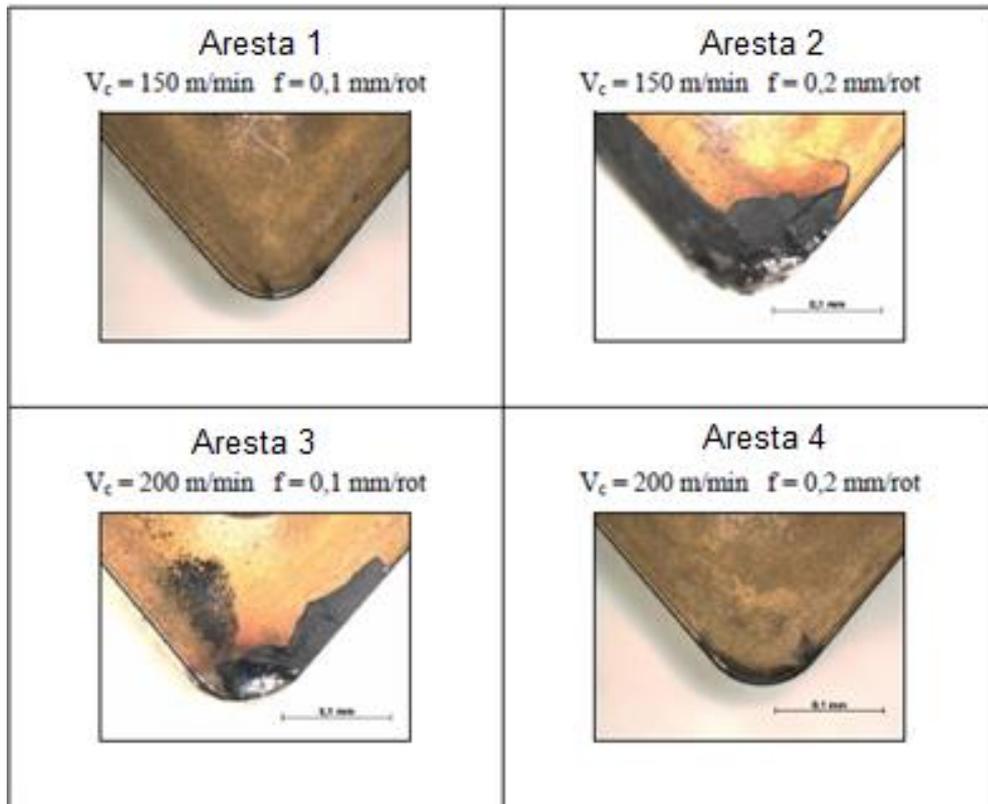


Figura 16 – Desgastes em ferramenta de $\text{Ti(C,N)+Al}_2\text{O}_3+\text{TiN}$ durante torneamento do aço SAE 4340 com V_c de 150 e 200 m/min e $f = 0,1$ e $f = 0,2$ mm/rot, com $a_p = 0,25$ mm

(Fonte: Souza, 2017)

Outro estudo avaliando o torneamento do aço SAE 4340 com 55HRC, foi realizado por Gonçalves e Boing (2019), no qual foi avaliado a performance de quatro ferramentas de metal-duro, a Figura 17 apresenta os resultados da vida útil das ferramentas para cada velocidade de corte:

- **SQ:** SNMA 12 04 08 - H13A - sem revestimento
- **CQ:** SNMG 12 04 08-SM – H13A sem revestimento
- **SQ-R:** SNMA 12 04 08 com revestimento PVD (TiAlN)
- **CQ-R:** SNMG 12 04 08-SM - 1105 com revestimento PVD (TiAlN)

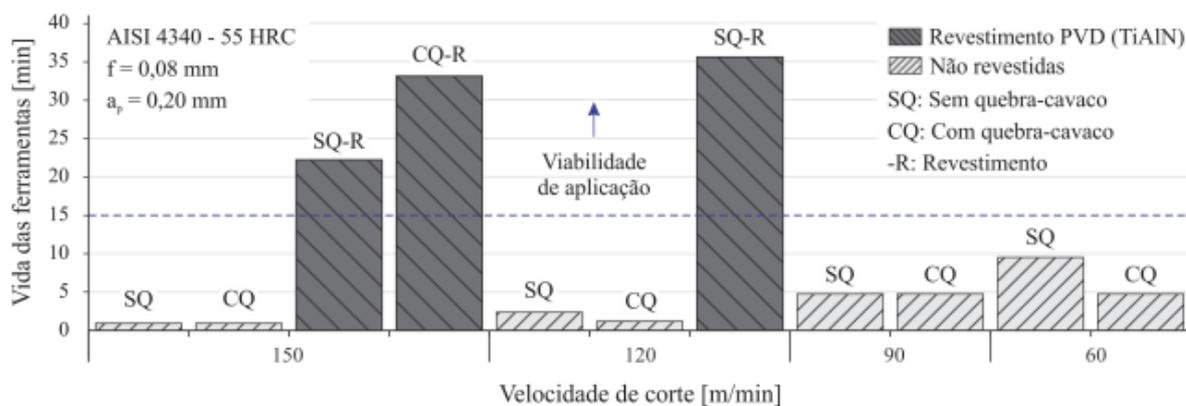


Figura 17 - Vida das ferramentas SQ e CQ (com e sem revestimento) no torneamento radial do aço SAE 4340

(Fonte: Gonçalves e Boing, 2019)

Considerando a aplicabilidade das ferramentas com vida útil acima de 15min, a utilização de ferramentas revestidas com PVD (TiAlN) tornou-se fundamental para garantir a realização das operações de torneamento em aços SAE 4340 endurecidos.

Neste estudo foi possível concluir que, para $V_c = 150$ m/min, a ferramenta revestida com quebra cavaco (CQ-R) apresentou melhor desempenho e maior vida útil (aproximadamente 33min), como também a ferramenta revestida sem quebra cavaco (SQ-R) também suportou as condições tribológicas dos processos, porém com menor vida útil.

Para $V_c = 120$ m/min, a ferramenta revestida sem quebra cavaco (SQ-R) apresentou maior vida útil (aproximadamente 36min) em relação a velocidade de corte superior, devido ao fato da redução da temperatura na interface cavaco-ferramenta, diminuindo os desgastes térmicos na ferramenta de corte. Conclui-se, também, que as ferramentas sem revestimento não possuíram aplicabilidade para as faixas de velocidades de corte estudadas.

2.4. RUGOSIDADE

A rugosidade é o conjunto de irregularidades, reentrâncias e saliências que as peças apresentam em suas superfícies. Esse parâmetro pode ser medido através do

rugosímetro e possui um papel muito importante em determinadas aplicações, pois gera influência nas características de deslizamento das peças (atrito), na resistência ao desgaste, possibilidade de ajustes, aparência, vedação, entre outros.

Do ponto de vista econômico e controle do processo de usinagem, a definição da rugosidade desejada é fundamental, pois dependendo dos parâmetros e do processo de usinagem, a aplicação da retificação é necessária e acaba elevando o custo de produção, visto que em determinadas condições de usinagem não é possível obter determinados valores de rugosidade simplesmente com as operações de desbaste.

Segundo Smith (2002), o perfil da superfície usinada é composto pela soma de três tipos de irregularidades: erros de forma, ondulações e rugosidade; a soma desses desvios estabelece o perfil real das superfícies dos produtos usinados, conforme observado na Figura 18.

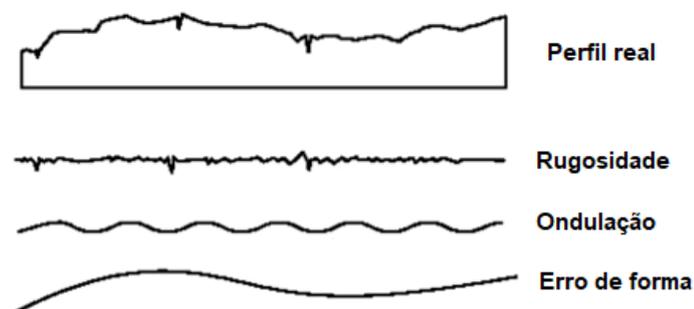


Figura 18 - Perfil das superfícies usinadas
(Fonte: Smith, 2002 modificado)

Neste trabalho foram avaliados os parâmetros de rugosidade média (R_a), rugosidade média (R_z) e rugosidade total (R_t) para caracterização do acabamento das amostras. Na avaliação de qualquer superfície é necessário estabelecer o comprimento de amostragem (*cutoff*) para a análise. Normalmente, o comprimento total de amostragem corresponde a cinco vezes o valor do *cutoff*.

A rugosidade R_a é calculada pela média aritmética de todos os pontos avaliados dentro do comprimento total de amostragem, sendo este parâmetro o mais

utilizado para análise das superfícies. A rugosidade R_z é calculado como a média aritmética das alturas entre os pontos máximo e mínimo dentro de cada comprimento de amostragem, conforme Figura 19. A rugosidade R_t é distância entre o maior pico e o vale mais profundo dentro do comprimento total de amostragem (Moldes Injeção Plásticos ,2021).

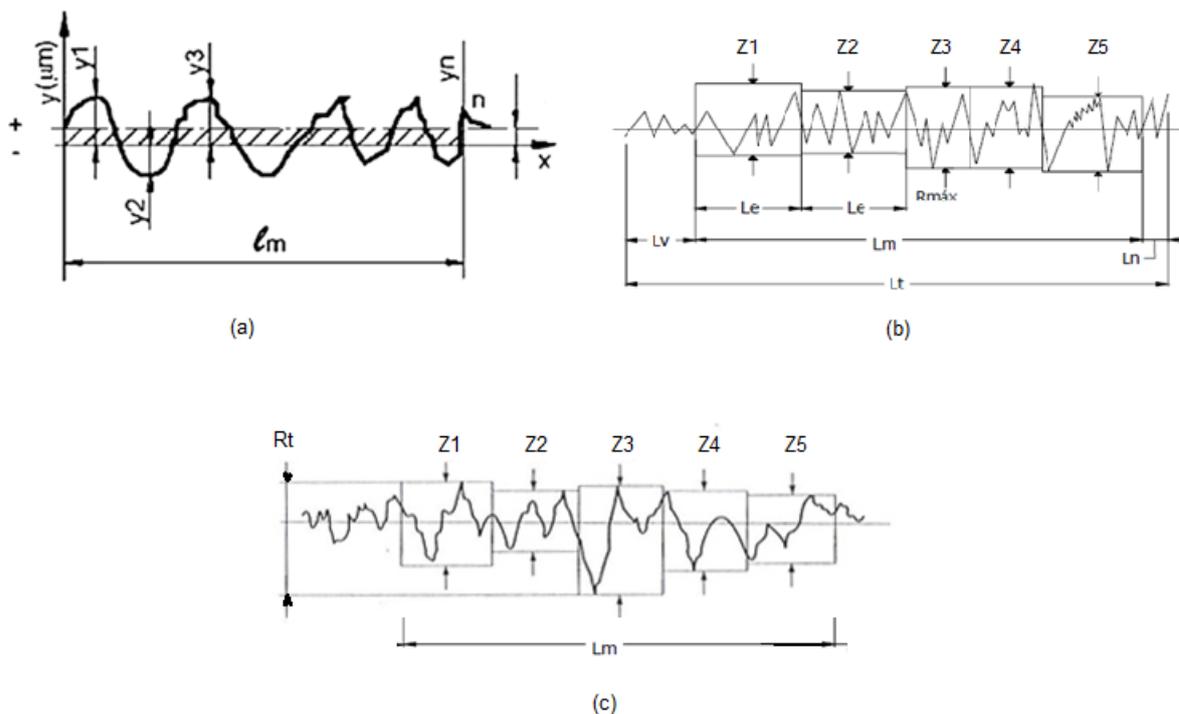


Figura 19 – Definição dos parâmetros de rugosidade: (a) Rugosidade R_a , (b) Rugosidade R_z , (c) Rugosidade R_t
(Fonte: Moldes Injeção Plásticos, 2021)

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Foram utilizadas seis barras cilíndricas de aço SAE 4340 com 200mm de comprimento por 25,4mm de diâmetro, conforme Figura 20. Inicialmente, foi realizada a preparação das amostras, no Laboratório de Pesquisa em Usinagem (LABUS) – CEFET/RJ, utilizando um torno mecânico horizontal Nardini. Primeiramente foi realizada a operação de faceamento e abertura de furo de centro em todas as amostras, então foi realizado o desbaste até que a barra detivesse 25mm de diâmetro. Posteriormente foi realizado o rebaixo das pontas dos corpos de prova para facilitar a fixação no torno, então foi realizado o sangramento axial à fim de obter a geometria desejada, ilustrada na Figura 21 (apêndice C).



Figura 20 - Geometria inicial das amostras

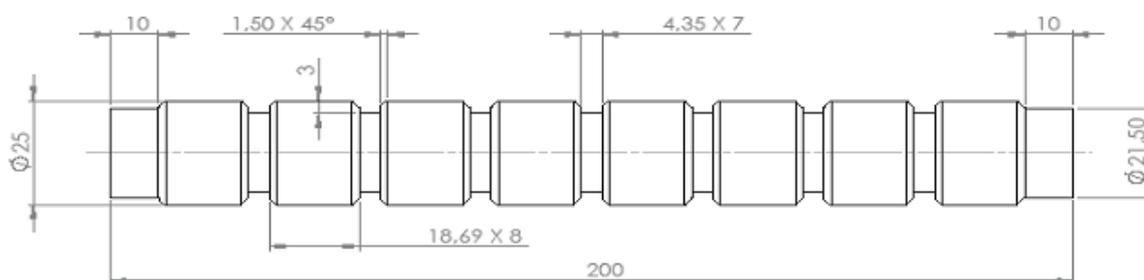


Figura 21 - Geometria final após preparação das amostras (cotas em milímetros)

3.3. APLICAÇÃO DOS TRATAMENTOS TÉRMICOS

Após a preparação de todas as amostras, foi elaborado um planejamento de tratamento térmico à fim de facilitar a compreensão das atividades a serem realizadas e estabelecer os parâmetros do processo. Todos os tratamentos térmicos foram realizados no laboratório de Metalografia e Tratamento Térmicos do CEFET/RJ.

