

## **AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE USINAGEM SOBRE A RUGOSIDADE SUPERFICIAL DO AÇO SAE 1045 NO PROCESSO DE TORNEAMENTO**

**Carlos Eduardo da Rosa de Matos<sup>1</sup>**

**Alexandre Milanez<sup>2</sup>**

**Resumo:** A rugosidade da superfície é um fator importante a ser considerado na usinagem de peças, pois afeta diretamente a qualidade do acabamento e a funcionalidade dos produtos. Nesse contexto, esta pesquisa teve como objetivo analisar a influência dos parâmetros de usinagem na rugosidade superficial de barras cilíndricas de SAE 1045 submetidas ao processo de torneamento. Utilizando a metodologia de planejamento experimental (DOE), foram obtidas 16 combinações de fatores diferentes, analisadas suas interações e seu impacto sobre o acabamento superficial de cada barra usinada. Os fatores de usinagem analisados foram: avanço, velocidade de corte, comprimento usinado e tipo de inserto. Com base no DOE, foram realizadas duas análises fatoriais: uma que avaliou a influência dos fatores sobre a rugosidade superficial e outra que analisou a influência sobre o índice IR que relaciona os valores de rugosidade obtidos experimentalmente com o valor de rugosidade teórica. Com base nas análises fatoriais o fator que mostrou maior impacto sobre a rugosidade superficial foi o avanço em ambas. Observou-se que menores valores de rugosidade  $R_a$  foram alcançados com avanços menores, porém por outro lado, teve impacto negativo para a eficiência do processo de torneamento no índice IR, uma vez que resultou em uma rugosidade substancialmente maior do que a rugosidade teórica. A utilização de velocidades de corte mais altas contribuiu para uma melhora no acabamento superficial.

**Palavras-Chave:** Torneamento, Avanço, Velocidade de corte, Rugosidade.

### **1 INTRODUÇÃO**

O processo de usinagem é fundamental para a produção de componentes mecânicos em diversos setores da indústria. Nesse contexto, a rugosidade superficial é uma das características metalúrgica importante a ser considerada na fabricação de componentes usinados, pois afeta diretamente seu desempenho e durabilidade. O aço

---

<sup>1</sup> Graduando em Engenharia Mecânica. E-mail: carlos.eduardo.matos@outlook.com

<sup>2</sup> Professor do Centro Universitário UniSATC E-mail: alexandre.milanez@satc.edu.br

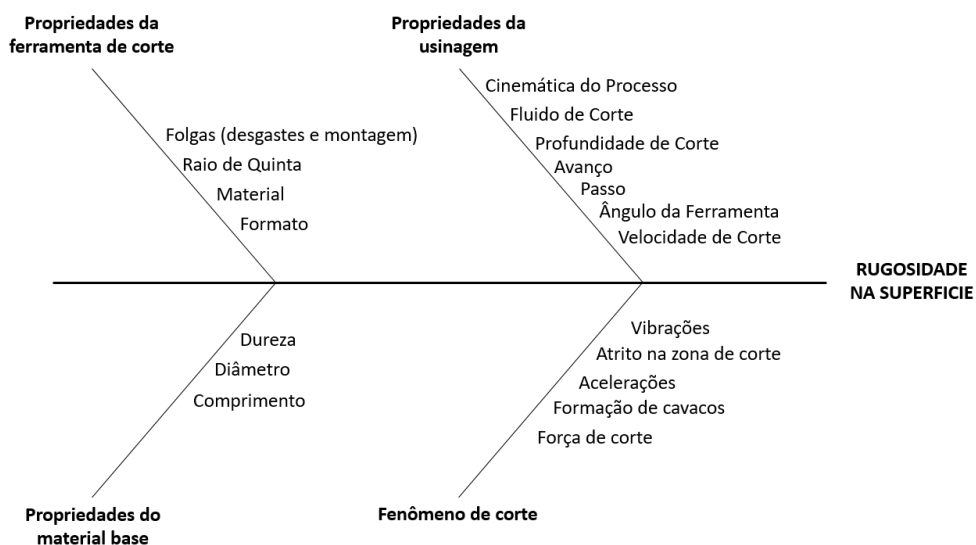
SAE 1045 é um material muito utilizado na fabricação de componentes mecânicos, devido às suas propriedades mecânicas e facilidade de usinagem.

A usinagem pode ser definida pelo processo de remover material para dar forma a peça. Dentro da usinagem, pode se destacar o processo de torneamento, que é amplamente utilizado na indústria para a fabricação de componentes mecânicos. Estima-se que cerca de 10% de todo o aço produzido no mundo é transformado em cavaco através do processo de usinagem, salientando que este processo possui perspectivas reais de aprimoramento advindo do processo de usinagem (CAPUTO, 2016).

No entanto, a rugosidade superficial pode ser afetada por diversos parâmetros de usinagem, como velocidade de corte, avanço e profundidade de corte. A incompreensão destes parâmetros pode se tornar um dos problemas que afetam o acabamento superficial das peças, implicando nos custos de produção ou em futuros reparos da peça usinada. É importante compreender como esses parâmetros influenciam a rugosidade superficial, a fim de otimizar o processo de usinagem e obter peças com maior qualidade superficial e precisão dimensional. A qualidade de uma peça usinada pode estar diretamente ligada as variáveis do processo, e isto pode ser estudado analisando os parâmetros da rugosidade  $R_a$  e  $R_z$  ( $\mu\text{m}$ ).

A Figura 1, apresenta os principais fatores que podem influenciar na rugosidade superficial da peça usinada.

Figura 1 – Fatores do processo de usinagem que podem influenciar a rugosidade da superfície.



Fonte: Adaptado de Biasibetti (2019).

Portanto, o estudo dos parâmetros de usinagem é fundamental para a compreensão das variáveis que influenciam a qualidade superficial no processo de torneamento. O estudo dessas variáveis não só pode melhorar o desempenho e a durabilidade das peças, como também reduzir os custos de produção aumentando a competitividade das empresas, mas também evitando futuros reparos da peça usinada.

O propósito deste estudo é investigar de que maneira certos fatores no processo de torneamento impactam na rugosidade superficial da peça usinada analisando os resultados de  $R_a$  e  $R_z(\mu m)$ . Utilizando o planejamento de experimento (DOE) e a análise fatorial como ferramentas para esta análise, busca-se encontrar qual a combinação dos fatores que possuem maior impacto na obtenção da rugosidade.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Esta seção tem por finalidade apresentar a revisão da literatura e abordar os temas pertinentes para o embasamento teórico necessário para a realização do trabalho.

