

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS  
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

SANZIO DE MAGALHÃES CAVALCANTE DINELLI LOPES

COMPARAÇÃO DA RUGOSIDADE EFETIVA VERSUS CALCULADA NO  
TORNEAMENTO E FRESAMENTO DO AÇO SAE 1045

BELO HORIZONTE

2020

SANZIO DE MAGALHÃES CAVALCANTE DINELLI LOPES

COMPARAÇÃO DA RUGOSIDADE EFETIVA VERSUS CALCULADA NO  
TORNEAMENTO E FRESAMENTO DO AÇO SAE 1045

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
no Curso de Graduação em Engenharia de  
Materiais do Centro Federal de Educação  
Tecnológica de Minas Gerais como requisito  
parcial para obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia de Materiais

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo dos Santos

BELO HORIZONTE

2020

SANZIO DE MAGALHÃES CAVALCANTE DINELLI LOPES

COMPARAÇÃO DA RUGOSIDADE EFETIVA VERSUS CALCULADA NO  
TORNEAMENTO E FRESAMENTO DO AÇO SAE 1045

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
no Curso de Graduação em Engenharia de  
Materiais do Centro Federal de Educação  
Tecnológica de Minas Gerais como requisito  
parcial para obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia de Materiais

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Carlos Eduardo dos Santos - Orientador

---

Prof. Msc. Aderci de Freitas Filho

---

Prof. Dr. Rogério Felício dos Santos

## AGRADECIMENTOS

Principalmente ao meu orientador, Carlos Eduardo dos Santos, por ter me dado o incentivo, a orientação e a oportunidade de realizar este trabalho a fim de obter o título de engenheiro.

À Professora Aline Magalhães, pelas aulas e orientações.

A todos que possibilitaram a conclusão deste trabalho direta e indiretamente.

*“A vocês, eu deixo o sono  
o sonho, não!  
Este eu mesmo carrego!”  
- Paulo Leminski.*

## RESUMO

A rugosidade é um parâmetro de acabamento importante nos processos de fabricação por usinagem e é determinado de acordo com a aplicação técnica da superfície usinada. A rugosidade afeta atributos funcionais dos produtos como desgaste, atrito, reflexão da luz, capacidade de manter e espalhar um lubrificante etc. Como a inspeção da superfície é normalmente feita com rugosímetros após a operação de usinagem, essa tarefa consome tempo e demanda trabalho, gerando custo adicional ao produto. Assim, este trabalho tem como objetivo estimar os valores das rugosidades média ( $R_a$ ) e total ( $R_t$ ) geradas nos processos de fresamento e torneamento do aço SAE 1045 calculados por fórmulas e compará-los com os dados obtidos em dois trabalhos realizados por outros autores, a fim de averiguar a eficácia das fórmulas matemáticas usualmente empregadas para a análise da rugosidade. Para tal, determinou-se com rugosímetros as rugosidades médias de um total de 48 amostras, em seguida, com base nos parâmetros de corte empregados, realizou-se o cálculo das rugosidades médias teóricas, junto a isso, estabeleceu-se um parâmetro que correlaciona os dados experimentais e teóricos, onde foi possível averiguar que para superfícies mais rugosas as fórmulas matemáticas se adequam mais ao resultado experimental, além da comprovação da interferência da velocidade de corte no acabamento superficial, sendo que maiores velocidades de corte tenderam a gerar superfícies com um menor valor de rugosidade média total, e a comprovação da interferência do avanço da ferramenta de corte como parâmetro de maior influência na rugosidade média.

Palavras – chave: fresamento; torneamento; rugosidade teórica.

## ABSTRACT

Roughness is an important finishing parameter in manufacturing processes by machining and is determined according to the technical application of the machined surface. Roughness affects functional attributes of products such as wear, friction, light reflection, the ability to maintain and spread a lubricant, etc. As the surface inspection is usually done with rugosimeters after the machining operation, this task is time consuming and labor intensive, generating additional cost to the product. Thus, this work aims to estimate the mean ( $R_a$ ) and total ( $R_t$ ) roughness values generated in the milling and turning processes of SAE 1045 steel calculated by formulas and to compare them with the data obtained in two works carried out by other authors, in order to verify the effectiveness of the mathematical formulas usually used for the analysis of roughness. To do so, the average roughness of a total of 48 samples was determined using rugosimeters, then, based on the cutting parameters used, the calculation of the theoretical average roughness was performed, along with this, a parameter was established that correlates the experimental and theoretical data, where it was possible to ascertain that for rougher surfaces the mathematical formulas are more suited to the experimental result, in addition to proving the interference of the cutting speed in the surface finish, with higher cutting speeds tending to generate surfaces with a lower value of total average roughness, and proof of the interference of the cutting tool advance as a parameter of greater influence on the average roughness.

Keywords: milling; turning; theoretical roughness.

## LISTA DE SÍMBOLOS

Ra - Rugosidade Média [Ra]

Rt - Rugosidade Total

Rz - Rugosidade Média Parcial [Rz]

Vc - Velocidade de Corte

f - Avanço da Ferramenta

ap - Profundidade de Corte

fz - Avanço por Dente

rε - Raio de Quina

Ia - Índice de Rugosidade média teórica/experimental

It - Índice de Rugosidade total teórica/experimental

lm - Comprimento medido

le - Comprimento de amostragem – Cut-off.

lt - Comprimento total

$\alpha$  - Ângulo de folga – Torneamento

$\gamma$  - Ângulo de saída – Torneamento

$\beta$  - Ângulo de cunha - Torneamento

D - Ângulo de folga - Fresamento

C - Ângulo de saída - Fresamento



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Movimentos possíveis no Torno.....	16
Figura 2 - Parâmetros de Torneamento.....	16
Figura 3 - Descrição da ferramenta de corte para torno.....	17
Figura 4 - Ferramenta de corte com vários ângulos de folga $\alpha$ .....	17
Figura 5 - Ferramenta de corte com vários ângulos de saída $\gamma$ .....	18
Figura 6 - Fresamento: (a) tangencial; (b) frontal .....	19
Figura 7 - Fresamento: (a) discordante; (b) concordante .....	20
Figura 8 - Representação dos parâmetros de Fresagem.....	22
Figura 9 - Correlação da eficiência entre diferentes materiais para ferramentas. ....	25
Figura 10 - Estrutura cristalina do grafite e do diamante.....	26
Figura 11 - Fatores de desgaste de uma ferramenta de corte. ....	28
Figura 12 - Estruturas que compõem uma superfície. ....	31
Figura 13 - Perfil efetivo, obtido com impressora de rugosímetro (sem filtrar) .....	32
Figura 14 - Perfil efetivo, obtido com impressora de rugosímetro (filtrado).....	32
Figura 15 - Perfil de avaliação e cut-offs .....	32
Figura 16 - Perfil para cálculo de Ra .....	33
Figura 17 - Perfil para cálculo de Rp .....	34
Figura 18 - Perfil para cálculo de Rv .....	34
Figura 19 - Perfil para cálculo de Rz .....	35
Figura 20 - Perfil para cálculo de Rt.....	35
Figura 21 - Princípio básico de funcionamento dos instrumentos de medição .....	36
Figura 22 - Configuração de montagem da barra a ser usinada (torneamento).....	39
Figura 23 - Posição de leitura da rugosidade para as amostras .....	39
Figura 24 - Dimensões do corpo de prova (fresamento).....	40
Figura 25 – Fresa de topo Mitsubishi APX 3000R.....	41
Figura 26 - Geometria do inserto utilizado no fresamento.....	41
Figura 27 - Avaliação da superfície: medição de rugosidade e regiões de avaliação.....	41
Figura 28 - Fluxograma dos ensaios de torneamento .....	42
Figura 29 - Fluxograma dos ensaios de fresamento .....	42
Figura 30 - Perfil de Rugosidade, amostra 2 .....	44
Figura 31 - Perfil de Rugosidade, amostra 3 .....	44
Figura 32 - Perfil de Rugosidade, amostra 13 .....	45
Figura 33 - Perfil de Rugosidade, amostra 15 .....	45

Figura 34 - Passe 29 ( $r_e = 0,8$ mm, $v_c = 140$ m/min, $f_z = 0,07$ mm) a) perfil da superfície; b) imagem da superfície (ampliação 200 x).....	47
Figura 35 -Passe 34 ( $r_e = 1,2$ mm, $v_c = 110$ m/min, $f_z = 0,08$ mm) a) perfil da superfície; b) imagem da superfície (ampliação 200x).....	47
Figura 36 - Passe 2 ( $r_e = 0,4$ mm, $v_c = 120$ m/min, $f_z = 0,08$ mm) a) perfil da superfície; b) imagem da superfície (ampliação 200 x).....	48
Figura 37 - Passe 14 ( $r_e = 0,4$ mm, $v_c = 140$ m/min, $f_z = 0,08$ mm) a) perfil da superfície; b) imagem da superfície (ampliação 200 x).....	48
Figura 38 - Gráfico de barras de rugosidades médias.....	56
Figura 39 - Gráfico de barras de $I_a$ .....	57
Figura 40 - Gráfico da tendência dos parâmetros.....	59
Figura 41 - Gráfico de correspondência entre Rugosidade Média Teórica em função do Raio de Quina, empregado para 4 valores de Avanço por Dente.....	60
Figura 42 - Gráfico de correspondência entre Rugosidade Média Teórica em função do Avanço por Dente empregado, para 2 valores de Raio de Quina.....	61
Figura 43 - Gráfico da distribuição de $R_a$ para Raio de Quina de 0,4mm.....	62
Figura 44 - Gráfico da distribuição de $R_a$ para Raio de Quina de 0,8mm.....	63
Figura 45 - Gráfico de correspondência entre Rugosidade Total Teórica em função de uma distribuição contínua de valores de avanço por dente.....	64
Figura 46 - Gráfico da distribuição de $R_t$ para Raio de Quina de 0,4mm.....	65
Figura 47 - Gráfico da distribuição de $R_t$ para Raio de Quina de 0,8mm.....	65
Figura 48 - Gráfico de barras de rugosidade média.....	66
Figura 49 - Gráfico de barras do parâmetro $I_a$ .....	66
Figura 50 - Gráfico de barras do logaritmo de $I_a$ .....	67
Figura 51 - Tendência dos grupos 1 ao 4.....	68

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química do aço SAE 1045 .....	15
Tabela 2 - Parâmetros do ensaio de Rugosidade .....	39
Tabela 3 - Dados do Torneamento.....	43
Tabela 4 - Dados do Fresamento .....	46
Tabela 5 - Comparação entre Rugosidades Teóricas e Experimentais no Torneamento	50
Tabela 6 - Comparação entre Rugosidades Teóricas e Experimentais no Fresamento ..	52
Tabela 7 - Aplicação dos parâmetros Ia e It no Torneamento.....	53
Tabela 8 - Aplicação dos parâmetros Ia e It no Fresamento (raio de quina = 0,4mm)...	54
Tabela 9 - Aplicação dos parâmetros Ia e It no Fresamento (raio de quina = 0,8mm)...	55

## Sumário

1. INTRODUÇÃO .....	13
1.1 Objetivos .....	14
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	15
2.1 Aço SAE 1045.....	15
2.2 Processo de Torneamento .....	15
2.3 Processo de Fresamento .....	18
2.5 Ferramenta de Corte .....	23
2.5.1 Características e Propriedades do Material.....	23
2.5.2 Aços Rápidos .....	24
2.5.3 Metal Duro .....	24
2.5.4 Materiais Ultraduros .....	25
2.5.5 Revestimentos para Ferramentas de Corte.....	26
2.6 Mecanismos de Desgaste .....	28
2.7 Rugosidade Superficial .....	30
2.7.1 Definição.....	30
2.7.2 Rugosímetro .....	36
2.7.3 Calculo Teórico .....	37
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	38
3.1 Materiais no Torneamento .....	39
3.2 Materiais no Fresamento.....	40
3.3 Fluxograma dos experimentos .....	42
3.4 Dados Coletados.....	43
3.4.1 Torneamento .....	43
3.4.2 Fresamento .....	46
3.5 Cálculo Teórico Aplicado .....	49
3.5.1 Torneamento .....	49
3.5.2 Fresamento.....	51
3.6 Parâmetro Ia e It .....	53
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	56
4.1 Torneamento.....	56
4.2 Fresamento .....	60
5. CONCLUSÕES .....	69
REFERÊNCIAS .....	71

## 1. INTRODUÇÃO

As principais demandas no caso das tecnologias de corte incluem: redução do tamanho e peso dos componentes, aprimoramento da qualidade superficial, tolerâncias e precisão de manufaturas, reduzindo custos e tamanhos de lotes (BYRNE, 2003). A rugosidade superficial de partes mecânicas é uma das características da qualidade do produto mais importantes. É o fator principal na avaliação da qualidade de um produto e tem grande importância na funcionalidade de componentes mecânicos assim como no custo de produção.

A falta de boa qualidade da superfície pode acarretar em desgastes por atrito, oxidação precoce e dificuldade de lubrificação, enquanto um nível extremamente alto de qualidade da superfície causa custos de produção mais altos e menor produtividade geral das operações de corte. A qualidade desejada da superfície é uma restrição crítica na seleção dos parâmetros de corte ideais no processo de produção (MACHADO *et al.*, 2009). Portanto, é de grande importância quantificar a relação entre a rugosidade da superfície e as condições de corte.

O fenômeno do desgaste da ferramenta, estudado por um grande número de cientistas, influencia diretamente a qualidade da superfície usinada (MACHADO *et al.*, 2009). A rugosidade da superfície também influencia as características tribológicas, a resistência à fadiga, a resistência à corrosão e a aparência estética das peças usinadas. Por outro lado, o acabamento da superfície no processo de torneamento é influenciado por vários fatores, como: velocidade de corte, taxa de avanço, profundidade de corte, características do material, geometria da ferramenta, estabilidade e rigidez da máquina-ferramenta - ferramenta de corte - sistema de peças de trabalho, aresta incorporada, fluido de corte, etc. Portanto, a qualidade ideal da superfície não pôde ser alcançada, mesmo nas condições ideais de corte e ambiente.

A rugosidade da superfície sempre se refere ao desvio da superfície nominal. O perfil real da superfície é a superposição dos erros de forma, ondulação e rugosidade. Existem vários parâmetros usados para avaliar a rugosidade da superfície.

Os processos de torneamento e fresamento são uns dos mais fundamentais entre vários processos de corte, e também são as operações de remoção de metal mais aplicadas no ambiente real de fabricação. Para obter a melhor rugosidade superficial possível, muitos operadores de máquinas-ferramenta confiam em sua própria experiência e/ou na diretrizes fornecidas nos manuais e manuais de máquinas-ferramenta. Também observa-se que operadores experientes de máquinas-ferramenta usam abordagem de tentativa e erro, estimando a qualidade da superfície comparando visualmente as superfícies reais da peça usinada com aqueles no calibrador de medição (BIASIBETTI, 2019).

Para atingir uma maior exatidão no que diz respeito aos parâmetros de rugosidade superficiais, existem fórmulas matemáticas que aproximam a rugosidade real das peças usinadas com uma rugosidade teórica calculada a partir dos parâmetros de corte empregados. Torna-se interessante, portanto, analisar a eficácia das fórmulas existentes com dados experimentais coletados.

## **1.1 Objetivos**

Objetivo Geral:

Comparar a rugosidade teórica calculada com a rugosidade real obtida por meio de ensaios de fresamento e torneamento realizados em dois distintos trabalhos acadêmicos, realizando assim um estudo de caso pontual.

Objetivos Específicos:

- Comparar a rugosidade calculada com a efetiva no torneamento do aço 1045 no trabalho de Guilherme Biasibetti.
- Comparar a rugosidade calculada com a efetiva no fresamento do aço 1045 no trabalho de Henrique Hübner
- Correlacionar a formação da rugosidade com a velocidade de corte
- Correlacionar a formação da rugosidade com o avanço de corte
- Correlacionar a rugosidade com o raio de quina

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Aço SAE 1045

Segundo a *Society of Automotive Engineers* (SAE). O aço 1045 é um aço com médio teor de carbono em sua composição química. A resistência mecânica deste se encontra entre 570 e 700 MPa e dureza Brinell entre 170 e 210HB. É um aço que possui razoável usinabilidade e boas propriedades mecânicas na condição normalizada ou laminada, além de ser de pouca temperabilidade. Usado em componentes estruturais e de máquinas, virabrequim, eixos, engrenagens comuns, peças forjadas. (LUZ, 2017).

**Tabela 1 - Composição química do aço SAE 1045**

ABNT/SAE	C	Mn	S	P	Fe
1045	0,42 - 0,50	0,60 – 0,90	0,05 (max)	0,04 (max)	Restante.

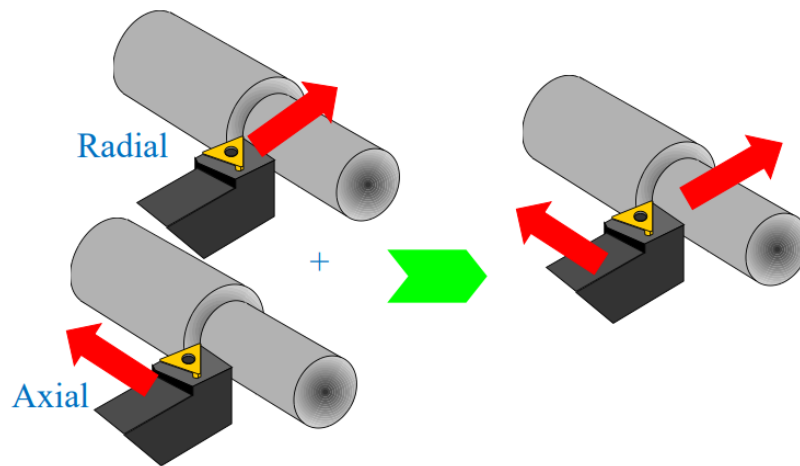
Fonte: Adaptado de ABNT NBR NM 87 (1996)

### 2.2 Processo de Torneamento

Torneamento pode ser definido como um processo mecânico de usinagem, destinado à obtenção de superfícies de revolução com o auxílio de uma ou mais ferramentas monocortantes, é o processo de usinagem para superfícies cilíndricas externas e cônicas, o processo usa uma máquina-ferramenta denominada torno. (JASINEVICIUS, 2019).

A peça é rotacionada em um eixo e a ferramenta é avançada radialmente, axialmente ou simultaneamente em ambas direções (Figura 1), para gerar a superfície desejada, sendo que quando existe a composição dos dois movimentos, forma-se os parâmetros de corte e movimento (JASINEVICIUS, 2019).