Inicialmente, definiu-se a temperatura de encharque de 870°C para têmpera, à fim de garantir total austenitização das amostras, onde estas foram acondicionadas dentro de fornos de mufla com temperatura e atmosfera controlada, onde permaneceram por 1 hora após atingir a temperatura do tratamento térmico. Após completar o ciclo estabelecido, o resfriamento foi realizado em óleo.

O próximo tratamento térmico aplicado nas amostras foi o revenido, o qual foi realizado em cinco amostras e uma delas permaneceu no estado temperado como referência. Cada amostra foi revenida em diferentes temperaturas: 600°C, 500°C, 400°C, 300°C, 200°C; onde foi aplicado 1 hora como tempo de tratamento térmico (após atingir a temperatura de revenido) e o resfriamento foi realizado dentro do próprio forno. A Tabela 2 apresenta a identificação das amostras após a realização dos tratamentos.

Tabela 2 - Identificação das amostras

Amostra	Condição
1	Temperada
2	Temperada e revenida a 600°C
3	Temperada e revenida a 500°C
4	Temperada e revenida a 400°C
5	Temperada e revenida a 300°C
6	Temperada e revenida a 200°C

3.4. ENSAIO DE DUREZA

Após a realização dos tratamentos térmicos, foram realizados os ensaios de dureza Rockwell com a intenção de avaliar a influência dos tratamentos térmicos na dureza das amostras. Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Metalografia e Tratamento Térmicos – CEFET/RJ, nos quais foi utilizado o durômetro Sussen Wolpert - tipo Testor HT1.

Foram utilizadas duas escalas Rockwell para avaliação dos resultados de dureza, as escalas “A” e “C”. O ensaio de dureza Rockwell nas escalas “A” e “C” utilizam penetrador cônico de diamante de conicidade 120° com pré-carga de 10 Kgf, a diferença está na carga de ensaio, onde é utilizada uma carga do ensaio de 150 Kgf para a escala “C”, para a escala “A” a carga de ensaio é 60 Kgf. Inicialmente, todas as amostras nas quais foram realizados os tratamentos térmicos foi efetuado ensaio de dureza Rockwell C, sendo aplicada de cinco a seis impressões na superfície das amostras, fazendo-se possível obter o valor médio da dureza para cada corpo de prova.

Complementarmente foi realizado ensaio dureza em uma amostra como recebida do fornecedor, onde foi possível observar a alta temperabilidade que o aço SAE 4340 apresenta, após o tratamento térmico de têmpera. Como os valores obtidos no ensaio de dureza Rockwell C ficaram fora de escala, foi utilizada a escala “A” para avaliar os resultados.

3.5. TORNEAMENTO DAS AMOSTRAS

Após realizado os tratamentos térmicos e análise da dureza nas seis amostras, foram estabelecidos os parâmetros de corte e as condições de análise. Para cada amostra, foi aplicada uma condição de corte, conforme Tabela 3. Foram utilizados insertos de metal duro (com dois raios de ponta diferentes – 0,4 e 0,8 mm) e quatro avanços (0,11; 0,15; 0,20; 0,25 mm/rot), todos as análises foram realizadas com a mesma profundidade de corte ($a_p = 1,0$ mm). O torneamento das amostras foi realizado no mesmo torno mecânico convencional utilizado na preparação das amostras utilizando velocidade de rotação de 2500 rpm (velocidade de corte de aproximadamente 200 m/min).

Tabela 3 - Condições de análise

Condição	Raio de ponta (mm)	Avanço (mm/rot)
1	0,4	0,11
2		0,15
3		0,20
4		0,25
5	0,8	0,11
6		0,15
7		0,20
8		0,25

A usinagem foi realizada em um torno Nardini Mascote e foram utilizados dois insertos de metal duro com revestimento CVD TiCN+Al₂O₃+TiN com especificações: DCMT 11 T3 04-PM 4325 e DCMT 11 T3 08-PM 4325 da fabricante Sandvik, no qual possui dimensões conforme a Tabela 4 e representado pela Figura 22. A operação realizada foi o torneamento cilíndrico externo com utilização de emulsão lubrificante com vazão de 1,5 L/min.

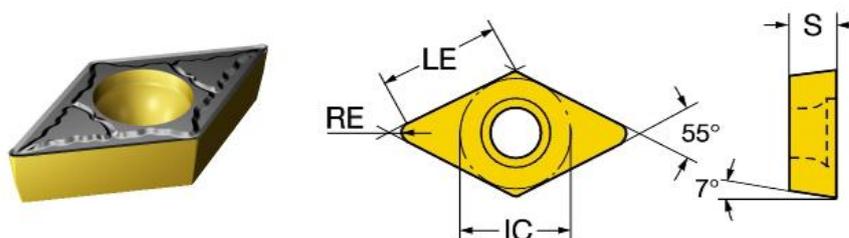


Figura 22 – Representação dos insertos

Fonte: Sandvik Coromant, 2021

Tabela 4 - Dimensões dos insertos

Fonte: Sandvik Coromant, 2021

Dados do produto	Inserto	
	DCMT 11 T3 04-PM 4325	DCMT 11 T3 08-PM 4325
Diâmetro do círculo inscrito (IC)	9,525 mm	9,525 mm
Comprimento efetivo da aresta de corte (LE)	11,2279 mm	10,8279 mm
Espessura da pastilha (S)	3,9688 mm	3,9688 mm
Raio do canto (Re)	0,3969 mm	0,7938 mm

Segundo Sandvik Coromant (2021), a condição de operação para melhor desempenho dos insertos na usinagem de aços é conforme apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 - Condições de operação dos insertos

Fonte: Sandvik Coromant, 2021

Parâmetros de usinagem	Inserto	
	DCMT 11 T3 04-PM 4325	DCMT 11 T3 08-PM 4325
profundidade de corte	0,3 a 3,2 mm	0,6 a 3,2 mm
avanço	0,08 a 0,23 mm/rot	0,1 a 0,3 mm/rot
Velocidade de corte	335 a 390 m/min	310 a 385 m/min

Por se tratar de condições de usinagem de aço com maiores valores de dureza, foi definido um valor de velocidade de corte abaixo do indicado pelo fabricante, pois as ferramentas de corte usadas neste trabalho são mais indicadas para aços com valores mais baixos de dureza.

3.6. OBTENÇÃO DAS FORÇAS DE USINAGEM

A obtenção das forças de usinagem foi realizada através da utilização do dinamômetro Kistler, modelo 9257 BA do fabricante Kistler Instrumente AG, conforme Figura 23, onde o equipamento foi acoplado sob o suporte do porta-ferramentas do torno. A aquisição de dados, das três componentes de forças, foi realizada através do software específico:

- Eixo x – Força passiva
- Eixo y – Força de avanço
- Eixo z – Força de corte



Figura 23 – Sistema de aquisição de dados: dinamômetro e conexões

3.7. AVALIAÇÃO DA RUGOSIDADE

Após realizado o torneamento e obtido as forças de usinagem, foi realizado a avaliação da rugosidade das amostras. Cada seção da amostra foi avaliada três vezes, onde foi possível obter o valor das rugosidades R_a , R_t e R_z de acordo com os parâmetros de corte aplicados e o inserto utilizado.

A análise da rugosidade foi realizada utilizando um rugosímetro portátil digital modelo SJ-210 da Mitutoyo do Laboratório de Pesquisa em Usinagem (LABUS) –

CEFET/RJ, conforme Figura 24. O comprimento de amostragem utilizado nos ensaios foi 2,5 mm, visto que para as operações de torneamento, a rugosidade R_a esperada está entre $2\ \mu\text{m}$ e $10\ \mu\text{m}$. Com as análises realizadas foi possível verificar a influência do avanço e do raio da ponta dos insertos no acabamento superficial de cada seção das amostras.

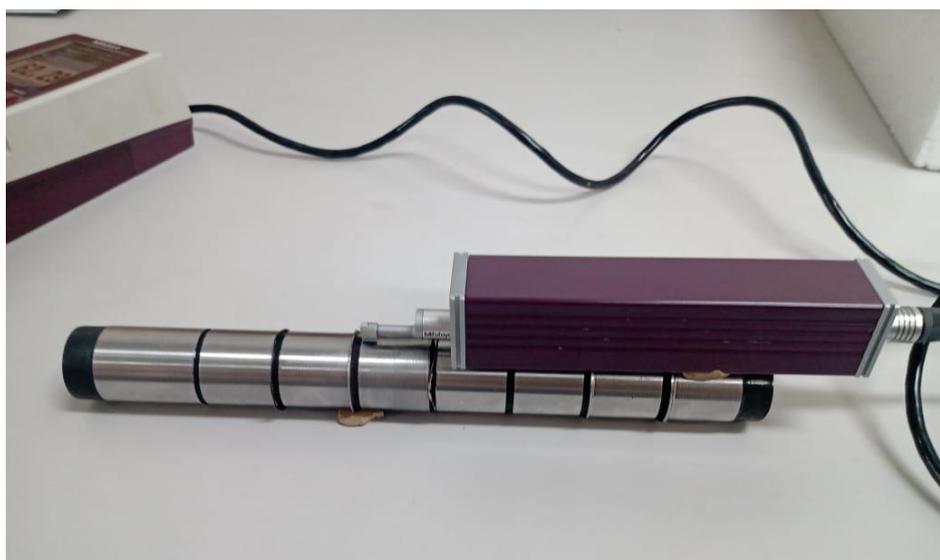


Figura 24 – Ensaio de rugosidade

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. ANÁLISE DA DUREZA

Após realizado o tratamento térmico em todas as seis amostras, foi realizado o ensaio de dureza para avaliar a influência do ciclo térmico, bem como coletar os dados para a elaboração da curva de revenido para o aço em estudo. Para avaliar a dureza com a qual as amostras foram adquiridas, foi realizado o ensaio de dureza em uma amostra teste e foi obtido o valor de 54,00 HRA, conforme Tabela 6.

Tabela 6 - Amostra teste: avaliação da dureza Rockwell A

Amostra	Tratamento térmico	Dureza média (HRA)	Desvio padrão
Teste	Como recebido	54	4

A Tabela 10 (apêndice A) apresenta os valores obtidos durante os ensaios de dureza das amostras revenidas em diferentes temperaturas, onde foi possível obter a curva de revenido, conforme a Figura 25. Comparando o valor de dureza média obtida na amostra teste com a dureza obtida na amostra temperada, o aço SAE 4340 apresentou excelente resposta ao tratamento térmico de tempera, onde obteve-se dureza média de 55 HRC (aproximadamente 78 HRA).

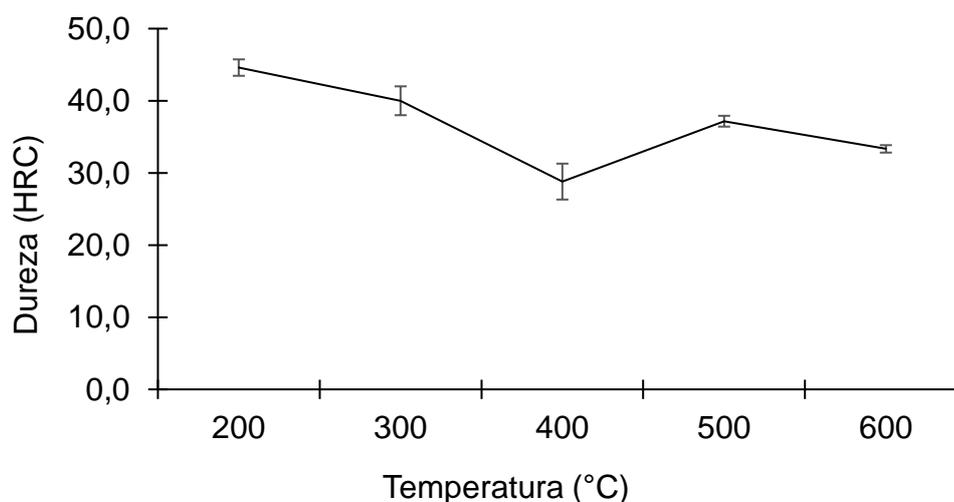


Figura 25 - Curva de revenido do aço SAE 4340 obtida pelos ensaios de dureza

4.2. ANÁLISE DAS FORÇAS DE USINAGEM

Em decorrência da pandemia do CoronaVirus e Ofício nº 054/2021 da DIREN, que proibiu a entrada de alunos nas dependências do Cefet/RJ, não foi possível realizar o torneamento da amostra 6 (revenida a 200 °C), logo não foi possível avaliar as força de usinagem e os parâmetros de rugosidade. Nesta condição foram realizados apenas os ensaios de dureza.

Durante o torneamento das amostras foram registrados os dados das forças de usinagem para cada condição aos quais as amostras foram submetidas, conforme a Tabela 7.

