

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO
SUCKOW DA FONSECA - CEFET/RJ**

**Análise das forças de usinagem no torneamento de
aço SAE 4340 sob diferentes condições de
tratamentos térmicos**

Bernardo Carneiro da Costa

Prof. Orientador: Tatiane de Campos Chuvas

Rio de Janeiro

Abril de 2019

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO
SUCKOW DA FONSECA - CEFET/RJ**

**Análise das forças de usinagem no torneamento de
aço SAE 4340 sob diferentes condições de
tratamentos térmicos**

Bernardo Carneiro da Costa

Projeto final apresentado em cumprimento às
normas do Departamento de Educação Superior
do CEFET/RJ, como parte dos requisitos para obtenção
do título de bacharel em Engenharia Mecânica

Prof. Orientador: Tatiane de Campos Chuvas

Rio de Janeiro

Abril de 2019

CEFET/RJ – Sistema de Bibliotecas / Biblioteca Central

C837 Costa, Bernardo Carneiro da
Análise das forças de usinagem no torneamento de aço SAE
4340 sob diferentes condições de tratamentos térmicos / Bernardo
Carneiro da Costa.—2019.
xiii, 47f. : il. (algumas color.) , grafs. , tabs. ; enc.

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação
Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2019.

Bibliografia : f. 44-47

Orientadora : Tatiane de Campos Chuvás

1. Engenharia mecânica. 2. Usinagem. 3. Aço. 4. Aspereza de
superfície. I. Chuvás, Tatiane de Campos (Orient.). II. Título.

CDD 620.1

Elaborada pela bibliotecária Mariana Oliveira CRB-7/5929

AGRADECIMENTOS

Meus primeiros agradecimentos são aos meus pais, Mônica Maria Carneiro e Carlos Bernardo da Costa, que sempre me ensinaram que somente com a busca de conhecimento e qualificação acadêmica eu posso alcançar meus objetivos. Os sacrifícios deles para que me tornasse um engenheiro valorizam ainda mais a minha conquista. Isto se aplica a todos os meus familiares que, de alguma forma, me ajudaram nesta caminhada.

A minha namorada Leane Verli que me apoiou nos momentos mais difíceis no processo de elaboração deste trabalho, quando por vezes não acreditei na conclusão do mesmo. Sempre me incentivando e ajudando no que podia, mesmo atuando em uma área totalmente diferente.

A melhor professora que tive em todo curso de Engenharia Mecânica e minha orientadora Tatiane de Campos Chuvas, que me deu crédito de dar continuidade a este trabalho mesmo eu não sendo merecedor. Obrigado por acreditar na minha força vontade e dedicação, ser solícita e paciente quando precisei e principalmente pelo apoio nesta reta final.

Ao professor Matheus Campolina Mendes pela sua paciência e ajuda na realização dos tratamentos térmicos.

E por último, a todos os amigos que celebraram comigo o final deste ciclo.

RESUMO

O Aço SAE 4340 é um aço de ampla utilização na confecção de peças estruturais, onde é exigida alta resistência mecânica aliada a propriedades como boa tenacidade e resistência a fadiga. Sua temperabilidade o define como aço para beneficiamento, sendo possível alcançar valores de dureza variados, dependendo das condições dos tratamentos térmicos aplicados, demonstrando a versatilidade do material em atender as mais diversas condições de projeto. Processos de usinagem são amplamente utilizados em aços SAE 4340 e, por esta razão é necessário entender a relação entre as propriedades deste material e os parâmetros de corte utilizados na usinagem, visando aumentar produtividade e diminuir os custos do processamento. Assim, o objeto deste estudo é a usinagem por torneamento de um aço SAE 4340 tendo como foco avaliar como os tratamentos térmicos influenciam na magnitude das forças de usinagem do processo. Foram estudadas duas condições: temperada e temperada e revenida. Além disso, foi realizado um estudo com diferentes avanços. Complementarmente foi realizado um estudo de qualidade superficial com base na rugosidade. A força de corte demonstrou ser a componente de maior magnitude nas duas condições de tratamentos, com uma tendência de crescimento junto ao aumento do avanço na peça temperada. Com relação a rugosidade, a variação de avanço utilizado apresentou significativa influência na peça temperada e revenida e pouca influência na peça somente temperada.

Palavras-chave: Aço SAE 4340; Torneamento; Forças de Usinagem; Pressão Específica de Corte; Rugosidade.

ABSTRACT

SAE 4340 steel is widely used in the manufacture of structural parts, due high mechanical resistance is required combined with properties such as good toughness and fatigue strength. Its hardenability defines it as hardening of steels, being possible to reach a range of hardness values, depending on the conditions of the heat treatment applied, showing the versatility of the material to meet the most diverse design conditions. Machining processes are widely used in SAE 4340 steels, therefore, it is necessary to understand the relationship between the properties of this material and the cutting parameters used in the machining, in order to increase productivity and decrease in processing costs. Thus, the object of study is the machining by turning of a SAE 4340 steel focusing on evaluating how the heat treatments influence the magnitude of the machining forces of the process. Two conditions have been studied: quenched and quenched and tempered. Besides that, a study has been carried out with different feed rates. In addition, a surface quality study has been carried out based on roughness. The cutting force was the highest magnitude component in the two treatment conditions, with a growth trend along with the increase of the feed rate in the tempered part. Regarding the roughness, the variation of the feed rate showed a significant influence on the temperate and toughening sample and little influence in the piece which was only tempered.

Keywords: SAE 4340 Steel; Turning Process; Machining Forces; Specific cutting force; Roughness.

SUMÁRIO

Capítulo 1	1
Introdução	1
Capítulo 2	3
Revisão Bibliográfica	3
2.1 Usinagem	3
2.2 Torneamento	3
2.2.1 Geometria da Cunha Cortante	7
2.3 Forças de usinagem no torneamento	8
2.3.1 Pressão específica de corte	10
2.4 Integridade Superficial	12
2.5 Dureza	16
2.6 Usinagem de aços endurecidos	17
2.7 Aço SAE 4340	17
2.7.1 Tratamentos térmicos aplicados em SAE 4340	18
2.8 Torneamento do aço SAE 4340	20
Capítulo 3	24
Materiais e Métodos	24
3.1 Confeção das amostras	24
3.2 Tratamentos térmicos	24
3.3 Torneamento	25
3.4 Força de usinagem	26
3.5 Ensaio de dureza	28
3.6 Ensaio de rugosidade	28
Capítulo 4	30
Resultados e Discussão	30

4.1 Análise de dureza	30
4.2 Análise das forças de usinagem	31
4.3 Análise da pressão específica de corte	36
4.4 Análise da rugosidade	38
Capítulo 5	42
Conclusões	42
Capítulo 6	43
Sugestão para Trabalhos Futuros	43
Referências Bibliográficas	44

LISTA DE FIGURAS

- Figura 2.1 – Principais operações executadas no torno (Fonte: MACHADO *et al.*, 2009).
- Figura 2.2 – Representação dos movimentos e direções no torneamento (Fonte: MACHADO *et al.*, 2009).
- Figura 2.3 – Superfície usinada com avanço f , f' e raio de ponte r (Fonte: SANCHES, 2011).
- Figura 2.4 – Elementos da cunha de corte de uma ferramenta para torneamento (Fonte: SANTOS, 2007).
- Figura 2.5 – Forças resultantes da ação da peça sobre a ferramenta de usinagem (Fonte: DINIZ *et al.*, 2010)
- Figura 2.6 – Seção transversal de corte no torneamento (Fonte: FERRARESI, 1977).
- Figura 2.7 – Perfil de Rugosidade média (R_a) (Fonte: ROSA, 2016).
- Figura 2.8 – Rugosidade R_a em função dos processos de usinagem (Fonte: Seco Tools AB, 2016).
- Figura 2.9 – Rugosidade total R_t (Fonte: ROSA 2016).
- Figura 2.10 – Escala de Dureza Rockwell (Fonte: RODRIGUES e MARTINS, 2005).
- Figura 2.11 – Microestrutura do aço SAE 4340 revenido, aumento de 1000X: (a) 200°C/60 min; (b) 700°C/60 min. (Fonte: LADEIRA *et al.*, 2009)
- Figura 2.12 Comportamentos das componentes da força de usinagem do aço SAE 4340 – 45 HRC (Fonte: BOING, 2016).
- Figura 2.13 – Comportamentos da força de usinagem do aço SAE 4340 (Fonte: BOING, 2016).
- Figura 2.14 Rugosidade R_a em função da velocidade de corte para diferentes avanços (Fonte: SOUZA 2017).
- Figura 2.15 – Rugosidade R_t em função da velocidade de corte para diferentes avanços (Fonte: SOUZA 2017).
- Figura 3.1 – Esboço da amostra (unidades em mm).
- Figura 3.2 – Pastilha de metal duro (Fonte: Sandvik Coromant, 2019).
- Figura 3.3 – Dinamômetro montado no torno
- Figura 3.4 – (a) Dinamômetro KISTLER de cristais piezoelétricos modelo 9257BA. (b) Unidade de controle KISTLER modelo 5233A1. (c) Placa de aquisição de dados NI USB-6221 (FERNANDES, 2018).
- Figura 3.5 – Ensaio de rugosidade utilizando o rugosímetro portátil SurfTest SJ-210

Figura 4.1 – Resultado do ensaio de dureza Vickers

Figura 4.2 – Forças de usinagem da amostra temperada, avanço de 0,073 mm/rot.

Figura 4.3 – Força de usinagem da amostra temperada e revenida, avanço de 0,073 mm/rot.

Figura 4.4 – Variação da força de corte em função do avanço

Figura 4.5 – Variação da força passiva em função do avanço

Figura 4.6 – Variação da força de avanço em função do avanço

Figura 4.7 – Variação da força de usinagem em função do avanço

Figura 4.8 – Pressão específica de corte

Figura 4.9 – Valores de rugosidade média adquiridos

Figura 4.10 – Valores de rugosidade máxima adquiridos

Figura 4.11 – Comparação entre a força de usinagem e rugosidade média

Figura 4.12 – Comparação entre a força de usinagem e rugosidade máxima

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Composição química do aço ABNT 4340 (Fonte: ABNT NBR NM 87: 1996)

Tabela 3.1 – Informações sobre a pastilha (Fonte: Sandvik Coromant, 2019).

Tabela 3.2 – Valores de avanço utilizados

Tabela 4.1 – Resultado do ensaio de dureza Vickers

Tabela 4.2 – Média e desvio padrão das componentes da força de usinagem da amostra temperada

Tabela 4. 3 – Média e desvio padrão das componentes da força de usinagem da amostra temperada e revenida.

Tabela 4. 4 – Pressão específica de corte - K_s

LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
a_p	Profundidade de corte
b	Comprimento de corte
CBN	Ferramenta de nitreto cúbico de boro
CVD	Deposição química de vapor
D	Diâmetro usinado
d	Média das diagonais da indentação
f	Avanço
F_c	Força de corte
F_f	Força de avanço
F_p	Força passiva ou de profundidade
F_t	Força ativa
F_u	Força de usinagem
h	Espessura de corte
HRA	Dureza Rockwell A
HRB	Dureza Rockwell B
HRC	Dureza Rockwell C
HV	Dureza Vickers
k_s	Pressão específica de corte
LABUS	Laboratório de Pesquisa em Usinagem
LAMAT	Laboratório de Pesquisa em Materiais
n	Rotação gerada pelo eixo-árvore do torno
P	Carga
R_a	Rugosidade média
$R_{a_{teo}}$	Rugosidade média teórica
R_t	Rugosidade máxima
$R_{t_{teo}}$	Rugosidade máxima teórica
s	Área da seção transversal de corte
SAE	Society of Automotive Engineers - EUA
v_c	Velocidade de corte

v_f	Velocidade de avanço
α	Ângulo de folga
γ	Ângulo de saída
χ_r	Ângulo de posição da aresta principal de corte

Capítulo 1

Introdução

O aço SAE 4340 é um material muito versátil e está presente em diversos componentes, como eixos submetidos a cargas elevadas, trens de pouso de aviões, virabrequins e veículos em geral. Suas características, como elevada temperabilidade e boa forjabilidade favorecem o seu uso nestas aplicações, além de possuir propriedades fundamentais em determinados projetos aeronáuticos, como resistência mecânica, resistência à fadiga e boa tenacidade (CARDOSO, 2011).

Os processos de usinagem vêm sendo aprimorados com objetivo de reduzir os custos de sua produção, atendendo a necessidade da indústria, que visa eliminar processos adjacentes a cadeia produtiva, como a retificação, e a redução ou eliminação completa da utilização de lubrificantes. Seguindo estas premissas, é cada vez mais importante o desenvolvimento de máquinas operatrizes com rigidez elevada e ferramentas de cortes que não necessitam de lubrificantes. Porém, a usinagem de materiais endurecidos e sem refrigeração provocam desgastes acelerados das ferramentas de corte e o controle dimensional fica prejudicado (SOUZA, 2017). Dessa forma, o conhecimento das forças de usinagem possui extrema importância na avaliação das melhores condições de usinagem dos aços endurecidos, como aço SAE 4340, já que estão diretamente ligadas a usinabilidade do material. Através da avaliação das forças de usinagem é possível definir a potência da máquina operatriz que será utilizada, a ferramenta de corte mais adequada, bem como as faixas de velocidades admissíveis para que o processo ocorra com sucesso (DINIZ *et al.*, 2010).

Um conceito avaliativo de usinagem utilizado é a pressão específica de corte, calculada partir da determinação da força de corte do processo em relação à área da seção transversal de corte, esta pressão tem uma relação direta com os resultados da usinagem. Altas taxas de transferência de calor e grandes tensões residuais na peça são verificadas quando seu valor é elevado, comprometendo a integridade superficial da peça. A pressão específica de corte é considerada um bom índice de usinabilidade dos materiais e permite compreender todo o processo de usinagem. Alguns fatores influenciam na pressão específica de corte: tipo de

operação de usinagem, características da ferramenta, tipo de material da peça e os parâmetros de corte (MACHADO *et al.*, 2009).

Outro critério de avaliação do processo de usinagem é acabamento superficial da peça obtida, que é classificado com ondulações e desvios micro-geométricos (rugosidade). A rugosidade superficial é caracterizada pelas irregularidades resultantes da interação entre a peça e a ferramenta de corte, dependentes dos parâmetros de usinagem, rigidez da máquina ferramenta, geometria da ferramenta de corte e utilização ou não de fluido de corte. De modo geral, é perceptível um melhor acabamento superficial, quando há pequenas deflexões geradas pelos esforços de corte ou vibração; centralização adequada entre a peça e a ferramenta de corte; ausência de defeitos na peça usinada; corte sem aresta postiça de corte (MACHADO *et al.*, 2009).

O processo de torneamento de aços em geral está em destaque, devido ao desenvolvimento de novos materiais para ferramentas de corte com elevada dureza e resistência ao desgaste em temperaturas elevadas. Com base nessas informações, este trabalho tem como objetivo avaliar as forças de usinagem do aço SAE 4340, submetido a condições variadas de tratamentos térmicos, em operação de torneamento cilíndrico externo, e a influência destas cargas na integridade superficial das peças produzidas.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1 Usinagem

A usinagem é o método de fabricação que se baseia na remoção de material da peça a fim de se alcançar a geometria necessária, sendo classificada em usinagem convencional e não-convencional (eletroerosão, plasma, laser). Os processos convencionais são baseados na retirada de material, consequência do cisalhamento gerado pela ferramenta de corte. O material é retirado na forma de cavaco e as ferramentas de corte neste processo podem ser mono ou multicortantes, com geometria definida, ou em processos de usinagem por abrasão onde as ferramentas são formadas por aglomerados de grãos abrasivos com gumes cortantes cuja geometria não é definida (DINIZ *et al.*, 2010). Os principais processos de usinagem convencional são torneamento, fresamento, furação, madrilamento, brochamento e roscamento.