**Figura 1 - Movimentos possíveis no Torno**



Fonte: JASINEVICIUS, 2019.

Os parâmetros ajustáveis principais envolvidos neste processo estão ilustrados na Figura 2 e são:

Velocidade de corte ( $V_c$ ):

Taxa na qual a superfície não cortada da peça passa pela aresta de corte da ferramenta, expressa normalmente em  $[m/min]$ .

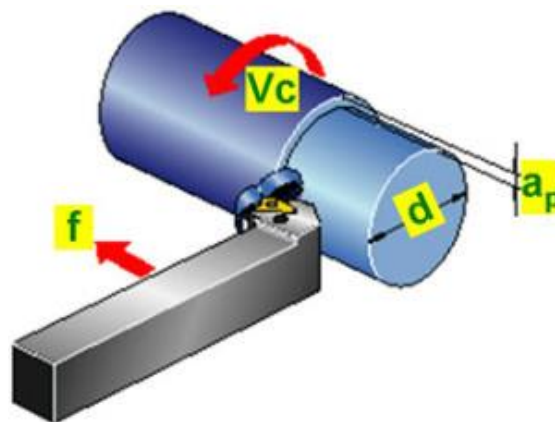
Velocidade de avanço ( $f$ ):

Velocidade de deslocamento da ferramenta em cada volta de  $360^\circ$  de uma peça (avanço em  $[mm/rotação]$ ), ou por unidade de tempo (avanço em  $[mm/minuto]$ ).

Profundidade de corte ( $a_p$ ):

Profundidade de penetração da ferramenta medida perpendicularmente ao plano de trabalho, que é definido pelas direções de avanço e velocidade da ferramenta (MACHADO *et al.*, 2009).

**Figura 2 - Parâmetros de Torneamento**



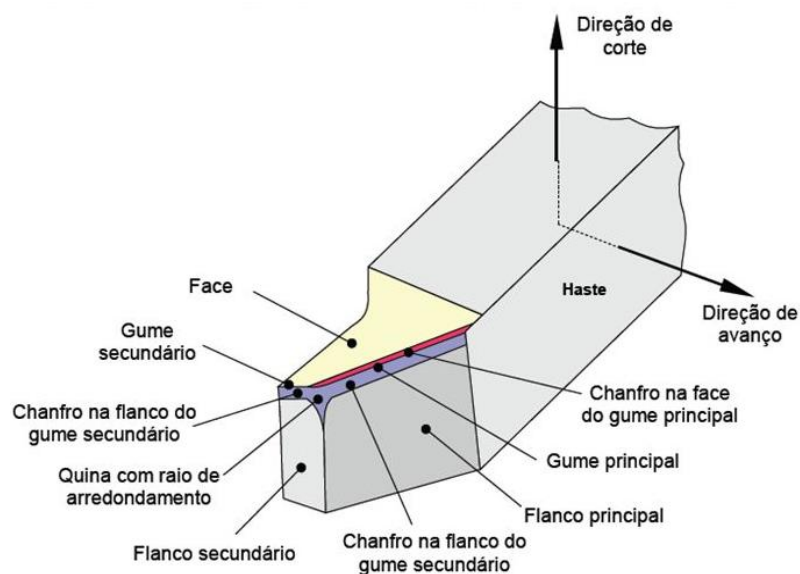
Fonte: Portal Cad.Curso, 2020.



Na Figura 3 é possível ver as regiões que compõem a ferramenta de corte para a operação em torno, a ferramenta como um todo sofre avarias com o uso, entretanto, devido a esforços de atrito as regiões de gume e flanco principais tendem a sofrer mais com a operação de usinagem (MACHADO *et al.*, 2009).

O raio de quina ( $r\epsilon$ ) se encontra na interseção do gume principal e secundário. Em conjunto com o avanço, ele define a rugosidade do componente usinado, além de também influenciar nas vibrações, estabilidade do gume e forças passivas. O raio de gume define a espessura mínima de usinagem e a capacidade de corte (KRATOCHVIL, 2020).

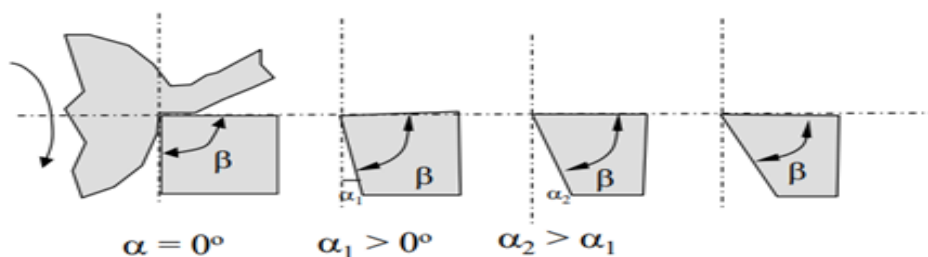
**Figura 3 - Descrição da ferramenta de corte para torno.**



Fonte: SENAI / FIEMG, 2020.

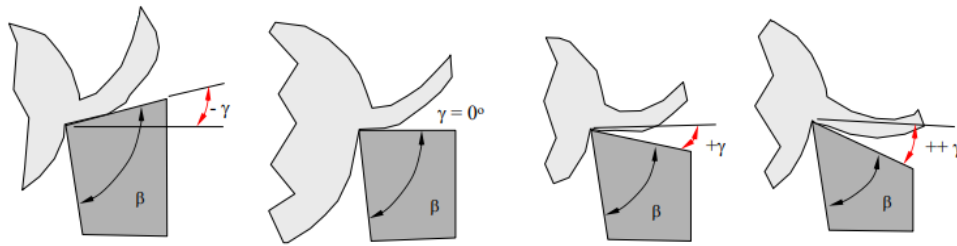
O atrito gerado entre a ferramenta de corte e a peça usinada também está muito relacionada ao ângulo formado entre a superfície em rotação e a posição da ferramenta de corte, como pode ser visto nas Figuras 4 e 5.

**Figura 4 - Ferramenta de corte com vários ângulos de folga  $\alpha$**



Fonte: JASINEVICIUS, 2019.

**Figura 5 - Ferramenta de corte com vários ângulos de saída  $\gamma$**



Fonte: JASINEVICIUS, 2019.

Onde:

$\alpha$  – Ângulo de folga, responsável por gerar maior ou menor atrito entre a superfície de folga e a superfície recém formada e pode melhorar a estabilidade da aresta. Geralmente varia de  $2^\circ$  a  $12^\circ$  (JASINEVICIUS, 2019).

$\gamma$  – Ângulo de saída, responsável pela formação do cavaco, diminuindo ou aumentando o atrito do cavaco com a superfície de saída, resultando em mudança no ângulo do plano de cisalhamento. Isso implica em redução ou aumento nas forças de corte. Geralmente varia de  $-10^\circ$  a  $20^\circ$  (JASINEVICIUS, 2019).

$\beta$  – Ângulo de cunha, que garante a rigidez da ferramenta principalmente se esta estiver submetida a solicitações pesadas. (HÜBNER, 2016)

Vale salientar que a seguinte igualdade sempre é válida:

$$\alpha + \beta + \gamma = 90^\circ$$

### 2.3 Processo de Fresamento

O fresamento é um processo de usinagem utilizado para obter superfícies de várias formas por meio do uso de ferramentas multicortantes (fresas) providas de arestas cortantes situadas simetricamente em torno de um eixo. No processo, a fresa gira e o material a ser usinado ou a ferramenta se desloca segundo uma trajetória qualquer, conferindo forma e dimensão desejadas ao material (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2013; FERRARESI, 1970).

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

Este processo apresenta as seguintes vantagens:

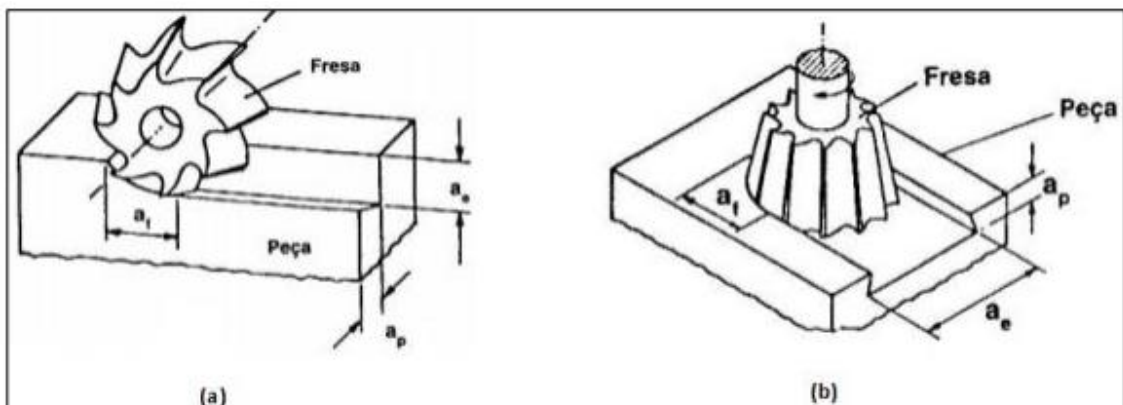
O fresamento possui uma operação mais eficiente do que o aplainamento, alta taxa de remoção de cavaco, grande variedade e flexibilidade de máquinas;

Capacidade de gerar uma grande variedade de formas e superfícies, qualidade do acabamento superficial, larga aplicação na usinagem de peças graças a diversidade de tipos de ferramentas de corte;

Apresenta maior capacidade de remoção de cavaco do que o processo de retificação, que é uma usinagem por abrasão, utilizado para obter superfícies com auxílio de ferramentas de revolução.

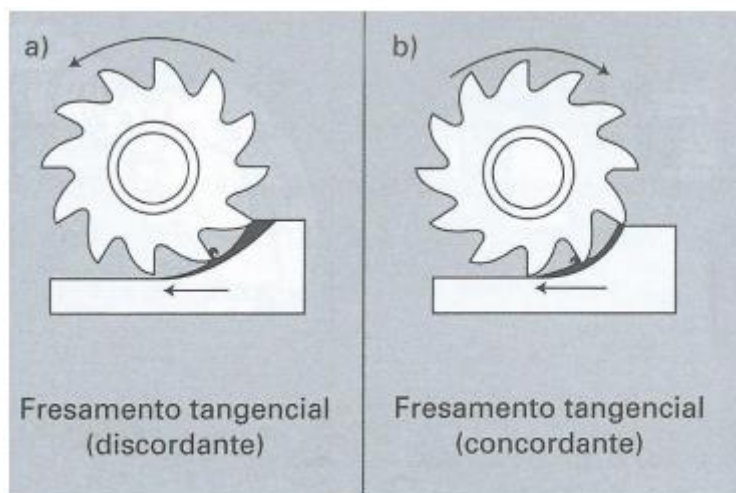
O processo de fresamento se divide basicamente em fresamento cilíndrico tangencial (Figura 6a) e fresamento frontal (Figura 6b). No entanto, ele também pode ser dividido de acordo com o movimento relativo peça-ferramenta, em relação ao sentido de corte e avanço, como discordante (Figura 7a) e concordante (Figura 7b) (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013; FERRARESI 1970).

**Figura 6 - Fresamento: (a) tangencial; (b) frontal**



Fonte: DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013.

**Figura 7 - Fresamento: (a) discordante; (b) concordante**



Fonte: DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013.

Segundo Diniz *et al.*, (2013) o fresamento frontal ou de topo é utilizado para obter-se superfícies planas que se encontram posicionadas perpendicularmente ao eixo de rotação da fresa. Nessas operações, os dentes ativos da fresa estão na superfície frontal da ferramenta. A escolha entre o tipo de fresamento vai depender da relação entre profundidade e largura do rasgo, e da máquina disponível.

Segundo Machado *et al.*, (2009) ao usinar uma superfície é necessário providenciar um movimento relativo adequado entre a ferramenta e a peça. Para isso, alguns parâmetros de corte devem ser determinados antes do processo de usinagem, como:

Velocidade de corte ( $V_c$ ):

Para o processo de fresamento, onde os movimentos de avanço e de corte ocorrem concomitantemente, é definida como a velocidade tangencial instantânea, que resulta da rotação da ferramenta em torno da peça. Neste processo, é necessário ter cuidado ao escolher a velocidade de corte, pois ela tem maior influência no desgaste da ferramenta que os demais parâmetros, além de exercer influência sobre a temperatura de corte visto que, o aumento desta grandeza faz com que aumente a força de impacto entre a aresta de corte e a peça (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Avanço por dente ( $f_z$ ):

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

Velocidade de avanço ( $V_f$ ):

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

Profundidade de usinagem ( $A_p$ ):

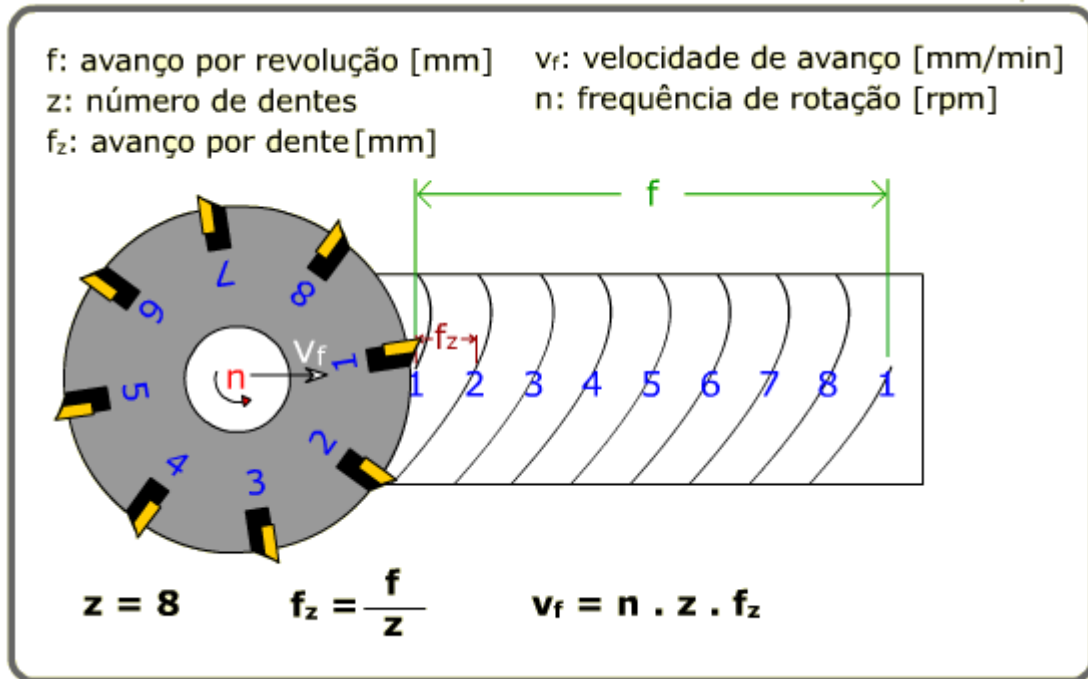
É a diferença entre a superfície usinada e não usinada na direção axial.  $A_p$  máximo é limitado principalmente pelo tamanho da pastilha e a potência da máquina (Figura 6a e 6b). Outro fator crítico em operações de desbaste é o torque e a vibração nas operações de acabamento (SANDVIK COROMANT, 2020).

Raio de quina ( $r_\epsilon$ ):

Assim como no torneamento, o raio de quina na fresa ou no inserto está definido entre os gumes cortantes, principal e secundário e também influencia nas vibrações, estabilidade do gume e rugosidade da peça acabada (KRATOCHVIL, 2020).

Os parâmetros elencados anteriormente podem ser vistos na Figura 8, representados esquematicamente.

Figura 8 - Representação dos parâmetros de Fresagem



Fonte: Portal CIMM, 2020.

## 2.5 Ferramenta de Corte

### 2.5.1 Características e Propriedades do Material

Segundo Stoeterau (2020), indústrias que fabricam ferramentas de usinagem (torneamento e fresamento) realizam diversos esforços para desenvolver ferramentas cada vez mais adequadas às exigências do mercado. Basicamente, uma ferramenta de usinagem deve obter tais propriedades fundamentais:

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

Para Ferraresi, (1970), objetivando obter maior eficiência no processo de usinagem é necessário determinar qual é o material ideal a ser utilizado como ferramenta de corte. Além das características supracitadas, a seleção deste material depende de diversos fatores, entre outros, como:

- A natureza da operação de usinagem;
- Material a ser usinado;
- Forma e dimensões da própria ferramenta;
- Condição da máquina ferramenta;
- Custo do material para ferramenta;

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

- Aços rápidos;
- Metal duro;
- Nitreto de boro cúbico (Materiais Ultraduros);
- Diamante (Materiais Ultraduros).

### **2.5.2 Aços Rápidos**

Taylor e White, em 1898, desenvolveram o primeiro aço-rápido, contendo 18,91% W, 5,47% Cr, 0,11% Mn, 0,67% C, 0,29% V e o tratamento térmico apropriado. A prática de usinagem na época foi revolucionada por esta descoberta, tendo como resultado um grande aumento de produtividade. Graças a isso, foi possível aumentar as velocidades de corte em mais de 15 vezes, passando de 3 a 5 m/min com as ferramentas de aço carbono para 30 a 35 m/min com as de aço-rápido (STOETERAU, 2020).

Devido a esse aumento de velocidade de corte, este aço foi denominado “aço-rápido” (HSS – *High Speed Steel*). Apesar destes valores serem relativamente baixos comparados com ferramentas dos dias atuais, este grupo de materiais ainda é muito empregado, apesar de haver mais de um século de sua descoberta (COELHO; JANONNE, 2018).

Os aços-rápidos possuem várias aplicações em brocas, fresas inteiriças, cossinetes, brochas, e até ferramentas de barras para aplicações em torneamentos de peças de diâmetros reduzidos, podendo atingir uma velocidade de corte inferior à velocidade econômica de corte dos materiais mais resistentes (COELHO; JANONNE, 2018).

### **2.5.3 Metal Duro**

A descoberta do aço-rápido acarretou no primeiro grande impulso na área dos materiais para ferramentas de corte, o segundo com o metal duro. As velocidades de corte puderam ser aumentadas em praticamente dez vezes com o desenvolvimento deste (de 35 m/min com os aços-rápidos para 250 - 300 m/min) (COELHO; JANONNE, 2018).

A descoberta desta classe aconteceu por volta de 1920, quando Schröter conseguiu produzir em laboratório o carboneto de tungstênio, WC, em pó pela primeira vez. A mistura deste pó principalmente com o cobalto, também em pó, trouxe ao mercado, em 1928, este que é um dos mais revolucionários grupos de materiais para ferramentas de corte. (COELHO; JANONNE, 2018).