Tabela 7 - Valores experimentais das forças de usinagem

Condição	Raio (mm)	Avanço (mm/rot)	Média Fp (N)	Média Fa (N)	Média Fc (N)	DP Fp	DP Fa	DP Fc
Temperado	0,4	0,11	99	571	172	19	43	13
		0,15	523	1392	449	239	148	53
		0,20	294	1084	305	21	97	29
		0,25	226	1098	262	46	46	17
	0,8	0,11	631	1291	369	172	271	62
		0,15	782	1226	390	138	282	36
		0,20	675	1884	480	144	149	51
		0,25	489	2029	434	121	145	43

Rev 600°C	0,4	0,11	199	101	363	20	5	38
		0,15	216	116	466	23	6	50
		0,20	271	135	641	25	8	64
		0,25	276	159	743	26	10	76
	0,8	0,11	226	187	397	12	7	30
		0,15	247	193	527	14	10	40
		0,20	255	214	625	16	12	57
		0,25	236	246	639	18	8	58
Rev 500°C	0,4	0,11	238	148	391	11	5	28
		0,15	347	226	515	13	5	38
		0,20	266	181	620	15	10	50
		0,25	244	269	497	13	10	20
	0,8	0,11	247	253	368	5	8	21
		0,15	248	238	488	9	7	33
		0,20	306	317	733	18	11	61
		0,25	323	327	697	15	11	51
Rev 400°C	0,4	0,11	290	197	422	12	14	28
		0,15	322	199	521	14	15	36
		0,20	404	366	638	48	76	46
		0,25	732	728	794	242	377	71
	0,8	0,11	303	322	400	10	12	24
		0,15	310	297	479	7	10	29
		0,20	457	469	563	12	40	39
		0,25	357	435	648	17	31	43
Rev 300°C	0,4	0,11	540	423	433	206	187	75
		0,15	855	1384	648	67	216	51
		0,20	573	1214	586	103	248	75
		0,25	511	1585	587	78	67	35
	0,8	0,11	393	475	408	53	79	29
		0,15	492	668	513	225	326	197
		0,20	681	1086	566	63	130	45
		0,25	579	1171	529	44	182	71

As Figuras 26 e 27 exemplificam gráficos das forças de usinagem obtidos durante as operações de torneamento de duas condições distintas. Inicialmente, observa-se que os valores das forças oscilam próximas a zero, visto que nessa região ainda foi iniciado o corte. No instante que se inicia o corte – contato inicial entre ferramenta e peça, as forças de usinagem sofrem um pico e permanecem estáveis (variando a magnitude de acordo com ciclo de formação do cavaco) até que cesse o contato entre a ferramenta e a peça, logo após as forças oscilam novamente próximas a zero, até o instante em que o dinamômetro é desligado.

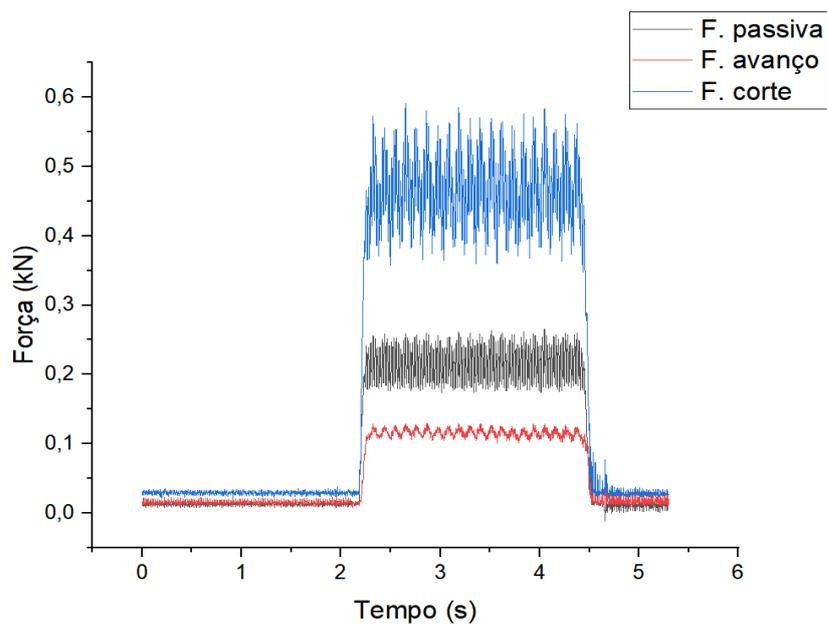


Figura 26 - Forças de usinagem – Revenido a 600 °C, Re = 0,4 mm, f = 0,15 mm/rot.

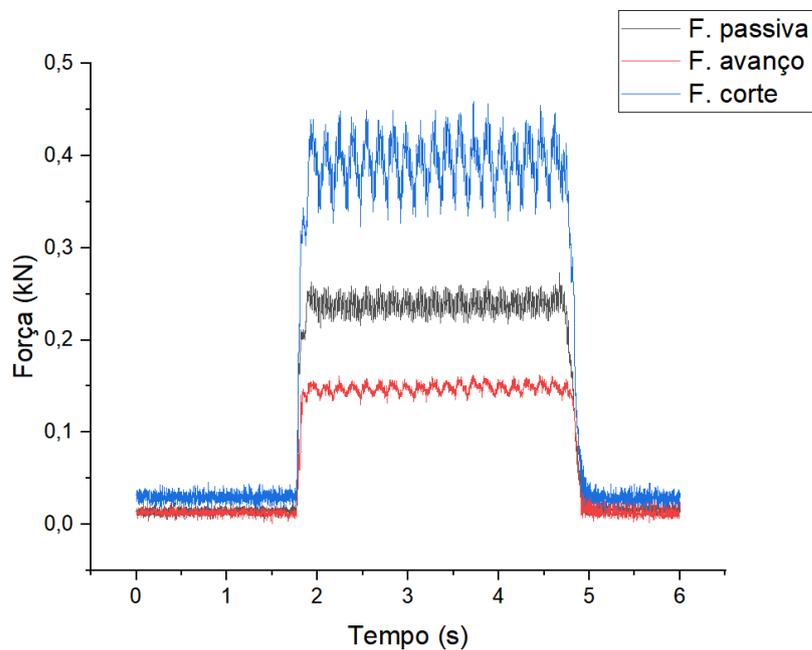
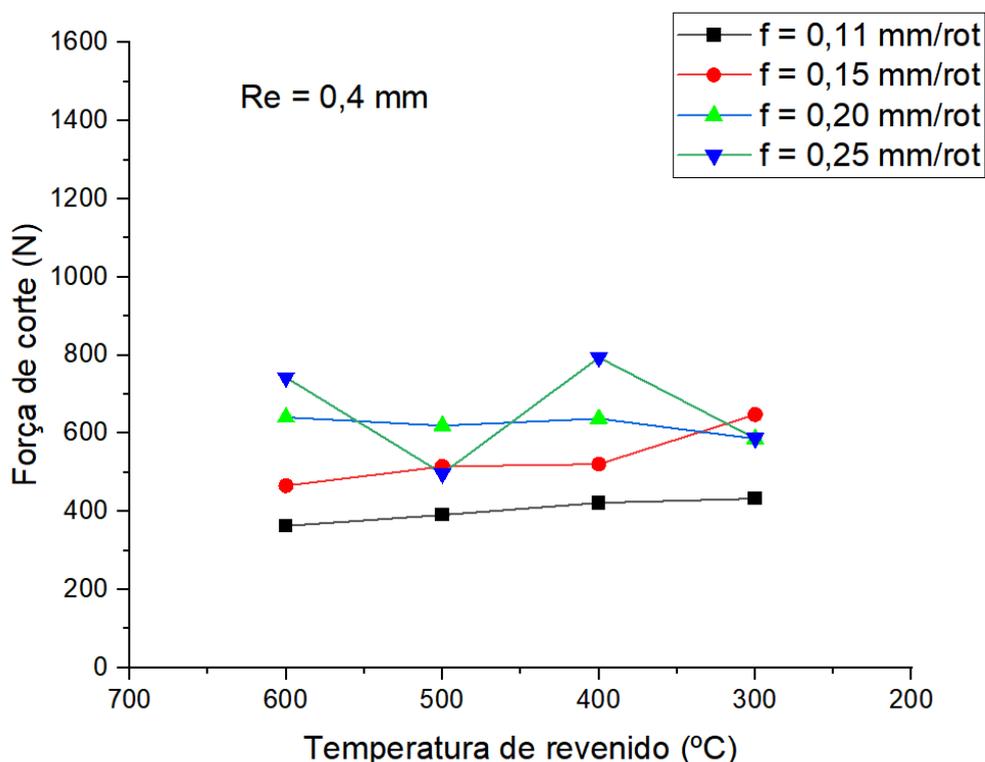


Figura 27 - Forças de usinagem – Revenido a 500 °C, Re = 0,4 mm, f = 0,11 mm/rot.

Com a aquisição dos dados (Tabela 7) foi possível avaliar a influência dos tratamentos térmicos, assim como avaliar a ação do avanço e do raio de ponta da ferramenta de corte nas forças de usinagem.

Conforme observado na Figura 28, as forças de corte apresentaram certa estabilidade em torno de um valor médio, ou seja, não houve grande variação à medida que a temperatura de revenido fosse alterada. Este fato pode estar associado com a área de seção de corte. Como a força de corte está mais relacionada com a remoção de cavaco, para as análises com mesmos parâmetros de usinagem (avanço, profundidade de corte, velocidade de corte), a área da seção de corte não altera, conforme apresentado na Equação 2.9, logo, a força de corte apresentou comportamento estável. Contudo, se esperava que as forças fossem maiores quanto maiores os valores de dureza do material. Quando se analisa a influência do avanço nessa componente de força, pode-se observar um pequeno aumento das forças de corte com o aumento do avanço, o que era esperado com o aumento da sessão de corte. Com relação aos raios de ponta de ferramenta, valores ligeiramente maiores são observados com o maior raio de ponta de ferramenta, mas estatisticamente não se pode afirmar que influenciam nos resultados.



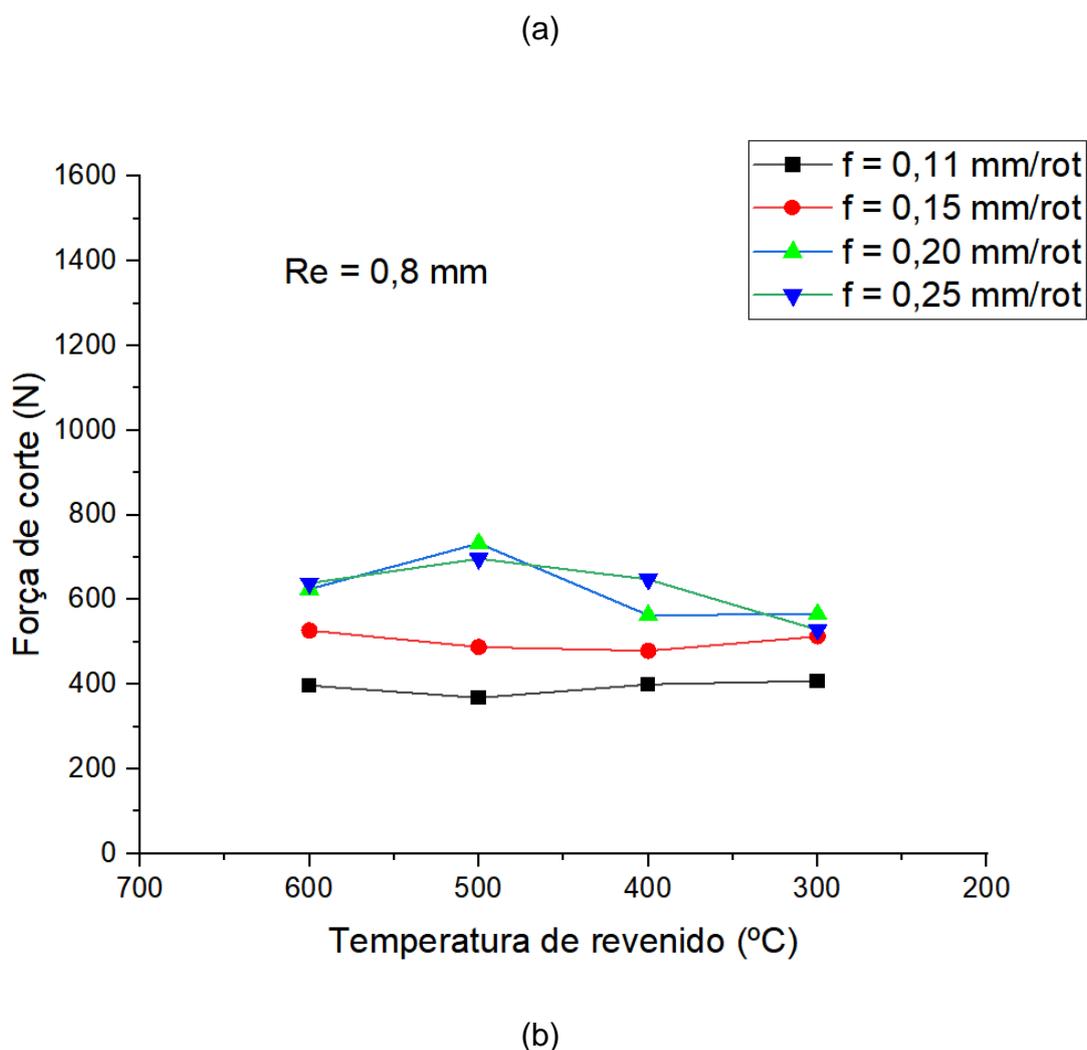
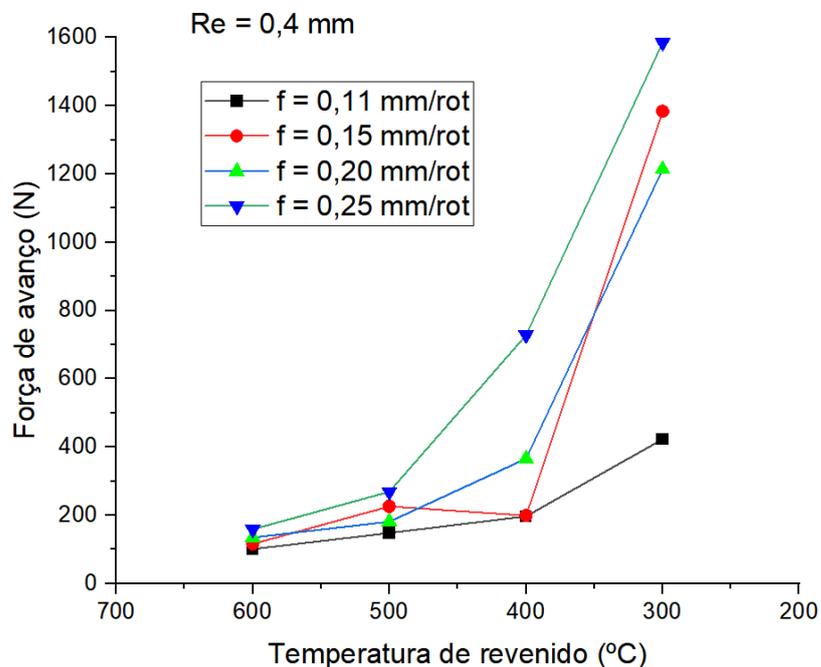