O processo de usinagem é considerado simples e complexo ao mesmo tempo, pois as condições ideais de corte, influenciadas por diversas variáveis, são difíceis de serem determinados. A simplicidade se apresenta após a determinação destas condições com o processo sendo realizados sem maiores intervenções posteriores (MACHADO *et al.*, 2009). Neste contexto, o torneamento se destaca entre os processos de usinagem por ser utilizado com frequência em pesquisas, graças à simplicidade de sua ferramenta e facilidade no monitoramento de suas variáveis na maioria dos casos (NUNES, 2011).

2.2 Torneamento

Segundo FERRARESI (1977), o torneamento é a operação que visa à obtenção de uma superfície de revolução nas peças. A ferramenta de corte se mantém fixa e retira material da peça girante através do cisalhamento. O torno é a máquina operatriz que realiza este tipo de usinagem, realizando a rotação da peça em torno de seu próprio eixo e a movimentação da ferramenta de corte através dos carros de ajuste longitudinal e transversal. Dentre as

principais operações estão o torneamento cilíndrico ou cônico externo e interno, faceamento, perfilamento. A Figura 2.1 apresenta as operações mais específicas realizadas no mesmo.

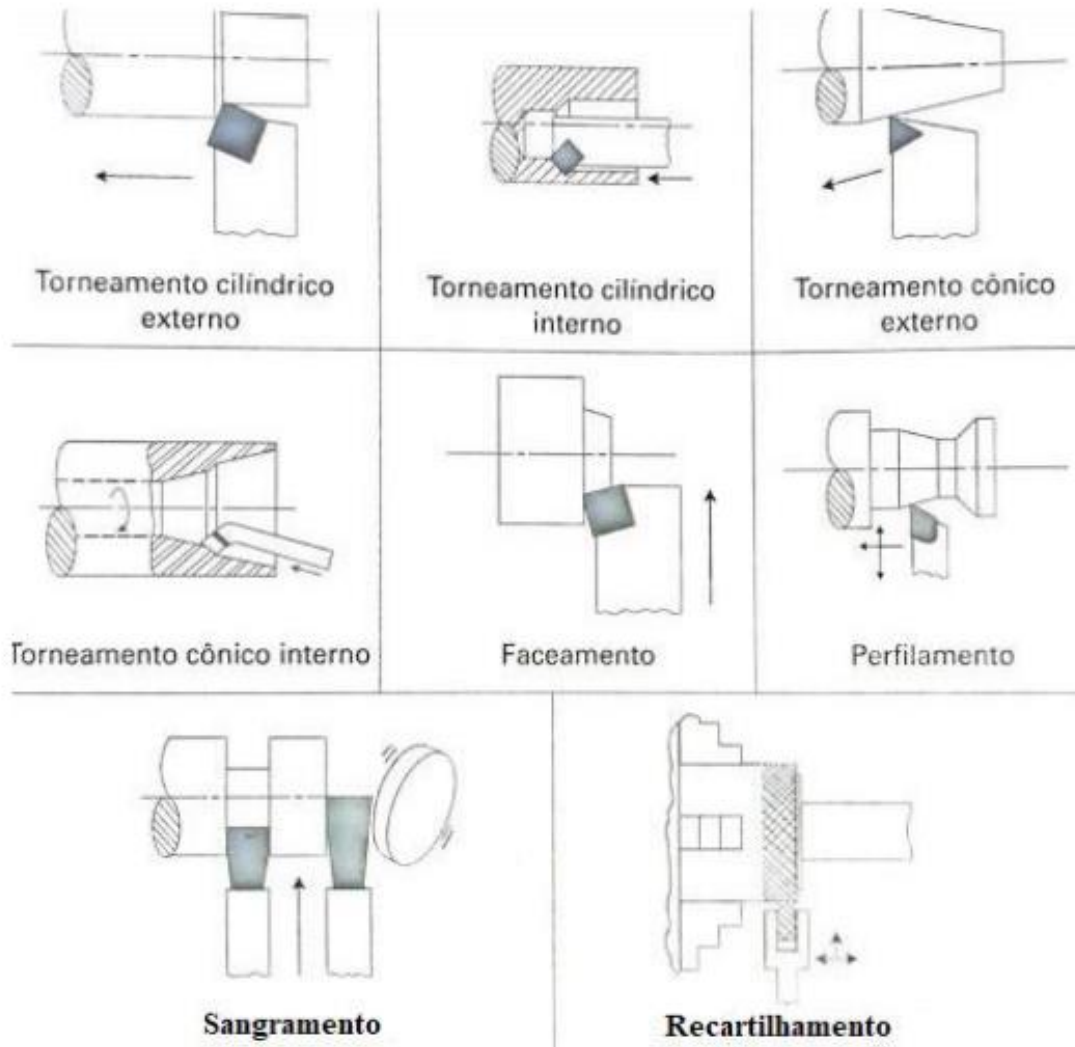


Figura 2.1 – Principais operações executadas no torno (Fonte: MACHADO *et al.*, 2009).

Estas operações são possíveis graças aos movimentos relativos entre a ferramenta e a peça trabalhada. Nessa análise, a peça é considerada o elemento inercial no processo e toda a movimentação é realizada pela ferramenta de corte que tem em sua aresta cortante o chamado ponto de referência, normalmente o mais próximo da ponta da ferramenta. A partir deste ponto são definidos os movimentos ativos, que estão diretamente ligados a remoção do material, e os movimentos passivos, que não atuam diretamente na remoção de material da peça. Os principais movimentos ativos são descritos como: (MACHADO *et al.*, 2009):

- **Movimento de corte:** é o movimento relativo entre a peça trabalhada e a ferramenta, caracterizado pela retirada do material da mesma em forma de cavaco em uma única rotação ou curso da ferramenta.
- **Movimento de avanço:** é o movimento relativo entre a peça trabalhada e a aresta de corte da ferramenta. Atuando em conjunto com o movimento de corte, o movimento de avanço expulsa o cavaco gerado na operação de forma contínua em usinagem por torneamento.
- **Movimento efetivo de corte:** movimento vetorialmente resultante das ações conjuntas dos movimentos de corte e avanço, determinando o processo de usinagem desejado. Quando o movimento de avanço é intermitente somente o movimento de corte compõe o movimento efetivo de corte. Nos casos contínuos, os dois movimentos anteriormente citados participam de sua composição.

Para uma abordagem vetorial da usinagem, esses movimentos estão ligados a velocidades instantâneas com direções e sentidos referenciados como a peça sendo o elemento inercial e a ferramenta se movimentando. O plano de trabalho é o plano definido por estas velocidades instantâneas e movimentos efetivos e é utilizado nos estudos de forças de usinagem. A Figura 2.2 apresenta de forma esquemática os movimentos efetivos, as respectivas velocidades instantâneas e o plano de trabalho no torneamento (DINIZ *et al.*, 2010).

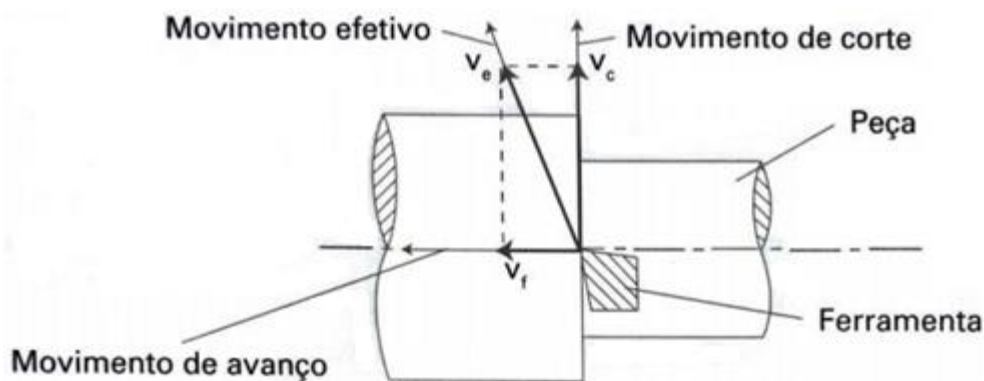


Figura 2.2 – Representação dos movimentos e direções no torneamento (Fonte: MACHADO *et al.*, 2009).

Os principais parâmetros de corte que definem como a operação será conduzida são: a profundidade de corte, a velocidade de corte, avanço e a velocidade de avanço. A escolha destes parâmetros define a usinagem a ser efetuada e a eficiência do conjunto máquina-ferramenta. Para MENG *et al.*(2000), na operação de desbaste, essas condições se intensificam, já que a remoção de material é maior, influenciando nos custos de fabricação. Já

nas operações de acabamento, há um controle mais refinado destas variáveis, onde as mesmas convergem para produção de peças com acabamento superficial superior, tendo em vista a tolerância dimensional e/ou geométrica, além da rugosidade (SANCHES, 2011).

A velocidade de corte é a velocidade instantânea gerada no ponto de referência segundo a direção de corte e está diretamente ligada à taxa de remoção do material, influenciando na temperatura da região de contato peça–ferramenta (MACHADO *et al.*, 2009). O cálculo do módulo desta velocidade é dado pela Equação 2.1:

$$v_c = \frac{\pi.D.n}{1000} \quad \text{Equação 2.1}$$

Onde: v_c = Velocidade de corte (m/min)

D = Diâmetro usinado (mm)

n = Rotação gerada pelo eixo-árvore do torno (rpm)

O avanço representa o quanto a ferramenta deslocou na direção de avanço, e é relacionado à produtividade nas condições de desbaste e, em operações de acabamento, influencia na qualidade superficial, como exemplo, o aumento do avanço tende a aumentar a rugosidade da peça devido ao fator geométrico ligado ao raio de ponta da ferramenta (SANCHES, 2011). A Figura 2.3 apresenta a influência do avanço na rugosidade de uma peça usinada: o avanço f é maior que o f' , criando vales mais profundos na superfície do material e rugosidade mais elevada com o mesmo raio de ponta.

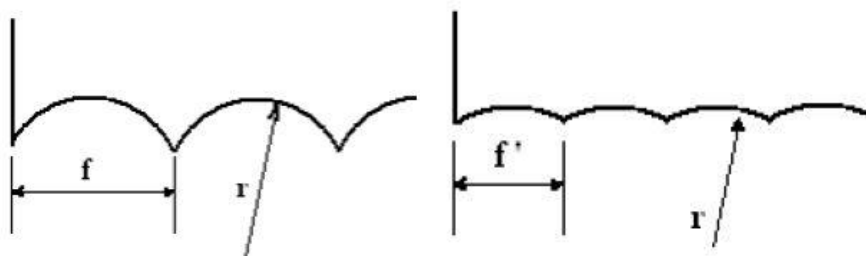


Figura 2. 3 – Superfície usinada com avanço f , f' e raio de ponte r (Fonte: SANCHES, 2011).

Em consequência ao avanço, existe a velocidade de avanço que em operações de desbaste, determina a produtividade do processo, contendo valores mais elevados. Sua determinação é dada pela Equação 2.2 (MACHADO *et al.*, 2009):

$$v_f = f \cdot n$$

Equação 2.2

Onde: v_f = Velocidade de avanço (mm/min)

f = Avanço (mm/rotação)

n = Rotação gerada pelo eixo-árvore do torno (rpm)

A profundidade de corte indica o quanto a ferramenta adentrou no raio da peça, na direção perpendicular ao plano de trabalho, retirando material da mesma e sendo ajustado pelo carro transversal do torno (SANCHES, 2011).

2.2.1 Geometria da Cunha Cortante

A ferramenta de corte tem influência direta no resultado da usinagem, por isso a seleção de uma geometria adequada e o entendimento das regiões que compõem a mesma são relevantes em pesquisas de usinagem (SANCHES, 2011). Segundo MACHADO *et al.* (2009) a ferramenta é formada pelas superfícies:

- **Superfície de saída:** superfície onde o cavaco se forma e se movimenta para ser expulso da zona de corte, definido pelo ângulo de saída.
- **Superfície principal de folga:** superfície que forma a aresta principal de corte ao se encontra com a superfície de saída. Também se encontra com a superfície principal em usinagem na peça e é definida pelo ângulo de folga.
- **Superfície secundária de folga:** superfície que forma a aresta secundária de corte ao se encontra com a superfície de saída. Também se encontra com a superfície secundária em usinagem na peça.

O encontro das superfícies citadas forma a cunha de corte da ferramenta e os ângulos apresentados influenciem tanto no cavaco que é formado no processo quanto nas propriedades da superfície na peça na peça trabalhada (SANCHES, 2011). A Figura 2.4 apresenta os elementos da cunha corte de uma ferramenta de torneamento.

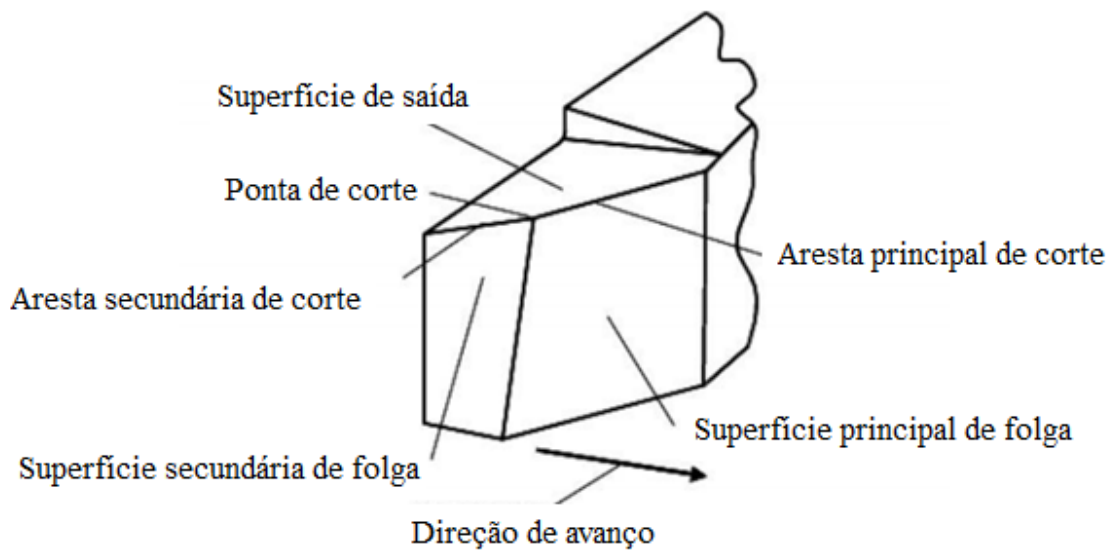


Figura 2.4 – Elementos da cunha de corte de uma ferramenta para torneamento (Fonte: SANTOS, 2007).

2.3 Forças de usinagem no torneamento

A força de usinagem é a força resultante sobre a cunha cortante que realiza a remoção de material na forma de cavaco da peça trabalhada. A determinação da mesma e suas componentes contribuem para potência de corte, logo, está diretamente relacionada a determinação da máquina operatriz aplicada ao processo, demonstrando a importância de sua avaliação (FERRARESI, 1977). Para HOFMEISTER *et al.*(2007) a determinação desta força pode ser feita através de três formas: modelagem empírica, método analítico e método semiempírico. No primeiro, cada variável é associada a um valor experimental; no segundo, o método é feito com base nas propriedades físicas da peça e da ferramenta envolvida em conjunto com métodos numéricos; o terceiro baseia-se em análises numéricas presentes no método analítico em conjunto com experimentos, tornando-se, assim, mais confiável.

A força de usinagem (F_u) não é tratada diretamente para a modelagem do processo, mas sim suas componentes contidas nas direções de corte, avanço e perpendicular ao plano de trabalho. As componentes que resultam na força de usinagem são: força ativa (F_t) e força passiva ou de profundidade (F_p). A força ativa também é decomposta em força de avanço (F_f) e força de corte (F_c). A Figura 2.5 mostra a atuação de cada uma das forças citadas no processo de usinagem no torneamento.