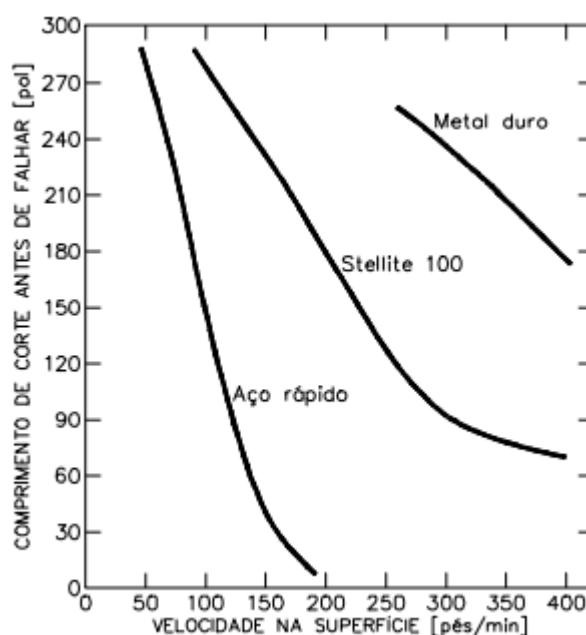
Devido às excelentes propriedades de dureza e resistência ao desgaste desse material, passou a ser chamado de “widia” (da língua alemã, de wie diamant = como o diamante), referindo-se à semelhança das propriedades desse material com as do diamante. O carboneto de tungstênio, fabricado pelo processo de metalurgia do pó



possui uma excelente combinação de resistência ao desgaste, resistência mecânica e tenacidade (COELHO; JANONNE, 2018).

O material em questão se mostrou muito eficiente na usinagem de ferros fundidos cinzentos, como pode ser visto pela Figura 9, mas com baixa resistência ao desgaste na superfície de saída usinando aços, sofrendo o desgaste denominado “craterização”. Para superar esta deficiência, pesquisas logo se iniciaram, concluindo que a adição de TiC, TaC e/ou NbC aos WC+Co reduziriam no problema de craterização durante a usinagem dos aços (COELHO; JANONNE, 2018).

**Figura 9 - Correlação da eficiência entre diferentes materiais para ferramentas.**



Fonte: COELHO; JANONNE, 2018.

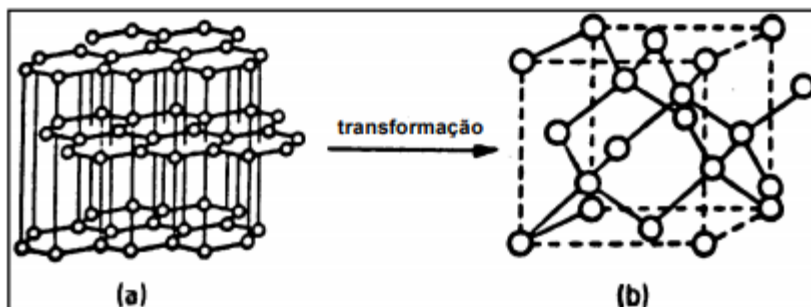
#### 2.5.4 Materiais Ultraduros

Normalmente materiais com dureza superior a 3000 HV (Dureza Vickers) são denominados ultraduros. Como ferramentas de corte de material ultraduro é possível citar o Nitreto de Boro Cúbico e o Diamante.

O diamante natural foi usado como ferramenta de corte por vários anos, devido ao fato de ser o material de maior dureza na natureza, além de possuir excelente condutividade térmica. As ferramentas de diamante natural são usadas principalmente quando se requer super-acabamento nos componentes usinados. Acabamentos superficiais da ordem de  $R_a=25\text{nm}$  (Rugosidade média) podem ser obtidos com estas ferramentas (COELHO; JANONNE, 2018).

Já o diamante sintético é obtido sujeitando o carbono, na forma de grafite a temperaturas e pressões extremamente altas (da ordem de 2.000°C e 7 GPa). Como grafite, os átomos de carbono se organizam na forma hexagonal (Figura 10a), mas após a sintetização se transforma em diamante, possuindo uma estrutura cúbica de face centrada (CFC) (Figura 10b) (COELHO; JANONNE, 2018).

**Figura 10 - Estrutura cristalina do grafite e do diamante**



Fonte: COELHO; JANONNE, 2018.

De maneira similar e pouco tempo depois de se obter o diamante sintético o hBN (nitreto hexagonal de boro) também foi transformado em cBN (nitreto cúbico de boro). Assim como a grafite, o hBN é frágil e escorregadio, enquanto o cBN é duro e resistente ao desgaste em menor escala que o diamante, mas superior às cerâmicas (COELHO; JANONNE, 2018).

### **2.5.5 Revestimentos para Ferramentas de Corte**

Ferrarasi (2013), afirma que os revestimentos possuem menor coeficiente de atrito o que permite a redução dos esforços durante o corte, garantindo também proteção térmica e menor desgaste por oxidação, por possuir alta dureza e maior resistência termomecânica.

Segundo Stoterau (2020), ferramentas revestidas tendem a possuir benefícios melhorados de performance, além de permitirem maiores velocidades de corte, atingindo o potencial das máquinas de corte modernas. Atualmente, os tipos de revestimentos mais usados são: TiC, TiN, TiCN, TiAlN e o AlCrN. Todos apresentam peculiaridades como cor, dureza, espessura, aplicabilidade e desempenho. As principais características de cada um deles podem ser observadas a seguir:

Carboneto de titânio (TiC)

É um material quimicamente inativo que oferece resistência ao desgaste, podendo formar um bloqueio químico e térmico entre o cavaco e a ferramenta. Devido à

redução do atrito e menor condutividade térmica, permite uma redução na temperatura no gume, diminuindo a taxa de difusão e conservando a ferramenta.

#### Nitreto de titânio (TiN)

Apresenta uma ligação interna mais forte do que o TiC em função da sua estabilidade química, tendo uma menor tendência à difusão na usinagem dos aços.

#### Nitreto de titânio e alumínio (TiAlN)

Segundo Stoeterau (2020), a cobertura de Nitreto de titânio alumínio é uma técnica na qual ocorre a substituição de átomos de alumínio por titânio, garantindo maior resistência ao desgaste, oxidação e estabilidade química. Apresenta elevada resistência à oxidação atribuída à formação de uma camada externa de óxido de alumínio e uma interna de óxido de titânio composto na interface entre o revestimento e o substrato.

#### Carbonitreto de titânio (TiCN)

Devido à presença combinada de TiC e TiN, possui resistência ao desgaste e química, resistindo principalmente ao fenômeno de craterização e à oxidação. É empregado geralmente na usinagem dos ferros fundidos (STOETERAU, 2020).

#### Óxido de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

Dentre vários revestimentos, o Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> apresenta a menor tolerância de aderência ao substrato do metal duro, porém, é altamente adequado à oxidação, aconselhável para usinagem em altas velocidades de corte. Apresenta alta resistência à abrasão e à difusão (KÖNIG; KLOCKE, 1997).

#### Nitreto de cromo de alumínio (AlCrN)

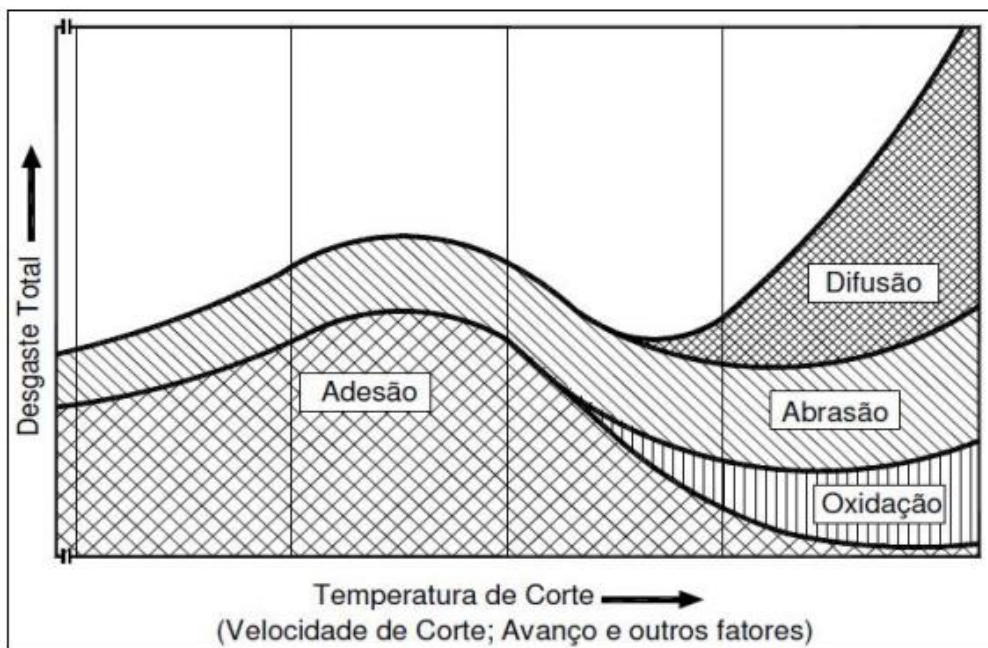
É um revestimento de alto rendimento, não contém titânio e faz parte de uma nova geração de coberturas. Possui elevada resistência à oxidação e dureza a quente. Devido a isto, este produto possui uma incomparável resistência ao desgaste. Quando empregar-se este tipo de revestimento, a eficiência das ferramentas nas máquinas modernas pode ser largamente explorada (OERLIKON; BALZERS, 2013).

## 2.6 Mecanismos de Desgaste

As formas de desgaste ocorrem por vários mecanismos, sendo as principais a abrasão, adesão, difusão e oxidação, estas ocorrem em função da temperatura de corte, sendo principalmente influenciada pela velocidade de corte. Pode-se observar os mecanismos de adesão e abrasão em baixas temperaturas, sendo a adesão predominante. Em temperaturas elevadas, a adesão perde lugar para mecanismos de difusão e oxidação em escala exponencial (STOETERAU, 2020).

Os sistemas de desgaste da ferramenta de corte ocorrem ao mesmo tempo, o que dificulta a detecção da sua causa e efeito. Conforme mostrado na Figura 11, a dinâmica de cada um dos mecanismos de desgastes está associada à temperatura de corte durante a usinagem.

**Figura 11 - Fatores de desgaste de uma ferramenta de corte.**



Fonte: KÖNIG; KLOCKE, 1997.

Segundo Sandvik (2020), os principais mecanismos de desgaste são:

**Abrasão:**

Ocorre devido ao deslizamento entre a peça e a ferramenta, provocando desprendimento de partículas do material. Ocorre repetidamente devido às partículas duras do material da peça, além do aumento da temperatura de corte que diminui a dureza do material da ferramenta. A resistência à abrasão depende basicamente da dureza a quente da ferramenta de usinagem. (KÖNIG; KLOCKE, 1997).

#### Adesão:

Ocorre devido a ruptura dos micro-caldeamentos na ferramenta, ocasionado por ação da temperatura e pressão presentes na região de corte. Pode ser observada a partir da análise do cavaco recém-retirado devido ao fato de não conter camadas protetoras de óxido, mostrando-se muito ativa quimicamente. O gume postiço é um exemplo da adesão do material nas superfícies da ferramenta. As partículas micro-caldeadas, representam barreiras para o escoamento do cavaco sobre a superfície da ferramenta. Provocando o arranque das partículas soldadas, levando muitas vezes, pedaços do material de corte, causando então o fim da vida da ferramenta, precocemente. A escolha correta do fluido de corte e de ferramentas revestidas, pode reduzir este tipo de desgaste. (KÖNIG; KLOCKE, 1997).

#### Gume postiço:

É motivado pelo caldeamento do material da peça na face da ferramenta, logo assume a finalidade do gume a partir da situação no qual o material agarrado se deforma e encrua, elevando-se a dureza, com o fluxo posterior de cavacos. Fragmentos do gume postiço podem se desprender e escorregar, decorrente dos parâmetros de corte utilizados. Conduzindo ao desgaste exagerado do flanco por abrasão e um aumento da rugosidade. Parte do material pode-se prender a superfície da ferramenta aumentando os esforços de corte. (KÖNIG; KLOCKE, 1997).

#### Difusão:

Ocorre devido à temperatura na região de corte, iniciando-se pela instabilidade que as moléculas adquirem. A manifestação deste mecanismo decorre das propriedades químicas do material da ferramenta e da peça, sendo decisivas. Algumas ferramentas são projetadas para evitarem a interação química. A difusão depende de altas temperaturas, o que corresponde dizer que ela está ligada às altas velocidades de corte. (KÖNIG; KLOCKE, 1997).

#### Oxidação:

Ocorre em elevadas temperaturas e em ambientes arejados, onde forma-se carepas. O metal duro, cuja temperatura de oxidação varia de 700 e 800°C, está mais sujeito à oxidação quando composto somente de carboneto de tungstênio e cobalto. Os acréscimos de óxido de titânio e outros carbonetos reduzem seu acontecimento. A presença de  $Al_2O_3$  tende a minimizar este tipo de desgaste, protegendo a ferramenta e aumentando sua vida útil (KÖNIG; KLOCKE, 1997).

## 2.7 Rugosidade Superficial

### 2.7.1 Definição

O estudo do acabamento superficial é de grande valia, dado que as superfícies são requisitadas devido a atrito, desgaste, corrosão, resistência à fadiga, entre outros. A maior parte dos estudos de usinagem que buscam analisar a qualidade das peças produzidas analisam a topografia deixada nestas peças. Esta topografia das peças produzidas denomina-se rugosidade e é caracterizada como erros microgeométricos, sendo um resultado do processo de usinagem (AGOSTINHO *et al.*, 1981).

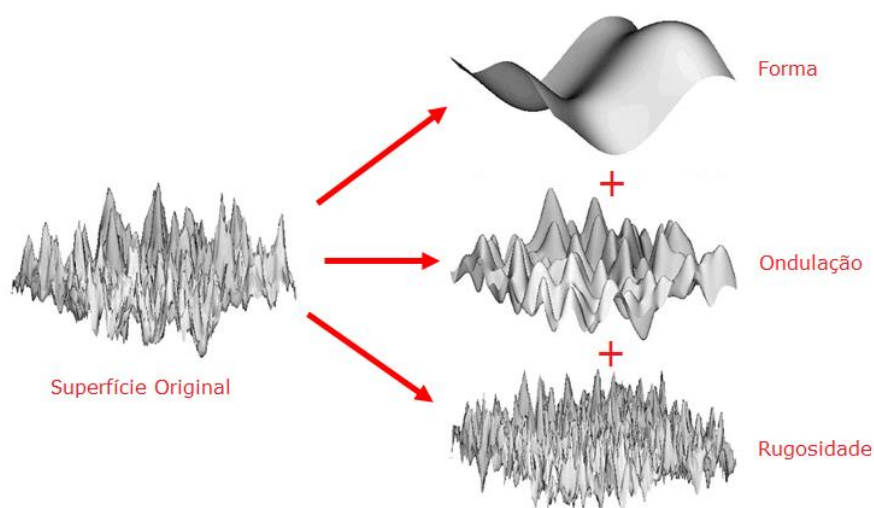
As superfícies de peças apresentam irregularidades quando observadas de perto, sempre após um tipo de usinagem. Estas por sua vez, causam imperfeições ou marcas deixadas pela ferramenta de corte que atuam sobre a superfície da peça. Partindo disso vê-se a importância do estudo do acabamento superficial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

É de suma importância o acabamento superficial para avaliar a produtividade de máquinas e ferramentas, além de componentes usinados, pois o comportamento das partes mecânicas depende de uma boa interação entre superfícies, na busca de uma funcionalidade adequada (BERNARDOS; VOSNIAKOS, 2003).

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

Uma superfície é na realidade composta por três componentes: forma, ondulação e rugosidade. Forma é a componente mais grosseira, portando sendo mais fácil sua observação, uma peça pode ter diversas formas. Se aproximando dessa superfície, vê-se que ela também possui diversas ondulações, as quais são constituídas de estruturas ainda menores, pequenos picos e vales, que representam a rugosidade da peça, esta divisão está representada na Figura 12 (JOSSO *et al.*, 2002).

Figura 12 - Estruturas que compõem uma superfície.



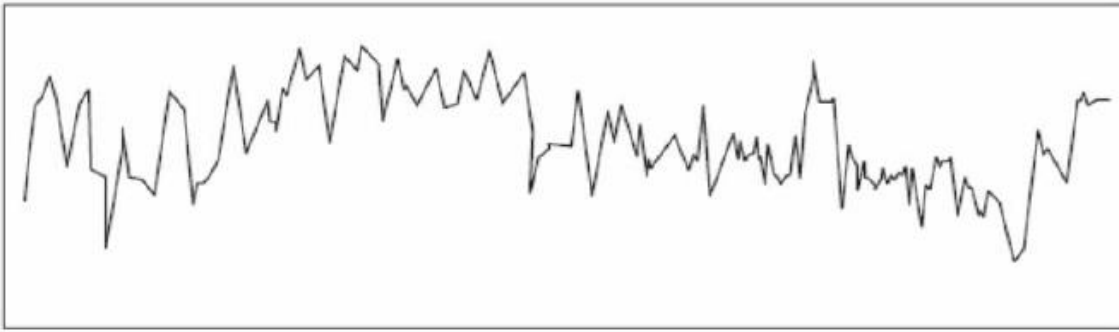
Fonte: JOSSO *et al.*, 2002. (Adaptado)

A análise de superfície é de suma importância, visto que ela influencia em diversas propriedades do componente. Propriedades como resistência à corrosão, ao desgaste e à fadiga de uma determinada peça, podem ser alterados pelo acabamento superficial, além também do coeficiente de atrito característico da peça e de propriedades reflexivas (SANTOS; SALES, 2007).

Para a análise dos parâmetros de rugosidade, é necessária antes que seja obtido um perfil de rugosidade prévio de uma determinada amostra de interesse (Figura 13) e em seguida, que seja feito a filtragem das ondulações (Figura 14), para que se possa ter uma superfície reta.

A rugosidade pode ser medida mecânica ou opticamente, dividindo-se a região medida ( $lm$ ) em cinco sub-regiões ( $le$ ) e calculando um linha média para o perfil, para a qual a área dos picos acima e abaixo da linha é igual (Figura 15) (JOSSO *et al.*, 2002).