### **2.1 USINAGEM**

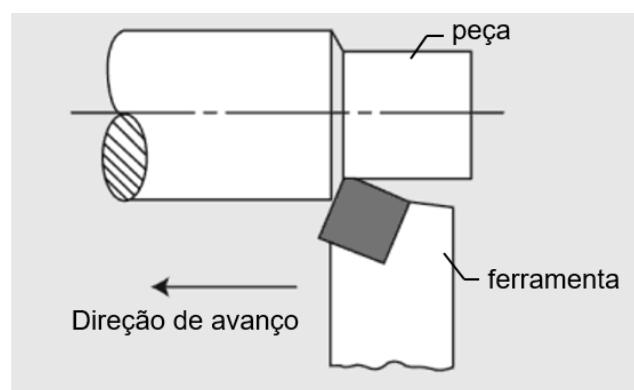
A usinagem é reconhecidamente o processo de fabricação mais popular do mundo, transformando em cavacos algo em torno de 10% de toda a produção de metais e empregando dezenas de milhões de pessoas. (CAPUTO, 2016)

O processo de usinagem consiste na operação de conferir a peça, forma geométrica, dimensão, acabamento ou ainda uma combinação das três e que por consequência gera cavaco. Cavaco é uma porção de material retirada da peça pela ferramenta durante a operação de usinagem, este é caracterizado por apresentar forma geométrica irregular (SCHHROETER; WEINGAERTNER, 2002).

### 2.1.1 Processo de torneamento

O torneamento é um processo mecânico que tem por objetivo dar forma a superfícies por revolução com a utilização de uma ou mais ferramentas. Para isso a peça é fixada de maneira que a mesma gire em torno do eixo principal de rotação da máquina e a ferramenta se desloque simultaneamente numa trajetória coplanar com o eixo conforme apresentado Figura 2 (FERRARESI, 1977).

Figura 2: Torneamento cilíndrico externo.



Fonte: Adaptado de Machado. (2015)

No presente trabalho será utilizado o torneamento retilíneo, especificamente o torneamento cilíndrico externo.

### 2.1.2 Parâmetros de corte

O processo de torneamento possui alguns parâmetros de corte importantes que influenciam no tempo da operação e na qualidade final da peça. Conforme Diniz (2014) a velocidade de corte é o resultado do deslocamento da ferramenta diante da peça e é a velocidade tangencial instantânea resultante da rotação da ferramenta de corte em volta da peça usinada, que é expressa pela equação 1:

$$v_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \text{ (m/min)} \quad (1)$$

Onde:

$v_c$  = velocidade de corte (m/min)

$d$  = diâmetro da peça (mm)

$n$  = rotação da peça (rpm)

A velocidade de avanço é o produto da rotação da ferramenta pelo avanço, onde o avanço é a distância percorrida pela ferramenta em uma rotação e é dada pela equação 2 (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014):

$$v_f = f \cdot n = \frac{1000 \cdot V_c}{\pi \cdot d} \text{ (mm/min)} \quad (2)$$

Onde:

$f$  = avanço (mm/rot)

$v_f$  = Velocidade de avanço (mm/min)

O tempo de corte pode ser resumido no tempo total dos tempos ativos, estes que são onde ocorre efetivamente a remoção de material e é obtida através da equação 3 (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014):

$$T_c = \frac{l_f}{v_f} = \frac{l_f}{f \cdot n} = \frac{\pi \cdot d \cdot l_f}{1000 \cdot f \cdot v_c} \text{ (min)} \quad (3)$$

Onde:

$l_f$  = percurso de avanço (mm)

$T_c$  = Tempo de corte (min)

### 2.1.3 Fluido de corte

O processo de usinagem tem por objetivo atender as especificações de acabamentos superficiais, tolerâncias, entre outros critérios pré-estabelecidos em projeto. Para atingir estes resultados, o uso de fluidos lubrificantes se mostra eficiente. O pesquisador americano F. W. Taylor (1894) verificou que com o uso destes conseguiu ter um aumento de 33 % na velocidade de corte sem interferir na vida da ferramenta de corte (MACHADO, et al. 2015)

O principal objetivo dos fluidos refrigerantes é diminuir os custos de usinagem, com desgaste de ferramenta e a melhora na superfície da peça fabricada. Sua função secundária é transportar o cavaco para fora da região de corte, refrigerar o sistema, visto que para atender tolerâncias dimensionais o calor é um ponto negativo em função da dilatação térmica (SCHHROETER; WEINGAERTNER, 2002).

#### **2.1.4 Avarias e desgaste de ferramenta**

Se considera avarias de ferramenta as quebras, trincas, deformações plásticas que ocorrem no gume de corte durante o processo de usinagem. Modificando as propriedades da ferramenta de corte, impactando no acabamento superficial e qualidade da peça usinada (FERRARESI, 1977; SCHHROETER; WEINGAERTNER, 2002).

A aresta postiça de corte ou gume postiço pode ocorrer quando utilizadas baixas velocidades de corte. O material temporariamente depositado na superfície de corte da ferramenta, tende a sair como partículas que podem ser aderidas tanto ao cavaco como a superfície usinada, causando impactos significativos no acabamento da superfície. Geralmente, esse problema pode ser reduzido aumentando a temperatura de corte, o que pode ser alcançado aumentando a velocidade de corte. (FERRARESI, 1977; SCHHROETER; WEINGAERTNER, 2002).

## **2.2 RUGOSIDADE SUPERFICIAL**

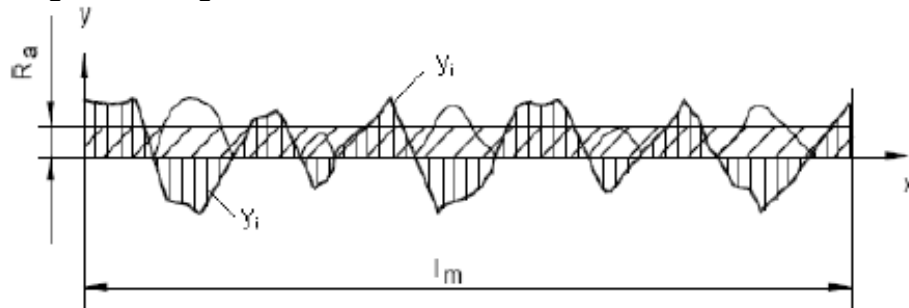
A rugosidade de uma superfície são irregularidades finas resultantes do processo de corte. No processo de torneamento, geralmente originam-se tensões residuais nas camadas mais próximas a superfície usinada e o acabamento final se deve a uma combinação de vários fatores. A qualidade superficial deve ser prevista em projeto, dependendo da aplicação da peça. (SOUZA, 2016).