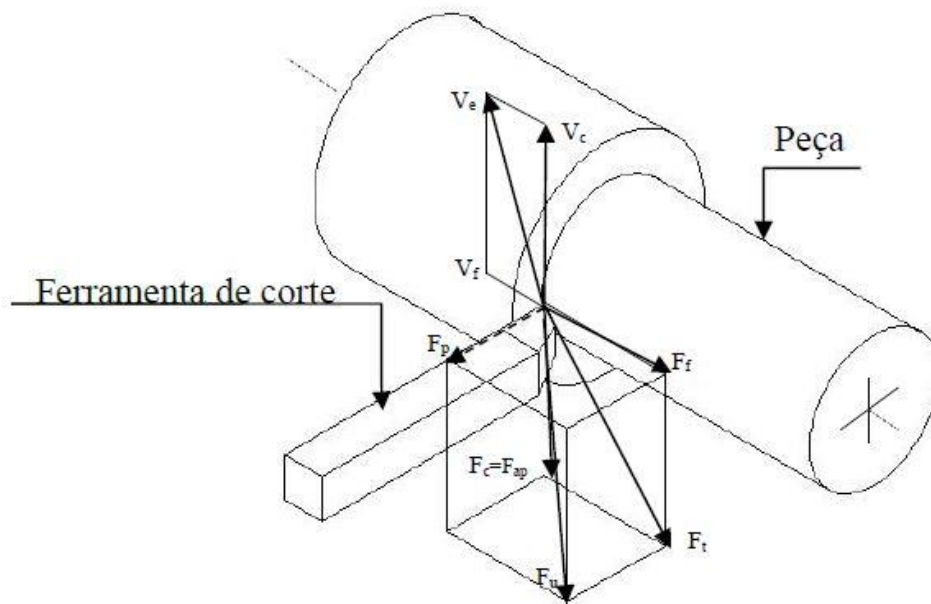


Figura 2.5 – Forças resultantes da ação da peça sobre a ferramenta de usinagem (Fonte: DINIZ et al., 2010)

Para determinar os esforços de usinagem de forma experimental podem ser utilizados diferentes métodos e equipamentos, sendo os dinamômetros piezoelétricos os mais utilizados. Este tipo de dinamômetro utiliza a polarização elétrica gerada em cristais introduzidos entre partes metálicas, medindo a tensão elétrica gerada na aplicação de esforço. Os dinamômetros são alocados em nas direções descritas anteriormente de cada componente. Essas informações são utilizadas na relação trigonométrica na Equação 2.3 para determinar a força de usinagem (MACHADO *et al*, 2009).

$$F_u = \sqrt{(F_c)^2 + (F_p)^2 + (F_f)^2} \quad \text{Equação 2.3}$$

Onde: F_u = força de usinagem (N)

F_c = força de corte (N)

F_p = força passiva ou de profundidade (N)

F_f = força de avanço (N)

A força de corte é considerada o fator mais importante na composição da força de usinagem, graças ao seu módulo elevado em comparação às demais. Os parâmetros de corte influenciam em seu valor, como a velocidade de corte, o avanço, a geometria da cunha de

corte da ferramenta e o uso ou não de fluido de corte (ROSA, 2016). As demais forças que compõem a força de usinagem, força de avanço e força passiva, estão contidas na direção de avanço e no plano perpendicular ao plano de trabalho, respectivamente. A velocidade de corte exerce grande influência nessas componentes, onde o aumento deste parâmetro relaciona-se diretamente ao aumento da força de avanço e da força passiva, para condições de corte convencionais (DINIZ *et al.*, 2010). A determinação da força de avanço e da força passiva também tem importância na deformação elástica da peça e da ferramenta de corte durante a operação, relacionando a capacidade da usinagem em alcançar tolerâncias apertadas (ROSA, 2016).

Existem outros fatores que devem ser considerados no estudo de esforços de corte. Para DINIZ *et al.* (2010) e STEMMER (1993), fatores como a geometria da ferramenta e material da peça são importantes para análise dessas cargas. A dureza do material trabalhado, relacionado à sua microestrutura e sua capacidade de encruamento, são determinantes nos valores de carga mencionados anteriormente, exigindo em maior ou menor grau da potência oferecida pela máquina operatriz.

Já na questão geométrica da ferramenta, o ângulo de saída (γ) é de grande influência nas cargas do processo, principalmente em materiais dúcteis, que se caracterizam por uma elevada deformação anteriormente ao seu rompimento (SILVA, 2014). Segundo DINIZ *et al.* (2010), uma diminuição do ângulo de saída do cavaco da ferramenta que usina estes materiais muda de forma considerável a direção do fluxo do cavaco e conseqüentemente diminui o ângulo de cisalhamento e aumenta a deformação, espalhando mais material sobre a superfície de saída da ferramenta, elevando o atrito. Em contrapartida, esta dinâmica não é verificada em materiais frágeis, que sofrem pouca deformação antes de seu rompimento.

2.3.1 Pressão específica de corte

A pressão específica de corte é a tensão gerada pela força de corte sobre a área da seção transversal do corte. A Figura 2.6 apresenta as dimensões que são utilizadas no cálculo da área da seção transversal utilizada para determinar a pressão específica de corte.

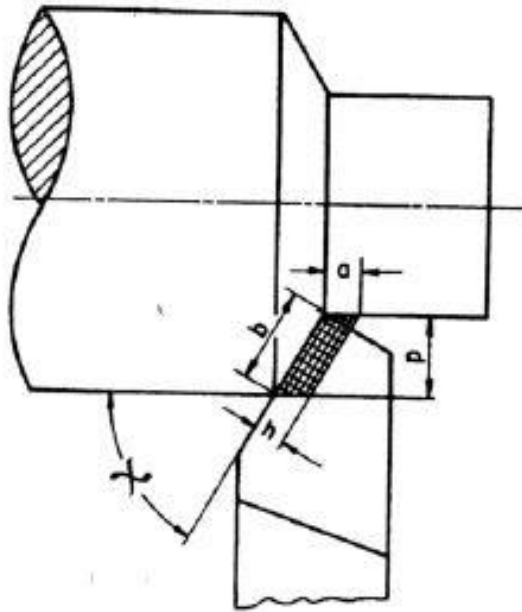


Figura 2.6 – Seção transversal de corte no torneamento (Fonte: FERRARESI, 1977).

Segundo FERRARESI (1977), a pressão específica de corte é obtida através da seguinte Equação 2.4.

$$k_s = \frac{F_c}{s} \quad \text{Equação 2.4}$$

Onde: k_s = pressão específica de corte (N/mm^2)

F_c = Força de corte (N)

s = área da seção transversal de corte (mm^2)

Pra determinar a área da seção transversal de corte, é definida a Equação 2.5.

$$s = a_p \cdot f = b \cdot h \quad \text{Equação 2.5}$$

Onde: a_p = profundidade de corte (mm)

f = avanço (mm/rotação)

b = comprimento de corte (mm)

h = espessura de corte (mm)

Para o cálculo do comprimento de corte (b) e espessura de corte (h), definem-se as Equações 2.6 e 2.7.

$$b = \frac{a_p}{\text{sen}(\chi_r)} \quad \text{Equação 2.6}$$

$$h = f \cdot \text{sen}(\chi_r) \quad \text{Equação 2.7}$$

Onde: χ_r = ângulo de posição da aresta principal de corte (graus)

Tendo como foco o material da peça usinada, quanto mais elevada for a dureza da mesma, maior será o valor de k_s . Mas isto não pode ser considerado regra, pois elementos de liga podem influenciar na pressão específica de corte ao ponto de materiais com durezas iguais possuírem valores de k_s diferentes (MACHADO *et al.*, 2009). Além disso, a propriedade física do material que mais se relaciona a pressão específica de corte é a tensão de ruptura ao cisalhamento, que é a tensão máxima que o material é submetido antes de sua ruptura por cisalhamento. Esta tensão tem grande influência na formação do cavaco durante o processo de usinagem (ROSA, 2016).

Os parâmetros de corte têm influências distintas nos valores da pressão específica de corte. Em relação à velocidade corte, a pressão específica de corte tem uma relação inversamente proporcional. Com o aumento da velocidade corte, ocorre uma redução da resistência ao cisalhamento do material e a diminuição do atrito no contato entre a peça e a ferramenta, acarretando na diminuição nos valores de k_s . A profundidade de corte influencia pouco na pressão específica de corte, pois sua alteração acarreta em mudanças no comprimento de contato entre a ferramenta e a peça, sem alterar a velocidade corte (ROSA, 2016). A partir de um experimento realizado por VOGEL *et al.* (2013), notou-se que com o aumento do avanço há um decaimento na pressão específica de corte.

2.4 Integridade Superficial

As superfícies de peças usinadas, por mais perfeitas que pareçam, são resultado do tipo de operação empregada nas mesmas e apresentam picos e vales com espaçamento regular ou irregular, que tendem a formar um perfil ou uma textura característica de formação. O

perfil da superfície desempenha um papel importante nos componentes mecânicos, influenciando em características como resistência ao desgaste, possibilidade de ajuste forçado e montagem de peças, resistência oferecida pela superfície ao escoamento de fluidos e lubrificantes, resistência à corrosão e à fadiga e capacidade de vedação (GAMARRA, 2017).

As peças produzidas em processos de usinagem são caracterizadas pela precisão dimensional e qualidade superficial. Para a avaliação superficial, o conceito de rugosidade se torna um parâmetro pertinente. Segundo DINIZ *et al.* (2010), a rugosidade é definida como irregularidades e erros microgeométricos presentes nas superfícies trabalhadas em processo de geração de superfície, tais como a usinagem e a laminação.

Cada parâmetro no processo de usinagem tem uma influência específica na rugosidade, principalmente o avanço e a velocidade de corte. Valores de avanço maiores aumentam a rugosidade, tornando a superfície da peça mais grosseira. Já o aumento da velocidade de corte melhora o acabamento superficial, diminuindo a rugosidade (STEMMER, 1993). Quanto maior a velocidade de corte, mais vezes a ferramenta passará na superfície do material, diminuindo essas irregularidades. Já a profundidade de corte não possui relevância nos valores de rugosidade.

Segundo BERNARDOS e VOSNIAKOS (2003), a rugosidade é parâmetro para avaliação de produtividade de máquinas-ferramentas, pois componentes mecânicos de peças usinadas tem sua funcionalidade baseada em uma boa qualidade superficial. A rugosidade de peças usinadas deve ser controlada pela sua influência em outras propriedades do material, assim como a resistência a fadiga. Superfícies rugosas podem facilitar o surgimento de pontos de concentração de tensões, que são vetores para nucleação de trincas por fadiga, sendo de suma importância para elementos estruturais, submetidos a tensões constantes ou intermitentes (SMITH e HASHEMI, 2012).

A determinação teórica do acabamento da superfície depende da relação entre avanço e raio de ponta. O aumento do raio de ponta torna a ferramenta mais resistente, porém a vibração da mesma se eleva devido ao aumento do atrito causado pela maior área de contato do processo de usinagem e também devido ao aumento da componente radial da força de usinagem, provocando a deflexão na peça e/ou na ferramenta (DINIZ *et al.*, 2010). A rugosidade máxima teórica é mostrada na Equação 2.8 e a rugosidade média teórica é apresentada pela Equação 2.9 (MACHADO *et al.*, 2009).

$$Rt_{teo} = \frac{f^2}{8.r_\epsilon}$$

Equação 2.8

$$Ra_{teo} = \frac{f^2}{31,2 \cdot r_\epsilon} \quad \text{Equação 2.9}$$

Onde: Rt_{teo} = rugosidade máxima teórica (mm)

Ra_{teo} = rugosidade média teórica (mm)

r_ϵ = raio da ponta da ferramenta (mm)

f = avanço (mm/rotação)

Dentre as diversas formas de medição de rugosidade, o mais utilizado pela indústria em geral é a rugosidade média R_a . Este método de medição utiliza a média aritmética dos valores absolutos de pontos de afastamento em relação à linha média dentro do percurso de medição l_m , chamado de cut off. Esta linha média é a linha de referência para as medições das distâncias absolutas dos pontos de medição, sendo a cota nominal da peça desejada (ROSA, 2016). A Figura 2.7 apresenta o perfil de rugosidade média e como são medidos os pontos em relação a linha média.

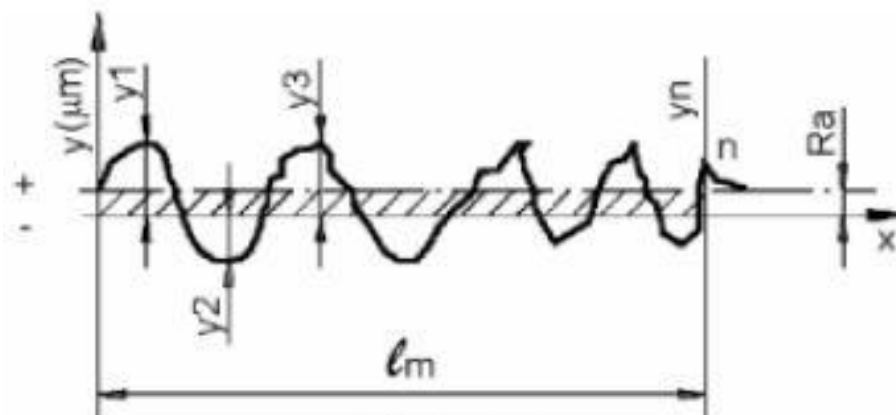


Figura 2.7 – Perfil de Rugosidade média (R_a) (Fonte: ROSA, 2016).

A Figura 2.8 apresenta a rugosidade média esperada nos processos de usinagem e percebe-se que a rugosidade média ideal esperada de um torneamento esta entre 6,3 e 0,8 μm .

Ra (μin)	1000	500	250	125	63	32	16	8	4	2
Ra (μm)	25,4	12,7	6,3	3,2	1,6	0,8	0,4	0,2	0,1	0,05
Furação	Amarelo	Amarelo	Verde	Verde	Verde	Verde	Amarelo			
Usinagem química	Amarelo	Amarelo	Verde	Verde	Verde	Verde	Amarelo			
Corrosão eletrolítica	Amarelo	Amarelo	Verde	Verde	Verde	Verde	Amarelo			
Fresamento	Amarelo	Amarelo	Verde	Verde	Verde	Verde	Amarelo	Amarelo		
Torneamento	Amarelo	Amarelo	Verde	Verde	Verde	Verde	Amarelo	Amarelo		
Madrilamento	Amarelo	Amarelo	Verde	Verde	Verde	Verde	Amarelo	Amarelo		
Brochamento			Amarelo	Verde	Verde	Verde	Amarelo			
Alargamento			Amarelo	Verde	Verde	Verde	Amarelo			
Retífica			Amarelo	Amarelo	Verde	Verde	Verde	Verde	Amarelo	Amarelo

	Aplicação menos comum		Campo de aplicação usual
Ra = Rugosidade média		μm = microns / μin = micro polegadas	

Figura 2.8 – Rugosidade Ra em função dos processos de usinagem (Fonte: Seco Tools AB, 2016).

Outra medida de rugosidade utilizada é a profundidade total R_t que é definida pela distancia vertical entre o pico mais alto e o vale mais profundo dentro do comprimento total de avaliação. A Figura 2.9 exemplifica a rugosidade R_t (ROSA,2016).

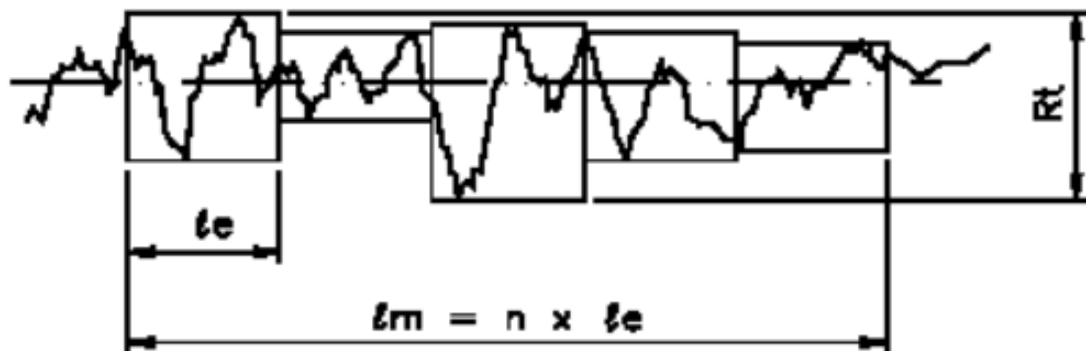


Figura 2.9 – Rugosidade total R_t (Fonte: ROSA 2016).