**Figura 13 - Perfil efetivo, obtido com impressora de rugosímetro (sem filtrar)**



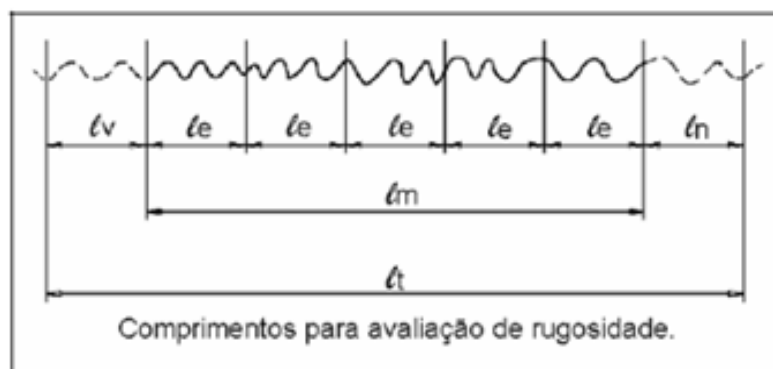
Fonte: SANTOS, C. E., 2016.

**Figura 14 - Perfil efetivo, obtido com impressora de rugosímetro (filtrado)**



Fonte: SANTOS, C. E., 2016.

**Figura 15 - Perfil de avaliação e cut-offs**



Fonte: JOSSO *et al.*, 2002.

$le$  = comprimento da amostragem

$lm$  = comprimento medido

$lt$  = comprimento total



Do perfil de rugosidade exposto na Figura 15, é possível calcular diversos parâmetros para representar a rugosidade da superfície, sendo os principais:

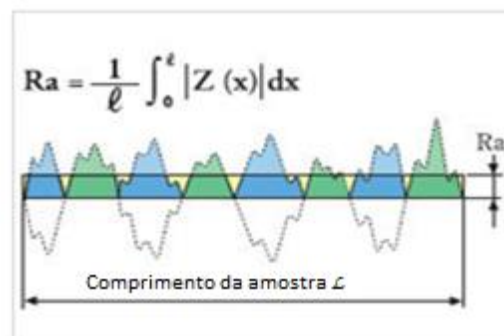
- Rugosidade média (Ra):

Este parâmetro corresponde à média aritmética dos valores, em módulo, das ordenadas de afastamento em relação à linha média nos pontos do perfil de rugosidade, dentro do percurso de medição ( $l_m$ ). Esta grandeza pode ser matematicamente descrita como a altura de um retângulo, cuja área corresponde à soma das áreas delimitadas entre o perfil de rugosidade e a linha média, sendo o comprimento, o percurso de medição ( $l_m$ ) (SANTOS; SALES, 2007).

Portanto, integrando os valores absolutos dos desvios em relação a uma variação infinitesimal no percurso de medição e dividindo pelo comprimento do percurso para alcançar um resultado normalizado. (SANTOS; SALES, 2007).

Operacionalmente, pode-se projetar a superfície que se encontra abaixo da linha média para cima desta mesma, como visto na Figura 16, e calcula-se a média desses novos valores;

**Figura 16 - Perfil para cálculo de Ra**

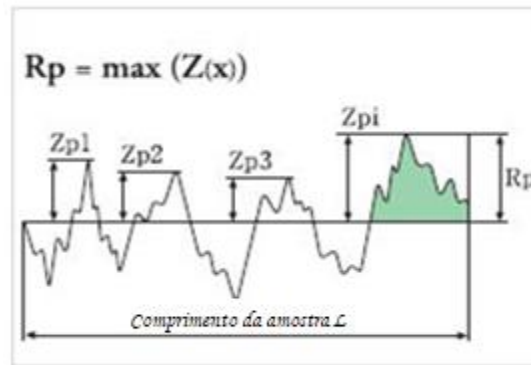


Fonte: JOSSO *et al.*, 2002 (Adaptado).

- Altura máxima de pico ( $R_p$ ):

Equivale à maior ordenada de pico ao longo do comprimento medido ( $lm$ ) calculando-se em relação à linha média, como visto na Figura 17.

**Figura 17 - Perfil para cálculo de  $R_p$**

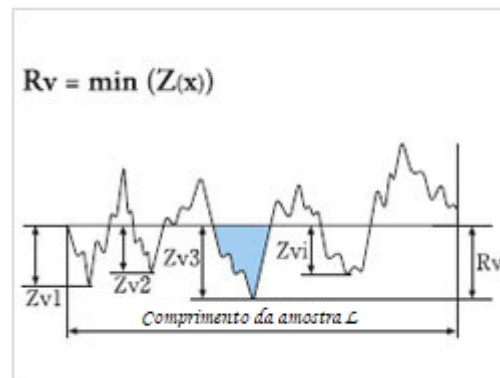


Fonte JOSSO *et al.*, 2002 (Adaptado).

- Profundidade máxima de vale ( $R_v$ ):

Assemelha-se ao parâmetro  $R_p$ , entretanto tendo como ordenadas os vales, ou seja, regiões abaixo da linha média, visto na Figura 18.

**Figura 18 - Perfil para cálculo de  $R_v$**

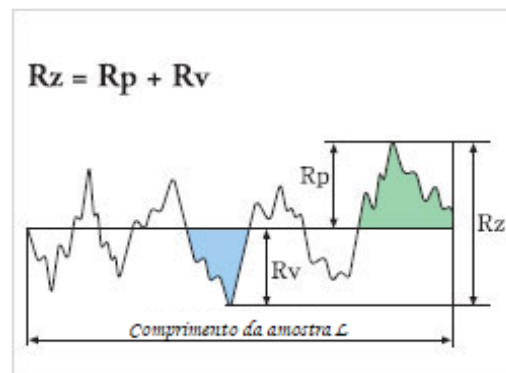


Fonte: JOSSO *et al.*, 2002 (Adaptado).

- Altura máxima do perfil de rugosidade ( $R_z$ ):

Corresponde à adição de  $R_p$  e  $R_v$ , ou seja, à distância entre o maior vale e o maior pico ao longo do comprimento, devem pertencer a uma região de amostragem  $l_e$  (cut-off) especificamente, e não a todo comprimento de medição, como visto na Figura 19.

Figura 19 - Perfil para cálculo de  $R_z$

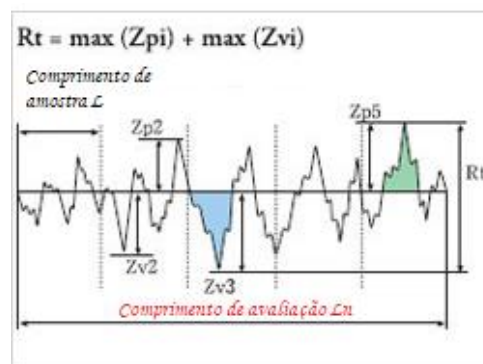


Fonte: JOSSO *et al.*, 2002 (Adaptado).

- Altura total do perfil de rugosidade ( $R_t$ ):

Está definida como a diferença vertical entre o maior pico e o maior vale dentro do comprimento total de avaliação. Diferente do  $R_z$ , o parâmetro  $R_t$  leva em consideração do percurso total de amostragem.

Figura 20 - Perfil para cálculo de  $R_t$



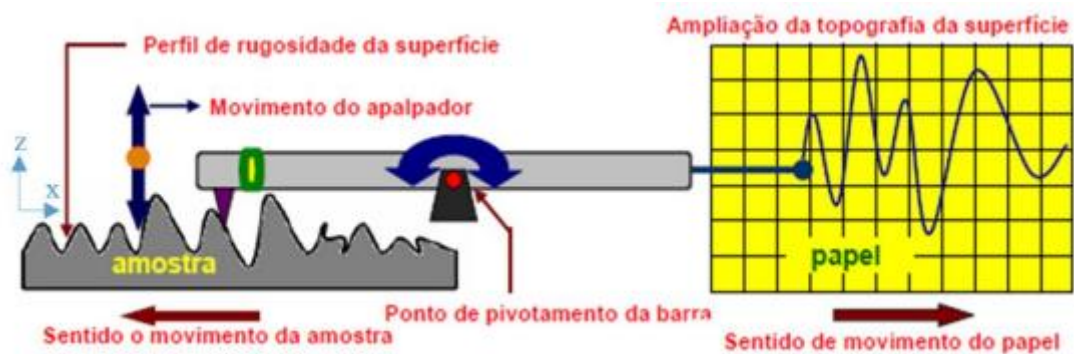
Fonte: Josso *et al.*, 2002 (Adaptado).

### 2.7.2 Rugosímetro

É denominado rugosímetro o aparelho empregado na medição de parâmetros de rugosidade (com ou sem contato entre o apalpador e a peça). A medição com contato é a mais utilizada por ser mais simples, versátil e ter menor custo (MACHADO *et al.*, 2009). Na medição com contato, o equipamento consiste de um apalpador que percorre em linha reta uma distância previamente definida denominada comprimento total ( $l_t$ ).

O deslocamento vertical do apalpador é convertido em sinal elétrico e então amplificado. O resultado pode ser apresentado na forma numérica, pelo gráfico do perfil que representa a superfície analisada e há, ainda, a possibilidade de utilizar filtros para eliminar a influência das ondulações (SANTOS; SALES, 2007). A Figura 21 ilustra o princípio de funcionamento de medição da rugosidade com contato.

**Figura 21 - Princípio básico de funcionamento dos instrumentos de medição**



Fonte: SANTOS; SALES, 2007.

### 2.7.3 Cálculo Teórico

Para o estudo da rugosidade calculada, as seguintes fórmulas são descritas segundo Machado *et al.*, 2009:

$$Ra(th) = \frac{f^2 \cdot 1000}{18\sqrt{3} \cdot r\epsilon} \quad (Ra - \text{Torneamento}) \quad (I)$$

$$Rt(th) = \frac{f^2 \cdot 1000}{r\epsilon \cdot 8} \quad (Rt - \text{Torneamento}) \quad (II)$$

$$Ra(th) = \frac{r\epsilon}{2} - \sqrt{\frac{r\epsilon^2}{4} - \left(\frac{fz}{4}\right)^2} \quad (Ra - \text{Fresamento de topo}) \quad (III)$$

$$Rt(th) = \frac{fz}{\tan(C) + \cotan(D)} \quad (Rt - \text{Fresamento de topo}) \quad (IV)$$

Os parâmetros de entrada do cálculo de rugosidade Ra e Rt são:

$f$  = avanço

$fz$  = avanço por dente

$r\epsilon$  = raio de quina

$C$  = ângulo de saída

$D$  = ângulo de folga

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este tópico trata dos materiais empregados nos casos estudados de referência para as comparações neste trabalho. Vale ressaltar que os dados utilizados advêm dos trabalhos de Henrique Butzlaff Hübner, “ESTIMAÇÃO DA RUGOSIDADE GERADA NO PROCESSO DE FRESAMENTO FRONTAL VIA REDES NEURAIAS ARTIFICIAIS” e de Guilherme Roberto dos Santos Biasibetti, “ANÁLISE DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL DE BARRAS DE AÇO SAE 1045 APÓS TORNEAMENTO”. Sendo o primeiro relativo ao processo de fresamento e o segundo relativo ao processo de torneamento.

Ambos os trabalhos buscaram analisar a influência dos parâmetros de movimento e de corte em seus respectivos processos, sendo que para o trabalho de Biasibetti, analisou-se a influência dos parâmetros: ângulo de saída, raio de quina, velocidade de corte, avanço por rotação da peça. Para isso, o autor realizou 16 experimentos onde para cada parâmetro empregou 2 possíveis valores, obtendo-se assim  $2^4 = 16$  amostras, como dito anteriormente.

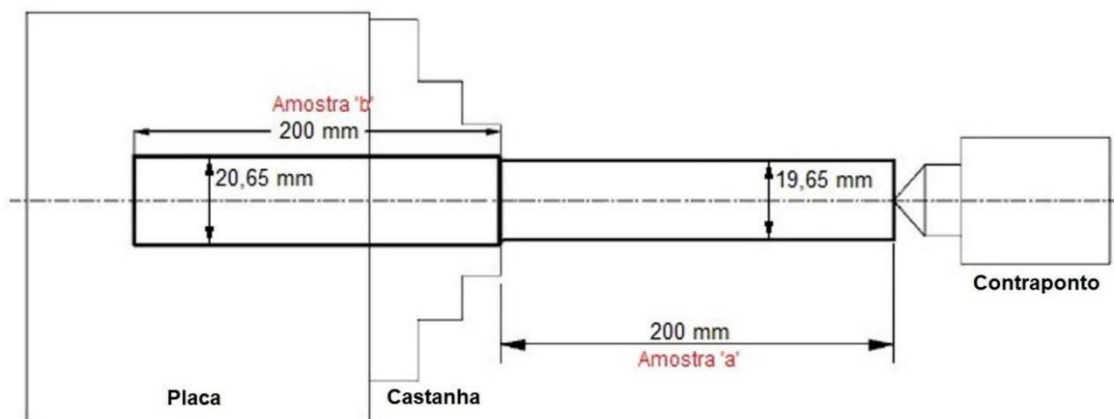
Para o trabalho de Hübner, analisou-se os parâmetros: raio de quina, velocidade de corte e avanço por dente. O autor empregou 4 possíveis valores para cada parâmetro, totalizando assim um total de  $4^3 = 64$  amostras. Entretanto, neste presente trabalho, serão considerados apenas metade dos possíveis valores empregados no raio de quina, fazendo assim com que sejam considerados, para efeito de estudo,  $64/2 = 32$  amostras.

Tanto no processo de fresamento quanto no processo de torneamento, foram utilizados rugosímetros portáteis da marca Mitutoyo modelo SJ-201, por ambos pesquisadores. No processo de fresamento frontal a seco, foi utilizado o aço SAE 1045 com fresa de topo reto de metal-duro em um centro de usinagem Romi Discovery 308 e para o processo de torneamento também foi utilizado aço SAE 1045 em um torno de controle numérico computadorizado (CNC) Romi 30D.

### 3.1 Materiais no Torneamento

Para o processo de torneamento, os materiais utilizados por Biasibetti foram barras de aço SAE 1045 trefiladas, recebidas com raio de 10,325 mm e comprimento de 6 m. Em laboratório, as barras longas foram cortadas, utilizando serra fita, em amostras de 400 mm de comprimento. Descartou-se 0,40 m de cada extremidade das barras de 6 m devido a propriedades distintas do restante do material.

Figura 22 - Configuração de montagem da barra a ser usinada (torneamento).



Fonte: BIASIBETTI, 2019.

Figura 23 - Posição de leitura da rugosidade para as amostras



Fonte: BIASIBETTI, 2019.

A Tabela 2 revela os parâmetros empregados para a leitura do rugosímetro utilizado.

Tabela 2 - Parâmetros do ensaio de Rugosidade

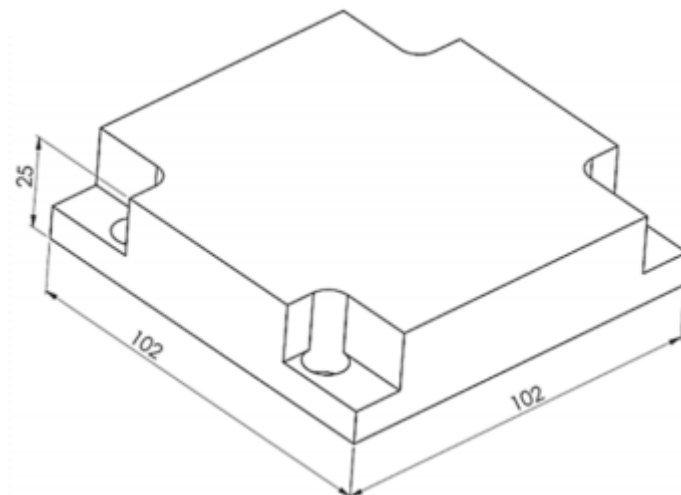
PARÂMETRO	VALOR
Percurso de medição ( $l_m$ )	4 mm
Número de amostragens	5
Comprimento de amostragem ( $l_e$ )	0,8 mm
Cut-off	0,8 mm

Fonte: BIASIBETTI, 2019.

### 3.2 Materiais no Fresamento

Para o processo de fresamento realizado por Hübner, O corpo de prova foi laminado e normalizado, em seguida cortado em amostras de 102 x 102 x 25 mm e furado para a fixação na plataforma piezelétrica.

**Figura 24 - Dimensões do corpo de prova (fresamento)**



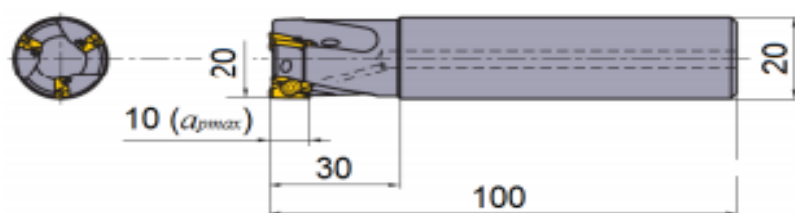
**Fonte: HUBNER, 2016.**

A ferramenta de corte utilizada por Hübner (fresa de topo), foi constituída de um suporte para insertos intercambiáveis da marca Mitsubishi (Figura 26) com a especificação APX3000R. Esta ferramenta tem diâmetro de 20 mm, haste cilíndrica e fixação mecânica por pinça. Possui acomodação para três pastilhas com ângulo de posição de 90°.

No caso, foram utilizadas quatro combinações de insertos de metal duro com raios de ponta ( $r\epsilon$ ) distintos da marca Mitsubishi. As demais dimensões dos insertos mantiveram-se constantes. A cobertura do inserto é feita de nitreto de titânio e alumínio (TiAlN), material que propicia uma grande força de adesão do substrato à ferramenta, aumentando assim sua vida.

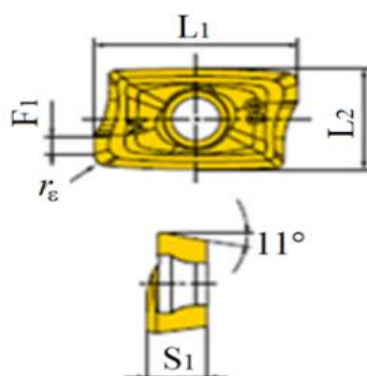


**Figura 25 – Fresa de topo Mitsubishi APX 3000R**



Fonte: HUBNER, 2016.