Os projetos mecânicos em geral, representam o acabamento superficial principalmente pela rugosidade, que consiste no conjunto de pequenas saliências e reentrâncias que dão características a uma superfície.

### 2.2.1 Rugosidade Média ( $R_a$ )

Um dos parâmetros que são empregados na indústria é a rugosidade média  $R_a$  (Figura 3). Em outras palavras, a rugosidade média ( $R_a$ ) é uma medida que representa a média aritmética dos desvios absolutos da linha média dentro de um determinado comprimento de medição ( $L_m$ ) conforme equação 3. Essa medida não leva em consideração a orientação dos picos e vales da superfície, ou seja, não distingue entre picos acima ou abaixo da linha média. (AMORIM, 2002; SOUZA, 2008)

Figura 3: Rugosidade média aritmética.



Fonte: Baseado de Amorim (2002).

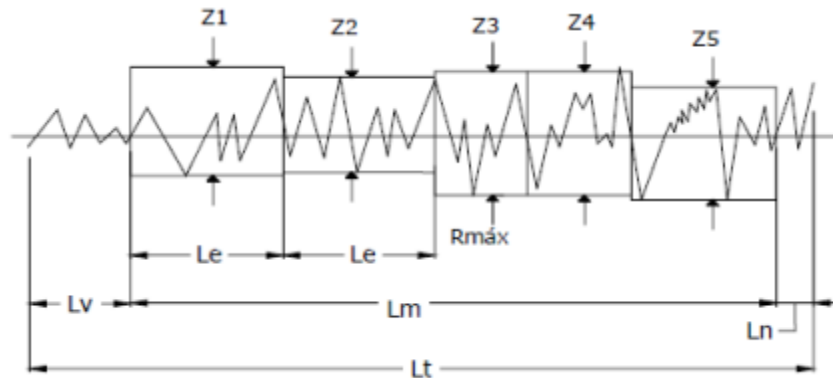
$$R_a = \frac{1}{l_m} \int_0^{l_m} |y(x)| dx \quad (4)$$

Onde  $l_m$  é o percurso de medição.

### 2.2.2 Altura máxima do perfil de rugosidade ( $R_z$ )

A altura máxima do perfil de rugosidade é a média aritmética dos cinco valores de rugosidade parcial  $Z_i$ , que são determinados por meio da soma dos valores absolutos da distância entre o pico mais alto e o vale mais profundo de cada seção de amostragem dentro de um comprimento de amostragem  $L_e$  conforme mostrado na Figura 4 (KIKUKAWA, 2019).

Figura 4: Altura máxima do perfil de rugosidade



Fonte: Baseado de Kikukawa (2019).

A equação 5 apresentada abaixo demonstra o cálculo para determinar o valor da rugosidade máxima da superfície de trabalho.

$$R_z = \frac{Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5}{5} \quad (5)$$

Onde: Z = Rugosidade média por intervalo

### 2.2.3 Rugosidade teórica

O parâmetro de rugosidade teórica ( $R_{th}$ ), pode ser calculado de maneira teórica, para ser utilizado como indicativo, visto que a rugosidade obtida no final do processo depende de outros fatores importantes, como vibração, desgaste da aresta de corte, entre outros fatores que podem influenciar. Para o processo de torneamento, quando o avanço ( $f$ ) for menor que o raio de quina ( $r_e$ ) o valor de  $R_{th}$  pode ser obtidos de forma aproximada através da equação 6 e utilizado como referência para avaliar o acabamento superficial obtido (MACHADO, et al. 2015).

$$R_{th} = \frac{f^2}{8r_e} \quad (6)$$

Onde:

$R_{th}$  = Rugosidade teórica ( $\mu\text{m}$ )

$r_e$  = Raio de quina (mm)



## 2.2.4 Eficiência do processo de torneamento

Conforme Biasebetti (2019), é possível calcular um índice para verificar de forma teórica a eficiência do processo de torneamento, este índice pode ser calculado pelo produto da média das rugosidades máximas obtidos em cada corpo de prova ( $R_{z,media}$ ) e pela rugosidade teórica ( $R_{th}$ ), conforme a equação 8. Quando o valor de IR se aproxima de 1,0, isso indica que o valor de rugosidade obtida se assemelha significativamente à rugosidade teórica, o que indica que o acabamento obtido está em conformidade com o esperado. Entretanto, valores maiores indicam que o  $R_{z,media}$  foi IR vezes maior que o  $R_{th}$  e sugerindo que o processo de torneamento pode ter tido influência de outros fatores que prejudicam o acabamento superficial.

$$IR = \frac{R_{z,media}}{R_{th}} \quad (8)$$

## 3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Nesta seção serão apresentados os procedimentos e metodologias utilizadas para a realização da análise da influência dos parâmetros de usinagem na rugosidade superficial no processo de torneamento.

### 3.1 ETAPAS DO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A Figura 5 apresenta as etapas realizadas para o estudo em questão.

Figura 5: Etapas do procedimento experimental



Fonte: Do autor (2023).

### 3.2 PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO (DOE)

Para garantir uma avaliação precisa, é comum empregar o planejamento estatístico de experimentos (DOE), que consiste em organizar cuidadosamente as condições do experimento de forma a permitir a análise estatística adequada dos dados coletados. Dessa forma, é possível obter conclusões objetivas e confiáveis sobre a qualidade da superfície em estudo. (DAS, et al. 2013)

Para a elaboração da matriz do experimento fatorial, os fatores utilizados para o estudo foram: velocidade de corte, avanço, comprimento usinado e tipo de ferramenta. Foram adotados dois valores diferentes como sendo um inferior e um superior. Na Tabela 1 são apresentados os valores utilizados para o estudo.

Tabela 1: Fatores utilizados para o estudo.