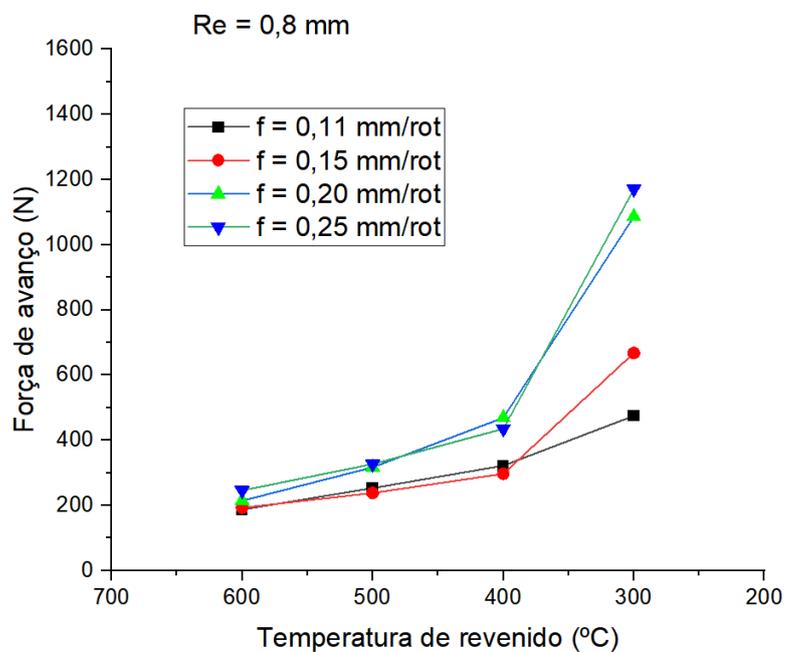
Figura 28 - Influência da temperatura de revenido nas forças de corte (F_c): (a) $Re = 0,4$ mm e (b) $Re = 0,8$ mm.

As forças passivas e avanço apresentaram comportamentos diferentes da força de corte. Enquanto a força de corte não sofreu grandes variações com a alteração da temperatura de revenido, essas outras duas componentes apresentaram crescimento à medida que a temperatura de revenido diminuiu, ou seja, apresentaram uma relação inversamente proporcional com a temperatura do tratamento térmico. Esta influência está associada ao fato de que em menores temperaturas de revenido, a dureza das amostras tende a ser maior, o que diminui a usinabilidade do material. Conseqüentemente, espera-se que a vida da ferramenta de corte seja bem menor quando usina o mesmo material em condições de dureza mais elevada, o que gera

um aumento de custos significativo na indústria. Tais afirmações podem ser observadas nas Figuras 29 e 30.

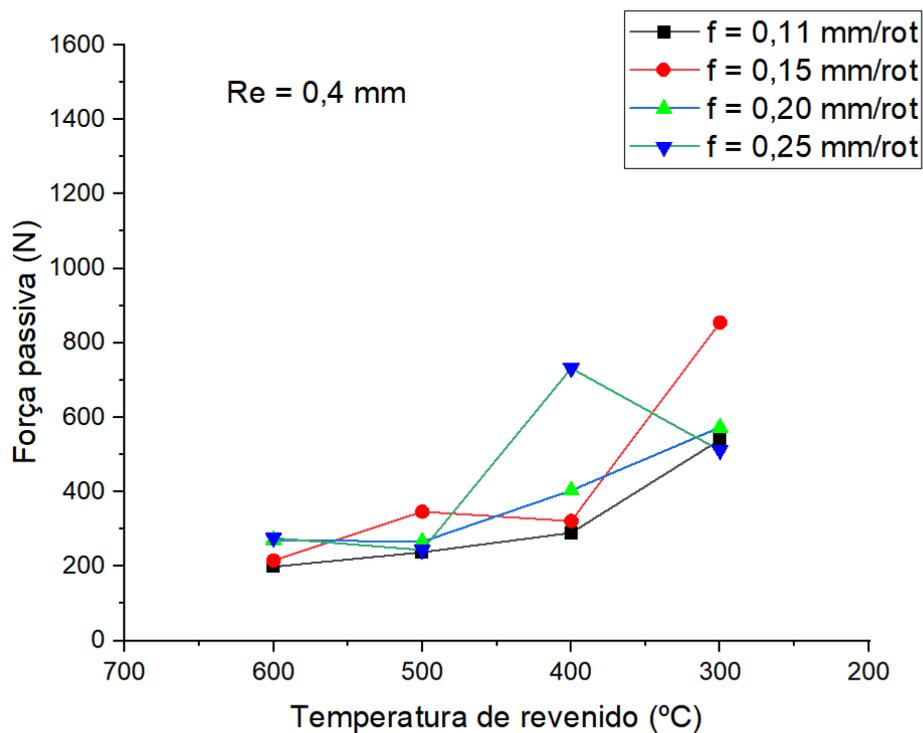


(a)

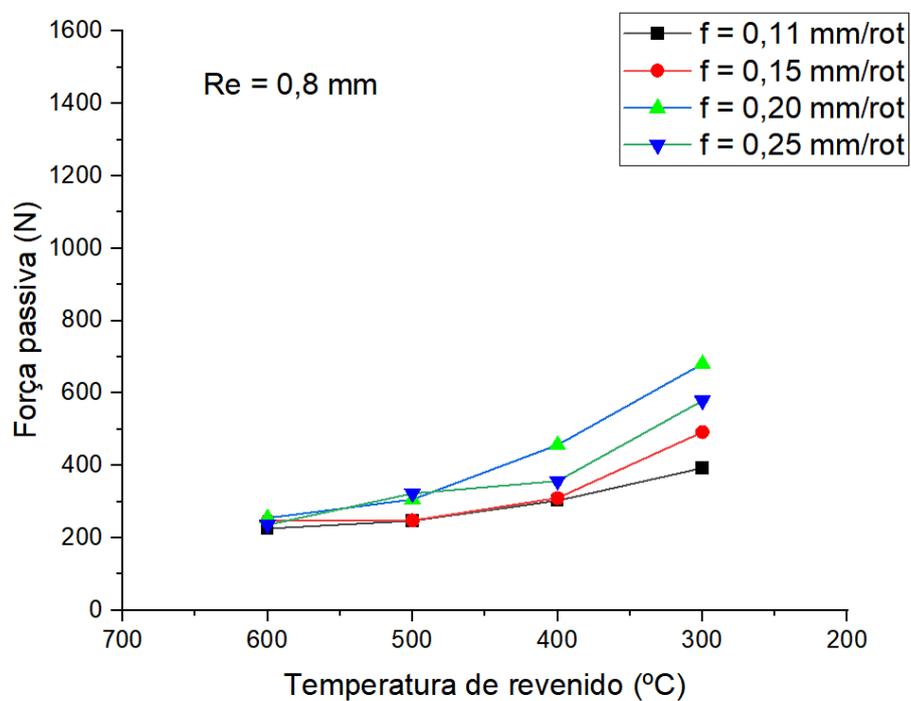


(b)

Figura 29 - Influência da temperatura de revenido nas forças de avanço (Fa): (a) Re = 0,4 mm e (b) Re = 0,8 mm.



(a)



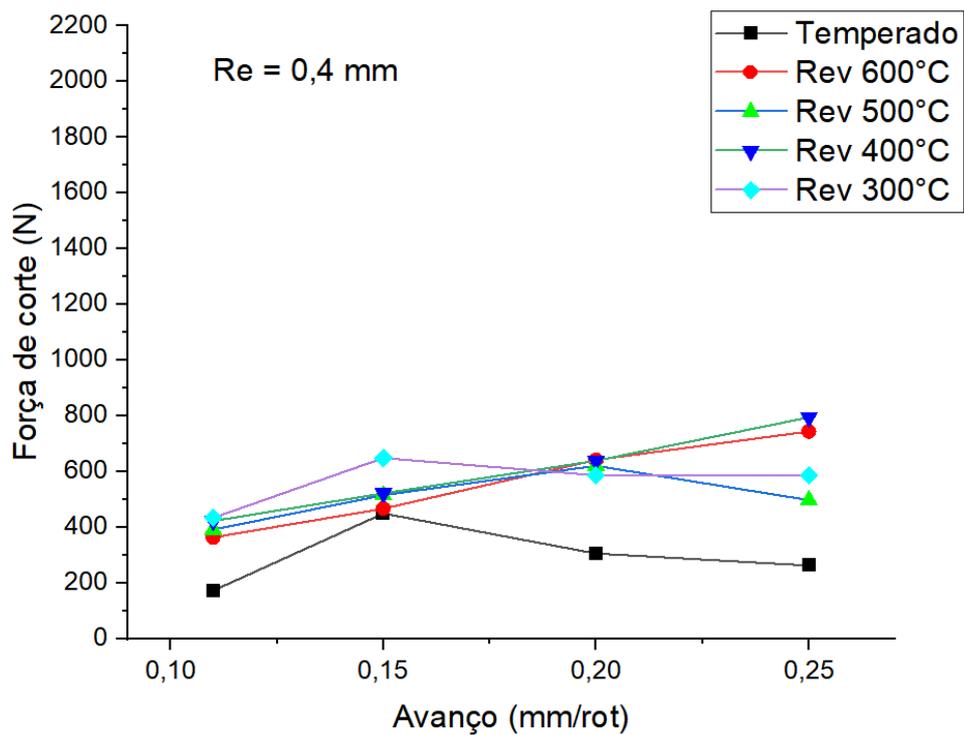
(b)

Figura 30 - Influência da temperatura de revenido nas forças passivas (Fp): (a) Re = 0,4 mm e (b) Re = 0,8 mm.

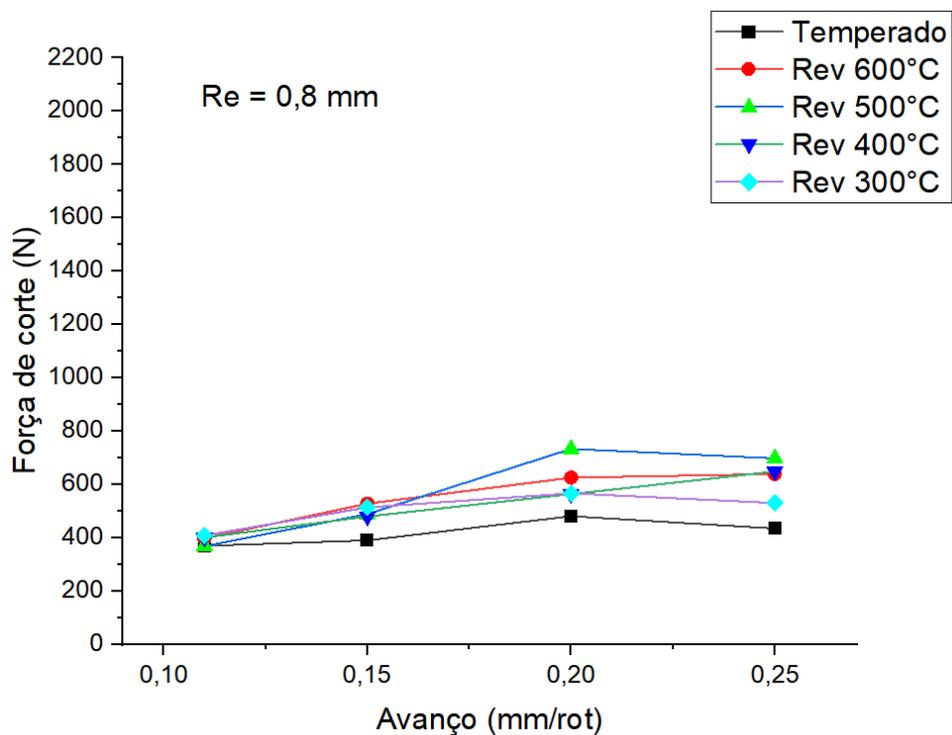
Outro fator observado na Figura 29 está relacionado com o aumento da força de avanço, apresentando valores superiores em comparação com as outras duas componentes. Esta condição foi verificada amostra revenida a 300°C, o que pode ser explicado pela maior dificuldade em usinar o material, devido alta dureza apresentada nas amostras.

O raio da ponta da ferramenta também exerceu certa influência nas duas componentes de força de usinagem (passiva e avanço). Espera-se que as forças de usinagem elevem com o aumento do raio da ferramenta devido ao maior contato na interface peça-ferramenta durante o processo de remoção de cavaco. Entretanto, sua maior atuação está sobre a rugosidade das superfícies usinadas. Com os experimentos não foi possível tomar conclusões sólidas a respeito da influência do raio da ponta, sendo necessário a realização de novos experimentos para tomar conclusões seguras. No entanto, foi observado que a força de avanço sofreu maior tendência em aumentar em comparação com as demais componentes. Em contrapartida, as força passiva apresentara comportamento variado em cada condição de corte, onde em alguns casos tenderam a aumentar e em outros tenderam a redução. Esta variação pode estar associada com os desgastes dos insertos ou com as vibrações do sistema.