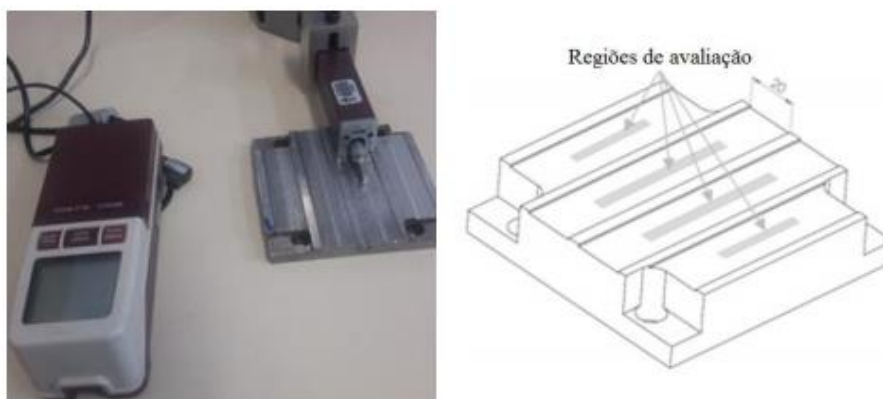
**Figura 26 - Geometria do inserto utilizado no fresamento**



Fonte: HUBNER, 2016.

O ângulo D de folga é de  $11^\circ$ , como o ângulo de posição é de  $90^\circ$ , o ângulo C será o complementar de  $11^\circ$ , portanto  $79^\circ$ . É de crucial importância para este trabalho o conhecimento do ângulo de saída e de folga no processo de fresamento, uma vez que este dado será utilizado posteriormente para o cálculo de rugosidade total teórica no processo.

**Figura 27 - Avaliação da superfície: medição de rugosidade e regiões de avaliação**

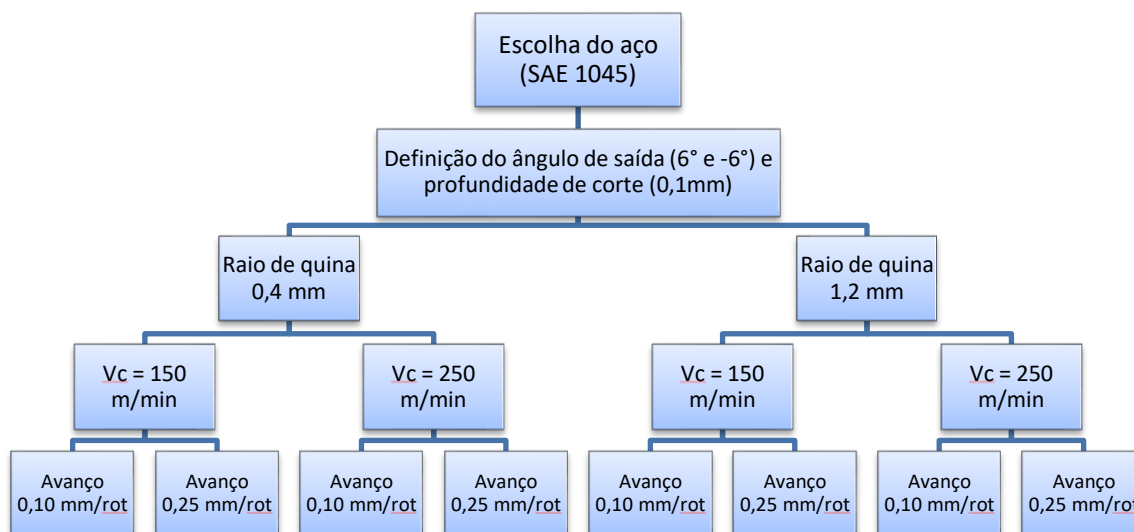


Fonte: HUBNER, 2016.

### 3.3 Fluxograma dos experimentos

O fluxograma a seguir representa a divisão de parâmetros analisados para o processo de torneamento:

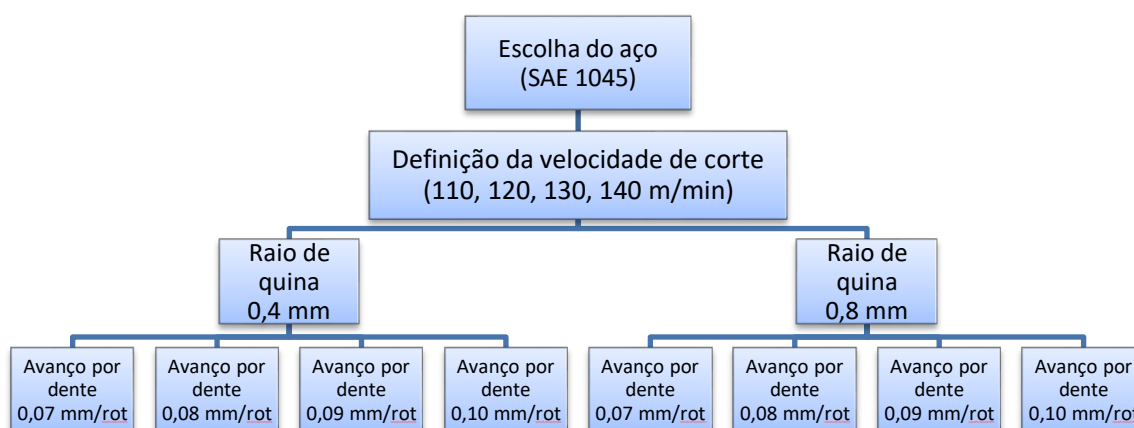
Figura 28 - Fluxograma dos ensaios de torneamento



Fonte: Produzido pelo autor

O fluxograma a seguir representa a divisão de parâmetros analisados para o processo de fresamento:

Figura 29 - Fluxograma dos ensaios de fresamento



Fonte: Produzido pelo autor

### 3.4 Dados Coletados

#### 3.4.1 Torneamento

Para o processo de torneamento, obteve-se os seguintes dados experimentais para Ra e Rz segundo o experimento de Biasibetti:

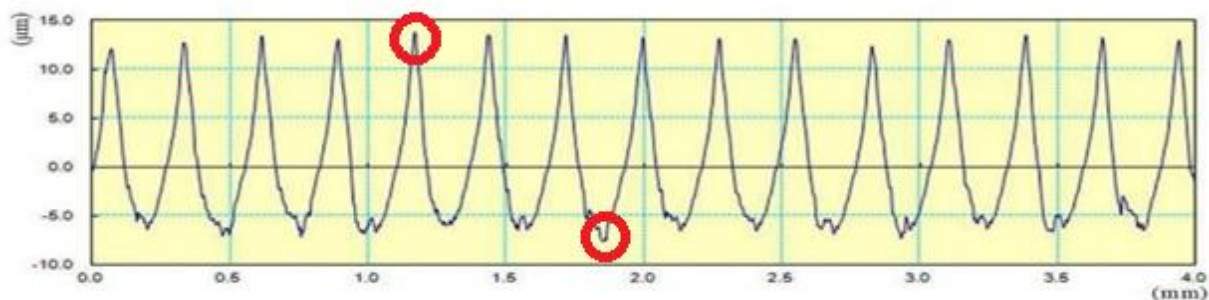
**Tabela 3 - Dados do Torneamento**

Barra (n°)	Ângulo de Saída (°)	Raio de quina (mm)	Vel. de Corte (m/min)	Avanço (mm/rot)	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Rz ( $\mu\text{m}$ )
1	6	0,4	150	0,10	2,546	12,062
2				0,25	4,960	20,958
3			250	0,10	0,976	5,525
4				0,25	4,902	20,449
5		1,2	150	0,10	3,553	18,292
6				0,25	4,303	19,592
7			250	0,10	2,043	8,788
8				0,25	1,555	8,066
9	-6	0,4	150	0,10	2,028	12,181
10				0,25	4,974	19,810
11			250	0,10	1,420	6,990
12				0,25	4,817	19,195
13		1,2	150	0,10	2,682	15,096
14				0,25	1,292	8,226
15			250	0,10	3,016	8,605
16				0,25	1,169	6,614

Fonte: BIASIBETTI, 2019 (Adaptado).

Os valores de Rt (Rugosidade total) não foram tabelados no trabalho de Biasibetti, apenas algumas amostras tiveram esse parâmetro estipulado pelo mesmo, estas estão mostradas abaixo:

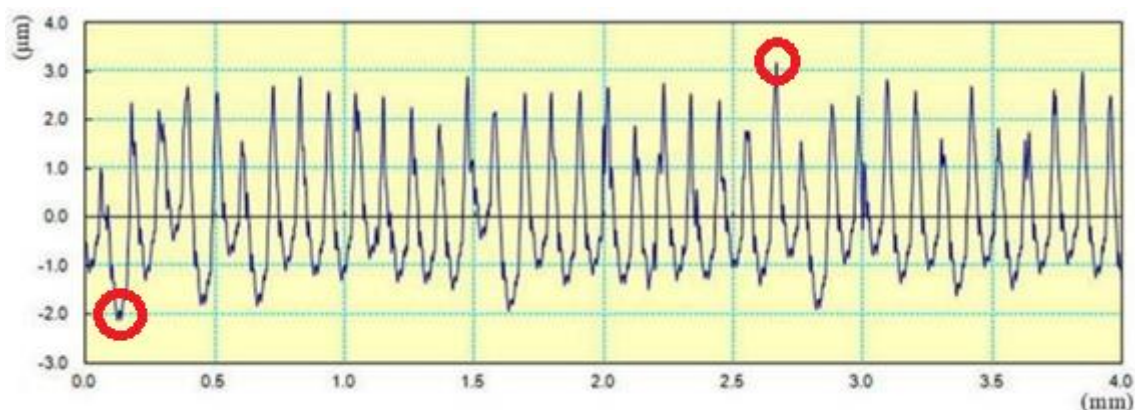
**Figura 30 - Perfil de Rugosidade, amostra 2**



Fonte: BIASIBETTI, 2019 (Adaptado).

O perfil de rugosidade da Figura 30 refere-se à amostra 2, onde se pode ver que o maior valor de avanço da ferramenta de corte acarretou em picos mais espaçados e de maior largura, quando comparado com o perfil da amostra 3 (Figura 31), onde um menor avanço foi empregado. Nota-se também o valor de  $R_t$  correspondente a aproximadamente 20 micrômetros.

**Figura 31 - Perfil de Rugosidade, amostra 3**

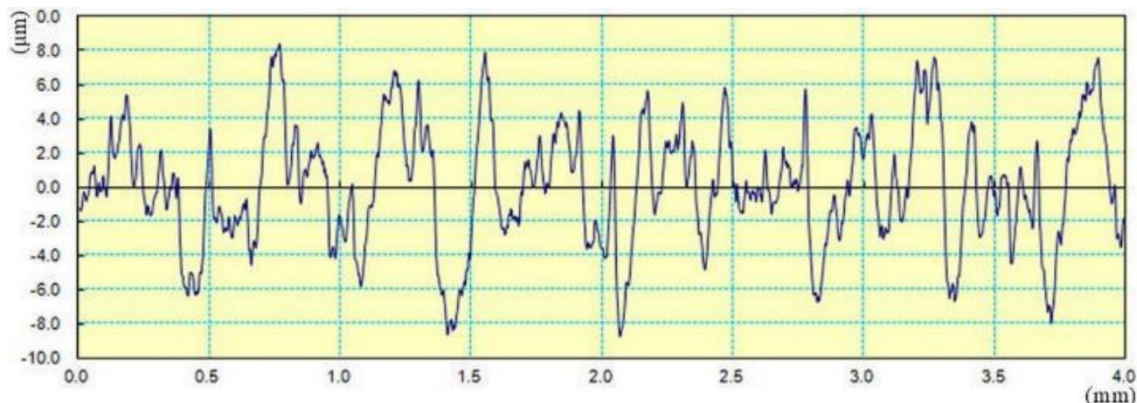


Fonte: BIASIBETTI, 2019 (Adaptado).

O perfil de rugosidade da Figura 31 (referente à amostra 3, dito anteriormente), revela que o valor de  $R_t$  é de aproximadamente 5 micrômetros. Nesta amostra, diferente da amostra 2, empregou-se um avanço de 0,10mm/rot e velocidade de corte de 250m/min, ao invés dos valores 0,25mm/rot e 150m/min empregados na amostra 2.

O menor valor de avanço se torna evidente com a aproximação dos picos e vales na amostra 3 em relação à 2. Já a redução do valor de  $R_t$  pode se embasar na ação conjunta da redução do avanço e de uma maior velocidade de corte.

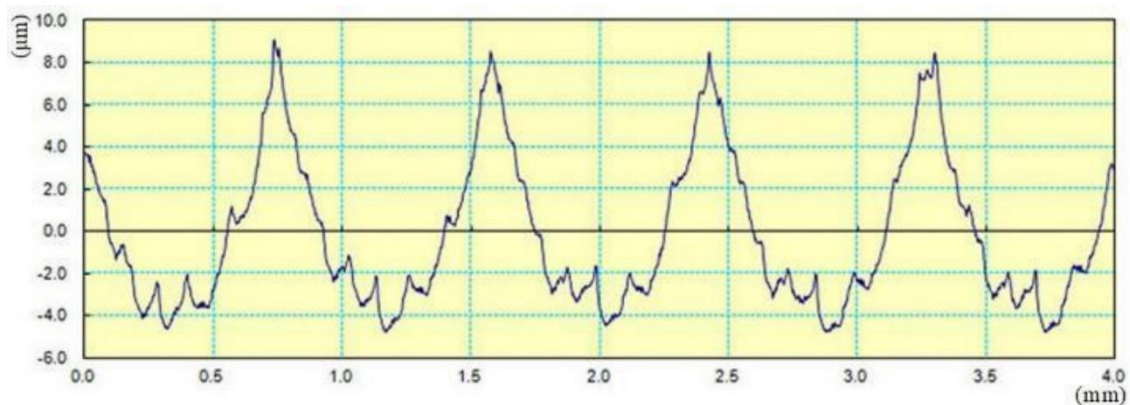
**Figura 32 - Perfil de Rugosidade, amostra 13**



Fonte: BIASIBETTI, 2019 (Adaptado).

A Figura 32 refere-se à amostra de número 13, nela foram empregados um ângulo de saída negativo ( $-6^\circ$ ) um raio de quina maior do que nos exemplos anteriores (1,2 mm) uma velocidade de corte baixa (150m/min) e um avanço de 0,10 mm, percebe-se que o acabamento foi muito irregular e que o  $R_t$  se aproxima de 16 micrômetros.

**Figura 33 - Perfil de Rugosidade, amostra 15**



Fonte: BIASIBETTI, 2019 (Adaptado).

A Figura 33 refere-se à amostra de número 15, nesta os parâmetros de corte foram iguais ao da amostra 13, somente alterando-se o valor da velocidade de corte de 150m/min para 250m/min, pode-se notar que a regularidade da superfície foi superior ao da amostra 13, formando picos mais grossos e contribuindo para reduzir o  $R_t$ , passando a ser de aproximadamente 12 micrômetros, entretanto ainda assim obteve um maior valor de rugosidade média  $R_a$ .

Isto dá um indício de que o aumento da velocidade de corte pode contribuir mais para a redução do valor de  $R_t$  do que para a redução do  $R_a$ .

### 3.4.2 Fresamento

Para o processo de fresamento, os dados experimentais obtidos por Hübner estão dispostos na Tabela 4 abaixo, vale ressaltar que estão apresentados uma fração dos dados coletados.

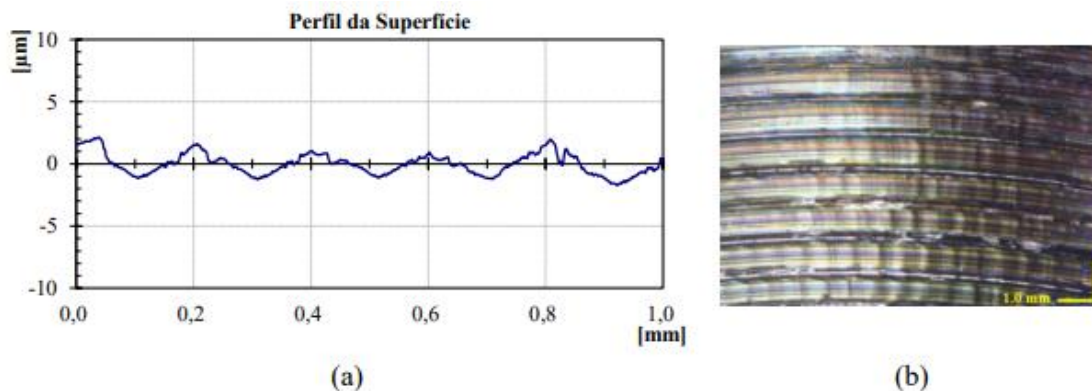
**Tabela 4 - Dados do Fresamento**

Passe	Raio de quina (mm)	Vc (m/min)	Fz (mm/rot)	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Rt ( $\mu\text{m}$ )
1	0,4	110	0.07	1.92	13
2			0.08	1.48	11.61
3			0.09	1.74	12.89
4			0.1	1.43	11
5		120	0.07	1.29	10.08
6			0.08	1.27	9.63
7			0.09	1.18	9.02
8			0.1	1.18	8.5
9		130	0.07	1.44	10.52
10			0.08	1.2	10.05
11			0.09	1.13	8.72
12			0.1	0.91	6.78
13		140	0.07	1.12	9.72
14			0.08	0.99	10.69
15			0.09	0.84	6.27
16			0.1	0.97	6.53
17	0,8	110	0.07	0.97	8.09
18			0.08	1.41	14.67
19			0.09	1.53	12.94
20			0.1	2.19	17.54
21		120	0.07	0.78	6.4
22			0.08	0.96	7.4
23			0.09	1.48	11.23
24			0.1	1.35	10.4
25		130	0.07	0.75	5.68
26			0.08	1.17	9.82
27			0.09	0.98	8.4
28			0.1	1.23	11.19
29		140	0.07	0.63	3.64
30			0.08	0.84	4.85
31			0.09	0.94	9.87
32			0.1	1.31	12.41

Fonte: HÜBNER, Henrique.