Vc (m/min)	f(mm/rot)	L <sub>usinado</sub> (mm)	Inserto
112	0,1	100	WNMG 080408- TF
223	0,3	200	B80 101 108-8-L4

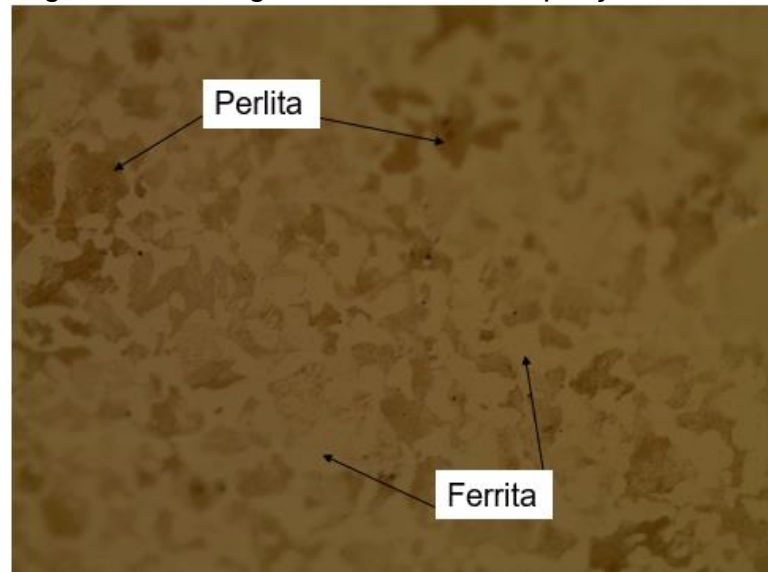
Fonte: Do autor (2023)

Desta forma foi obtido o total de 16 combinações diferentes para a realização do estudo.

### 3.2 CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova utilizados foram barras de SAE 1045 fabricadas através do processo de laminação. As barras com diâmetro de 7/8" (22,23 mm) foram seccionadas em tamanhos de 250 mm e 150 mm. As barras foram cortadas com 50mm a mais que o comprimento definido para o estudo para a fixação na placa de castanha. Após isso passaram pelo processo de normalização para homogeneizar as propriedades mecânicas. A microestrutura do material das amostras está apresentada na Figura 6.

Figura 6: Metalografia SAE 1045, ampliação de 500x





Fonte: Do autor (2022)

Através da metalografia é possível analisar a microestrutura típica para o processo de recozimento do SAE 1045, onde é encontrado grãos finos de ferrita e perlita que resulta em uma boa resistência e tenacidade. Além disso, a normalização elimina as tensões internas do material, tornando-o mais uniforme e estável.

### 3.3 MAQUINA E FERRAMENTAS

O processo de torneamento foi realizado em um torno CNC Romi Centur 30D. Na Tabela 2 é apresentado os insertos de usinagem utilizadas no trabalho.

Tabela 2: Especificação dos insertos.

Inserto	Especificação	Fabricante	Raio de Quina
	WNMG 080408- TF	Iscar	0,8mm
	B80 101 108-8-L4	Sandivick	0,8mm

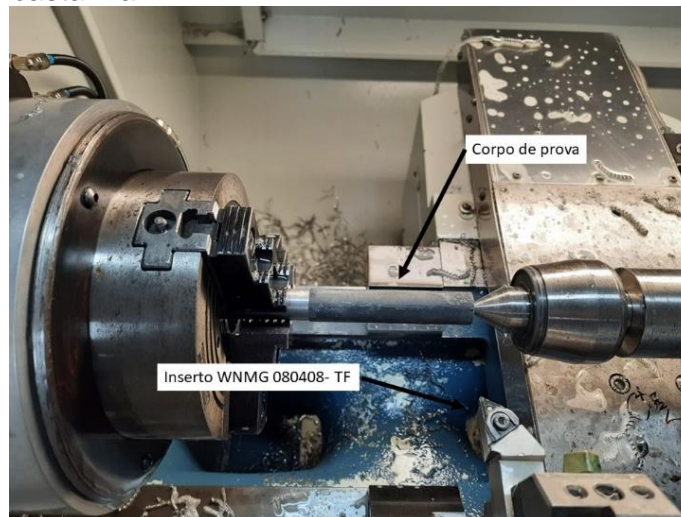
Fonte: Do autor (2023)

A escolha dos insertos com o mesmo raio de quina é fundamentada em estudos anteriores que destacam a influência significativa desse parâmetro na rugosidade da superfície usinada. Ao adotar uma abordagem consistente com um único valor de raio de quina, busca-se eliminar variações decorrentes desse fator.

### 3.4 USINAGEM

As barras foram fixadas na placa de maneira a deixar o comprimento disponível para usinagem de 200mm e 100mm Figura 7, para atender as condições definidas no planejamento do experimento. As barras foram usinadas utilizando fluido de corte semi sintético base vegetal (LUBRI YHS NA) diluído em água na proporção 1:20 conforme indicação do fabricante.

Figura 7: Fixação do corpo de prova na placa de castanha.



Fonte: Do autor (2023)

A usinagem foi realizada em duas etapas, sendo a primeira etapa um passe de 0,5mm de profundidade de corte ( $a_p$ ) para remover qualquer imperfeição da superfície das barras usinadas e o segundo passe de 0,2mm que gerou a superfície utilizada para análise do estudo.

### 3.5 MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE

Após a usinagem, a leitura da rugosidade das barras foi feita utilizando o rugosímetro portátil Mitutoyo SJ-310, foram realizadas 3 medições por corpo de prova. Os resultados das medições foram tabelados no *software* Minitab 19 de acordo com as condições utilizadas no experimento para posterior análise das interações dos resultados.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção serão apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios realizados para avaliação da influência dos parâmetros de usinagem na rugosidade superficial de barras cilíndricas de SAE 1045 submetidas ao processo de torneamento.

### 4.1 INFLUENCIA DOS FATORES SOBRE A RUGOSIDADE SUPERFICIAL

Seguindo o planejamento do experimento foram usinados 16 corpos de provas de acordo com as condições definidas para a realização do estudo. O DOE com quatro fatores e uma saída (rugosidade  $R_a$ ) está exposto na Tabela 3. A rugosidade apresentada foi obtido através da média das medições realizadas em cada corpo de prova.