2.5 Dureza

A dureza é uma propriedade dos materiais de grande importância nos processos de usinagem, pois define tanto os parâmetros de corte quanto qual tipo de ferramenta de corte mais indicada para realizar a operação. A definição de dureza, dentro de uma perspectiva mecânica, é a capacidade do material de resistir à penetração ou deformação quando submetido a uma carga de compressão (MARTINS, 2015).

Existem vários métodos de medição de dureza com suas próprias escalas. Um deles é o método Rockwell, que é baseado na medida de profundidade de uma indentação gerada no corpo de prova por um penetrador. A combinação do tipo de penetrador com uma carga específica determina qual a escala do ensaio Rockwell (RODRIGUES e MARTINS, 2005).

O ensaio começa com a aplicação de uma carga inicial que ajusta o indentador à superfície da peça e estabelece a medida da dureza a zero. Em seguida realiza-se a indentação durante um tempo, geralmente, de 2 a 8 segundos, com uma carga total, obtida com a aplicação de uma carga adicional. Depois de feita a indentação retira-se apenas a carga adicional, permitindo o material de recuperar a parcela de deformação elástica sofrida durante a deformação. Finalmente mede-se a penetração do indentador usando como referência a posição definida pela carga inicial. Dentre as escalas Rockwell mais utilizadas pela indústria em geral estão as escalas A, B e C (MARTINS, 2015). A Figura 2.10 Apresenta as informações das principais escalas de ensaio Rockwell.

Escala	Classe	Símbolo	Indentador	Força inicial (kg)	Força total (kg)	Campo de aplicação	Materiais
A	Normal	HRA	Cone de diamante	10	60	20 a 88 HRA	Aços niturados, carbonetos metálicos
B	Normal	HRB	Esfera de aço 1/16"	10	100	20 a 100 HRB	Aços carbono recozidos de baixo teor de carbono
C	Normal	HRC	Cone de diamante	10	150	20 a 70 HRC	Aços duros

Figura 2. 10 – Escala de Dureza Rockwell (Fonte: RODRIGUES e MARTINS, 2005).

Outro ensaio de dureza utilizado na indústria em geral é o ensaio de dureza Vickers. Este ensaio utiliza um indentador em forma piramidal quadrangular de diamante com 136° entre as faces opostas. A indentação feita no corpo de prova tem o formato de losango e suas diagonais são medidas. A média entre as diagonais em conjunto com a carga aplicada são

utilizadas para calcular a dureza Vickers do material, HV. A Equação 2.10 apresenta calculo para determinar a dureza Vickers (MARTINS, 2015).

$$HV = 1,854 \frac{P}{d^2} \quad \text{Equação 2.10}$$

Onde: HV = dureza Vickers (HV)

P = carga (kgf)

d = média das diagonais da indentação (mm)

2.6 Usinagem de aços endurecidos

Segundo MACHADO *et al.* (2009), aços são classificados endurecidos quando sua dureza alcança valores maiores que 45 HRC, reflexo de sua microestrutura formada por martensita e ou carbonetos livres por exemplo. Esta condição limitava estes materiais a processos de usinagem por abrasão, como a retificação. Porém, os avanços tecnológicos em ferramentas de corte permitem outros processos, como o torneamento, de realizar esta usinagem. Estas ferramentas unem características capazes de suportar os esforços gerados na formação do cavaco, altas velocidades de corte e as altas temperaturas geradas na usinagem de aços endurecidos, produzindo peças com elevado acabamento superficiais e pequenas tolerâncias dimensionais.

Ferramentas de metal duro cobertas com TiAlN ou de AlTiN (nitreto de alumínio-titânio) são exemplos que são aplicados em usinagem de aços endurecidos, sendo criadas a partir do processo PVD (deposição física a vapor), que cria esta fina camada de material mais resistente com arestas de corte mais finas (SOARES, 2017). Dentre os aços endurecidos, um exemplo é o aço SAE 4340.

2.7 Aço SAE 4340

O SAE 4340 é um aço ao Ni-Cr-Mo, com teor de carbono médio de 0,40%, e é caracterizado como aço para beneficiamento e de boa forjabilidade. Tal aço possui a aplicação em elementos estruturais de veículos aeroespaciais, trens de pouso de aeronaves, e peças

automobilísticas onde a resistência mecânica em conjunto com a tenacidade sejam essenciais para os processos propostos (CARDOSO, 2011).

O aço SAE 4340 possui uma elevada resistência mecânica aliada à ductilidade superior comparada aos aços de alta resistência e baixa liga. Outra característica de destaque é a resistência à fadiga em altas temperaturas (300 à 700 °C) do SAE 4340, sendo credenciado para utilização em vasos de pressão em usinas nucleares (BHATTACHARYA *et al.*, 2011). Sua dureza varia entre 52 e 62 HRC, sendo condicionado ao teor de carbono e a tratamentos térmicos aplicados (OLIVEIRA *et al.*, 2009).

A Tabela 2.1, a seguir, apresenta a composição do ABNT/SAE 4340 segundo ABNT NBR NM 87:1996, estipulando teores de enxofre e fósforo com limitação máxima de 0.035%.

Tabela 2.1 – Composição química do aço ABNT 4340 (Fonte: ABNT NBR NM 87: 1996)

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

2.7.1 Tratamentos térmicos aplicados em SAE 4340

O tratamento térmico de aços e ligas metálicas consiste de modo geral em aquecer e resfriar a peça para que ela atinja as propriedades mecânicas desejadas como dureza, ductilidade, resistência à tração. A peça adquire essas propriedades sem que se modifique o estado físico, porém alterando as fases que compõem a mesma. Essas mudanças de fase dependem dos seguintes fatores: temperatura de aquecimento, velocidade resfriamento, composição química do material (CHIAVERINI, 1985). A característica de beneficiamento, presente no aço SAE 4340, significa que este material, quando submetido a estes tratamentos, alcança uma elevada resistência mecânica aliada a uma elevada tenacidade. Os valores de temperatura e velocidade de resfriamento envolvidos no tratamento térmico ditaram o grau de elevação da resistência mecânica e tenacidade. Portanto, é possível determinar o grau desejado dessas características no aço SAE 4340 alterando os parâmetros do tratamento, adequando ao desejado em projetos de peças estruturais que suportaram cargas específicas. Os tratamentos utilizados em conjunto para o beneficiamento do aço SAE 4340 são a têmpera e o revenido (OLIVEIRA *et al.*, 2009).

A têmpera é o tratamento térmico onde o material é aquecido até sua temperatura de austenitização seguida de um resfriamento rápido, porém controlado. O objetivo é evitar que a

austenita se transforme em ferrita ou cementita + perlita, compostos com resistência mecânica inferior, e tende a se transformar em martensita, composto caracterizado por elevada dureza (OLIVEIRA *et al.*, 2009). A martensita se apresenta em aços comuns como um composto sólido super-saturado em ferro alfa que distorce o reticulado cúbico centrado, tornando-se tetragonal. Esta configuração distorcida dificulta muito a movimentação das discordâncias que é o que caracteriza a alta resistência e dureza do material (CHIAVERINI, 1985).

Esta dureza elevada adquirida no processo diminui significativamente propriedades primordiais do aço SAE 4340 como sua ductilidade e tenacidade, criando risco de falhas catastróficas nas aplicações estruturais que o material é submetido. Para controlar estes efeitos da têmpera que propiciam esta fragilidade é realizado o revenimento (CARDOSO, 2011).

Este processo, realizado normalmente após a têmpera, consiste em três etapas: o reaquecimento da peça até temperaturas inferiores a de austenitização (geralmente entre 200°C e 600°C), a manutenção desta temperatura durante um período determinado e, por fim, o resfriamento. Durante esta operação ocorre o alívio de tensões residuais provenientes da têmpera e mudanças estruturais como a redução da concentração de carbono na matriz martensítica. Além disso, existe a possibilidade de ocorrer uma transformação da austenita retida nos contornos de grão, que fragilizam o aço, em ferrita e cementita (KRAUSS, 1990).

A temperatura e tempo mantido na mesma são parâmetros que definem o grau de mudanças nas propriedades no material durante o revenimento. Aliando uma temperatura elevada à grandes períodos de exposição ocorre a diminuição das tensões residuais, o aumento da tenacidade e ductilidade do material. Em contrapartida, a dureza é decrescida (CARDOSO, 2011).

Segundo OLIVEIRA *et al.* (2009), o aço SAE 4340 tem boa reação ao processo de têmpera e revenido com a formação de martensita revenida, composta pela fase $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$, com dureza e resistência mecânica elevadas tanto quanto a martensita monofásica formada somente após a execução da têmpera. Além disso, resultou no refinamento de grão, ductilidade e tenacidade melhoradas. A Figura 2.11 apresenta a metalografia de aço SAE 4340 temperado e revenido em dois patamares de temperatura, onde é possível notar a maior presença de martensita em menores temperaturas, com granulação em formato de agulhas.

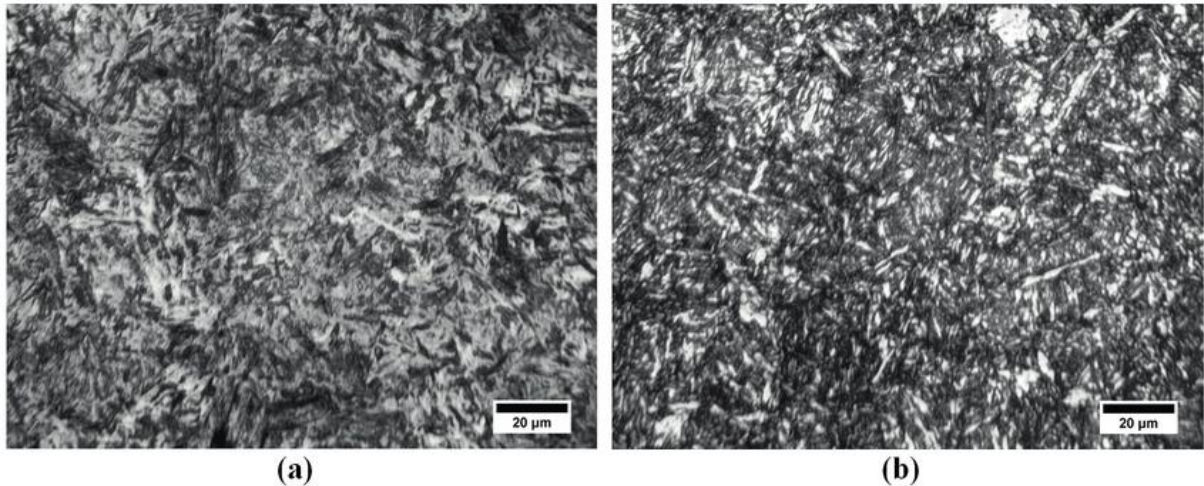


Figura 2.11 – Microestrutura do aço SAE 4340 revenido, aumento de 1000X: (a) 200°C/60 min; (b) 700°C/60 min. (Fonte: LADEIRA *et al.*, 2009)

2.8 Torneamento do aço SAE 4340

O SAE 4340 é aço endurecido e portanto merece uma atenção especial quanto ao planejamento quando é usinado. A análise das forças de usinagem no torneamento deste material se torna essencial para definição da ferramenta de corte adequada e para a escolha das faixas de velocidade de corte, avanço e profundidade de corte que permitem a remoção adequada de cavaco de forma otimizada (DINIZ *et al.*, 2010).

BOING (2016) apresentou as forças de usinagem no torneamento, em operação de faceamento, do aço SAE 4340, com dureza de 45 HRC, utilizando dois tipos de ferramentas de metal-duro TiCN/Al₂O₃/TiN com espessura $\approx 16 \mu\text{m}$. Os parâmetros de usinagem utilizados foram: velocidade de corte de 150 m/min, avanço de 0,08 mm/rotação e profundidade de corte de 0,20 mm. A Figura 2.12 apresenta o comportamento das forças de usinagem durante o processo.

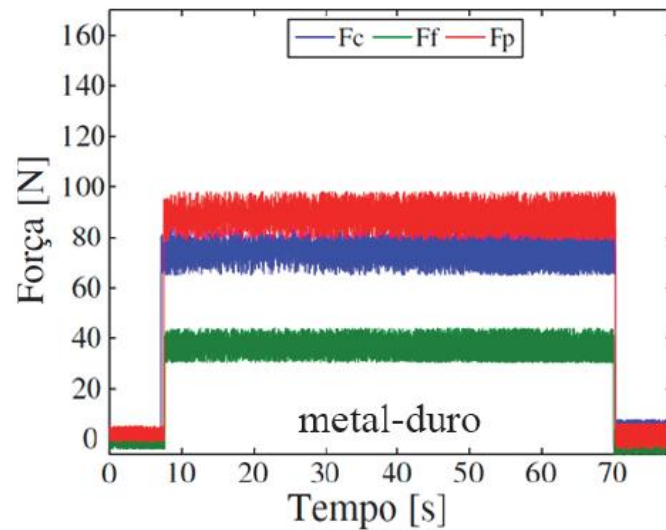


Figura 2.12 Comportamentos das componentes da força de usinagem do aço SAE 4340 – 45 HRC (Fonte: BOING, 2016).

Segundo BOING (2016), verifica-se na imagem acima uma estabilidade das componentes da força de usinagem durante todo o processo de faceamento, sendo a força passiva a mais elevada, com valores superiores que a força de corte. A maior força passiva pode ser justificada pela recuperação elástica promovida pelo material ligado a resistência ao escoamento e em função das pequenas espessuras do cavaco na região secundária de corte. Também foram feitos gráficos tridimensionais relacionando da força de usinagem à dureza do aço SAE 4340 e ao seu teor de carbonetos presentes em três tipos de aços (4340, 52100 e D2), como apresentado na Figura 2.13. Percebe-se o aumento expressivo da força de usinagem na transição de dureza de 45 para 50 HRC, elevando muito quando os valores se aproximam de 60 HRC. Isto é justificado pelo aumento da resistência mecânica do material destes patamares de dureza, do aumento da componente força de corte e da redução da tensão de escoamento devido à geração de calor, tendo como resultado um aumento significativo das componentes da força de usinagem.

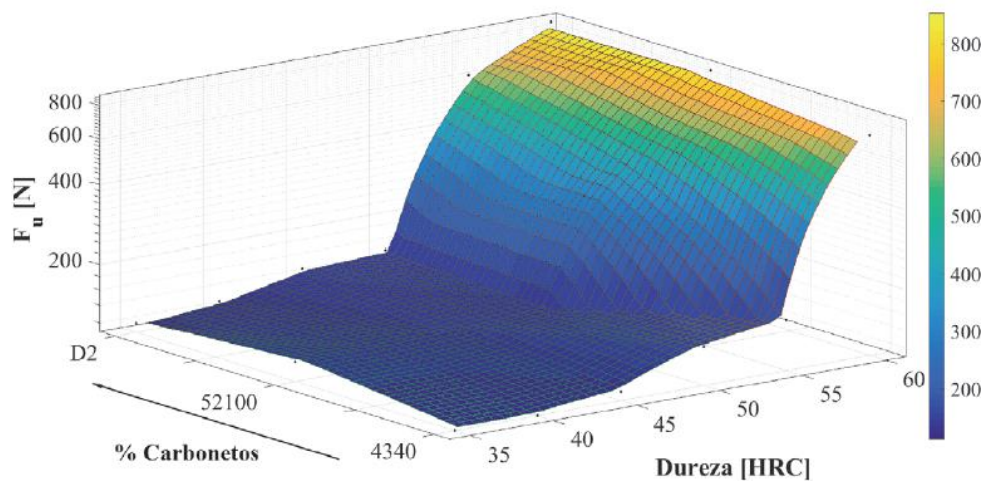


Figura 2.13 – Comportamentos da força de usinagem do aço SAE 4340 (Fonte: BOING, 2016).