**Figura 34 - Passe 29 ( $r_e = 0,8$  mm,  $v_c = 140$  m/min,  $f_z = 0,07$  mm)**

**a) perfil da superfície; b) imagem da superfície (ampliação 200x).**

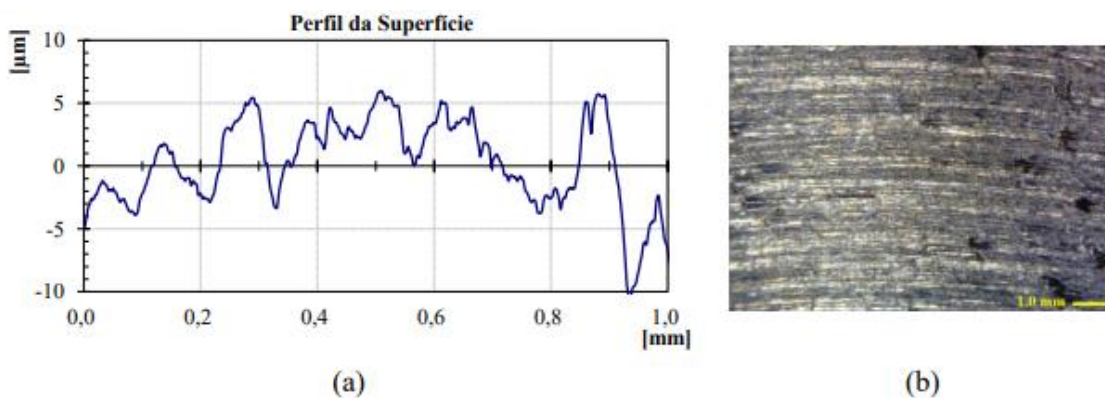


Fonte: HÜBNER, Henrique.

A Figura 34(a) revela o perfil medido da superfície para o passe onde se obteve os menores valores de  $R_a$  e  $R_t$  com o inserto  $r_e = 0,8$  mm. Segundo Hübner, é possível notar que os valores das ordenadas para os picos e os vales são relativamente baixos em comparação com outros passes. Já na Figura 34(b) observa-se que a superfície fresada praticamente não apresentou rebarbas, corroborando com o detectado pelo rugosímetro.

**Figura 35 -Passe 34 ( $r_e = 1,2$  mm,  $v_c = 110$  m/min,  $f_z = 0,08$  mm)**

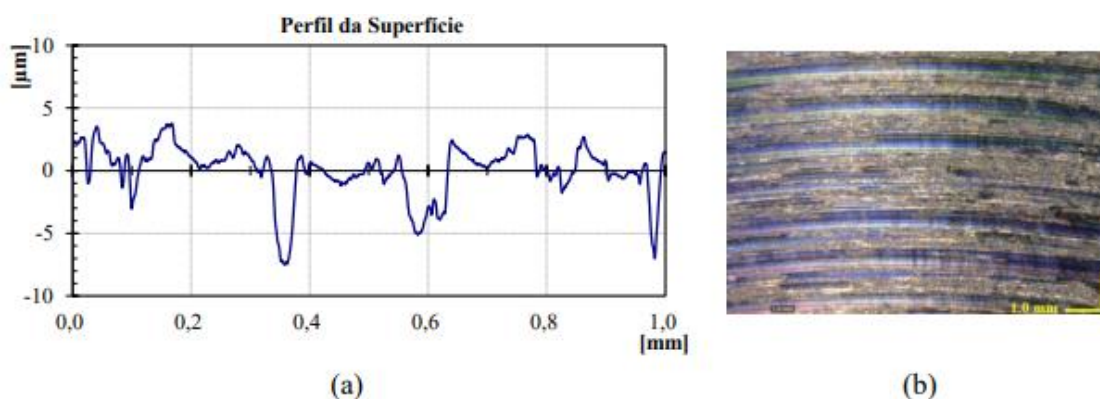
**a) perfil da superfície; b) imagem da superfície (ampliação 200x).**



Fonte: HÜBNER, Henrique.

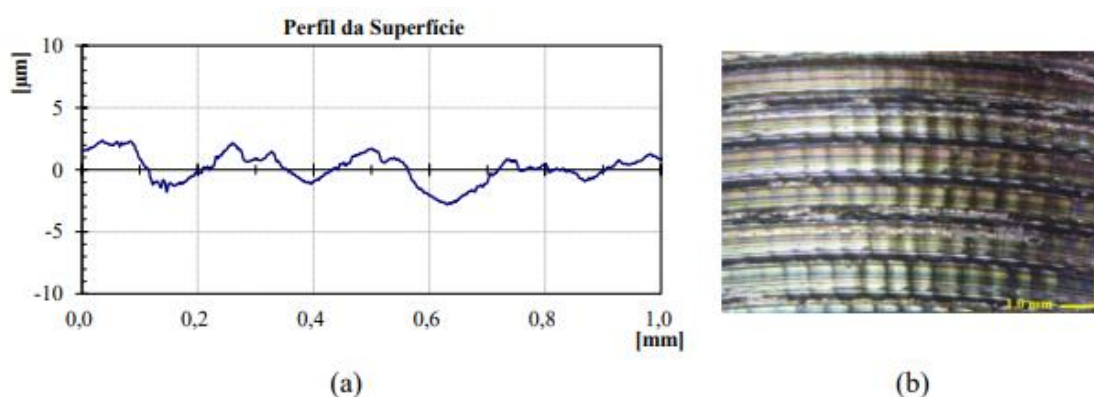
Para comparação, a Figura 35(a) ilustra o perfil de rugosidade para o passe que apresentou maior  $R_a$  para o inserto com  $r_e = 1,2$  mm. Para Hübner, pode-se observar a irregularidade do perfil e os maiores valores de ordenadas, tanto para picos quanto para vales. Na Figura 35(b) observa-se a imagem da superfície, onde, diferente da amostra anterior, apresenta nítidas rebarbas.

**Figura 36 - Passe 2 ( $r_e = 0,4$  mm,  $v_c = 120$  m/min,  $f_z = 0,08$  mm)**  
**a) perfil da superfície; b) imagem da superfície (ampliação 200 x).**



Fonte: HÜBNER, Henrique.

**Figura 37 - Passe 14 ( $r_e = 0,4$  mm,  $v_c = 140$  m/min,  $f_z = 0,08$  mm)**  
**a) perfil da superfície; b) imagem da superfície (ampliação 200 x).**



Fonte: HÜBNER, Henrique.

A Figura 36(a) e a Figura 37(a) mostram os perfis de rugosidade originados por velocidades de corte distintas ( $V_c = 120$  m/min e  $140$  m/min respectivamente) para o inserto com  $r_e = 0,4$  mm. De acordo com Hübner, o que se nota é que o aumento da velocidade de corte contribuiu para a redução da rugosidade, uma vez que produziu picos e vales menores, além também, de uma superfície mais regular, como se nota pelas distâncias aproximadamente iguais entre picos e vales. Na Figura 36(b) e na Figura 37(b) observa-se que o aumento da velocidade de corte acarretou na diminuição na formação de rebarbas na superfície.



### 3.5 Cálculo Teórico Aplicado

#### 3.5.1 Torneamento

Aplicando-se as Equações I e II (visto em 2.7.3) no processo de torneamento, pode-se calcular, respectivamente, os valores de Rugosidade Média e Rugosidade Total para os parâmetros empregados no processo de torneamento em questão:

$$Ra(f, r\varepsilon) = \frac{f^2 \cdot 1000}{18\sqrt{3} \cdot r\varepsilon}$$

$$Ra(f, r\varepsilon) = \frac{\begin{pmatrix} 0,10 \\ 0,25 \end{pmatrix}^2 \cdot 1000}{18\sqrt{3} \cdot \begin{pmatrix} 0,4 \\ 1,2 \end{pmatrix}}$$

Chega-se ao seguinte quadro, em micrômetros, com as 4 combinações possíveis dos valores utilizados de avanço [mm] e raio de quina [mm], produzido pelo autor:

	$f = 0,10$	$f = 0,25$
$r\varepsilon = 0,4$	0,802	5,012
$r\varepsilon = 1,2$	0,267	1,671

Aplicando-se a Equação II com os parâmetros de corte usados, chega-se aos seguintes resultados:

$$Rt(f, r\varepsilon) = \frac{f^2 \cdot 1000}{r\varepsilon \cdot 8}$$

$$Rt(f, r\varepsilon) = \frac{\begin{pmatrix} 0,10 \\ 0,25 \end{pmatrix}^2 \cdot 1000}{\begin{pmatrix} 0,4 \\ 1,2 \end{pmatrix} \cdot 8}$$

Assim como para o cálculo de Rugosidade Média, obtêm-se o seguinte quadro, produzido pelo autor, para o cálculo da Rugosidade Total em micrômetros:

	$f = 0,10$	$f = 0,25$
$r\varepsilon = 0,4$	3,125	19,531
$r\varepsilon = 1,2$	1,042	6,510

Dispondo os valores experimentais e teóricos em uma única tabela a fim de comparação, têm-se a Tabela 5 produzida pelo autor:

**Tabela 5 - Comparação entre Rugosidades Teóricas e Experimentais no Torneamento**

Barra (n°)	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Ra ( $\mu\text{m}$ ) Teórico	Rz ( $\mu\text{m}$ )	Rt ( $\mu\text{m}$ ) Teórico
1	2,546	0,802	12,062	3,125
2	4,960	5,012	20,958	19,531
3	0,976	0,802	5,525	3,125
4	4,902	5,012	20,449	19,531
5	3,553	0,267	18,292	1,042
6	4,303	1,671	19,592	6,510
7	2,043	0,267	8,788	1,042
8	1,555	1,671	8,066	6,510
9	2,028	0,802	12,181	3,125
10	4,974	5,012	19,810	19,531
11	1,420	0,802	6,990	3,125
12	4,817	5,012	19,195	19,531
13	2,682	0,267	15,096	1,042
14	1,292	1,671	8,226	6,510
15	3,016	0,267	8,605	1,042
16	1,169	1,671	6,614	6,510

Fonte: Produzido pelo autor.

### 3.5.2 Fresamento

Aplicando-se as Fórmulas III e IV no processo de fresamento, pode-se calcular os valores de Rugosidade Média e Rugosidade Total para os parâmetros empregados no processo de fresamento em questão:

$$Ra(fz, r\varepsilon) = \frac{r\varepsilon}{2} - \sqrt{\frac{r\varepsilon^2}{4} - \left(\frac{fz}{4}\right)^2}$$

$$Ra(fz, r\varepsilon) = \frac{\begin{pmatrix} 0,4 \\ 0,8 \end{pmatrix}}{2} - \sqrt{\frac{\begin{pmatrix} 0,4 \\ 0,8 \end{pmatrix}^2}{4} - \left(\frac{\begin{pmatrix} 0,07 \\ 0,08 \\ 0,09 \\ 0,10 \end{pmatrix}}{4}\right)^2}$$

Chega-se ao seguinte quadro produzido pelo autor, em micrômetros, com as 8 combinações possíveis dos valores utilizados de avanço [mm] e raio de quina [mm]:

	$fz = 0,07$	$fz = 0,08$	$fz = 0,09$	$fz = 0,10$
$r\varepsilon = 0,4$	0,767	1,003	1,270	1,569
$r\varepsilon = 0,8$	0,383	0,500	0,633	0,782

Aplicando-se a Equação IV com os parâmetros de corte usados, chega-se aos seguintes resultados (lembrando que D equivale a  $11^\circ$  e C ao complementar,  $79^\circ$ ):

$$Rt(C, D, fz) = \frac{fz * 1000}{\tan(C) + \cotan(D)}$$

$$Rt(C, D, fz) = \frac{\begin{pmatrix} 0,07 \\ 0,08 \\ 0,09 \\ 0,10 \end{pmatrix} * 1000}{\tan(79^\circ) + \cotan(11^\circ)}$$

$$Rt(C, D, fz) = \frac{\begin{pmatrix} 0,07 \\ 0,08 \\ 0,09 \\ 0,10 \end{pmatrix} * 1000}{10,289108032}$$

Como o raio de quina não interfere na fórmula da Rugosidade Total, obtêm-se o seguinte quadro:

$fz = 0,07$	$fz = 0,08$	$fz = 0,09$	$fz = 0,10$
6,803	7,775	8,747	9,719

**Tabela 6 - Comparação entre Rugosidades Teóricas e Experimentais no Fresamento**

Passe	Ra( $\mu\text{m}$ )	Ra( $\mu\text{m}$ ) Teórico	Rt( $\mu\text{m}$ )	Rt( $\mu\text{m}$ ) Teórico
1	1.92	0,767	13	6,803
2	1.48	1,003	11.61	7,775
3	1.74	1,270	12.89	8,747
4	1.43	1,569	11	9,719
5	1.29	0,767	10.08	6,803
6	1.27	1,003	9.63	7,775
7	1.18	1,270	9.02	8,747
8	1.18	1,569	8.5	9,719
9	1.44	0,767	10.52	6,803
10	1.2	1,003	10.05	7,775
11	1.13	1,270	8.72	8,747
12	0.91	1,569	6.78	9,719
13	1.12	0,767	9.72	6,803
14	0.99	1,003	10.69	7,775
15	0.84	1,270	6.27	8,747
16	0.97	1,569	6.53	9,719
17	0.97	0,383	8.09	6,803
18	1.41	0,500	14.67	7,775
19	1.53	0,633	12.94	8,747
20	2.19	0,782	17.54	9,719
21	0.78	0,383	6.4	6,803
22	0.96	0,500	7.4	7,775
23	1.48	0,633	11.23	8,747
24	1.35	0,782	10.4	9,719
25	0.75	0,383	5.68	6,803
26	1.17	0,500	9.82	7,775
27	0.98	0,633	8.4	8,747
28	1.23	0,782	11.19	9,719
29	0.63	0,383	3.64	6,803
30	0.84	0,500	4.85	7,775
31	0.94	0,633	9.87	8,747
32	1.31	0,782	12.41	9,719

Fonte: Produzido pelo autor.

### 3.6 Parâmetro Ia e It

Para melhor entendimento das diferenças encontradas entre os valores experimentais e teóricos, faz-se a seguir a criação de dois parâmetros que racionem os valores de Ra experimentais e o Ra teóricos, assim como para os valores de Rz e Rt experimentais e teóricos, dada as seguintes fórmulas:

$$Ia = \frac{Ra(\text{experimental})}{Ra(\text{teórico})} \quad (V)$$

$$It = \frac{Rz \text{ ou } Rt(\text{experimental})}{Rt(\text{teórico})} \quad (VI)$$

Aplicando-se as Fórmulas V e VI nos dados da Tabela 6 anterior, pode-se chegar à seguinte Tabela 7 com resultados de Ia e It para o Torneamento:

**Tabela 7 - Aplicação dos parâmetros Ia e It no Torneamento**

Barra (n°)	Ângulo de Saída (°)	Raio de quina (mm)	Vel. de Corte (m/min)	Avanço (mm/rot)	Ia	It
1	6	0,4	150	0,10	3.174564	3.85984
2				0,25	0.989625	1.073063
3			250	0,10	1.216958	1.768
4				0,25	0.978053	1.047002
5		1,2	150	0,10	13.30712	17.5547
6				0,25	2.575105	3.009524
7			250	0,10	7.651685	8.433781
8				0,25	0.93058	1.239017
9	-6	0,4	150	0,10	2.528678	3.89792
10				0,25	0.992418	1.014285
11			250	0,10	1.770574	2.2368
12				0,25	0.961093	0.982797
13		1,2	150	0,10	10.04494	14.48752
14				0,25	0.77319	1.263594
15			250	0,10	11.29588	8.258157
16				0,25	0.699581	1.015975

Fonte: Produzido pelo autor.

Vale ressaltar que para valores próximos de 1 o cálculo teórico se aproximou dos dados coletados, e de maneira análoga, para valores maiores e menores a 1, o cálculo teórico distinguiu-se mais do experimental. É possível notar que, para o caso do torneamento, a escolha de um menor valor de avanço (0,10 mm/rot), resultou em valores de  $I_a$  e  $I_t$  relativamente altos quando comparados com o valor de avanço de 0,25mm/rot.

Aplicando-se as Fórmulas V e VI para o processo de Fresamento, constrói-se a Tabela 8 (para raio de quina de 0,4 mm) e à Tabela 9 (para raio de quina de 0,8 mm):

**Tabela 8 - Aplicação dos parâmetros  $I_a$  e  $I_t$  no Fresamento (raio de quina = 0,4mm)**

Passo	Raio de quina (mm)	Vel. de Corte (m/min)	Avanço por dente (mm/rot)	$I_a$	$I_t$
1	0,4	110	0.07	2.502946	1.910834
2			0.08	1.476291	1.493207
3			0.09	1.370451	1.473629
4			0.1	0.911611	1.131802
5		120	0.07	1.681667	1.481632
6			0.08	1.266817	1.238551
7			0.09	0.929386	1.031197
8			0.1	0.752238	0.874574
9		130	0.07	1.877209	1.546306
10			0.08	1.196992	1.292569
11			0.09	0.890006	0.9969
12			0.1	0.580116	0.697602
13		140	0.07	1.460052	1.428716
14			0.08	0.987519	1.374882
15			0.09	0.661597	0.716808
16			0.1	0.618365	0.671879

Fonte: Produzido pelo autor.

Tabela 9 - Aplicação dos parâmetros Ia e It no Fresamento (raio de quina = 0,8mm)

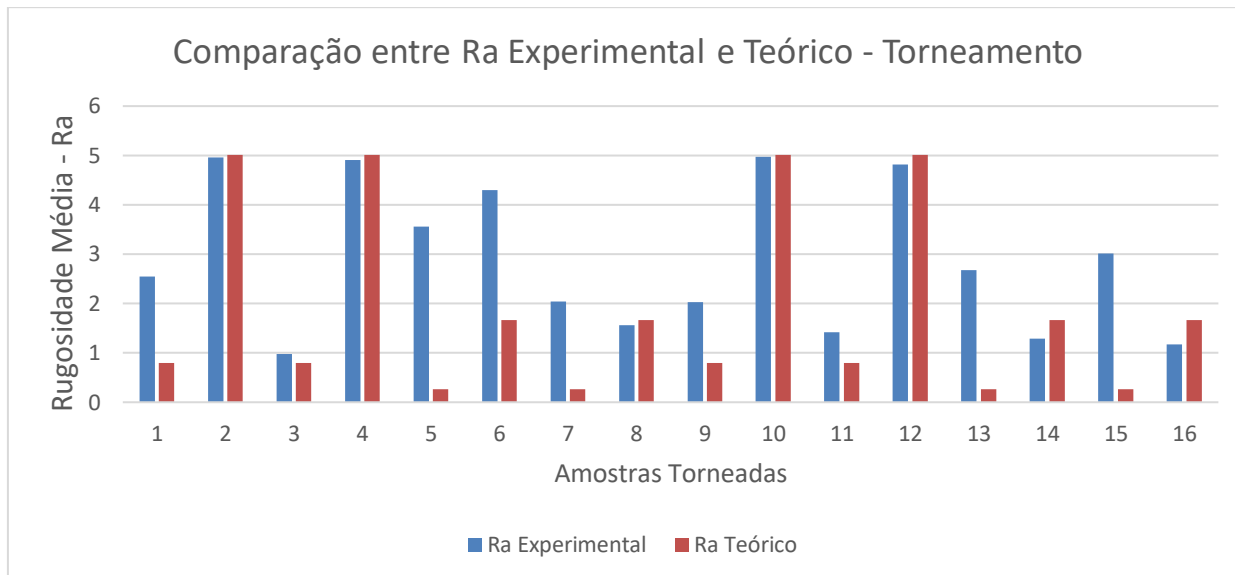
Passe	Raio de quina (mm)	Vel. de Corte (m/min)	Avanço por dente (mm/rot)	Ia	It
17	0,8	110	0.07	2.532664	1.189127
18			0.08	2.818236	1.886765
19			0.09	2.415864	1.479345
20			0.1	2.80046	1.80471
21		120	0.07	2.036576	0.940718
22			0.08	1.918799	0.951742
23			0.09	2.336914	1.283852
24			0.1	1.726311	1.070067
25		130	0.07	1.958246	0.834888
26			0.08	2.338537	1.262988
27			0.09	1.547416	0.960317
28			0.1	1.572861	1.151351
29		140	0.07	1.644926	0.535034
30			0.08	1.678949	0.623777
31			0.09	1.484256	1.128372
32			0.1	1.675161	1.276878

Fonte: Produzido pelo autor.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Torneamento

Figura 38 - Gráfico de barras de rugosidades médias



Fonte: Produzido pelo autor.