O avanço foi outro fator que apresentou grande influência sobre as forças de usinagem. Observa-se pela Figuras 31,32 e 33 à medida que o avanço aumentou as forças de usinagem tendem a ser superiores, tal fato está relacionado com o aumento da área da seção de corte. Outro fator observado está relacionado com o aumento da força de avanço, apresentando valores superiores em comparação com as outras duas componentes. Esta condição foi verificada nas amostras temperada e revenida a 300°C, que seria as mais críticas para usinagem por apresentar uma dureza elevada e um material de baixa tenacidade.

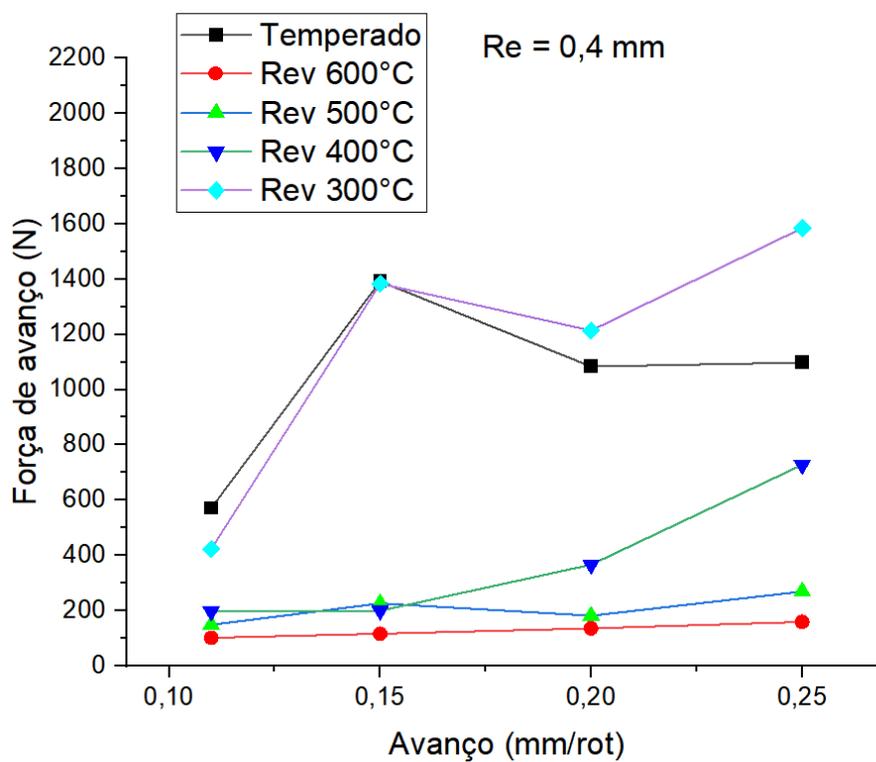


(a)

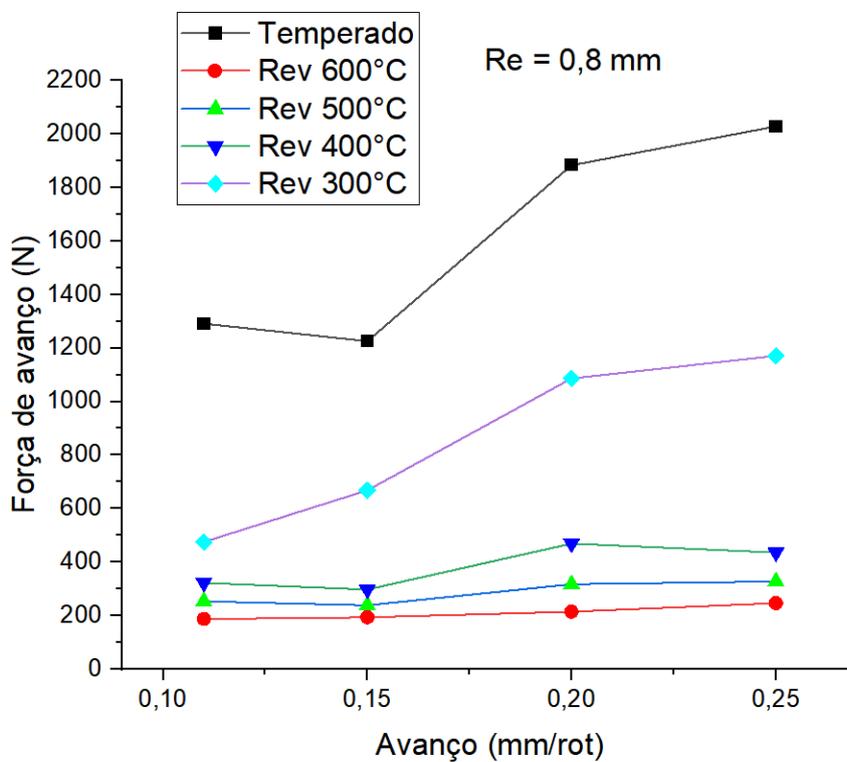


(b)

Figura 31 - Influência do avanço nas forças de corte (F_c): (a) Re = 0,4 mm e (b) Re = 0,8 mm.

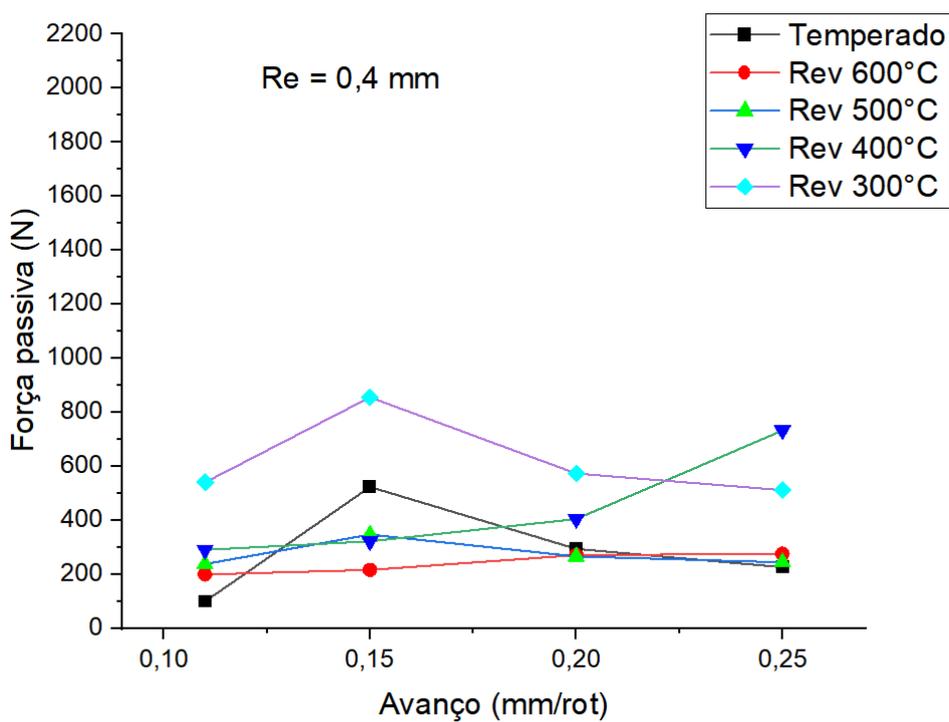


(a)

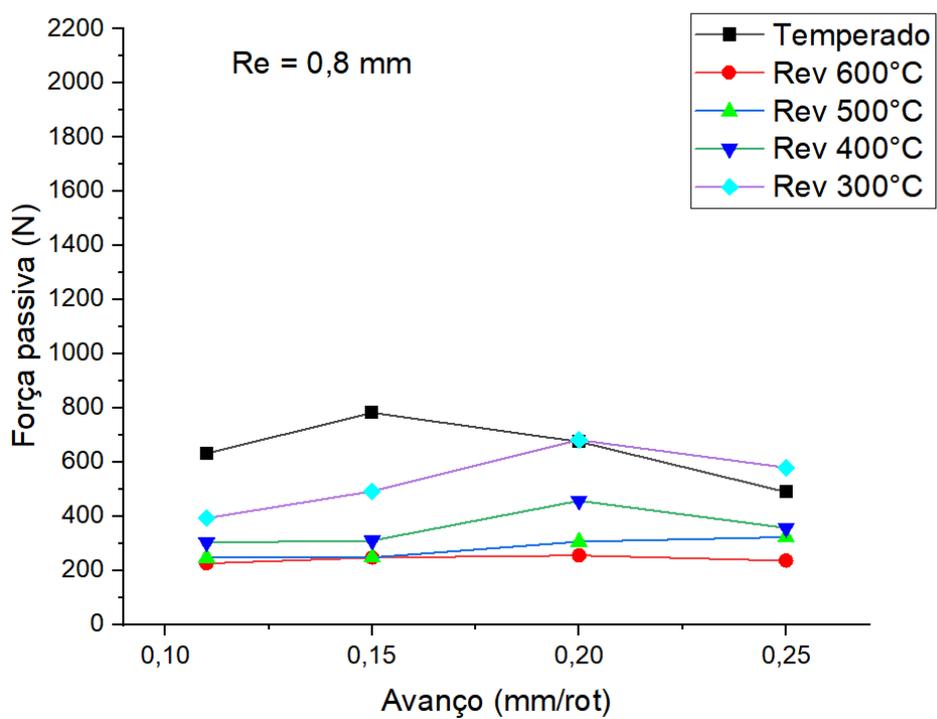


(b)

Figura 32 - Influência do avanço nas forças de avanço (F_a): (a) $Re = 0,4$ mm e (b) $Re = 0,8$ mm.



(a)



(b)

Figura 33 - Influência do avanço nas forças passivas (F_p): (a) $Re = 0,4$ mm e (b) $Re = 0,8$ mm.

4.3. ANÁLISE DA RUGOSIDADE

Avaliação da rugosidade superficial, parâmetros Ra, Rt e Rz, foi realizada após as usinagens, procurando identificar a influência do avanço, do raio da ponta da ferramenta de corte e do tratamento térmico na qualidade superficial das peças usinadas.

As Tabelas 8 e 9 apresentam os valores de rugosidade obtidos durante os ensaios com o rugosímetro e o apêndice B apresenta as tabelas com os conjuntos de dados e o cálculo dos parâmetros de rugosidade. A avaliação da rugosidade foi realizada em todas as amostras. Entretanto para a amostra temperada não foi possível avaliar a rugosidade para as seções usinadas com o inserto com $R_e = 0,4$ mm, pela baixa qualidade superficial apresentada após a usinagem (Figura 34). Devido à alta dureza da amostra (55 HRC), a alta fragilidade da ponta da ferramenta e as altas forças de usinagem, o acabamento superficial ficou deteriorado, impossibilitando sua avaliação.

Tabela 8 - Rugosidade Ra, Rz e Rt com utilização de inserto com $R_e = 0,4$ mm

Condição	Avanço (mm/rot)	Ra média (μm)	Rz médio (μm)	Rt máximo (μm)	DP Ra	DP Rz
Rev 600°C	0,11	2,322	14,027	18,521	0,198	0,856
	0,15	3,795	20,093	23,339	0,030	0,464
	0,20	6,538	33,642	42,801	0,120	1,517
	0,25	10,752	53,576	62,851	0,054	1,941
Rev 500°C	0,11	2,019	12,087	19,662	0,032	0,925
	0,15	3,900	20,649	22,531	0,034	0,196
	0,20	6,633	32,172	34,459	0,022	0,561
	0,25	10,925	56,574	78,116	0,366	3,519
Rev 400°C	0,11	2,207	12,188	14,421	0,080	0,685
	0,15	3,796	20,525	21,911	0,049	0,406
	0,20	7,050	34,763	37,854	0,045	1,481
	0,25	11,190	61,091	65,833	0,079	1,994
Rev 300°C	0,11	4,622	27,486	48,859	0,160	0,898
	0,15	16,314	87,002	122,56	0,660	3,006
	0,20	24,724	116,117	166,25	0,819	2,755
	0,25	26,523	152,713	230,48	0,607	12,606

Tabela 9 - Rugosidade Ra, Rz e Rt com utilização de inserto com Re = 0,8 mm

Condição	Avanço (mm/rot)	Ra média (μm)	Rz média (μm)	Rt máximo (μm)	DP Ra	DP Rz
Temperado	0,11	7,190	40,035	49,704	0,235	0,940
	0,15	4,792	29,117	45,671	0,074	0,707
	0,20	13,629	59,856	70,512	0,753	2,292
	0,25	18,489	81,399	93,391	0,483	2,643
Rev 600°C	0,11	1,474	8,583	10,143	0,150	0,555
	0,15	2,274	13,049	14,622	0,138	0,533
	0,20	3,486	19,508	21,555	0,018	0,152
	0,25	5,182	29,811	32,854	0,099	3,525
Rev 500°C	0,11	1,357	8,520	10,809	0,021	0,211
	0,15	2,006	11,562	13,169	0,041	0,119
	0,20	5,592	28,869	31,906	0,132	0,149
	0,25	5,210	26,181	29,363	0,072	0,574
Rev 400°C	0,11	1,694	9,129	9,669	0,081	0,078
	0,15	2,203	12,370	13,362	0,035	0,677
	0,20	3,434	18,740	20,037	0,046	1,002
	0,25	5,108	27,510	30,291	0,028	0,748
Rev 300°C	0,11	2,208	12,255	15,939	0,190	1,273
	0,15	4,919	28,110	34,343	0,066	0,719
	0,20	4,436	24,474	45,223	0,775	2,525
	0,25	4,744	28,634	33,444	0,089	1,743