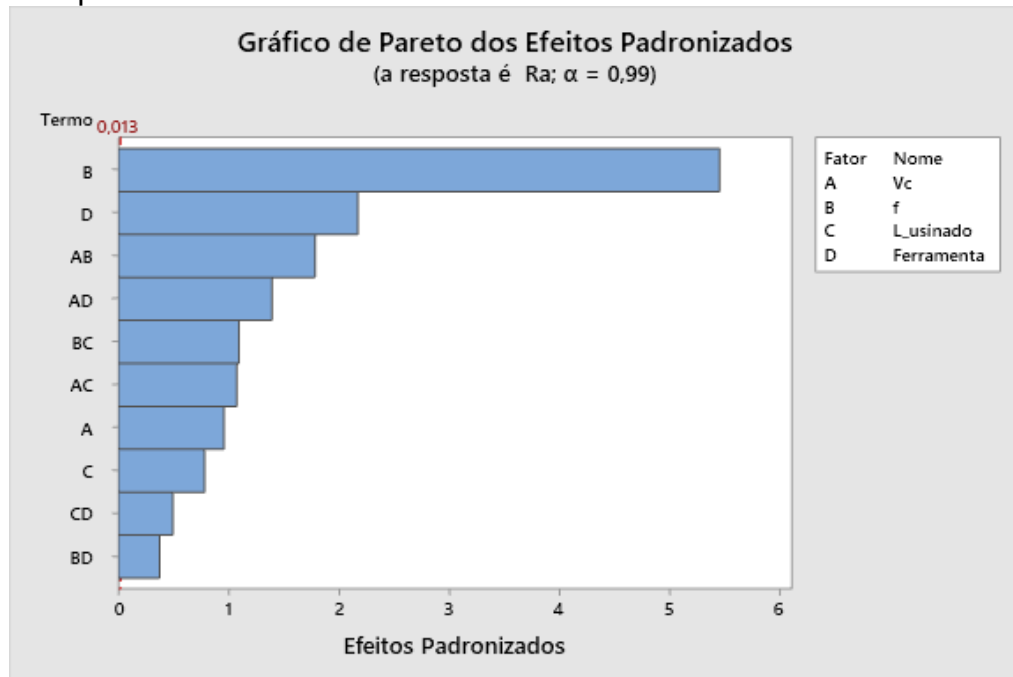
Tabela 3: Matriz dos dados do DOE com quatro fatores e como saída a rugosidade média ( $R_a$ )

Barra (n°)	Vc (m/min)	f(mm/rot)	L <sub>usinado</sub> (mm)	Ferramenta	R <sub>a</sub> ( $\mu$ m)
1	112	0,1	100	WNMG 080408 - TF	1,570
2	223	0,1	100	WNMG 080408 - TF	0,912
3	112	0,3	100	WNMG 080408 - TF	2,373
4	223	0,3	100	WNMG 080408 - TF	2,678
5	112	0,1	200	WNMG 080408 - TF	0,837
6	223	0,1	200	WNMG 080408 - TF	1,209
7	112	0,3	200	WNMG 080408 - TF	2,347
8	223	0,3	200	WNMG 080408 - TF	2,818
9	112	0,1	100	80 101 108-8-LA	3,276
10	223	0,1	100	80 101 108-8-LA	0,827
11	112	0,3	100	80 101 108-8-LA	2,946
12	223	0,3	100	80 101 108-8-LA	3,471
13	112	0,1	200	80 101 108-8-LA	1,386
14	223	0,1	200	80 101 108-8-LA	1,054
15	112	0,3	200	80 101 108-8-LA	3,514
16	223	0,3	200	80 101 108-8-LA	3,137

Fonte: Do autor (2023)

Com base nos dados apresentados na Tabela 3, foi realizada a análise fatorial para identificar os principais fatores que influenciam a rugosidade da superfície e os mesmos são analisados no gráfico de Pareto da Figura 8. O gráfico de Pareto, Figura 8, revelou que o fator mais significativo foi o avanço (f), seguido pelo tipo de inserto utilizado e pela combinação de avanço (f) com velocidade de corte (vc) e tipo de inserto, a influencia do inserto utilizado se da em função da sua geometria, visto que o inserto WNMG 080408 - TF é apoiado radialmente no suporte enquanto que o inserto 80 101 108-8-LA é tangencial. Outros fatores não foram considerados significativos para o estudo em questão.

Figura 8: Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados dos 4 fatores sobre a resposta Ra.



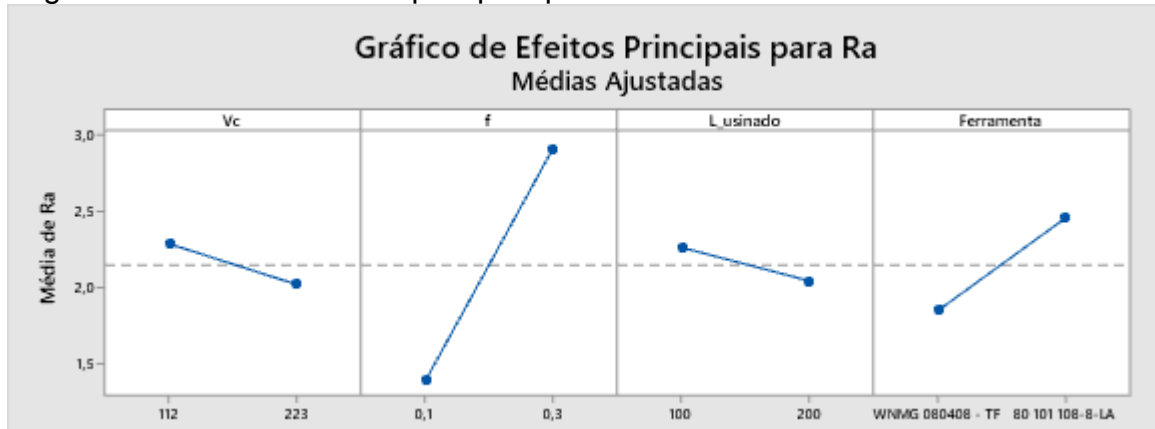
Fonte: Do autor (2023)

Conforme analisado pode-se observar que a rugosidade superficial é fortemente influenciada pela taxa de avanço, convergindo com os resultados obtidos nos estudos de Xiao et al (2021) e Oraby; Alaskari (2008).