No gráfico de barras acima (Figura 38), pode-se ter uma melhor noção da variação entre os valores de rugosidade média Ra experimentais e teóricos ao longo das 16 amostras realizadas no experimento.

Nota-se que para os valores mais altos de rugosidade (amostras: 2, 4, 10, 12) a aplicação do cálculo teórico se equiparou aos dados experimentais, consultando a Tabela 7 com valores de  $I_a$  para o torneamento, nota-se que as amostras supracitadas apresentam, respectivamente, os seguintes valores de  $I_a$ : 0,989; 0,978; 0,992; 0,961. Todos valores muito próximos de 1.

É possível notar uma relação entre as 4 amostras, todas elas utilizaram o avanço de 0,25 mm/rot, e se aproveitando desta observação, percebe-se que, de modo geral, no torneamento, as amostras de número par (que tiveram avanço de 0,25 mm/rot) tiveram valores mais próximos entre experimental e teórico, não necessariamente possuindo melhores valores absolutos para rugosidade média.

Outra possível inferência que se depreende a partir da análise do gráfico de barras é que, as amostras que foram torneadas com ângulo de saída de  $6^\circ$  (amostras de 1 a 8) e as amostras torneadas com ângulo de  $-6^\circ$  (amostras de 9 a 16) não apresentaram



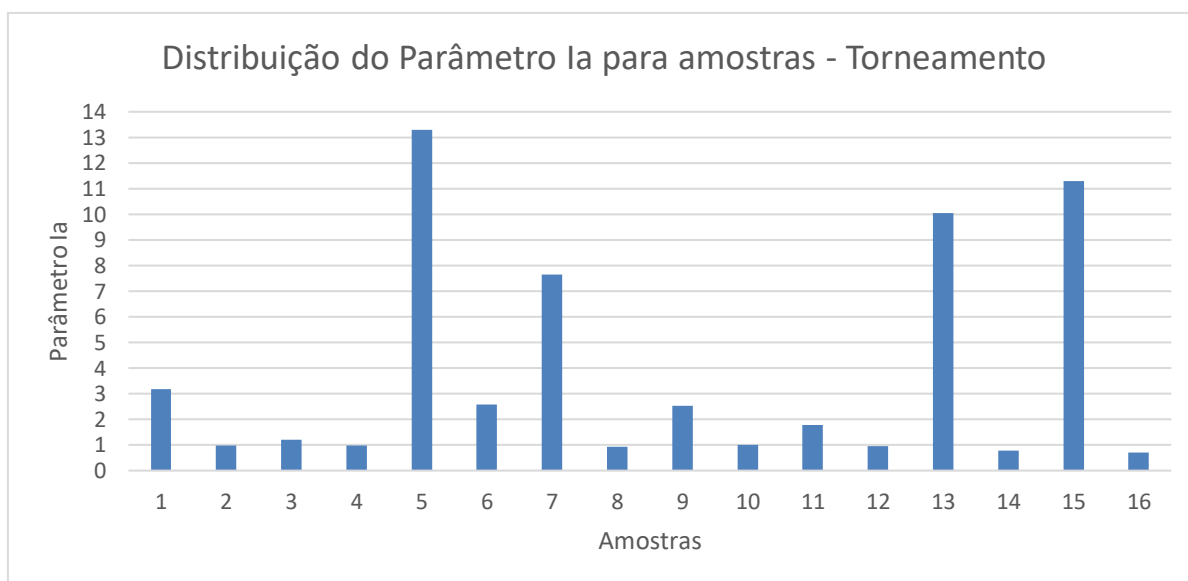
diferença gritante no que diz respeito à variação entra rugosidade média experimental e teórica.

Segundo Ferrarasi, o ângulo de saída é determinado em função do material da peça, pois influencia a formação do cavaco, a força de corte, no acabamento da peça e no calor gerado.

Para valores positivos de ângulo de saída, ocorre o trabalho do dobramento do cavaco e gera-se uma menor temperatura. Já em contrapartida, com um ângulo de saída negativo tem-se um maior sollicitação da ferramenta de corte, aumentado assim o esforço cortante e a temperatura gerada.

Segundo Biasibetti, é possível que os valores escolhidos para análise do ângulo de saída estejam muito próximos e devido a isto não foi encontrada influência em sua mudança ou realmente o efeito padronizado do ângulo de saída sobre Ra seja pequeno, quando comparado aos demais fatores em estudo, e sobre Ia não seja significativa.

**Figura 39 - Gráfico de barras de Ia**



Fonte: Produzido pelo autor

O gráfico de barras acima (Figura 39) refere-se aos valores calculados para o parâmetro Ia, observa-se que corrobora com o analisado em parágrafos anteriores, onde as amostras 2, 4, 10 e 12 apresentaram o índice mais próximo do valor 1.

Relembrando a Fórmula I empregada no cálculo de Ra, observa-se que o raio de quina empregado atua de forma inversamente proporcional à rugosidade da peça acabada, ou seja, aumentando-se o raio de quina, tende-se a diminuir a rugosidade. Este fenômeno pode ser observado no gráfico de barras dividindo-se as amostras em 4 grupos de 4 amostras cada, sendo que o primeiro e terceiro grupos (amostras: {1,2,3,4}

e {9,10,11,12}) tiveram o raio de quina de 0,4 mm e o segundo e quarto grupos ({5,6,7,8} e {13,14,15,16}) tiveram raio de quina de 1,2 mm. Percebe-se que aqueles tiveram maior rugosidade média teórica, e estes tiveram menor valor de rugosidade média teórica, o que corrobora com a teoria. Entretanto, analisando-se em pares as seguintes correspondências de amostras:

1 e 5	2 e 6	3 e 7	4 e 8	9 e 13	10 e 14	11 e 15	12 e 16
-------	-------	-------	-------	--------	---------	---------	---------

Analisar-se-á pares de amostras cuja única diferença nos valores dos parâmetros estará no raio de quina empregado, sendo que a amostra de menor número no par, corresponderá ao menor valor de raio de quina empregado.

Para os pares, {2 e 6}, {4 e 8}, {10 e 14} e {12 e 16}, observa-se que a amostra com raio de quina maior, resultou na peça acabada com menor rugosidade, o que corresponde com o esperado teórico. Todavia, para as amostras restantes, {1 e 5}, {3 e 7}, {9 e 13} e {11 e 15} ocorreu o comportamento contrário, onde a amostra com maior raio de quina, que deveria gerar a peça com menor rugosidade, gerou a peça com maior rugosidade, contrariando o esperado.

Uma possível explicação para este ocorrido se baseia no fato de que as últimas amostras citadas fazem referência à aquelas que empregaram avanço de 0,10 mm/rot. Logo, conclui-se que a correspondência – Aumento de raio de quina e diminuição de rugosidade - se vale para um maior valor de avanço (0,25 mm/rot, no caso). Porém, para um menor valor de avanço (0,10 mm/rot) a correspondência não pode ser observada. Concluindo que o emprego da Fórmula I para o cálculo da rugosidade média  $R_a$  é mais adequado para um maior valor de avanço da ferramenta, e para um menor valor de avanço da ferramenta não se observa uma correspondência de aumento de raio de quina acarretando em diminuição da rugosidade, mas sim o contrário – Aumento de raio de quina e aumento de rugosidade –.

Vale salientar que esta conclusão cabe-se apenas para o experimento realizado e com base nos dados adquiridos neste processo, não necessariamente se valendo para outras condições de corte e parâmetros empregados.

Calculando-se o valor médio das rugosidades médias para cada par de valores atribuídos aos 4 parâmetros analisados (Ângulo de Saída, Raio de Quina, Velocidade de Corte e Avanço) pode-se chegar nos seguintes dados:

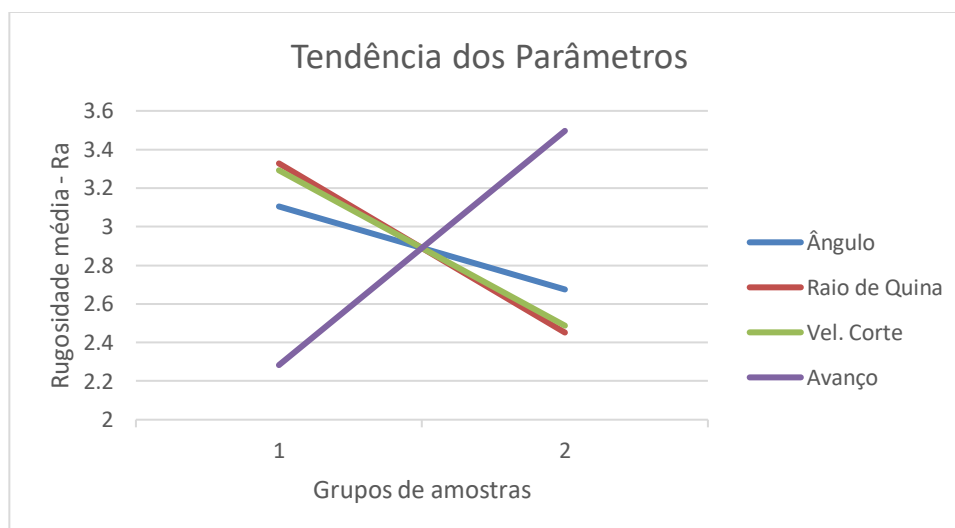
	6°	-6°
Ângulo de Saída	3.10475	2.67475

	150m/min	250m/min
Vel. Corte	3.29225	2.48725

	0.4mm	1.2mm
Raio de Quina	3.327875	2.451625

	0.1mm/rot	0.25mm/rot
Avanço	2.283	3.4965

**Figura 40 - Gráfico da tendência dos parâmetros**



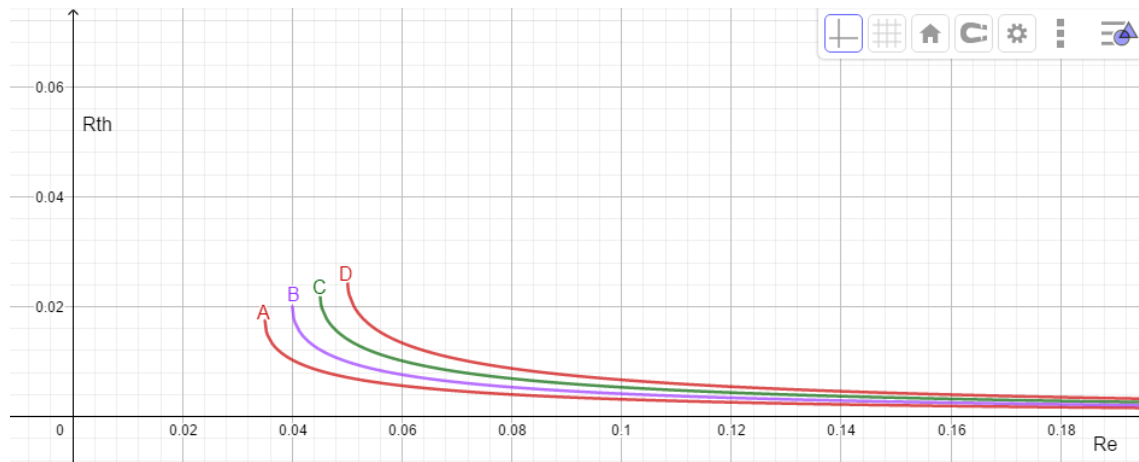
Fonte: Produzido pelo autor

No gráfico da Figura 40, o valor 1 na abcissa refere-se aos valores do grupo a esquerda nos quadros (6°; 0,4 mm; 150 m/min; 0,1 mm/rot), já o valor 2 aos valores a direita nos quadros (-6°; 1,2 mm; 250 m/min; 0,25 mm/rot). Percebe-se como o Avanço tem maior influência (devido à maior inclinação de sua reta) ao passo que o Ângulo de Saída da ferramenta tem menor influência, justificando o fato da Fórmula I não contemplar este parâmetro.

Por fim, nota-se como a velocidade de corte tem uma influência tão preponderante quanto o raio de quina no processo, reforça-se a ideia de que a escolha da velocidade de corte deve atender as orientações dos fornecedores.

## 4.2 Fresamento

Figura 41 - Gráfico de correspondência entre Rugosidade Média Teórica em função do Raio de Quina, empregado para 4 valores de Avanço por Dente.



Fonte: Produzido pelo autor.

A: Curva  $f_z = 0,07$

B: Curva  $f_z = 0,08$

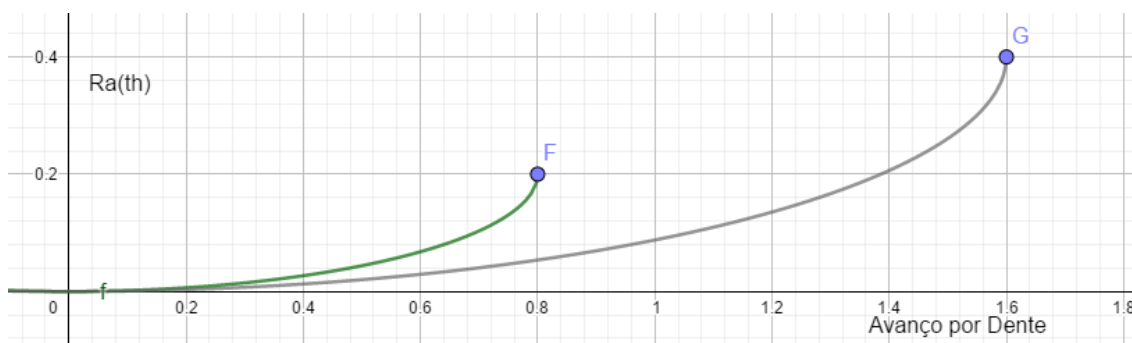
C: Curva  $f_z = 0,09$

D: Curva  $f_z = 0,10$

O gráfico da Figura 41 mostra os valores de  $R_a$  teóricos calculados por meio da Fórmula III para uma distribuição contínua de Raios de Quina. Percebe-se que com o aumento do raio de quina ( $r_\epsilon$ ), a rugosidade  $R_a$  tende a diminuir, além do fato de que a Fórmula está avaliada para um valor de raio de quina superior à metade do avanço por dente.

Foram experimentados 4 valores para o avanço por dente, pode-se notar que o aumento do avanço por dente acarreta em curvas de maior rugosidade média. Como por exemplo, nota-se que a curva D ( $f_z = 0,10$ ) possui uma maior rugosidade  $R_a$  para um dado valor de raio de quina, em comparação ao mesmo valor na curva A ( $f_z = 0,07$ ).

**Figura 42 - Gráfico de correspondência entre Rugosidade Média Teórica em função do Avanço por Dente empregado, para 2 valores de Raio de Quina.**



Fonte: Produzido pelo autor.

F: Curva  $r\epsilon = 0,4$  mm

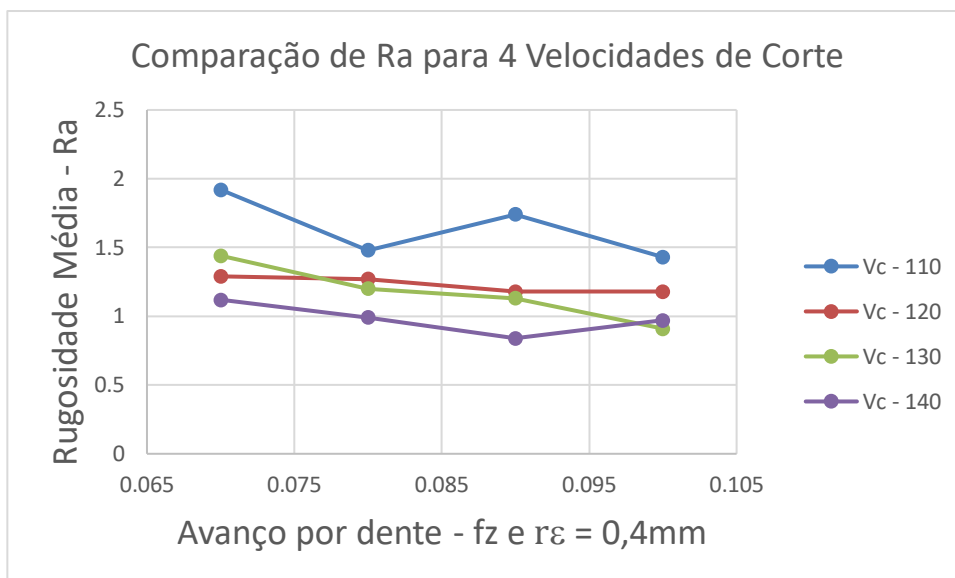
G: Curva  $r\epsilon = 0,8$  mm

Já no gráfico da Figura 42, trocou-se a variável independente, que deixa de ser o raio de quina, como na Figura 41, e passa a ser o Avanço por Dente a variável de distribuição contínua.

Observa-se que a curva G associada a um maior raio de quina gera, teoricamente, superfícies menos rugosas, dado um determinado Avanço por Dente.

Conclui-se, portanto, que o aumento do raio de quina acarreta na diminuição da rugosidade média, de acordo com a Fórmula III. Já o aumento do Avanço por Dente acarreta em mais rugosidade média de acordo com a Fórmula III, tendo papéis contrários no acabamento da superfície.