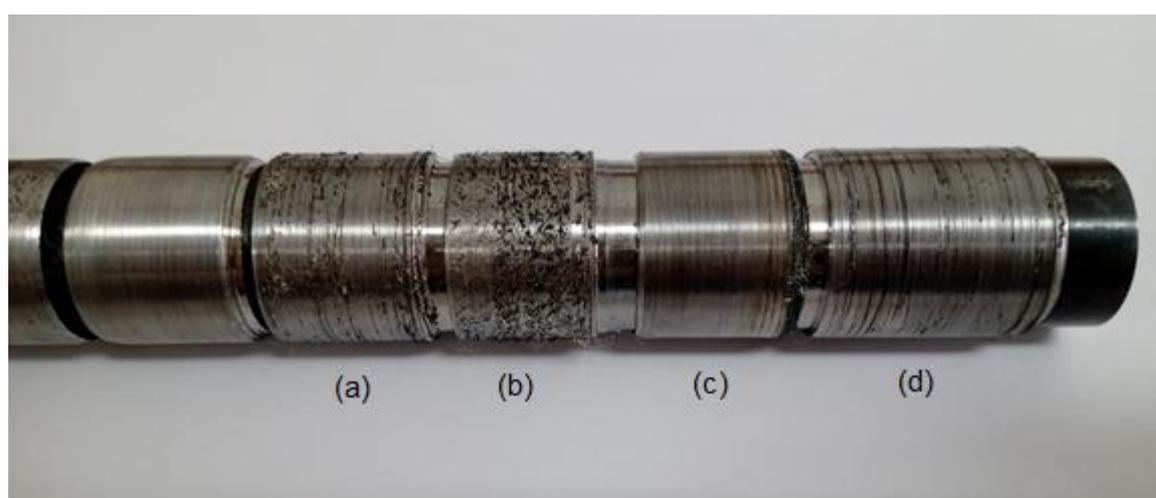
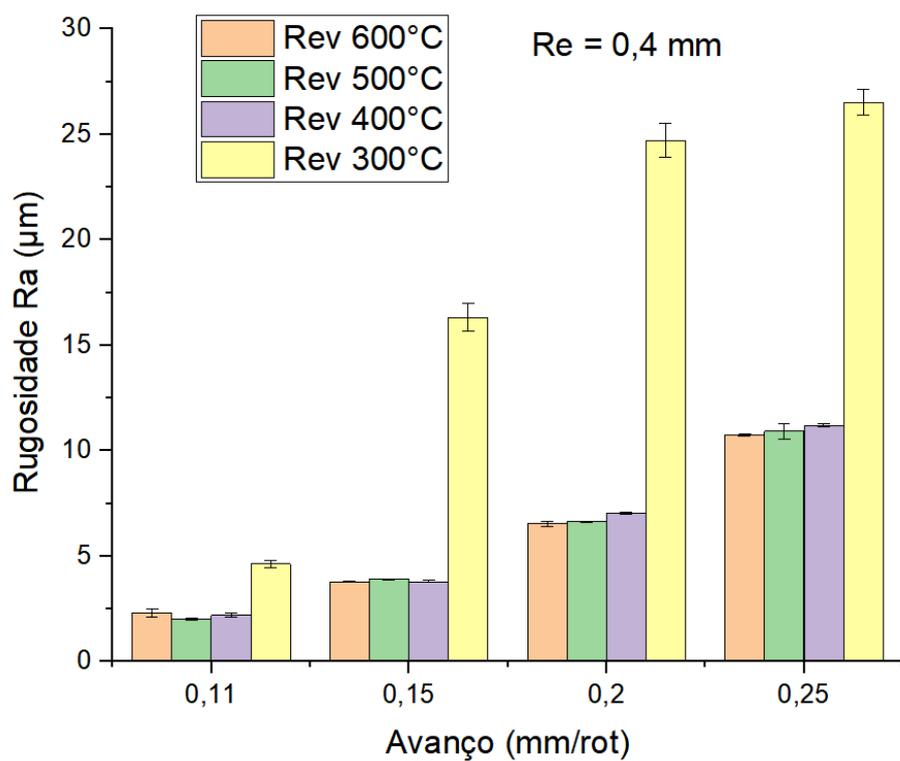


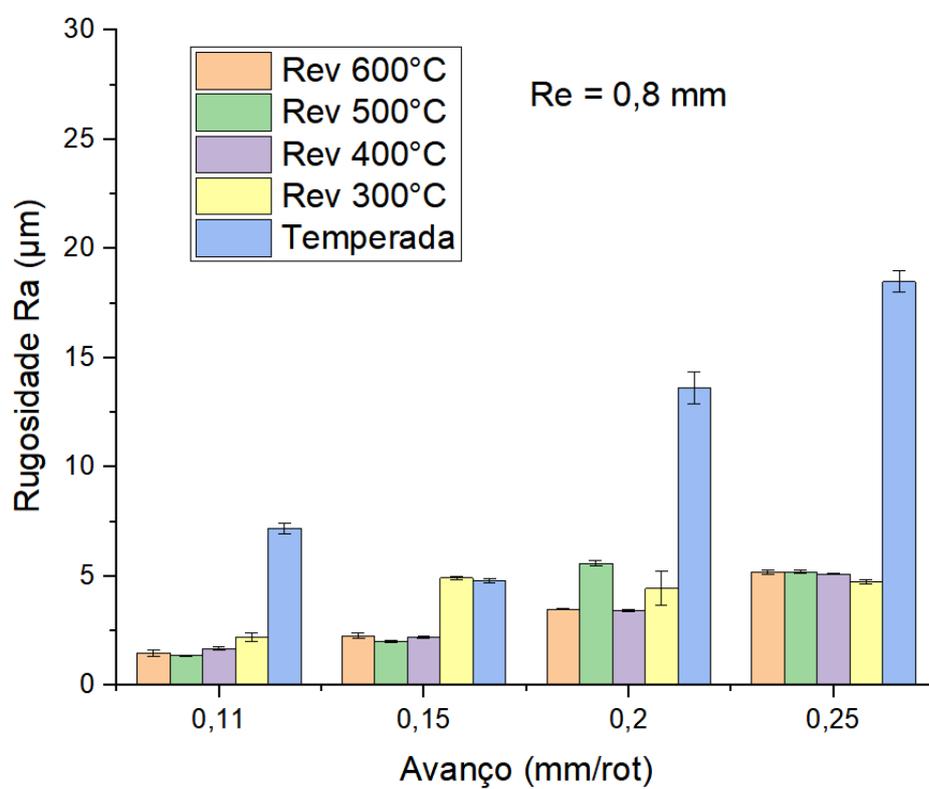
Figura 34 - Amostra temperada: Seções não avaliadas – Re = 0,4 mm, avanços: (a) $f = 0,20$ mm/rot, (b) $f = 0,11$ mm/rot, (c) $f = 0,15$ mm/rot, (d) $f = 0,25$ mm/rot

Analisando os gráficos apresentados na Figura 35 pode-se notar que para o avanço $f = 0,11$ mm/rot apresentou valores de Ra próximos, mesmo com a variação do raio da ferramenta de corte. Entretanto, conforme esperado, o acabamento superficial apresentou melhor qualidade com a utilização da ferramenta com maior raio de ponta. Sobre a amostra temperada, para todos os parâmetros de rugosidade avaliados com o inserto com raio 0,8 mm houve decréscimo entre $f = 0,11$ mm/rot e $f = 0,15$ mm/rot, mas houve um aumento praticamente linear dos valores de rugosidade após $f = 0,15$ mm/rot, à medida que o avanço aumentou.

Deve-se destacar a condição de revenido a 300 °C, para a ferramenta com raio de 0,4 mm, que apresentou os maiores valores de Ra. Ao comparar os resultados de Ra com as de força de avanço é possível perceber que os valores de maiores rugosidades estão relacionados as maiores magnitudes de força de avanço, que podem estar diretamente ligados a tendência de vibrações no processo de corte com maiores avanços na condição de desbastes, que resultam em uma qualidade superficial pior. A condição temperada, que não foi analisada por apresentar uma qualidade superficial muito ruim vem corroborar com essa afirmativa: maiores valores de dureza estão relacionados a maiores magnitudes das forças de avanço e pior condição de acabamento superficial. Essa é uma das razões para que a usinagem de materiais de alta dureza tenha extrema complexidade e altos custos.



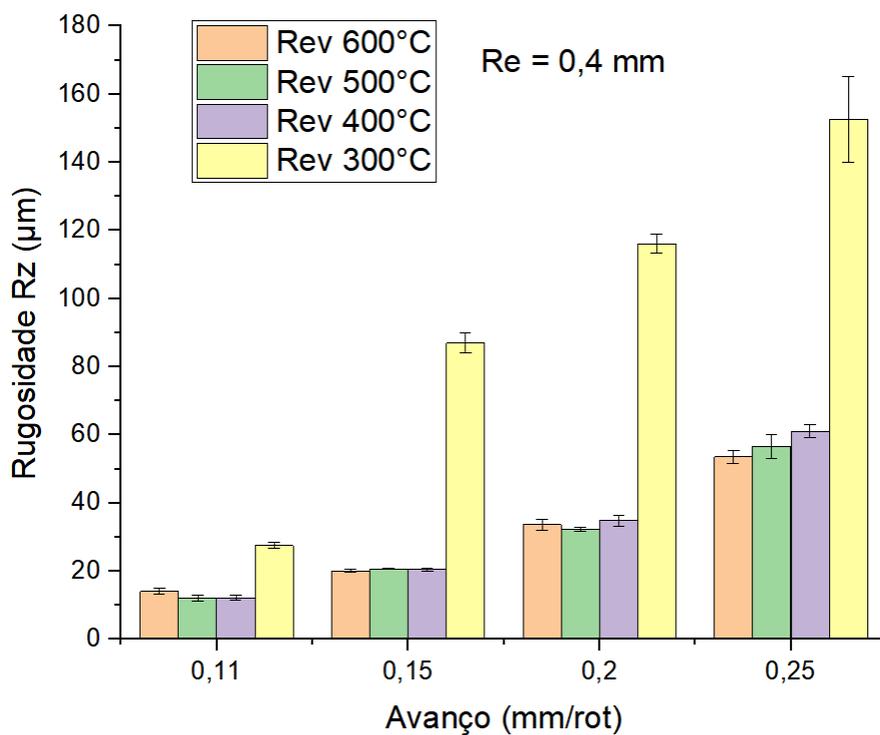
(a)



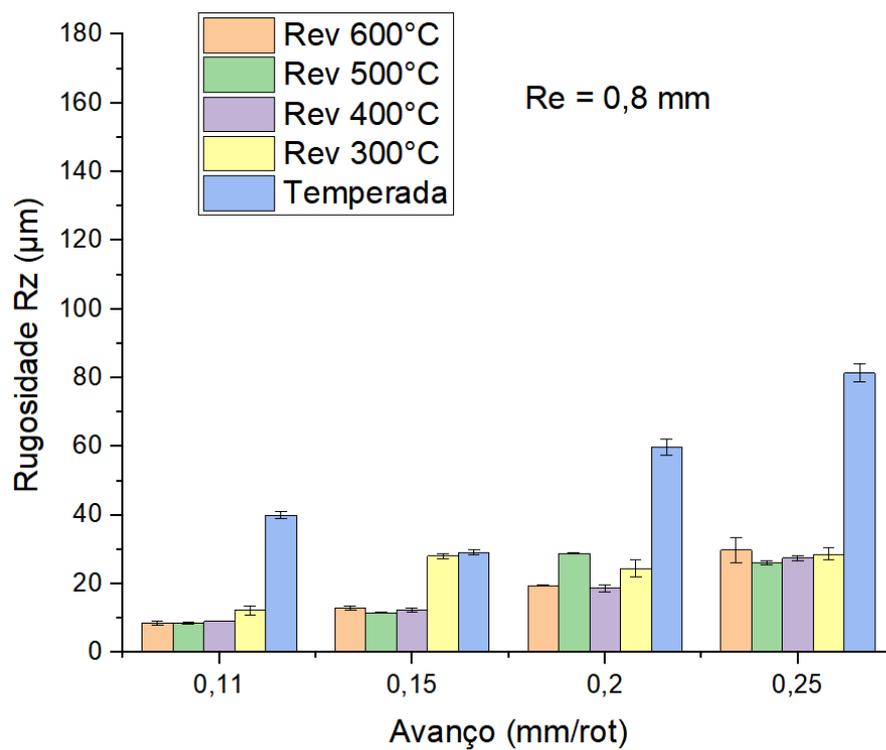
(b)

Figura 35 - Rugosidade Ra das amostras usinadas: (a) Re = 0,4 mm e (b) Re = 0,8 mm.

Os parâmetros de rugosidade R_z e R_t apresentaram comportamento semelhante. À medida que o avanço aumentou, os valores de R_z e R_t cresceram, com algumas exceções, conforme pode ser observado nas Figuras 36 e 37. Conforme esperado, o acabamento superficial apresentou melhor qualidade com a utilização da ferramenta com maior raio de ponta. Para os valores de R_t e R_z , com $f = 0,25$ mm/rot, os valores R_z e R_t dobraram com a mudança do inserto, onde apresentou valores mais elevados com a ferramenta de $R_e = 0,4$ mm.