Quando analisado o gráfico de Pareto, (Figura 8), em conjunto com o gráfico dos principais efeitos para a rugosidade média (Ra), (Figura 9), é possível observar que os menores valores de Ra foram obtidos quando se utilizou o menor avanço. Após esse fator, o que teve maior impacto foi o tipo de inserto utilizado, embora não tenha sido tão significativo quanto o avanço. A velocidade de corte e o

comprimento usinado não apresentaram tanto impacto quanto os outros fatores mencionados anteriormente, porém é possível observar uma melhora no acabamento superficial quando utilizado uma velocidade de corte maior.

Figura 9: Gráfico de efeitos principais para Ra

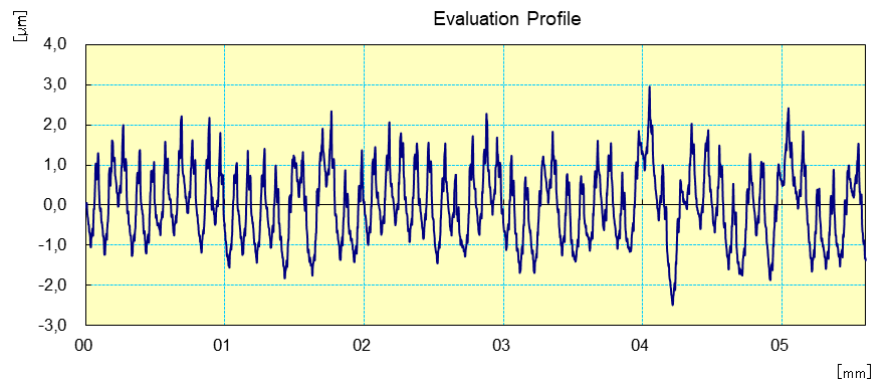


Fonte: Do autor (2023)

Velan; Shree; Muthuswamy (2017) afirmam em seu estudo que com a utilização de maiores velocidades de corte a incidência de formação de aresta postiça (quando o material de trabalho adere à aresta de corte) é reduzida, o que contribui para a obtenção de uma superfície de maior qualidade. Além disso, o alto calor gerado na interface entre a ferramenta e a peça usinada em função da alta velocidade de corte o cavaco fica mais fluido, diminui a resistência do material e promove a ação de cisalhamento, esse aumento no cisalhamento promove uma melhor estabilidade da ferramenta de corte, o que tem impacto positivo no acabamento superficial.

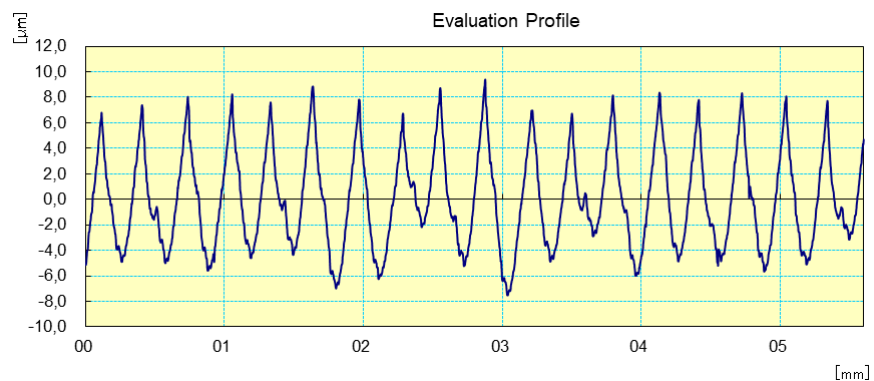
## 4.2 ANÁLISE DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL

O menor valor de rugosidade foi obtido na amostra da barra nº 10, conforme a Figura 10, quando foi utilizado um avanço de 0,1mm/rot, uma velocidade de corte de 223 m/min e o inserto de usinagem 80 101 108-8-LA.

**Figura 10: Perfil de rugosidade da barra n°10**


Fonte: Do autor (2023)

Em contrapartida, o maior valor de rugosidade foi verificado no corpo de prova n° 15, Figura 11, ao usar o mesmo inserto, mas com um avanço de 0,3mm/rot e uma velocidade de corte de 112 m/min.

**Figura 11: Perfil de rugosidade da barra n°15**


Fonte: Do autor (2023)

Nos dois gráficos, é possível verificar a consistência dos picos e vales e sua correspondência com o avanço empregado durante o processo de usinagem. Segundo Velan; Shree; Muthuswamy (2017) de acordo que avanço é aumentado, ocorre um aumento nos valores de rugosidade superficial. Essa relação segue uma tendência linear, pois o aumento da taxa de avanço resulta na formação de sulcos helicoidais devido à forma da ferramenta e ao movimento helicoidal da peça. Esses sulcos tornam-se mais profundos e largos à medida que a taxa de avanço aumenta.

#### 4.3 EFICIENCIA DO PROCESSO DE TORNEAMENTO

No intuito de avaliar a adequação do acabamento alcançado no processo



de usinagem de cada barra, empregou-se um índice (IR) que estabelece uma relação entre o valor da rugosidade teórica como ponto de referência e os valores obtidos experimentalmente. Os valores para  $R_{z;media}$  foram obtidos através da média aritmética das rugosidades  $R_z$  ( $\mu\text{m}$ ) obtidas para cada corpo de prova. O valor de  $R_{th}(\mu\text{m})$  foi encontrado através da equação 7.