A análise da rugosidade obtida no torneamento do aço SAE 4340 também é tema de estudos, como apresentado por SOUZA (2017). Utilizando também ferramentas de corte de metal duro TiCN/Al₂O₃/TiN, profundidade de corte de 0,25 mm, velocidades de corte de 150 m/min e 200 m/min, avanços de 0,1 mm/rotação e 0,2 mm/rotação. Foram ensaiadas peças de SAE 4340 recozidas e endurecidas na operação de faceamento. A Figura 2.14 e 2.15 apresenta os resultados de rugosidade obtidos em Ra e Rt respectivamente.

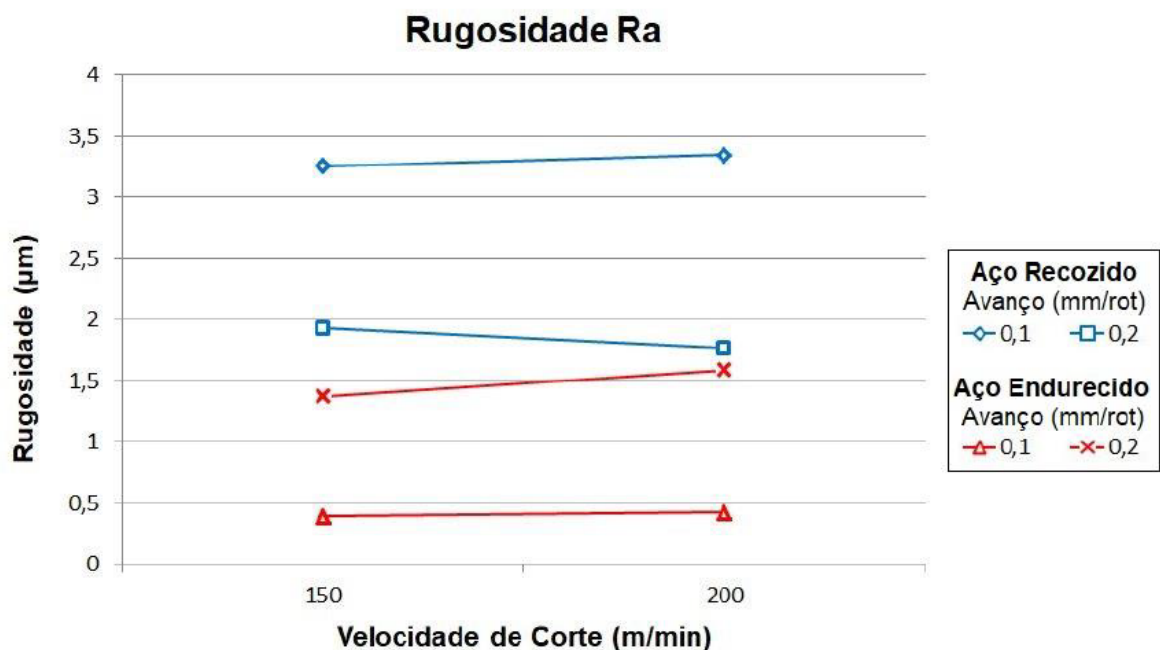


Figura 2.14 Rugosidade Ra em função da velocidade de corte para diferentes avanços (Fonte: SOUZA 2017).

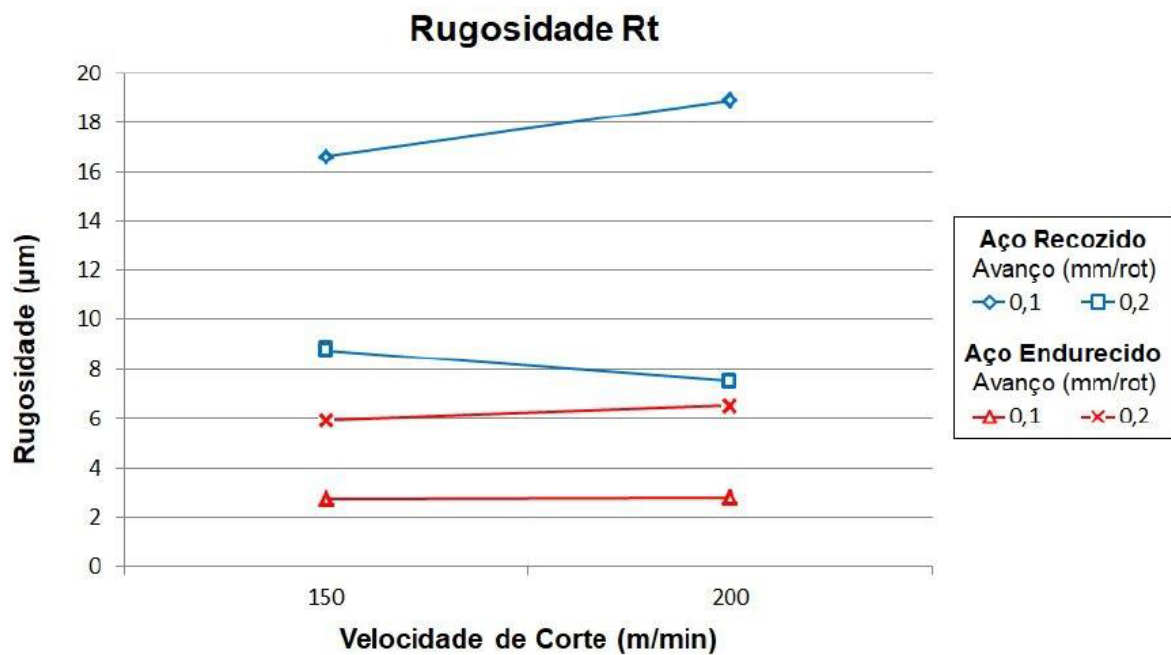


Figura 2. 15 – Rugosidade Rt em função da velocidade de corte para diferentes avanços (Fonte: SOUZA 2017).

Pela análise do gráfico na figura 2.14, os valores de rugosidade são menores no aço SAE 4340 recozido com o avanço de 0,2 mm/rotação e velocidade de corte de 200 m/min. Os aços recozidos apresentaram elevados valores de Ra tanto na utilização do avanço de 0,1 e 0,2 mm/rotação, demonstrando que dependendo da aplicação do material usinado um processo posterior de retifica é recomendado para diminuir a rugosidade superficial da peça. É possível verificar também que dentre os dois materiais usinados, o que apresentou menores valores de rugosidade foi o aço endurecido, principalmente na velocidade de corte de 150 mm/min, independente do avanço. Já para o avanço de 0,2 mm/rot, notou-se um aumento da rugosidade conforme eleva-se a velocidade de corte (SOUZA, 2017).

No gráfico da figura 2.15, os valores da rugosidade Rt encontrados nos dois materiais são semelhantes aos resultados do parâmetro de Ra. Apresentam menores valores de rugosidade para o material endurecido, devido à ferramenta de corte ser específica para materiais com elevada dureza, proporcionando melhores resultados superficiais (SOUZA, 2017).

Segundo SOUZA (2017), analisando em conjunto os resultados das rugosidades Ra e Rt, conclui-se que os melhores resultados de rugosidade Ra e Rt ocorreram no aço SAE 4340 endurecido com menores valores de velocidade de corte, propiciando uma melhor qualidade superficial para as peças usinadas quando comparado com ao mesmo material no estado recozido.

Capítulo 3

Materiais e Métodos

3.1 Confeção das amostras

O aço SAE 4340 utilizado no presente trabalho foi fornecido na forma de barra de seção circular com diâmetro de 25,4 mm. A barra foi dividida em dois pedaços de mesmo comprimento e usinadas no torno mecânico NARDINI, modelo Mascote MS 205, no Laboratório de Pesquisa em Usinagem (LABUS) no CEFET-RJ, recebendo as dimensões estipuladas para análises deste projeto. Cada parte possui seis superfícies amostrais para análise, numeradas de 1 a 6, divididas por rasgos ao longo do comprimento. A Figura 3.1 apresenta o esboço das peças que foram usinadas.

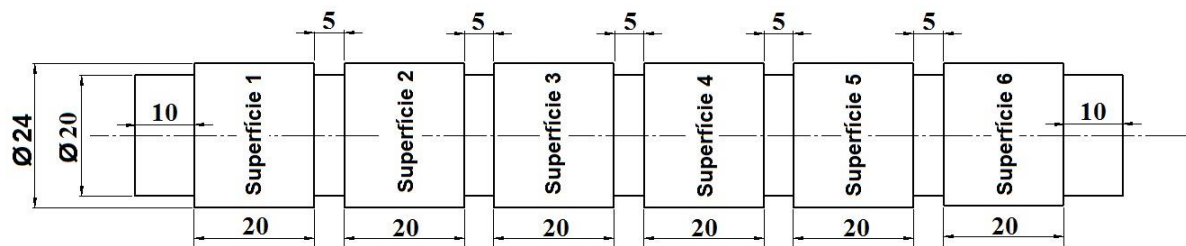


Figura 3.1 – Esboço da amostra (unidades em mm).

3.2 Tratamentos térmicos

As amostras foram submetidas primeiramente ao tratamento térmico de têmpera. As amostras foram acondicionadas dentro de um recipiente de ferro fundido e submersas em pó de carvão, para evitar descarbonetação. Em seguida, o recipiente foi posto no forno tipo mufla com temperatura pré-aquecida a 850 °C. Foi contabilizado o tempo de 30 minutos para que as amostras alcançassem a temperatura mais 1 hora de tempo de encharque. Após completar este ciclo, as amostras foram temperadas em óleo.

O segundo tratamento térmico realizado foi o revenimento, realizado em uma das amostras, utilizando o mesmo forno. Foi selecionada a temperatura de revenimento de 200 °C, com o objetivo de alcançar patamares de dureza diferente (revenido e não revenido). O acondicionamento da mufla e a preparação da amostra no recipiente de ferro fundido foi semelhantes ao processo de têmpera. O tempo para que a peça alcançasse a temperatura da mufla também foi de 30 minutos e o tempo de encharque foi de 2 horas. Em seguida a amostra a mufla foi desligada e a amostra resfriou dentro da mesma.

3.3 Torneamento

As operações de torneamento cilíndrico externo foram realizadas em um torno NARDINI, modelo Mascote MS205 no LABUS do CEFET-RJ. A ferramenta de corte utilizada foi a pastilha de metal duro, modelo DCMT11T304-LF KC5010, fabricado pela Kennametal. A Figura 3.3 apresenta a pastilha utilizada e a Tabela 3.1 mostra as informações da mesma.

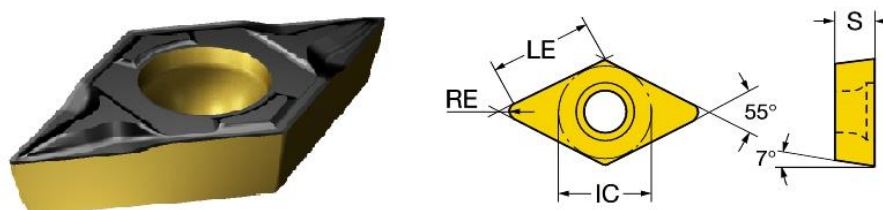


Figura 3.2 – Pastilha de metal duro (Fonte: Sandvik Coromant, 2019).

Tabela 3. 1 – Informações sobre a pastilha (Fonte: Sandvik Coromant, 2019).

Diâmetro do círculo inscrito	9,525 mm
Comprimento efetivo da aresta de corte (LE)	11,228 mm
Raio de ponta (RE)	0,397 mm
Espessura da pastilha (S)	3,969 mm
Revestimento	CVD Ti(C,N)+Al ₂ O ₃ +TiN

Os parâmetros de corte utilizados no ensaio foram estipulados seguindo as recomendações do fabricante da pastilha. O avanço foi o parâmetro que variou entre os ensaios e a cada duas superfícies foi utilizado um valor de avanço distinto, gerando réplica

nos resultados. A rotação utilizada foi de 1600 rpm, gerando uma velocidade de corte de aproximadamente 120 m/min . A profundidade de corte foi de 0,30 mm. Cada uma das amostras resultantes dos tratamentos térmicos foi usinada seguindo a disposições de avanço apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Valores de avanço utilizados

Superfície	Avanço (mm/rot)
1 e 2	0,073
3 e 4	0,109
5 e 6	0,125

3.4 Força de usinagem

A aquisição das forças de usinagem foi realizada através de um dinamômetro de cristais piezoelétricos KISTLER em conjunto a uma unidade de controle com filtro de passa-baixa e um amplificador de sinais com uma placa de aquisição de dados. A visualização destas forças em tempo real foi obtida através do software Labview Signal express 2011, que gerou gráficos da variação destas forças durante o torneamento. A Figura 3.3 apresenta o dinamômetro montado no torno com os eixos das componentes das forças de usinagem.

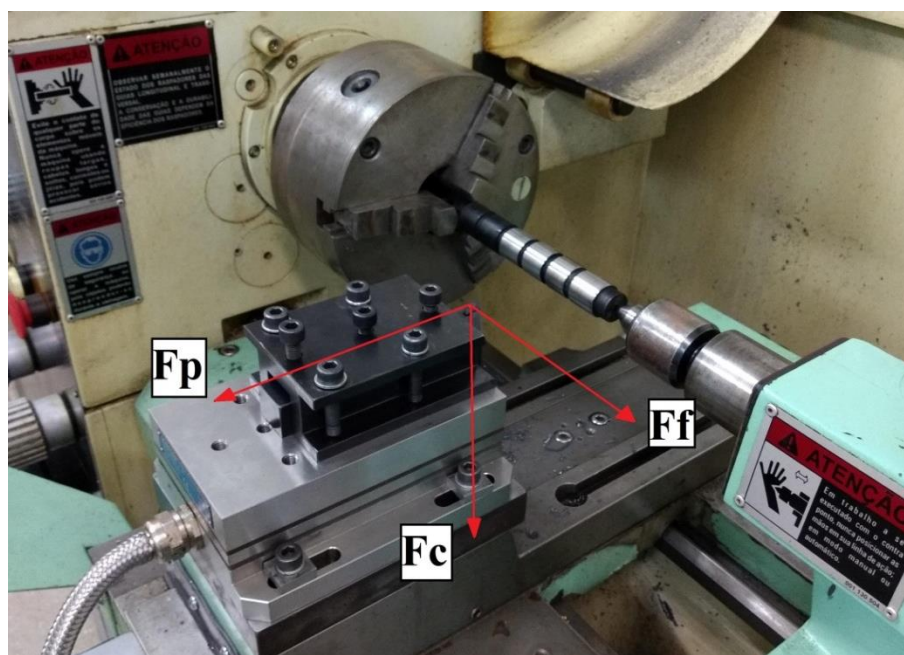


Figura 3.3 – Dinamômetro montado no torno

As três componentes ortogonais da força de usinagem (força de avanço, força passiva e força de corte) são medidas simultaneamente, sendo respectivamente representadas por F_x , F_y e F_z . O valor médio e as variações dinâmicas das forças de usinagem podem ser aferidos independentemente do ponto de aplicação das medições. O recebimento das forças ocorre na parte superior do dispositivo, sendo distribuídas para quatro sensores de três componentes arranjados entre sua espessura. Os cristais de quartzo estão localizados em três pares de placas nos sensores. Estes cristais são materiais piezoelétricos que ao se deformarem transmitem um sinal elétrico de saída com a baixa intensidade de corrente, necessitando de uma amplificação realizada pela unidade controle, transformando a corrente em tensão elétrica. Cada par de placa de quartzo está ligada sensivelmente à uma direção ortogonal (FERNANDES, 2018).