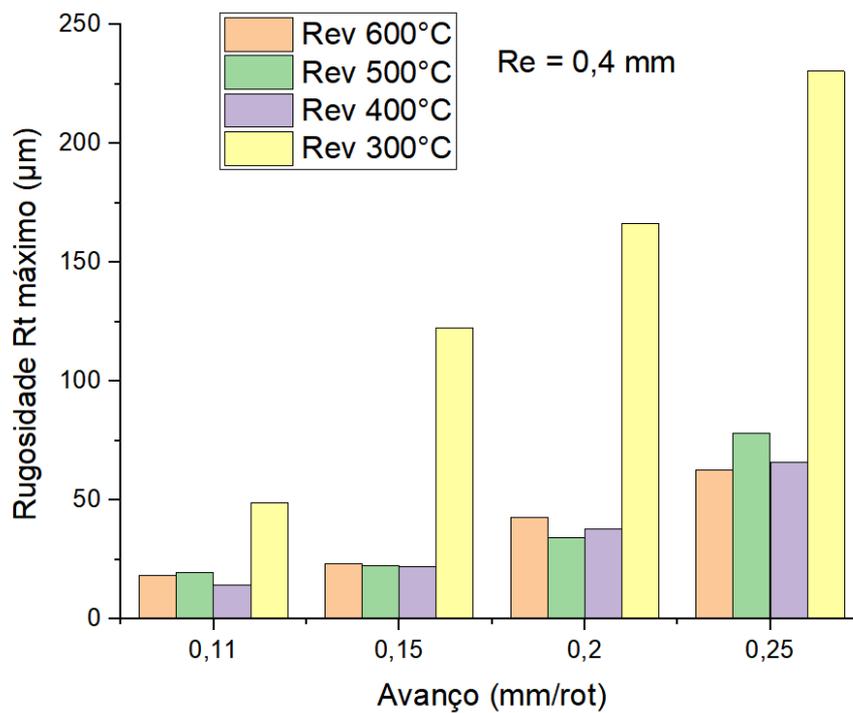


(a)

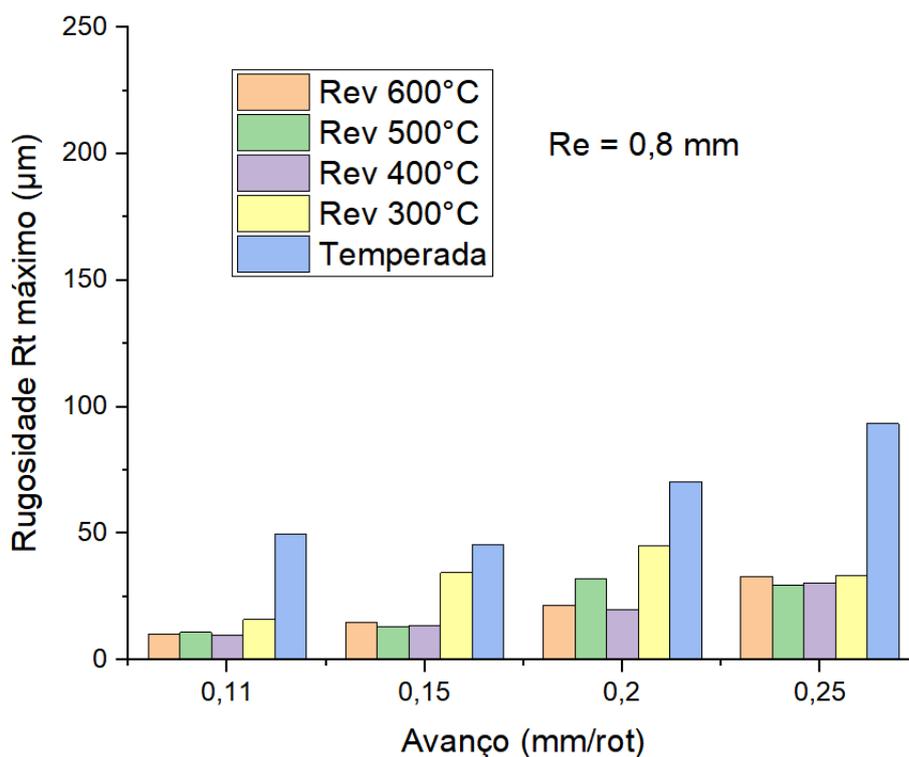


(b)

Figura 36 - Rugosidade Rz das amostras usinadas: (a) Re = 0,4 mm e (b) Re = 0,8 mm.



(a)



(b)

Figura 37 - Rugosidade Rt máximo das amostras usinadas: (a) Re = 0,4 mm e (b) Re = 0,8 mm.

Com relação as condições de tratamento térmico, fica claro que as amostras com maiores durezas apresentaram piores valores de acabamento, fato esse já evidenciado na análise da rugosidade média (Ra). Portanto, pode-se concluir que o aumento da dureza do material influenciou diretamente nos valores de rugosidade, visto que os maiores valores foram encontrados na amostra revenida a 300°C e temperada, para ambos os raios de ponta de ferramenta.

Para todos os avanços utilizados no presente trabalho, os valores de Rz e Rt apresentaram valores próximos. Esse fato deve ter ocorrido devido a maior regularidade dos picos máximos e vales das superfícies usinadas, evidenciando a uniformidade do processo de corte.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

Após a realização dos experimentos e realizado a discussão dos resultados, acompanhado por todo o conhecimento adquirido com a elaboração deste trabalho, pode-se concluir que:

1. A força de corte não apresentou variação significativa de magnitude em função da temperatura de revenido.
2. As forças de avanço e passiva apresentaram relação inversamente proporcional com a temperatura de revenido, onde essas forças cresceram à medida que foi aplicado menores temperaturas de revenido.
3. Na usinagem das amostras com maior dureza (menores temperatura de revenido), a força de avanço apresentou valores superiores em comparação com as demais componentes.
4. O avanço apresentou grande influência nas forças de usinagem, apresentando valores superiores de força à medida que o mesmo aumenta.
5. O aumento da dureza das amostras influenciou diretamente nos parâmetros de rugosidade, visto que maiores valores de Ra, Rt e Rz foram encontrados nas amostras revenida a 300 °C e temperada (de maior dureza).
6. O avanço foi outro fator que influenciou diretamente na rugosidade das amostras, apresentando valores crescentes de rugosidade à medida que o avanço aumentou, conforme esperado.
7. O raio da ponta da ferramenta influencia no acabamento superficial, obtendo melhores valores de rugosidade para a ferramenta de maior raio.

Após todos os apontamentos fica evidente que para condições de corte aplicados neste trabalho do raio de ponta de ferramenta de 0,8 mm apresentou melhores resultados e que os tratamentos térmicos influenciam diretamente na usinabilidade de um material de mesma composição química. Dessa forma, pode-se otimizar os parâmetros de corte para cada condição de tratamento térmico do material que será usinado, utilizando ferramentas com maiores raio de ponta à fim de obter

melhor acabamento superficial, otimizando a produtividade e minimizando os custos de operação.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho permite alguns estudos posteriores, como:

1. Analisar os desgastes nos insertos utilizados nas usinagens;
2. Realizar análise microestrutural em cada condição de TT e analisar as fases apresentadas com a dureza obtida;
3. Realizar mais usinagens, variando as velocidades de corte e profundidade de corte e analisar as forças de usinagem e sua correlação com as temperaturas de revenido;
4. Realizar novos ensaios de dureza (após torneamento) com o objetivo de avaliar se houve modificação superficial, devido à altas temperaturas de usinagem;
5. Realizar mais usinagens, utilizando as técnicas de mínima quantidade de lubrificante (MQL) e torneamento à seco e analisar as forças de usinagem para as diferentes temperaturas de revenido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdalla, A., Anazawa, R., Hashimoto, T., Pereira, M., Souza, G., Carrer, G., & Silva, O. (24-28 de Novembro de 2008). Caracterização microestrutural de aços multifásicos por microscopia óptica com a utilização de diferentes ataques químicos. *18º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais*.
- ABNT. (1971). *NBR 6175 - Processos Mecânicos de Usinagem*. São Paulo.
- ABNT. (1989). *NBR 6162 NB 204 - Movimentos e relações geométricas na usinagem dos metais*.
- ABNT. (2000). *NBR NM 136 - Tratamentos térmicos de aço - Terminologia e definições*. Rio de Janeiro.
- ABNT. (2000). *NBR NM 87 - Aço carbono e ligados para construção mecânica - Designação e composição química*. Rio de Janeiro.
- Amorim, H. (2003). *Movimentos e Parâmetros de corte*. Porto Alegre: Material didático do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Araujo, A. C., Mougo, A. L., & Campos, F. d. (2020). *Usinagem para engenharia: um curso de mecânica do corte*. Rio de Janeiro: E-papers.
- Barros, R. A., Abdalla, A. J., Rodrigues, H. L., & Pereira, M. d. (2015). Caracterização de um aço SAE/SAE 4340 com diferentes microestruturas. *Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo*, 71-74.
- Callister, W. D. (2002). *Ciência e Engenharia de Materiais - 5ª Ed.* Rio de Janeiro: LTC Editora.
- Caputo, P. C. (2016). *Estudo comparativo entre a temperatura no torneamento convencional a seco por imagem termográfica e o modelo analítico de Trigger e Chao*. Juiz de Fora.

- Cervelin, J. E. (2009). Estudo teórico-experimental das forças de corte no processo de torneamento. *Univesidade de São Paulo Escola de Engenharia de São Carlos*, pp. 65-66.
- Chaverini, V. (1996). *Aços e Ferros Fundidos*. ABM.
- Chaves, B., Casarin, J., & Kieckow, F. (9-13 de Novembro de 2014). Sistema de monitoramento do desgaste de ferramentas de corte em operações de usinagem. *21º CBECIMAT - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais*, p. 3119.
- da Silva, M. B., Abrão, A. M., Coelho, R. T., & Machado, A. R. (2009). *Teoria da Usinagem dos Materiais*. São Paulo: Editora Lucher.
- Departamento de Engenharia - Escola de Engenharia de São Carlos. (2017). SEM534 – Processos de Fabricação Mecânica. *Aula 01: Geometria da ferramenta e movimentos*, p. 10. Fonte: <https://edisciplinas.usp.br/course/view.php?id=36166>
- DIN. (1982). *DIN 6584 - Terms of the cutting technique: Forces, Energy, Work, Power*. Berlin.
- Diniz, A. E., Marcondes, F. C., & Coppini, N. L. (2013). *Tecnologia da Usinagem dos Materiais - 8ª Edição*. São Paulo: Artliber Editora.
- Droga, M., Sharma, V. S., & Dureja, J. (2011). Journal of Engineering Science and Technology Review. *Effect of tool geometry variation on finish turning - A Review*, pp. 1-13.
- Escola de Engenharia de São Carlos. (s.d.). SEM534 – Processos de Fabricação Mecânica. *Aula 01: Geometria da ferramenta e movimentos*, 10.
- Ferraresi, D. (2003). *Fundamentos da Usinagem dos Metais*. São Paulo: Editora Edgar Blucher Ltda.
- Gerdau. (2003). *Manual de Aços*.
- Gonçalves, A., & Boing, D. (5-7 de Agosto de 2019). 10º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação. *Influência da microgeometria do gume e do*

revestimento de ferramentas de metal-duro no torneamento do aço SAE 4340 com 55HRC .

Ladeira, D. G., dos Santos, J. A., Oliveira, G. P., Peçanha, L. A., de Oliveira, M. M., & Tomaz, Í. d. (Maio-Agosto de 2017). Avaliação do revenimento na dureza e microestrutura do aço SAE 4340. pp. 99-105.

Lima, J. G., Ávila, R. F., Abrão, A. M., Faustino, M., & Davim, J. P. (2005). Journal of Materials Processing Technology 169. *Hard turning: SAE 4340 high strength low alloy steel and SAE D2 cold work tool steel*, pp. 388-395.

Machado, P. H. (2018). Estudo do desgaste da ferramenta de corte no torneamento, com o uso de grafite como lubrificante sólido. *Universidade Federal de Juiz de Fora*.

Mitsubishi Materials. (2021). *c009z_r_technical_data*. Fonte: Mitsubishi Materials: http://www.mitsubishicarbide.com/application/files/4315/8277/8244/c009z_r_technical_data.pdf

Moldes Injeção Plásticos. (2021). *Parâmetros de avaliação da rugosidade - acabamento superficial*. Fonte: Moldes Injeção Plásticos: <http://moldesinjecao plasticos.com.br/parametros-de-avaliacao-da-rugosidade-acabamento-superficial/>

Oliveira, A. R., & Júnior, I. C. (2009). *Influência da Temperatura de Revenimento do aço SAE 4340*. Vale do Paraíba.

Rocha, V., Vieira, L. E., Castanheira, G., Camargo, P., Oliveira, D., Oliveira, J. H., & Viana, R. (20-24 de Maio de 2018). Torneamento do aço SAE 4340 com diferentes sistemas de lubrefrigeração. *CONEM - Congresso Nacional de Engenharia Mecânica*.

Sandvik Coromant. (2021). *DCMT 11 T3 04-PM 4325*. Fonte: Ferramentas para usinagem: <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/products/pages/productdetails.aspx?c=DCMT%2011%20T3%2004-PM%20%20%20%204325>

Sandvik Coromant. (2021). *DCMT 11 T3 08-PM 4325*. Fonte: Ferramentas para usinagem: <https://www.sandvik.coromant.com/pt->

pt/products/pages/productdetails.aspx?c=dcmt%2011%20t3%2008-
pm%204325

Santos, S. C., & Sales, W. F. (2007). *Aspectos Tribológicos da Usinagem dos Materiais*. São Paulo: Artliber Editora.

Smith, G. T. (2002). *Industrial Metrology – Surfaces and Roundness*. Londres: Springer.

Souza, I. G. (2017). Processo de torneamento do aço ABNT 4340 utilizando ferramenta de metal duro com revestimento de Ti(C,N)+Al₂O₃+TiN. *Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" Campus de Guaratinguetá*, pp. 53-54.

Suresh, R., Basavarajappa, S., Gaitonde, V. N., & Samuel, G. L. (2012). Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials. *Machinability investigations on hardened SAE 4340 steel using coated carbide insert*, pp. 75-86.