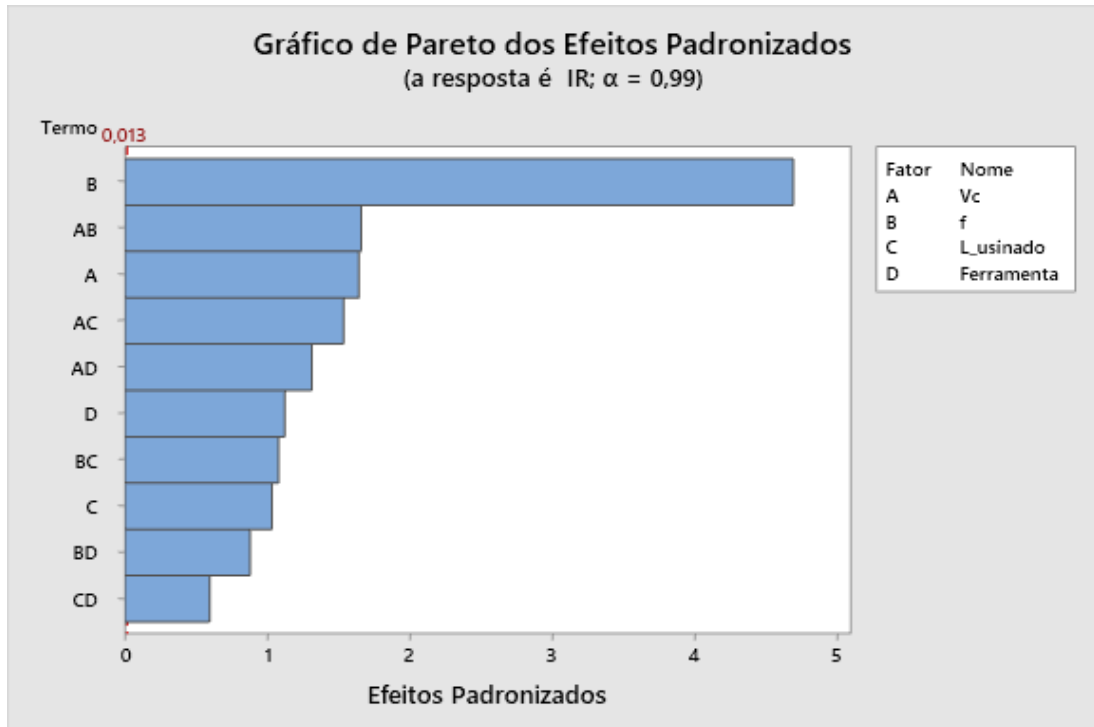
Tabela 4: Matriz dos dados do DOE com quatro fatores e como saída o índice IR e os valores de  $R_{z;media}$  e  $R_{th}$  utilizados para o cálculo do índice.

Barra (n°)	Vc (m/min)	f(mm/rot)	Lusinado (mm)	Ferramenta	$R_{z;media}$ ( $\mu\text{m}$ )	$R_{th}$ ( $\mu\text{m}$ )	IR
1	112	0,1	100	WNMG 080408 - TF	8,691	1,563	5,56
2	223	0,1	100	WNMG 080408 - TF	4,912	1,563	3,14
3	112	0,3	100	WNMG 080408 - TF	10,627	14,063	0,76
4	223	0,3	100	WNMG 080408 - TF	11,587	14,063	0,82
5	112	0,1	200	WNMG 080408 - TF	4,693	1,563	3,00
6	223	0,1	200	WNMG 080408 - TF	6,540	1,563	4,19
7	112	0,3	200	WNMG 080408 - TF	10,977	14,063	0,78
8	223	0,3	200	WNMG 080408 - TF	12,061	14,063	0,86
9	112	0,1	100	80 101 108-8-LA	17,443	1,563	11,16
10	223	0,1	100	80 101 108-8-LA	4,474	1,563	2,86
11	112	0,3	100	80 101 108-8-LA	13,202	14,063	0,94
12	223	0,3	100	80 101 108-8-LA	14,442	14,063	1,03
13	112	0,1	200	80 101 108-8-LA	7,783	1,563	4,98
14	223	0,1	200	80 101 108-8-LA	5,528	1,563	3,54
15	112	0,3	200	80 101 108-8-LA	15,675	14,063'	1,11
16	223	0,3	200	80 101 108-8-LA	13,256	14,063	0,94

Fonte: Do autor (2023)

Analisando o gráfico de Pareto, Figura 12, que mostra as influências dos fatores de usinagem sobre o índice IR, observa-se que o fator avanço (f) se destaca dos demais, seguido da combinação de velocidade de corte e avanço, velocidade de corte sozinha, e combinação da velocidade de corte com os demais fatores de comprimento usinado e o tipo de inserto utilizado. Do segundo ao quarto item a velocidade de corte está presente ou individualmente ou em combinação com os outros fatores, destacando sua influencia.

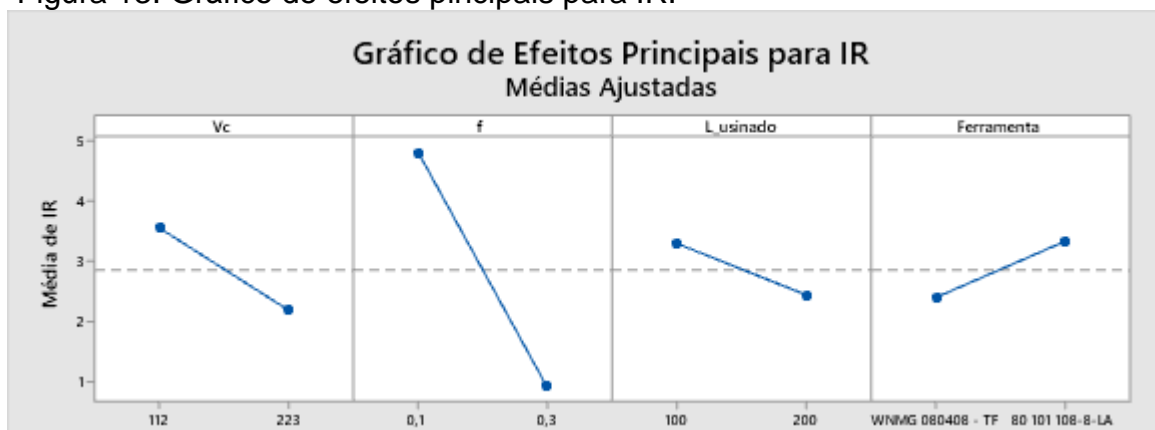
Figura 12: Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados dos 4 fatores sobre a resposta IR.



Fonte: Do autor (2023)

No gráfico de Pareto, Figura 8, a velocidade de corte não demonstrou grande influência sobre a rugosidade  $R_a$ , já no gráfico, Figura 12, pode se observar que a velocidade de corte possui influencia no índice IR, apesar de no cálculo da rugosidade teórica equação 6, o resultado não depender do parâmetro velocidade de corte. Verificando os gráficos de principais efeitos da velocidade de corte sobre  $R_a$ , Figura 11 e sobre IR, Figura 13, mostra que o aumento da velocidade de corte ocasiona uma redução em ambos  $R_a$  e IR.