Em conjunto ao dinamômetro está à unidade de controle KISTLER modelo 5233A1. Sua função é filtrar os sinais acima de 200Hz, utilizando um filtro de passa-baixa e amplificando os sinais, já que os sinais de saída transmitidos pelo dinamômetro são de baixa intensidade. Esta transformação de sinal elétrico permite a visualização da força medida após a conversão analógica/digital no computador. Isto elimina os sinais espúrios (ruídos). Os fundos de escala possíveis com esta unidade de controle são de 500 N, 1 kN, 2 kN e 5 kN nas direções passiva e de avanço. Já na direção principal de corte, os fundos de escala são 1 kN, 2 kN, 5 kN e 10 kN, pois na maioria dos casos a força de corte é a de maior intensidade (FERNANDES, 2018).

Finalizando o conjunto de coleta de forças de usinagem, está a placa de aquisição de dados modelo NI USB6221 com oito canais, 16 bits e taxa de aquisição de dados de 250 kS/s, fabricado pela empresa NATIONAL INSTRUMENTS. Este valor de taxa de aquisição significa que o dispositivo consegue adquirir 250 mil amostras por segundo. A função desta placa de aquisição é converter o sinal analógico (constante no tempo) em uma grandeza digital (quantizada no tempo) para a adequada visualização pelo software LabView Signal Express 2011. A frequência de captação de dados no ensaio foi de 1000 Hz e foi decidido este valor levando em consideração a rotação do torno (FERNANDES, 2018). A Figura 3.4 apresenta os três componentes que em conjunto captam os dados da força de usinagem.

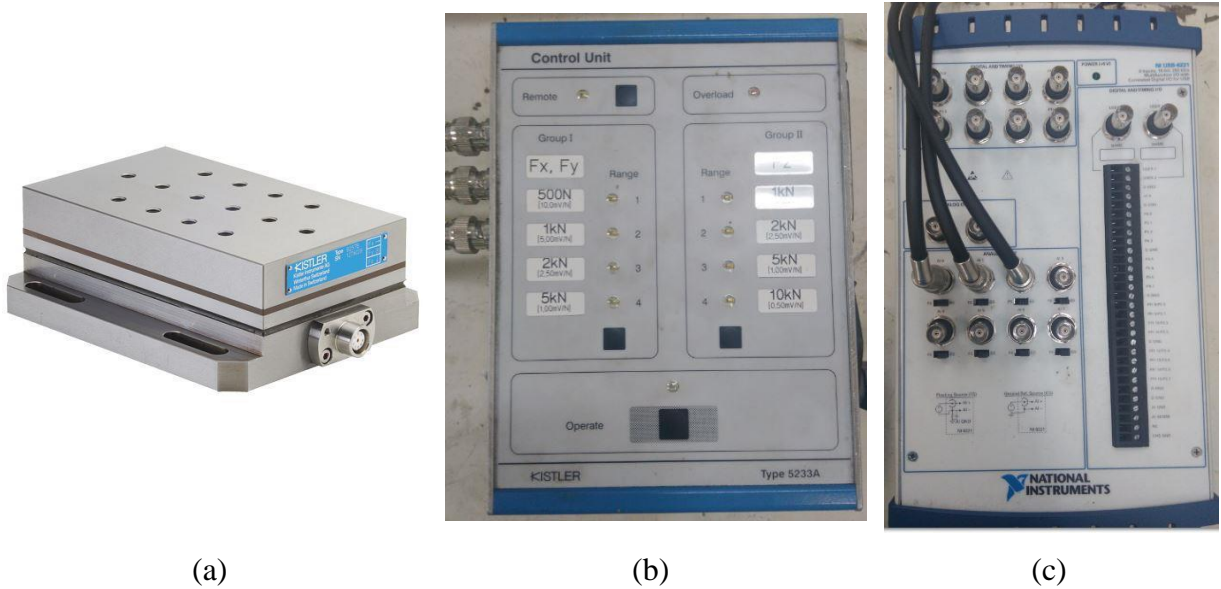


Figura 3.4 – (a) Dinamômetro KISTLER de cristais piezoelétricos modelo 9257BA. (b) Unidade de controle KISTLER modelo 5233A1. (c) Placa de aquisição de dados NI USB-6221 (FERNANDES, 2018).

3.5 Ensaio de dureza

Para verificar a dureza superficial adquirida nos corpos de prova após os tratamentos térmicos foram realizados ensaios de dureza Vickers. A dureza foi aferida utilizando um durômetro da marca Instron Wolpert, modelo DIA TESTOR 7551, localizado no Laboratório de Pesquisas em Materiais (LAMAT) do CEFET-RJ, que pode realizar ensaios de dureza Rockwell, Vickers e Brinell. O ensaio de dureza Vickers realizado após os tratamentos térmicos utilizou carga de 5 kgf e foram realizadas 10 identificações em cada corpo de prova. A média e o desvio padrão dos resultados foram utilizados para determinar a dureza atingida.

3.6 Ensaio de rugosidade

A rugosidade é um fator importante na análise do resultado da usinagem, principalmente nas operações acabamento. O rugosímetro portátil SurfTest SJ-210 (Figura 3.5) fabricado pela Mitutoyo foi utilizado na medição da rugosidade R_a e R_t . A portabilidade do aparelho, seu curso total de lança de 16 mm e uma resolução de 360 μm capacitam este dispositivo para medições necessárias em processos de usinagem. O cut-off selecionado para as medições foi de 2,5 mm e cada superfície dos corpos de prova foi aferida em 6 pontos

diferentes. Foram calculadas as médias e desvios de padrões das medições para determinação de Ra de cada superfície. Para Rt, foi selecionado o maior valor encontrado dentre as 6 medições.



Figura 3.5 – Ensaio de rugosidade utilizando o rugosímetro portátil Surftest SJ-210

Capítulo 4

Resultados e Discussão

4.1 Análise de dureza

Primeiramente foi realizado o ensaio de dureza nas amostras após os tratamentos térmicos aplicados a fim de verificar se há uma variação de dureza entre as duas condições estudadas. A Tabela 4.1 e o gráfico da Figura 4.1 apresentam os resultados do ensaio de dureza das amostras.

Tabela 4.1 – Resultado do ensaio de dureza Vickers

Condição	Dureza Vickers (HV)	Desvio Padrão
Temperado	462	46
Temperado e Revenido	427	30

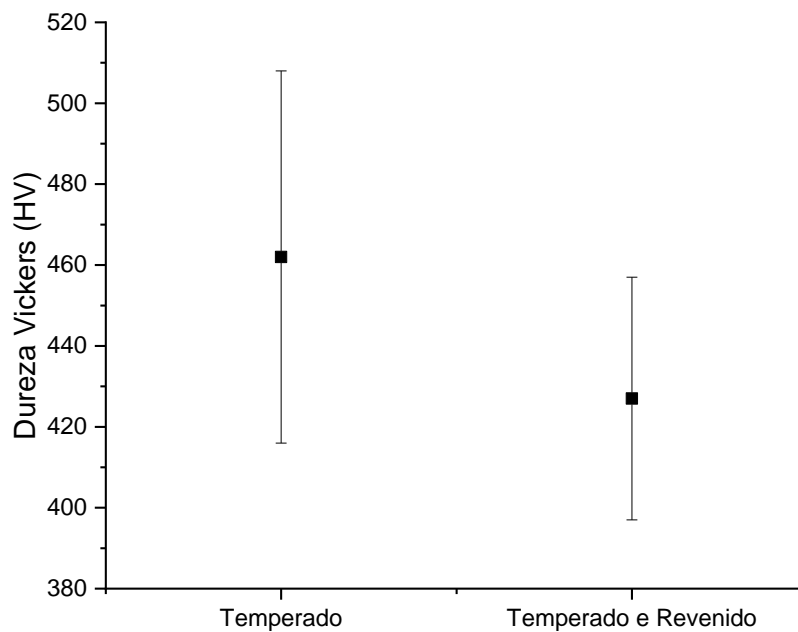


Figura 4.1 – Resultado do ensaio de dureza Vickers

O valor de dureza média alcançado pela peça somente temperada foi de 462 HV, equivalente à 46 HRC, e a peça temperada e revenida à alcançou 427 HV, equivalente à 42 HRC. A dureza do material antes dos tratamentos térmicos era de 23 HRC, demonstrando a eficiência da tempera e revenido realizados. Contudo, a variação de dureza com relação a aplicação de revenido não foi muito aparente, pois o desvio padrão é muito grande. A menor dispersão dos resultados na amostra temperada e revenida, indicando maior homogeneidade da dureza do material na extensão da peça.

4.2 Análise das forças de usinagem

Os dados coletados pelo dinamômetro foram plotados em gráficos que apresentam o comportamento das componentes da força de usinagem, como apresentado nas Figuras 4.2 e 4.3 que exemplificam os dados coletados no torneamento com avanço de 0,073 mm/rot.

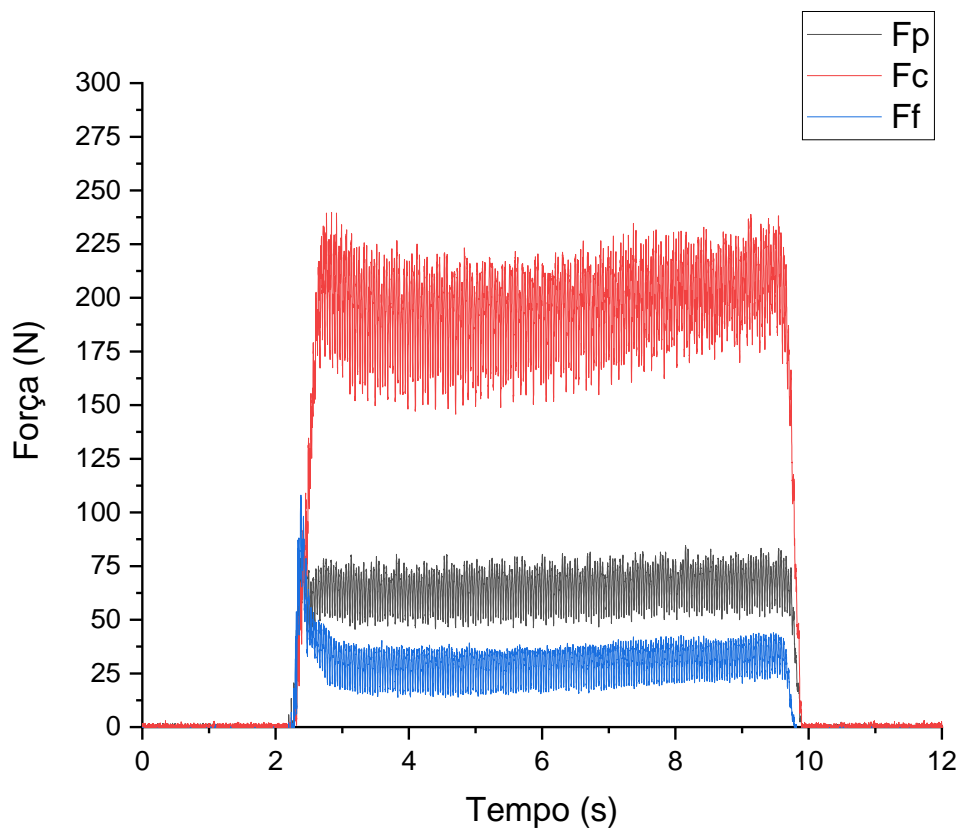


Figura 4.2 – Forças de usinagem da amostra temperada, avanço de 0,073 mm/rot.

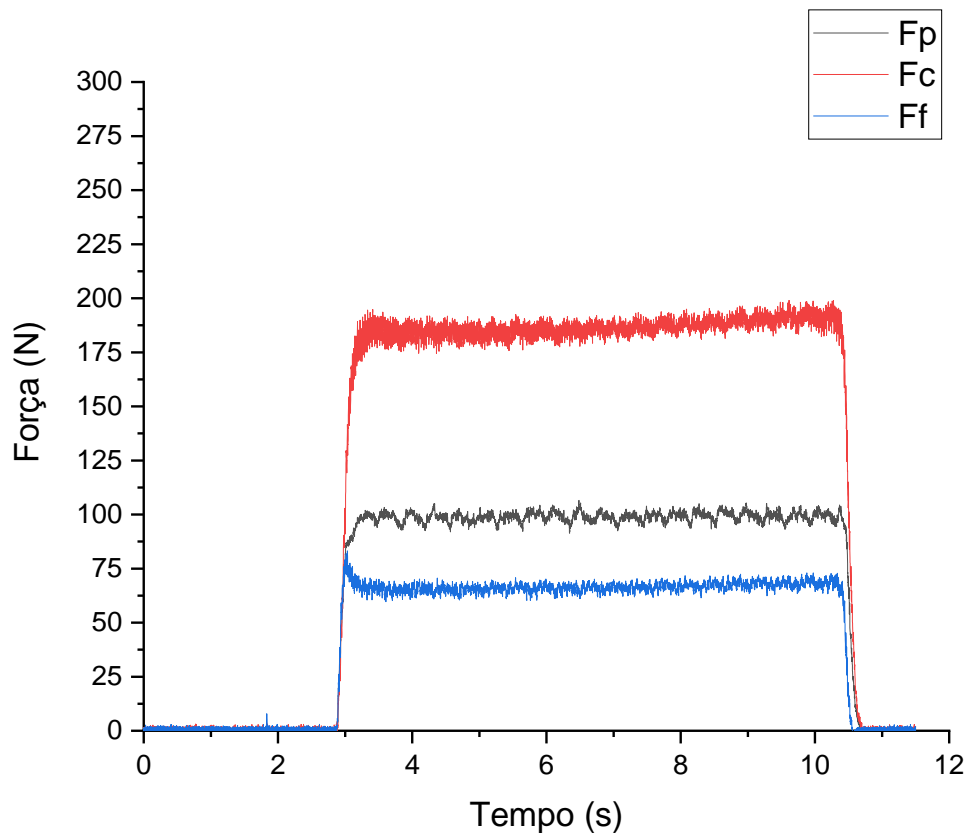


Figura 4.3 – Força de usinagem da amostra temperada e revenida, avanço de 0,073 mm/rot.

Os gráficos obtidos apresentaram similaridade aos apresentados nas Figuras 4.2 e 4.3, onde é perceptível que as componentes assumem uma tendência constante nos valores das cargas ao iniciar a usinagem da superfície. Porém os valores das componentes da amostra temperada e revenida são menos dispersos comparado à peça somente temperada. Isto é outra evidência homogeneidade da dureza da peça temperada e revenida. Foram calculadas as médias e desvios de padrão de cada componente (Tabelas 4.1 e 4.2), utilizando os dados dos intervalos de tempo que apresentaram valores dentro do patamar constante das cargas.

Tabela 4.2 – Média e desvio padrão das componentes da força de usinagem da amostra temperada

Avanço (mm/rot)	Forças de usinagem	Componente da Força Média (N)	Desvio Padrão Absoluto	Desvio Padrão Percentual
0,073	Corte	209	20	9%
	Passiva	72	10	14%
	Avanço	35	8	22%
0,109	Corte	318	72	23%
	Passiva	171	44	26%
	Avanço	158	50	32%
0,125	Corte	386	76	20%
	Passiva	45	8	17%
	Avanço	35	12	35%

Tabela 4.3 – Média e desvio padrão das componentes da força de usinagem da amostra temperada e revenida.

Avanço (mm/rot)	Forças de usinagem	Componente da Força Média (N)	Desvio Padrão Absoluto	Desvio Padrão Percentual
0,073	Corte	184	4	4%
	Passiva	102	4	2%
	Avanço	67	2	3%
0,109	Corte	272	8	3%
	Passiva	121	4	3%
	Avanço	58	3	5%
0,125	Corte	209	6	3%
	Passiva	144	5	3%
	Avanço	80	6	7%

A partir dos resultados apresentados nas Tabelas 4.1 e 4.2, foram plotados gráficos comparativos entre as peças ensaiadas da força de corte (Figura 4.4), da força passiva (Figura 4.5) e da força de avanço (Figura 4.6), mostrando o comportamento das componentes em

função da variação de avanço. Utilizando a Equação 2.3, também foi calculada força de usinagem em relação a cada avanço aplicado, apresentado na Figura 4.7.