TENAX. (2021). SAE 4340. Fonte: TENAX:
<https://www.tenax.com.br/tenax/produtos/acos-para-construcao-mecanica/sae-4340/>

APÊNDICE A – Tabela cálculo de dureza

Tabela 10 - Valores ensaios de dureza Rockwell C

Amostra	Tratamentos térmicos	Dureza (HRC)	Dureza Média (HRC)	DP
1	Temperada	52	54,67	3,44
		55		
		59		
		58		
		54		
2	Temperada e revenida a 600°C	50	33,33	0,52
		33		
		34		
		33		
		33		
3	Temperada e revenida a 500°C	37	37,17	0,75
		37		
		38		
		38		
		36		
4	Temperada e revenida a 400°C	37	28,80	2,49
		25		
		31		
		29		
		28		
5	Temperada e revenida a 300°C	31	40,00	2,00
		39		
		43		
		41		
		38		
6	Temperada e revenida a 200°C	39	44,60	1,14
		43		
		45		
		45		
		46		
		44		

APÊNDICE B – Tabelas cálculo de rugosidade

Tabela 11 - Amostra 1: temperada - Parâmetros de rugosidades

Parâmetros de corte	Ra	Rt	Rz	Ra média (µm)	Rt média (µm)	Rz média (µm)	DP Ra	DP Rt	DP Rz
f = 0,25 mm/rot;	18,675	87,697	79,498						
Re = 0,8 mm	17,940	90,933	80,282	18,489	90,674	81,399	0,483	2,856	2,643
	18,851	93,391	84,418						
f = 0,20 mm/rot;	13,603	64,509	57,869						
Re = 0,8 mm	12,890	67,772	59,336	13,629	67,598	59,856	0,753	3,005	2,292
	14,395	70,512	62,364						
f = 0,15 mm/rot;	4,779	41,462	29,740						
Re = 0,8 mm	4,872	45,671	29,261	4,792	43,272	29,117	0,074	2,165	0,707
	4,725	42,684	28,349						
f = 0,11 mm/rot;	7,304	46,256	40,252						
Re = 0,8 mm	7,346	49,704	39,005	7,190	47,433	40,035	0,235	1,967	0,940
	6,920	46,339	40,848						

Tabela 12 - Amostra 2: revenida a 600°C - Parâmetros de rugosidades

Parâmetros de corte	Ra	Rt	Rz	Ra média (µm)	Rt média (µm)	Rz média (µm)	DP Ra	DP Rt	DP Rz
f = 0,25 mm/rot;	5,297	30,979	27,754						
Re = 0,8 mm	5,124	32,854	27,799	5,182	30,544	29,811	0,099	2,555	3,525
	5,126	27,799	33,881						
f = 0,20 mm/rot;	3,480	21,555	19,360						
Re = 0,8 mm	3,506	21,225	19,664	3,486	21,166	19,508	0,018	0,422	0,152
	3,471	20,717	19,500						
f = 0,15 mm/rot;	2,130	13,943	12,895						
Re = 0,8 mm	2,405	14,622	13,642	2,274	14,142	13,049	0,138	0,418	0,533
	2,287	13,861	12,609						
f = 0,11 mm/rot;	1,465	9,752	8,563						
Re = 0,8 mm	1,328	9,995	8,038	1,474	9,963	8,583	0,150	0,197	0,555
	1,628	10,143	9,147						
f = 0,25 mm/rot;	10,699	56,675	51,809						
Re = 0,4 mm	10,750	62,851	55,653	10,752	59,145	53,576	0,054	3,268	1,941
	10,806	57,910	53,266						

f = 0,20	6,593	42,801	34,616						
mm/rot;	6,400	34,044	31,895	6,538	38,705	33,642	0,120	4,406	1,517
Re = 0,4 mm	6,621	39,270	34,416						
f = 0,15	3,823	22,249	20,519						
mm/rot;	3,763	23,339	19,598	3,795	22,505	20,093	0,030	0,740	0,464
Re = 0,4 mm	3,800	21,927	20,161						
f = 0,11	2,191	16,467	14,033						
mm/rot;	2,550	18,521	14,879	2,322	16,649	14,027	0,198	1,787	0,856
Re = 0,4 mm	2,225	14,960	13,168						

Tabela 13 - Amostra 3: revenida a 500°C - Parâmetros de rugosidades

Parâmetros de corte	Ra	Rt	Rz	Ra média (µm)	Rt média (µm)	Rz média (µm)	DP Ra	DP Rt	DP Rz
f = 0,25	5,257	29,363	26,825						
mm/rot;	5,245	28,09	25,996	5,210	28,115	26,181	0,072	1,235	0,574
Re = 0,8 mm	5,127	26,893	25,723						
f = 0,20	5,744	31,593	28,965						
mm/rot;	5,524	31,906	28,945	5,592	31,691	28,869	0,132	0,186	0,149
Re = 0,8 mm	5,508	31,574	28,698						
f = 0,15	1,960	13,169	11,499						
mm/rot;	2,038	12,549	11,699	2,006	12,644	11,562	0,041	0,485	0,119
Re = 0,8 mm	2,019	12,214	11,487						
f = 0,11	1,364	10,809	8,756						
mm/rot;	1,333	9,833	8,350	1,357	10,278	8,520	0,021	0,494	0,211
Re = 0,8 mm	1,373	10,193	8,454						
f = 0,25	11,345	78,116	60,611						
mm/rot;	10,762	62,902	54,963	10,925	65,852	56,574	0,366	11,087	3,519
Re = 0,4 mm	10,669	56,539	54,149						
f = 0,20	6,608	34,459	32,657						
mm/rot;	6,649	33,643	31,558	6,633	34,100	32,172	0,022	0,417	0,561
Re = 0,4 mm	6,642	34,199	32,301						
f = 0,15	3,863	22,012	20,425						
mm/rot;	3,931	21,627	20,737	3,900	22,057	20,649	0,034	0,454	0,196
Re = 0,4 mm	3,905	22,531	20,786						
f = 0,11	2,002	12,421	11,750						
mm/rot;	1,998	13,364	11,378	2,019	15,149	12,087	0,032	3,937	0,925
Re = 0,4 mm	2,056	19,662	13,133						

Tabela 14 - Amostra 4: revenida a 400°C - Parâmetros de rugosidades

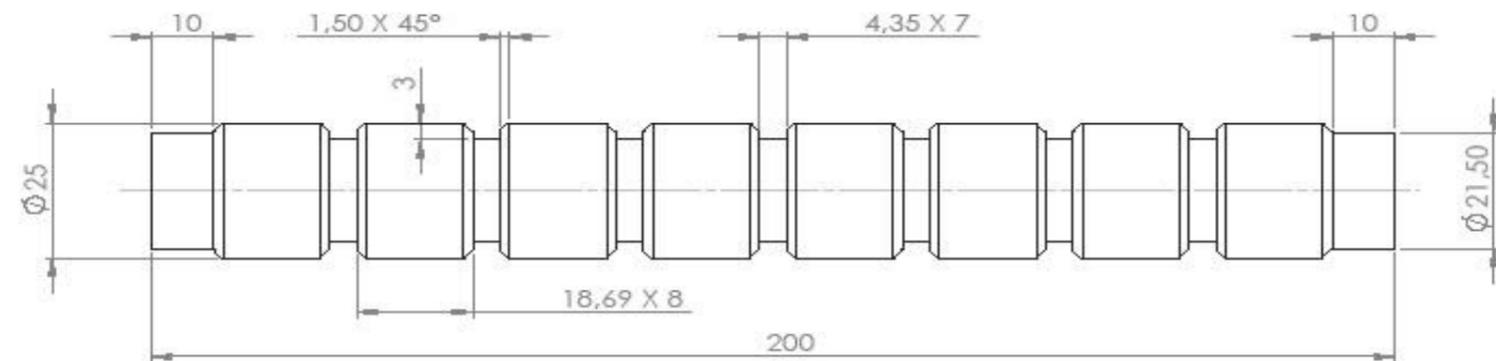
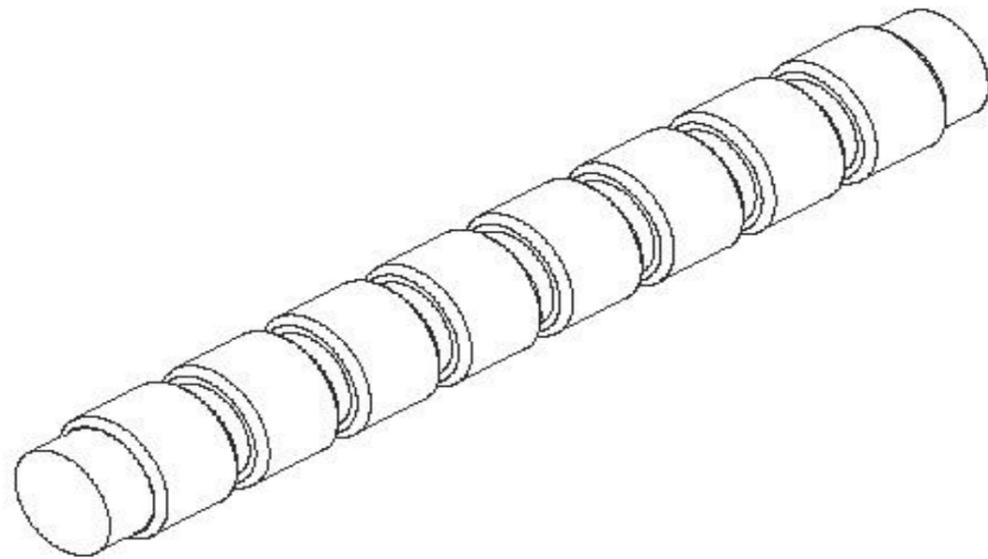
Parâmetros de corte	Ra	Rt	Rz	Ra média (µm)	Rt média (µm)	Rz média (µm)	DP Ra	DP Rt	DP Rz
f = 0,25 mm/rot;	5,076	27,433	26,826						
Re = 0,8 mm	5,120	27,849	27,396	5,108	28,524	27,510	0,028	1,544	0,748
	5,129	30,291	28,309						
f = 0,20 mm/rot;	3,460	18,076	17,874						
Re = 0,8 mm	3,380	19,659	18,509	3,434	19,257	18,740	0,046	1,040	1,002
	3,461	20,037	19,837						
f = 0,15 mm/rot;	2,227	12,739	12,168						
Re = 0,8 mm	2,163	12,321	11,816	2,203	12,807	12,370	0,035	0,524	0,677
	2,219	13,362	13,125						
f = 0,11 mm/rot;	1,740	9,669	9,104						
Re = 0,8 mm	1,600	9,378	9,216	1,694	9,389	9,129	0,081	0,275	0,078
	1,742	9,120	9,066						
f = 0,25 mm/rot;	11,28	65,417	62,789						
Re = 0,4 mm	11,156	65,833	61,588	11,190	64,516	61,091	0,079	1,933	1,994
	11,133	62,297	58,896						
f = 0,20 mm/rot;	7,029	37,854	36,089						
Re = 0,4 mm	7,019	34,176	33,164	7,050	36,522	34,763	0,045	2,038	1,481
	7,101	37,536	35,036						
f = 0,15 mm/rot;	3,740	20,592	20,086						
Re = 0,4 mm	3,820	21,911	20,886	3,796	21,330	20,525	0,049	0,673	0,406
	3,829	21,488	20,604						
f = 0,11 mm/rot;	2,115	12,233	11,533						
Re = 0,4 mm	2,262	12,259	12,132	2,207	12,971	12,188	0,080	1,256	0,685
	2,243	14,421	12,899						

Tabela 15 - Amostra 5: revenida a 300°C - Parâmetros de rugosidades

Parâmetros de corte	Ra	Rt	Rz	Ra média (µm)	Rt média (µm)	Rz média (µm)	DP Ra	DP Rt	DP Rz
f = 0,25 mm/rot;	4,808	33,444	29,875						
Re = 0,8 mm	4,643	29,132	26,642	4,744	31,518	28,634	0,089	2,192	1,743
	4,782	31,978	29,386						
f = 0,20 mm/rot;	3,545	25,331	21,560						
Re = 0,8 mm	4,959	42,845	25,850	4,436	37,800	24,474	0,775	10,863	2,525
	4,803	45,223	26,011						

f = 0,15	4,937	30,965	28,334						
mm/rot;	4,845	32,935	27,306	4,919	32,748	28,110	0,066	1,697	0,719
Re = 0,8 mm	4,974	34,343	28,691						
f = 0,11	2,37	15,939	13,115						
mm/rot;	1,999	13,17	10,792	2,208	14,754	12,255	0,190	1,427	1,273
Re = 0,8 mm	2,256	15,152	12,858						
f = 0,25	27,224	227,95	167,1						
mm/rot;	26,172	230,48	147,44	26,523	224,847	152,713	0,607	7,671	12,606
Re = 0,4 mm	26,173	216,11	143,60						
f = 0,20	25,162	145,30	113,11						
mm/rot;	25,231	151,33	118,52	24,724	154,293	116,117	0,819	10,785	2,755
Re = 0,4 mm	23,780	166,25	116,72						
f = 0,15	16,711	122,56	87,211						
mm/rot;	15,552	117,35	83,897	16,314	118,903	87,002	0,660	3,179	3,006
Re = 0,4 mm	16,678	116,80	89,899						
f = 0,11	4,806	46,672	28,407						
mm/rot;	4,550	48,859	26,613	4,622	46,998	27,486	0,160	1,722	0,898
Re = 0,4 mm	4,511	45,462	27,437						

APÊNDICE C – Desenho técnico das amostras



ALUNO	RAMON ELIAS DE JESUS				
PROF	TATIANE CHUVAS				
Data	05/2021	VISTO			
Esc.:	TÍTULO: AMOSTRAS PARA TESTE		UNIDADE mm	NÚMERO	FOLHA Nº
1:1			NÚMERO DO DESENHO		