Figura 13: Gráfico de efeitos principais para IR.



Fonte: Do autor (2023)

Estudos de Oraby e Alaskari (2008), comprovaram que o aumento da velocidade de corte resulta em um aumento do calor gerado na região de contato entre o material a ser removido e a ferramenta. Esse aumento de temperatura tende a tornar o material maleável, reduzindo significativamente a força necessária para cortá-lo. A medida que a velocidade de corte aumenta o atrito diminui e a taxa de deformação aumenta. Isso, por sua vez, leva a uma redução na força necessária, resultando em um processo mais estável ou em uma melhor rugosidade da superfície. Além disso, a taxa de remoção de material e temperatura na interface entre o material a ser removido e a ferramenta, o desgaste da ferramenta também afeta as forças envolvidas. Quando a velocidade de corte é menor, observa-se a presença de picos de rugosidade mais elevados, devido ao atrito intenso e à baixa taxa de deformação do material, ocasionando possível formação de gume postiço e impactando o acabamento superficial.

## 5 CONCLUSÕES

- Os resultados obtidos nesta pesquisa evidenciaram a influência dos parâmetros de usinagem na rugosidade da superfície de barras cilíndricas de SAE 1045 submetidas ao processo de torneamento. Através da análise fatorial, foi possível identificar os principais fatores que afetam a rugosidade superficial, sendo o avanço o fator mais significativo. A velocidade de corte e o comprimento usinado também exerceram alguma influência, embora menos significativa. Observou-se que menores valores de rugosidade foram alcançados com avanços menores, e o uso de velocidades de corte mais altas contribuiu para um acabamento superficial melhor.
- Os perfis de rugosidade das barras usinadas confirmaram a relação entre o avanço empregado e a rugosidade superficial. Conforme o avanço aumenta, ocorre um aumento na rugosidade devido à formação de sulcos helicoidais. Verificou-se que o menor valor de rugosidade foi obtido com o avanço de 0,1mm/rot, velocidade de corte de 223 m/min e o inserto de usinagem 80 101 108-8-LA. Por outro lado, o maior valor de rugosidade foi observado com o avanço de 0,3mm/rot e a velocidade de corte de 112 m/min.
- Ao analisar o índice IR, que relaciona a rugosidade teórica com os valores obtidos, constatou-se que o avanço foi o fator mais influente, seguido pela combinação de velocidade de corte e avanço. A velocidade de corte isoladamente e em combinação com outros fatores também teve impacto no índice IR. De acordo com a literatura o aumento da velocidade de corte reduz a formação de aresta postiça, melhora a qualidade da superfície e promove uma melhor estabilidade da ferramenta de corte.
- Portanto, os resultados deste estudo demonstraram a importância dos parâmetros de usinagem, especialmente o avanço e a velocidade de corte, na obtenção de um acabamento superficial de maior qualidade. A compreensão desses fatores e sua influência na rugosidade superficial podem auxiliar na otimização do processo de usinagem, contribuindo para a melhoria da eficiência e qualidade da usinagem. Esses resultados obtidos contribuem para o aprimoramento dos processos de usinagem e fornecem informações valiosas para a indústria na busca por melhores resultados em termos de rugosidade superficial. Recomenda-se que estudos futuros investiguem outras variáveis e busquem aperfeiçoar ainda mais o processo de usinagem e o acabamento superficial das peças usinadas.

## REFERÊNCIAS

- AMORIM, Heraldo José de. **Estudo da relação entre velocidade de corte, desgaste de ferramenta, rugosidade e forças de usinagem em torneamento com ferramenta de metal duro**. 2002. 131f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PROMEC, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- BIASIBETTI, Guilherme Roberto dos Santos et al. **Análise da rugosidade superficial de barras de aço SAE 1045 após torneamento**. *Matéria* (Rio de Janeiro), v. 24, 2019.
- CAPUTO, Patrick Croko. **Estudo comparativo entre a temperatura no torneamento convencional a seco por imagem termográfica e o modelo analítico de trigger e chão**. 2016. 69f. Monografia de graduação - Universidade de Juiz de Fora – UFJF, Juiz de Fora/MG, Brasil, 2016.
- DAS, S. R. et al. **Optimization of surface roughness in hard turning of AISI 4340 steel using coated carbide inserts**. *International Journal of Information and Computation Technology*, v. 3, n. 9, p. 871-880, 2013.
- DINIZ, Anselmo Eduardo; MARCONDES, Francisco Carlos; COPPINI, Nivaldo Lemes. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 9. ed. São Paulo: Artliber Editora Ltda. 2014.
- FERRARESI, DINO. **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo: Editora Edgard Blucher. 1977.
- KIKUKAWA, Jonathan Kenji et al. **Análise do processo de torneamento em relação a rugosidade superficial do aço SAE 1010**. *Revista Engenharia em Ação UniToledo*, v. 4, n. 2, 2019.
- MACHADO, Álisson Rocha et al. **Teoria da usinagem dos materiais**. Editora Blucher, 2015.
- ORABY, S. E.; ALASKARI, A. M. **Surface topography assessment techniques based on an in-process monitoring approach of tool wear and cutting force signature**. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 30, p. 221-230, 2008.
- SCHHROETER, Rolf Bertrand; WEINGAERTNER, Walter Lindolfo. **Tecnologia da usinagem com ferramentas de corte de geometria definida – Parte I**. Florianópolis: LMP. 2002.
- SOUZA, Luciano de. **Avaliação dos Efeitos dos Parâmetros de Usinagem e dos tratamentos térmicos no torneamento de três aços inoxidáveis austeníticos**. 2006. 130p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

SOUZA, André et al . **Avaliação do acabamento gerado no torneamento do aço AISI 420C com ferramenta wiper para diferentes avanços e profundidades de corte.** 2016 10.20906/CPS/CON-2016-0198.

VELAN, M. Vijaya Ganesa; SHREE, M. Subha; MUTHUSWAMY, Padmakumar. **Effect of cutting parameters and high-pressure coolant on forces, surface roughness and tool life in turning AISI 1045 steel.** Materials Today: Proceedings, v. 43, p. 482-489, 2021.

XIAO, Zeqing et al. **Effect of cutting parameters on surface roughness using orthogonal array in hard turning of AISI 1045 steel with YT5 tool.** The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 93, p. 273-282, 2017.