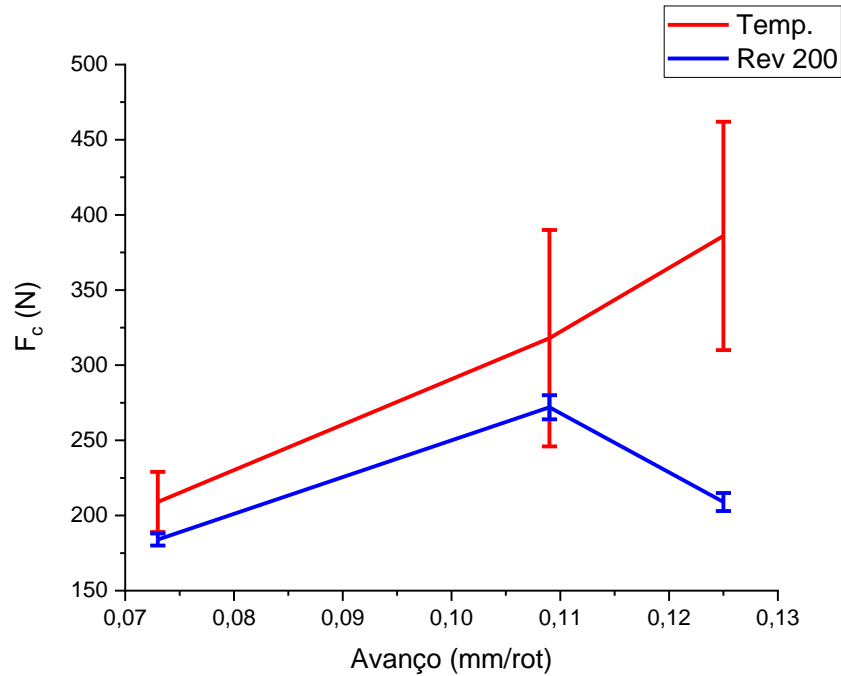


Figura 4.4 – Variação da força de corte em função do avanço

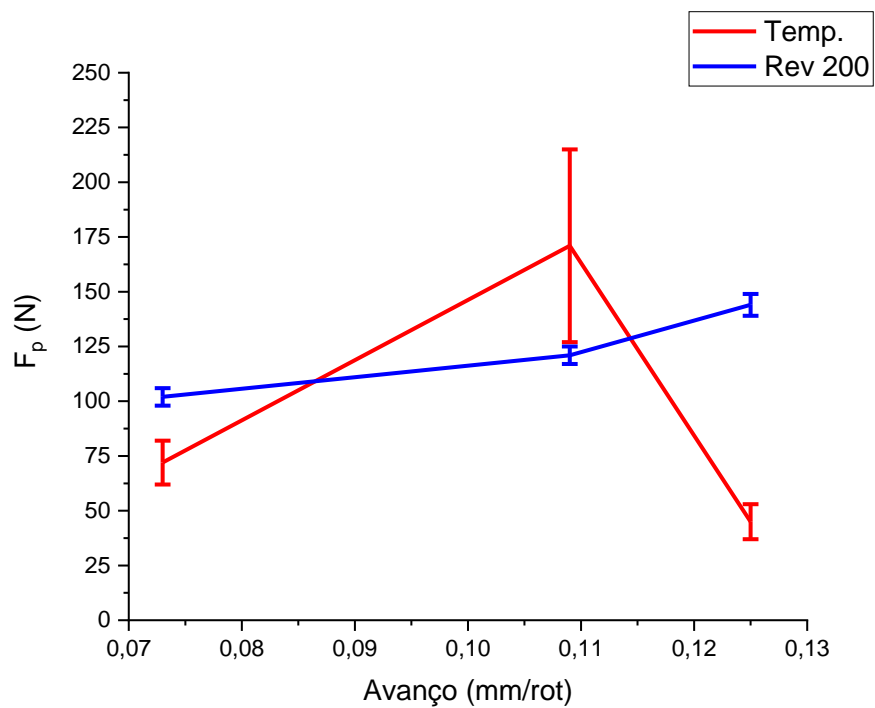


Figura 4.5 – Variação da força passiva em função do avanço

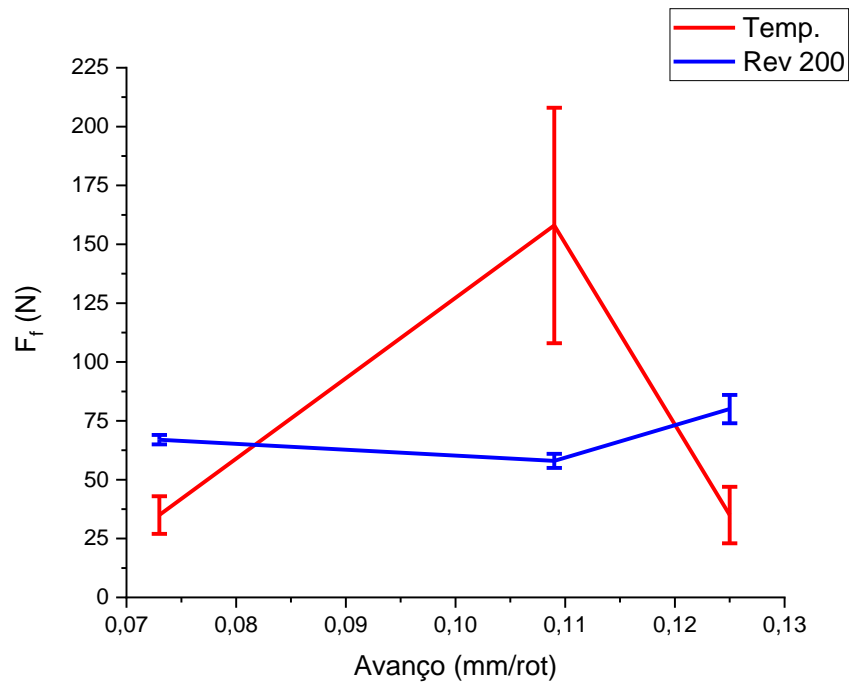


Figura 4. 6 – Variação da força de avanço em função do avanço

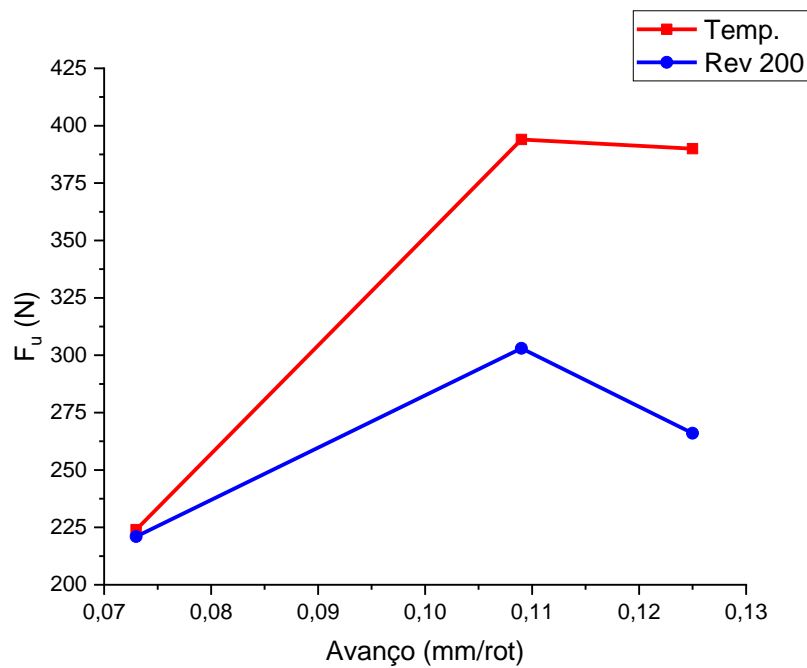


Figura 4.7 – Variação da força de usinagem em função do avanço

Analisando de forma conjunta os gráficos e as tabelas de força, é perceptível que a maior magnitude é das força de corte, em ambas as condições estudadas. Esta componente é o fator predominante na composição da força de usinagem. Porém, na condição temperado e revenido, esta componente não apresentou uma tendência definida em relação à variação de avanço, tendo como valor mais elevado no avanço de 0,109 mm/rot e valores reduzidos em avanço de 0,125 mm/rot. Isto demonstra que utilizando uma rotação de 1600 rpm, avanços na faixa de 0,109 mm/rot elevam a força de corte nesta condição de revenido, acarretando na elevação da força de usinagem. Isto tem implicações na integridade superficial que sofre esforços maiores, podendo gerar vibrações que prejudicam a qualidade superficial de peça; além disso, pode influenciar na vida útil da ferramenta de corte. Este mesmo comportamento foi observado na força de avanço e passiva da peça somente temperada.

Outro fato perceptível na análise é a influência da dureza mais elevada da amostra temperada em relação a revenida na força de corte. Os valores se mostraram maiores em todos os avanços testados, porém a variação dos resultados, exemplificado no desvio padrão percentual, mostra como a componente varia ao longo da usinagem, chegando a 26% de variação em torno do valor médio determinado no avanço de 0,125 mm/rot.

4.3 Análise da pressão específica de corte

Utilizando os valores das forças de corte média adquirida nos ensaios foi calculada a pressão específica de corte das duas peças. A Equação 2.5 foi usada para determinar a área da seção de corte de cada avanço testado e a Equação 2.4 para determinar a pressão específica de corte correspondente. Os valores são apresentados na Tabela 4.4 e no gráfico da Figura 4.8.

Tabela 4.4 – Pressão específica de corte - K_s

Avanço (mm/rot)	Área da seção de corte (mm ²)	K _s – Temperado (N/mm ²)	K _s – Revenido 200 °C (N/mm ²)
0,073	0,0219	9544	8393
0,109	0,0327	9718	8326
0,125	0,0375	10300	5584

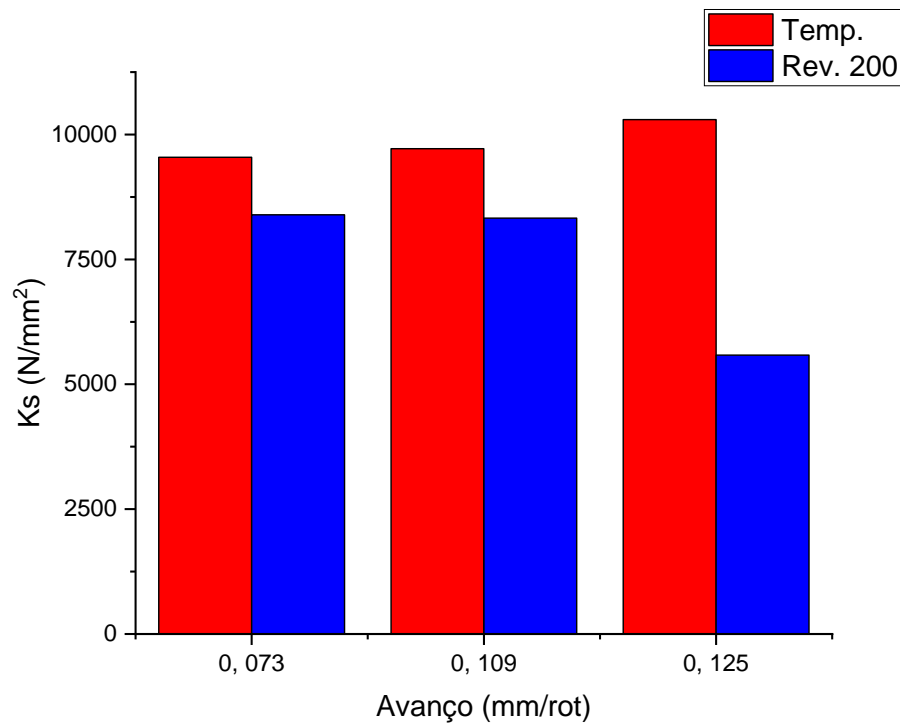


Figura 4.8 – Pressão específica de corte

Foi notado tendências diferentes entre as amostras. A pressão específica de corte na condição somente temperado apresentou uma tendência ao crescimento com o aumento do avanço, divergindo do apresentado na revisão bibliográfica deste trabalho, onde o aumento do avanço propicia a diminuição de K_s . O valor elevado da força de corte teve muita influência, principalmente no avanço de 0,109 mm/rot, na peça temperada e revenida quando se analisa os valores de K_s encontrados. Em decorrência do crescimento desta componente, os valores de K_s se mantém praticamente estáveis com a elevação do avanço, começando seu decaimento após o avanço de 0,109 mm/rot. Contudo, foi observado que os valores de K_s para a condição temperada são superiores aos valores da condição revenido, o que implica na necessidade de maior potência da máquina operatriz para a realização da mesma usinagem. Assim, fica evidente que a condição o de tratamento térmico pode ser uma fazer decisivo na viabilidade de uma operação de usinagem.

4.4 Análise da rugosidade

Os dados coletados nos ensaios de rugosidade Ra e Rt são apresentados respectivamente nos gráficos das Figuras 4.9 e 4.10. Para comparação, foram calculados os valores teóricos de Ra e Rt utilizando as Equações 2.9 e 2.8, respectivamente.

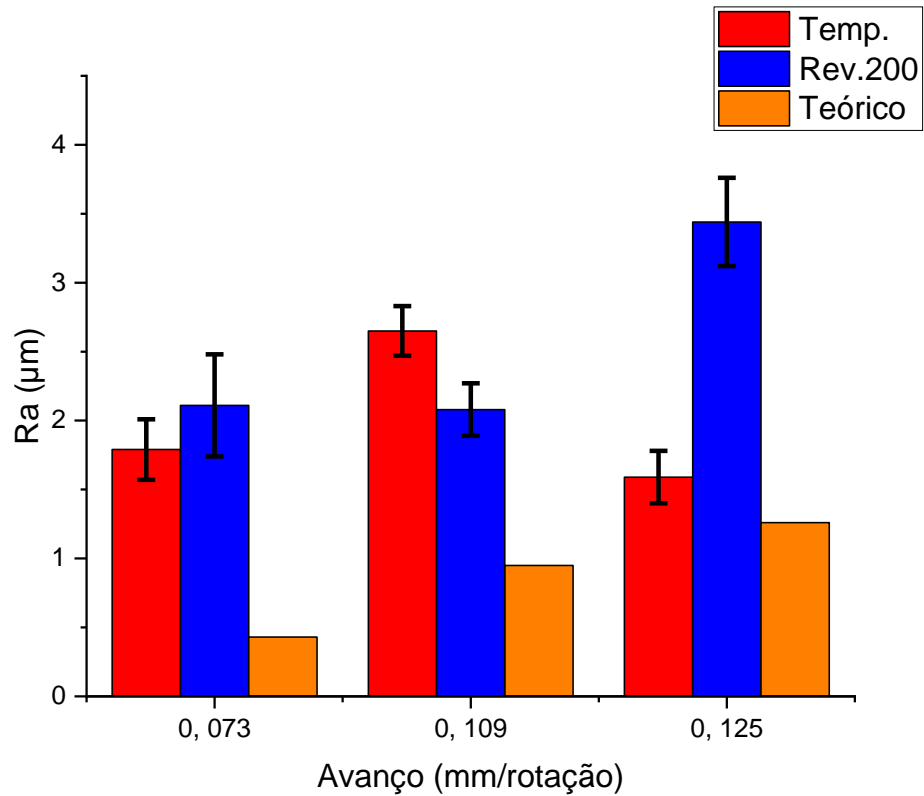


Figura 4.9 – Valores de rugosidade média adquiridos

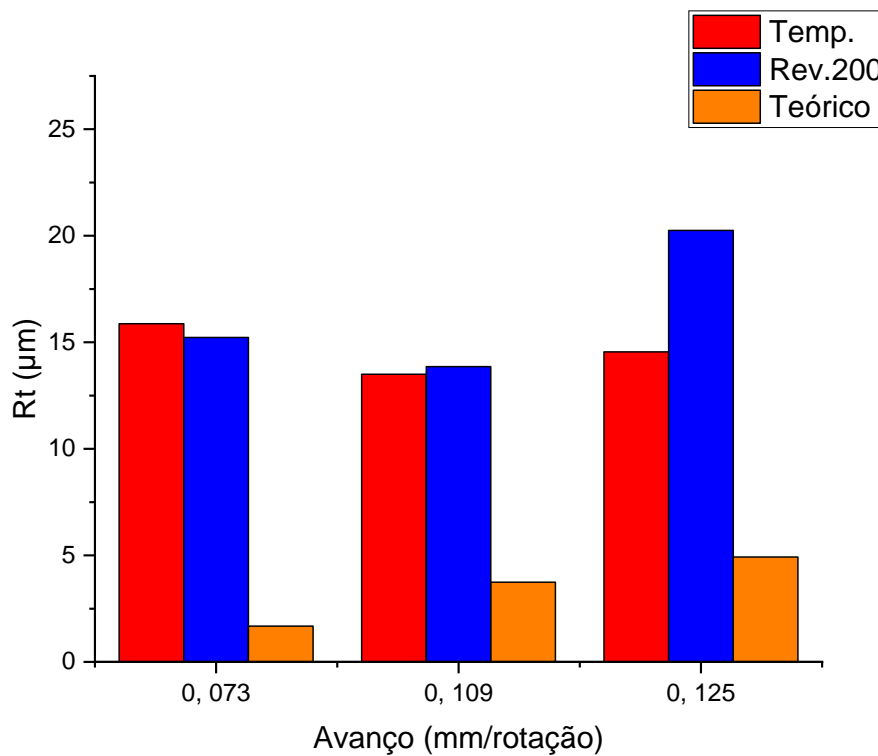


Figura 4.10 – Valores de rugosidade máxima adquiridos

Os valores obtidos através das equações 2.9 e 2.8 foram muito abaixo dos valores encontrados no ensaio e com comportamento bem aleatório. A rugosidade média e máxima da peça temperada e revenida a apresentou uma estabilidade nos valores de avanço de 0,073 e 0,109 mm/rot, com valores muito semelhantes. Quando o avanço elevou-se para 0,125 mm/rot ambas as rugosidades aumentaram, seguindo a tendência apresentada na revisão bibliográfica deste trabalho, onde o aumento do avanço eleva os valores de rugosidade. Também nota-se nesta amostra que a dispersão de valores foi menor no avanço de 0,109 mm/rot se comparada às demais, o que demonstram a maior estabilidade do controle da rugosidade nesta faixa de avanço.

A peça somente temperada apresentou resultados diferentes da peça temperada e revenida, não apresentam a tendência de crescimento quando relacionado a elevação do avanço quando avaliada a rugosidade máxima. Os valores de R_t desta peça se mantiveram constantes não apresentando relação com a variação do avanço. Já nos valores da rugosidade média, a peça somente temperada apresentou valores muito elevados no avanço de 0,109 mm/rot, fora da tendência que se apresentava na análise dos demais valores de avanço. apresentava nos valores de 0,073 e 0,125 mm/rot demonstravam uma diminuição do R_a com o

aumento do avanço, o que diverge do conceito da relação diretamente proporcional entre avanço e rugosidade e apresentando uma relação inversamente proporcional.

Os gráficos das Figuras 4.11 e 4.12 foram plotados para avaliar a relação entre a rugosidade média e máxima, respectivamente, com as força de usinagem determinadas. Nota-se que na peça temperada e revenida a rugosidade média alcança menor valor quando a força de usinagem chega ao seu patamar mais alto. Já na peça somente temperada ocorre o oposto, apresentando uma relação diretamente proporcional entre o aumento da força de usinagem e o aumento da rugosidade média. Na avaliação da rugosidade máxima, ambos os materiais apresentaram menor valor de R_t quando a força de usinagem alcançou seu maior valor dentre os avanços testados. Assim, não foi possível estabelecer uma relação entre as forças de usinagem com a qualidade superficial obtida para os parâmetros de corte utilizados, pois a rugosidade superficial de comportou de maneira aleatória com o aumento do avanço.

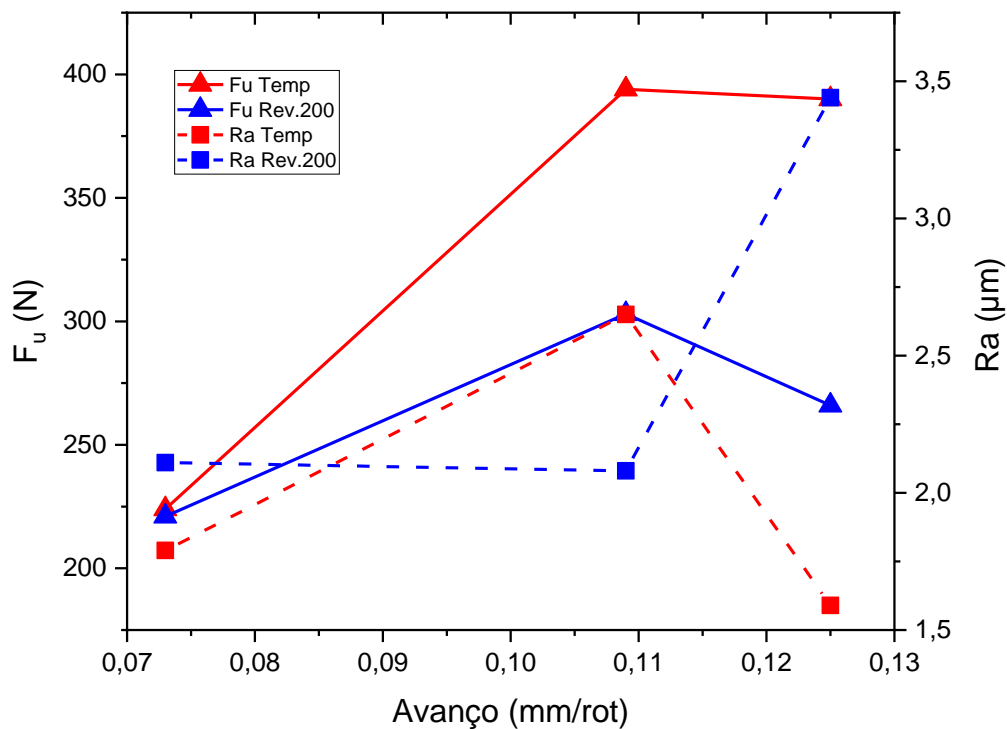


Figura 4. 11 – Comparação entre a força de usinagem e rugosidade média

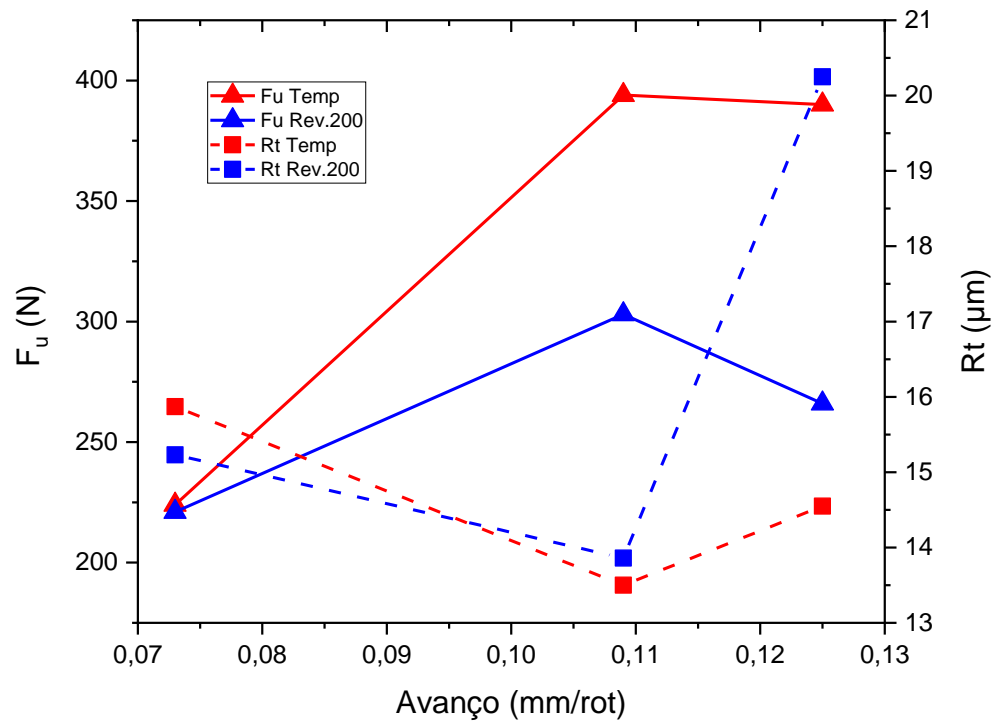


Figura 4.12 – Comparação entre a força de usinagem e rugosidade máxima

Capítulo 5

Conclusões

Baseando-se simultaneamente na referência teórica e na análise experimental realizada neste trabalho, pode-se concluir que:

- I. A força de corte foi o de maior magnitude e a principal componente da força de usinagem no torneamento em ambas as condições de tratamento térmico.
- II. Os maiores valores de força de corte foram obtidos na condição que apresentou maior dureza (temperada).
- III. O material somente temperado apresentou uma relação direta entre a elevação do avanço e aumento da força de corte, o que não ocorreu com a condição revenida.
- IV. A pressão específica de corte na condição temperada foi maior na condição revenida, mas não foi possível quantificar uma correlação entre dureza e pressão específica de corte.
- V. A rugosidade média teórica e máxima teórica não apresentaram valores próximos os seus respectivos ensaios experimentais, evidenciando que outros parâmetros influenciam nos valores de rugosidade.
- VI. O material temperado e revenido apresentou menor valor de rugosidade média quando foi submetido à maior força de usinagem testada. Já a o material somente temperado apresentou uma relação direta entre a rugosidade média e a força de usinagem à submetido.
- VII. Não foi possível estabelecer um padrão entre magnitude das forças de usinagem e rugosidade para as condições de corte estudadas no presente trabalho.

Capítulo 6

Sugestão para Trabalhos Futuros

- I. Avaliar a força de usinagem e suas componentes sob a influência de tratamentos térmicos diferentes dos apresentados, com diferentes temperaturas de revenimento.
- II. Avaliar a dureza de cada superfície das amostras, tratadas nas condições apresentadas e outras propostas, verificando a influencia da variação de avanço, nos valores de dureza obtido.
- III. Avaliar a influência da variação da velocidade de corte e da profundidade corte na força de usinagem e suas componentes nas condições de tratamentos térmicos apresentadas e em outras propostas.

Referências Bibliográficas

- BERNARDOS, P. G., VOSNIAKOS, G. S., 2003; *Predicting surface roughness in machining; a review*. **Int. J. Mach. Tools Manuf.** v.43, p. 833-844, 1977.
- BHATTACHARYA, S. *et al*; *Microstructural evolution of AISI 4340 steel during Direct Metal Deposition process*, **Materials Science and Engineering A**, v. 528, n. 6, p. 2309–2318, 2011.
- BOING, D. **Transição da aplicação do metal-duro revestido e do PCBN no torneamento de aços endurecidos em função da dureza e do teor de carbonetos**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.
- CARDOSO, A. S. M. **Caracterização mecânica e microestrutural dos aços SAE 4340 E 300M após soldagem a laser e tratamento superficial de nitretação a plasma**. 2011. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.
- CHIAVERINI, V. **Tratamento térmico das Ligas Ferrosas**. Associação Brasileira de Metais, 1985.
- DINIZ, A. E.; COPPINI, N. L.; MARCONDES, F. C. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 7 ed., São Paulo: Artiber, 2010.
- GAMARRA, J. R. **Estratégias de Usinagem no Torneamento de Aço Inoxidável Super Duplex (UNS S32750)**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017.
- FAVORIT; **Placas SAE 4340**. Disponível em: <<http://www.favorit.com.br/produtos/placas-1045-4140-8620-8640-4340/placas-sae-4340>> Acesso em: 23 fev. 2016.
- FERNANDES, P. F. S. **Análise Experimental das Forças de Usinagem em Torneamento de Aço Inoxidável Super Duplex**. CEFET-RJ, Rio de Janeiro, junho de 2018.
- FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. 13 ed. São Paulo: Blucher, 1977.
- HOFMEISTER, F. A.; DE OLIVEIRA, D. G.; VOGEL, J. P.; ARAUJO, A. C.; **Determinação do ângulo do plano de cisalhamento no corte ortogonal**; XIV Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, 2007.

JOHNSON, G. R.; COOK, W. H.; **A Constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strains rates and high temperatures**; *Proceedings of the Seventh International Symposium on Ballistics*, Hague, Holanda, 1985.

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

KRAUSS, G.; *Steels: Heat Treatment and Precessing Principles*. **ASM International**; 1990.

MACHADO, Á. R.; ABRAÃO, A. M.; COELHO e R. T.; SILVA, M. B. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. São Paulo: Bluncher, 2009.

MARTINS, H. M. S.; **Dureza Vickers do alumínio AA1050 a elevadas velocidades de deformação**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Mestrado do Instituto Superior Técnico (IST) integrada à Universidade de Lisboa, Lisboa, 2015.

MENG, Q.; ARSECULARATNE, J. A.; MATHEW, P. *Calculation of optimum cutting conditions for turning operations using machining theory*. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v.40, n. 12, pp. 1709, 2000.

NUNES, L. T. **Análise estatística da influencia dos parâmetros de corte na rugosidade do torneamento do aço microligado DIN 38MnSiVS5**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, São Paulo, 2011.

OLIVEIRA, A. R; ARAÚJO JR., I. C.; SILVA, G.; **Influência da temperatura no revenimento do aço SAE 4340**; IX Encontro Latino Americano de Pós-Graduação - Curso de Graduação em Engenharia de Materiais – Universidade do Vale do Paraíba, 2009.

REIS, B.; **Estudo da influência da geometria da cunha da ferramenta de aço rápido na usinagem do aço ABNT 1045 em diferentes condições lubri-refrigerantes**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, São Paulo, 2015.

RODRIGUES, J.; MARTINS P.; **Tecnologia Mecânica: Tecnologia da Deformação Plástica**; Volumes I e II, Escolar Editora, 2005.

ROSA, F. A. **Comparação do desempenho de ferramentas de Si₃N₄ e Al₂O₃ no torneamento do ferro fundido nodular austempera**. 2016. Dissertação (Mestrado em

Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São João del-Rei, São João del-Rei, 2016.

SANCHES, H. A. B. **Avaliação do processo de usinagem com corte interrompido utilizando a análise de esforços e frequências**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

Sandvik Coromant, Catalogue for General Turning Tools, disponível em:

<http://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/general_turning> Acesso em: 29 de janeiro de 2019.

SANTOS S. C.; SALES W. F. **Aspectos Tribológicos da usinagem dos Materiais**. São Paulo: Artliber Editora, 2007.

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

SHAW, M. C. *Metal Cutting Principles*. **Great Britan, Clarendon Press**, 2005.

SILVA, F. V. P. **Forças de corte geradas por torneamento – Um estudo de caso das ligas Cu-Al-Be e Cu-Al-Be-Nb-Ni passíveis do efeito memória de forma**. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2014.

SMITH, W. F.; HASHEMI, J. **Fundamentos de engenharia e ciência dos materiais**. 5 ed. , Porto Alegre: AMGH, 2012.

SOARES, L. R. DE L. **Fresamento do aço SAE 430 temperado e revenido utilizando ferramentas de metal duro recobertas**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica na área de Materiais) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Guaratinguetá, 2017.

SOUZA, I. G. **Processo de torneamento do aço ABNT 4340 utilizando ferramenta de metal duro com revestimento de Ti(C,N)+Al₂O₃+TiN**. 2017. Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em (Engenharia de Materiais) da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em (Engenharia de Materiais), Guaratinguetá, 2017.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte I**. 3 ed. , Florianópolis: UFSC, 1993.

VOGEL, J. P.; NERY, W. S.; ARAUJO, A. C. **Estudo do efeito do avanço nas forças e no acabamento de um torneamento de aço superduplex.** 7º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação. Penedo, Itatiaia – RJ, 2013.