**Figura 43 - Gráfico da distribuição de Ra para Raio de Quina de 0,4mm**



Fonte: Produzido pelo autor.

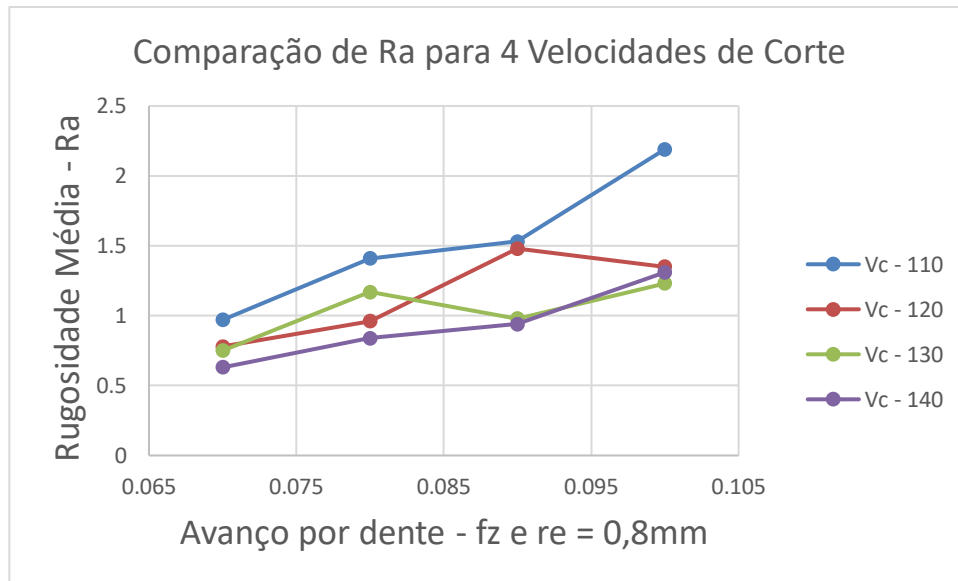
A Figura 43 representa como o aumento do Avanço por Dente nos dados adquiridos experimentalmente, acarreta, de modo geral, na redução da rugosidade média das peças acabadas, quando se usa um raio de quina de 0,4 mm.

Também pode-se perceber que com o aumento da velocidade de corte, as curvas tendem cair, ou seja, gerando rugosidades médias cada vez menores.

Para os 16 valores de Ra representados no gráfico, os parâmetros velocidade de corte igual a 140 m/min e avanço por dente de 0,09 mm/rot geraram a superfície com melhor acabamento, ou seja, menor valor de rugosidade média Ra, 0,84 micrômetros.

Voltando-se à Tabela 6 com valores de Rt para o Fresamento, percebe-se que os mesmos parâmetros acarretaram também na superfície com menor valor de rugosidade total Rt, 6,27 micrômetros.

**Figura 44 - Gráfico da distribuição de Ra para Raio de Quina de 0,8mm**



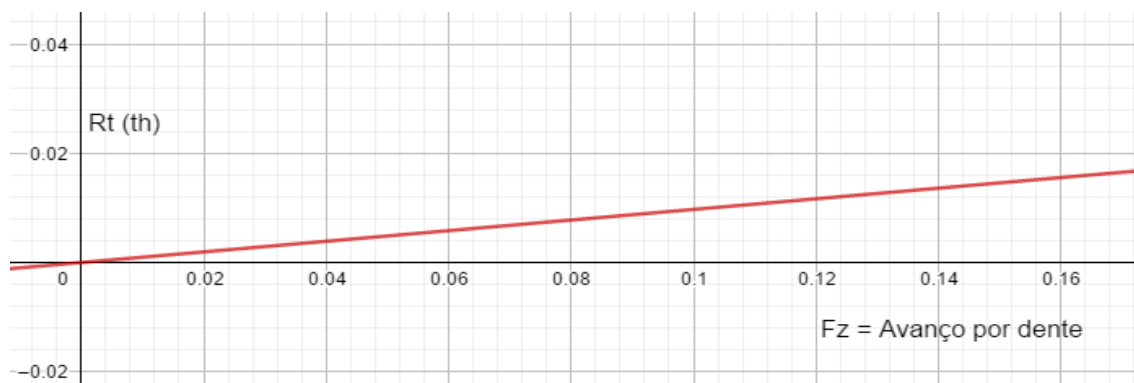
Fonte: Produzido pelo autor.

Já no gráfico da Figura 44, onde se analisa o comportamento da rugosidade média usando um raio de quina de 0,8 mm, observa-se um comportamento mais de acordo com o cálculo teórico, uma vez que neste gráfico o aumento do Avanço por Dente acarreta no aumento da rugosidade média.

Comparando-se os valores de rugosidade média para um determinado Avanço por Dente nos dois gráficos apresentados não se pode chegar em conclusões plausíveis, uma vez que houve um comportamento inesperado para o Gráfico de raio de quina de 0,4 mm.

Para os 16 valores de Ra representados no gráfico, os parâmetros velocidade de corte igual a 140 m/min e avanço por dente de 0,07 mm/rot geraram a superfície com melhor acabamento, ou seja, menor valor de rugosidade média Ra, 0,63 micrômetros.

**Figura 45 - Gráfico de correspondência entre Rugosidade Total Teórica em função de uma distribuição contínua de valores de avanço por dente.**



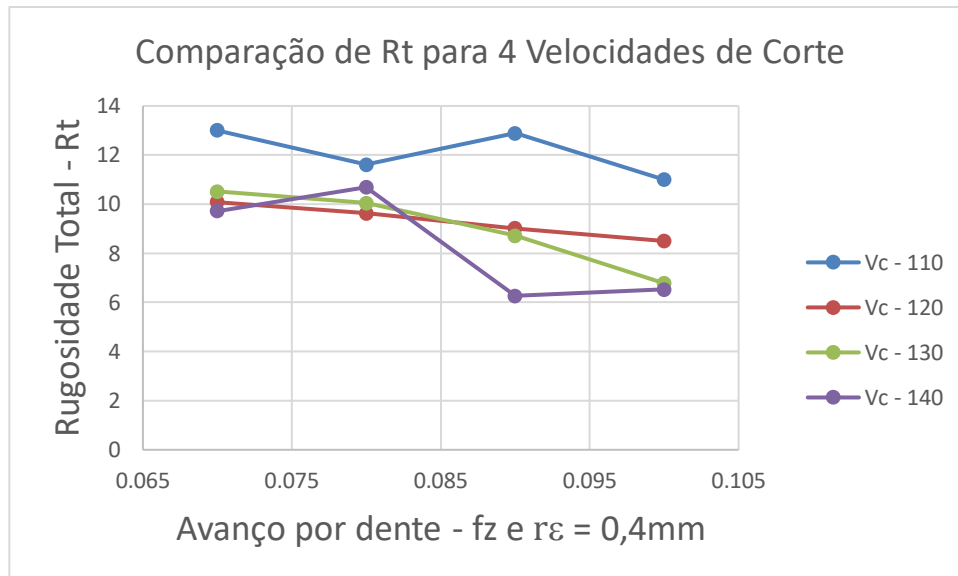
Fonte: Produzido pelo autor.

No gráfico da Figura 45, observa-se como se comporta a rugosidade total teórica de uma superfície que passou pelo processo de fresamento frontal em função de seu único parâmetro variável, o Avanço por Dente. Nota-se que a relação é linear, uma vez que o cálculo é feito a partir da divisão do valor de Avanço por Dente por valores associados à geometria da ferramenta de corte, que por sua vez, são constantes.

Para a análise da rugosidade total  $R_t$ , calculada a partir da Fórmula IV, percebe-se dois comportamentos distintos para os dois raios de quina empregados nos ensaios, sendo que para o raio de quina correspondente a 0,4 mm, o aumento do avanço por dente diminuiu a rugosidade total observada, indo de encontro com o esperado pelo cálculo teórico do  $R_t$  (Figura 46).



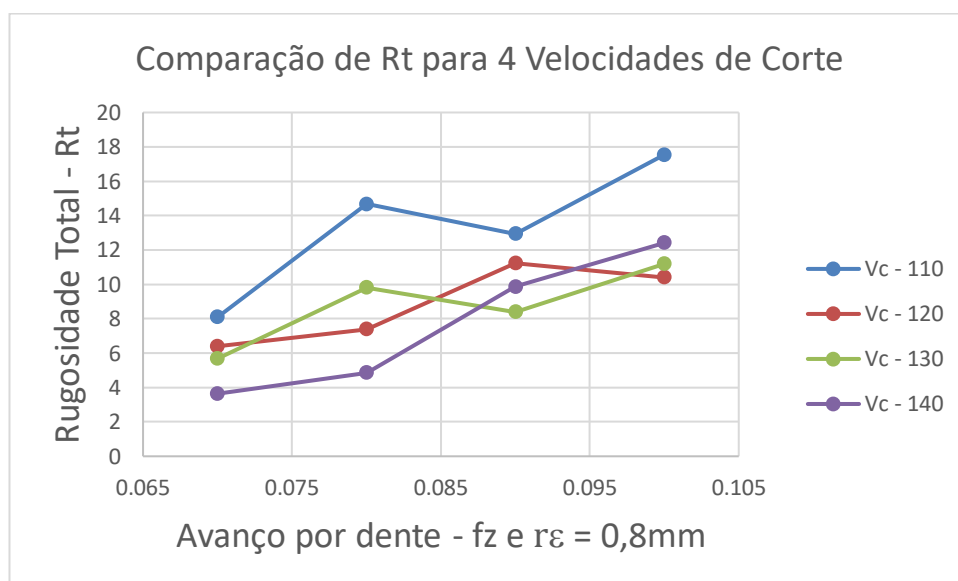
**Figura 46 - Gráfico da distribuição de Rt para Raio de Quina de 0,4mm**



Fonte: Produzido pelo autor.

Já para o raio de quina correspondente a 0,8 mm, nota-se que o aumento do avanço por dente acarretou no aumento da rugosidade total observada, indo ao encontro dos valores teóricos calculados (Figura 47).

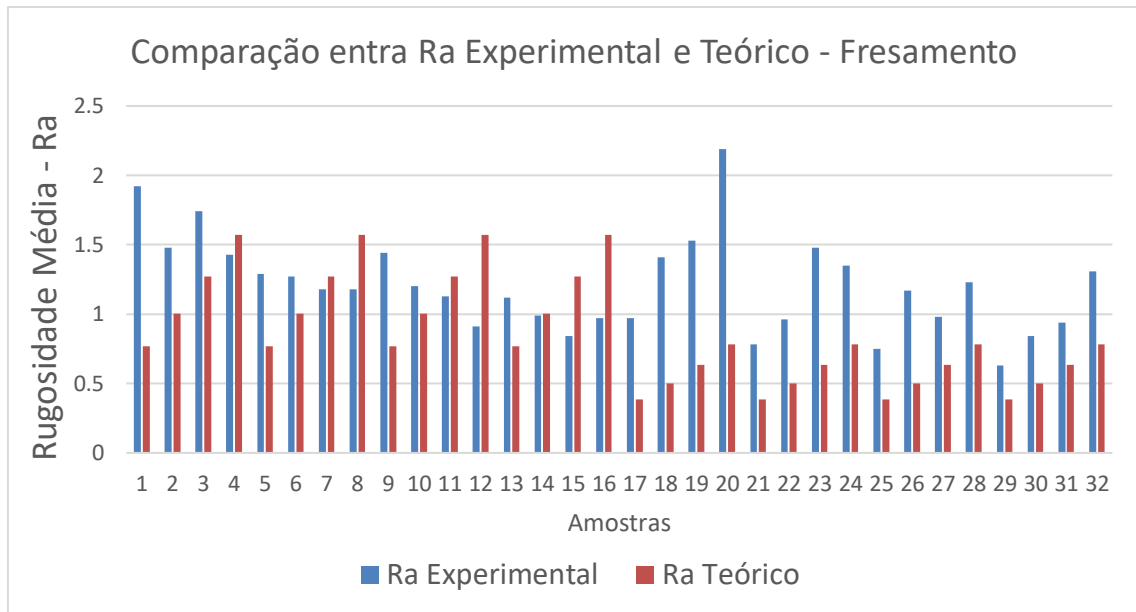
**Figura 47 - Gráfico da distribuição de Rt para Raio de Quina de 0,8mm**



Fonte: Produzido pelo autor.

No que concerne à influência da velocidade de corte nos valores de rugosidade total encontrados experimentalmente, assim como para a rugosidade média, o aumento da velocidade de corte contribuiu para a redução da rugosidade total, gerando assim superfícies com melhor acabamento.

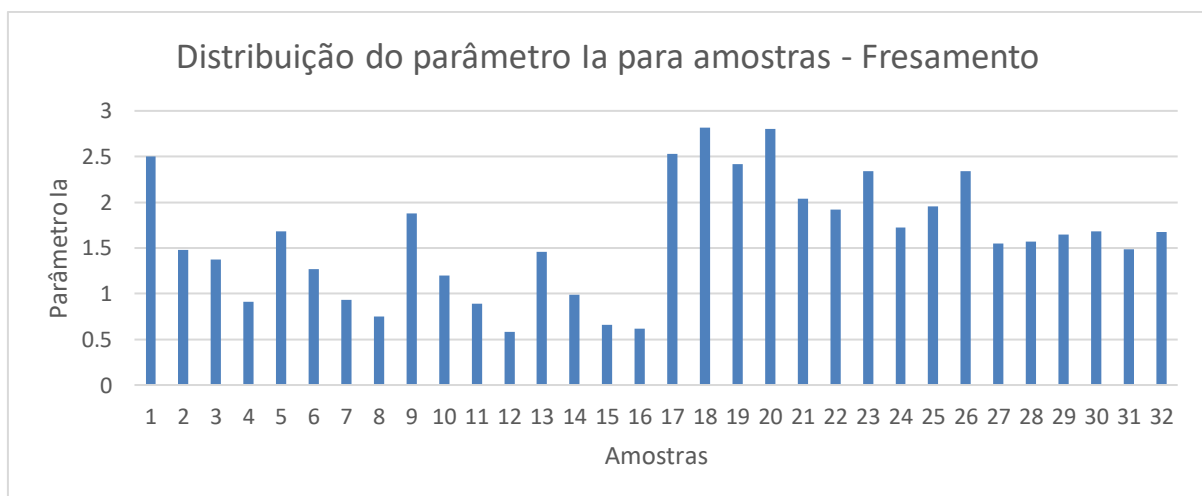
**Figura 48 - Gráfico de barras de rugosidade média**



Fonte: Produzido pelo autor.

O gráfico de barras acima (Figura 48) relaciona as rugosidades médias Ra, experimentais e teóricas medidas e calculadas para o processo de fresamento. Segue abaixo (Figura 49) o gráfico com os valores de Ia para o fresamento.

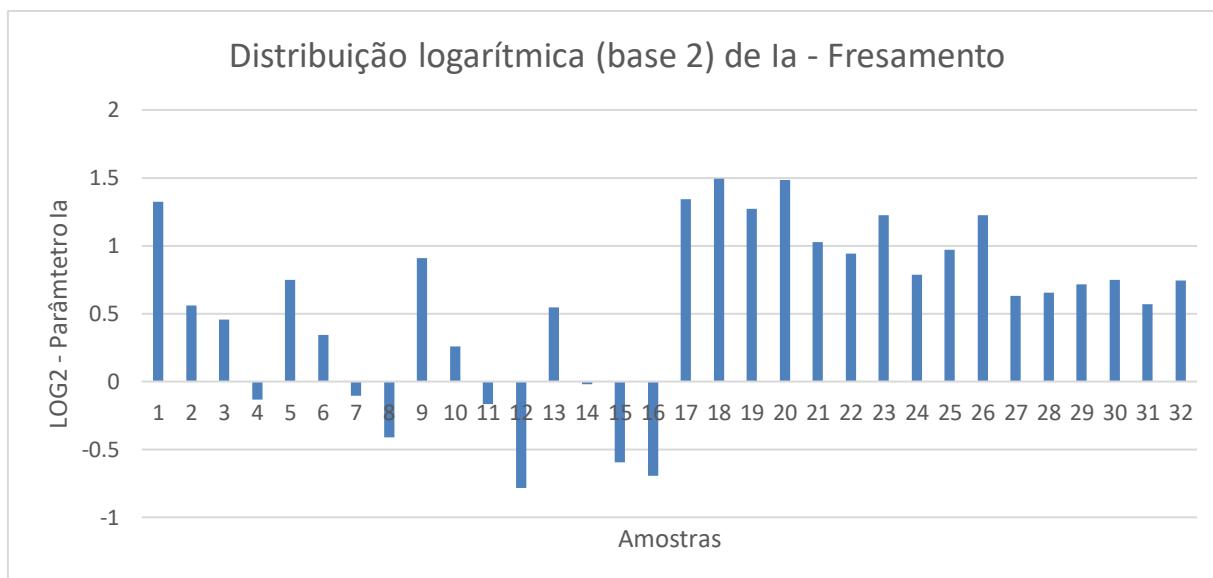
**Figura 49 - Gráfico de barras do parâmetro Ia**



Fonte: Produzido pelo autor.

De modo geral, percebe-se que a primeira metade das amostras (1 a 16) apresentou valores de Ia mais próximos a 1, indicando uma melhor correspondência entre o experimental e o teórico, aplicando-se um logaritmo no gráfico ficará mais evidente a variação do parâmetro Ia.

**Figura 50 - Gráfico de barras do logaritmo de Ia**



Fonte: Produzido pelo autor.

A distribuição logarítmica nos ajuda a identificar melhor como uma amostra se comportou em relação a outra em termos de variação do parâmetro Ia. Por exemplo, as amostras de número 4, 7, 8, 11, 12, 15 e 16 (com valores negativos) apresentaram um valor de rugosidade menor do que o esperado na teoria. Assim como para a amostra 14 que no gráfico tem valor 0, indicando que a aproximação teórica foi a melhor possível.

A amostra 14 teve raio de quina de 0,4 mm, velocidade de corte de 140m/min e avanço por dente de 0,08 mm/rot e como consta no parágrafo anterior, foi a amostra onde o resultado teórico mais coincidiu com o dado experimental.

As amostras de 17 a 32 se referem ao uso de raio de quina de 0,8 mm e podemos observar pelo gráfico que tiveram em média um resultado experimental que mais se distanciou do calculado, quando comparado com as amostras de 1 a 16. Evidenciando uma maior interferência deste parâmetro para o cálculo teórico.

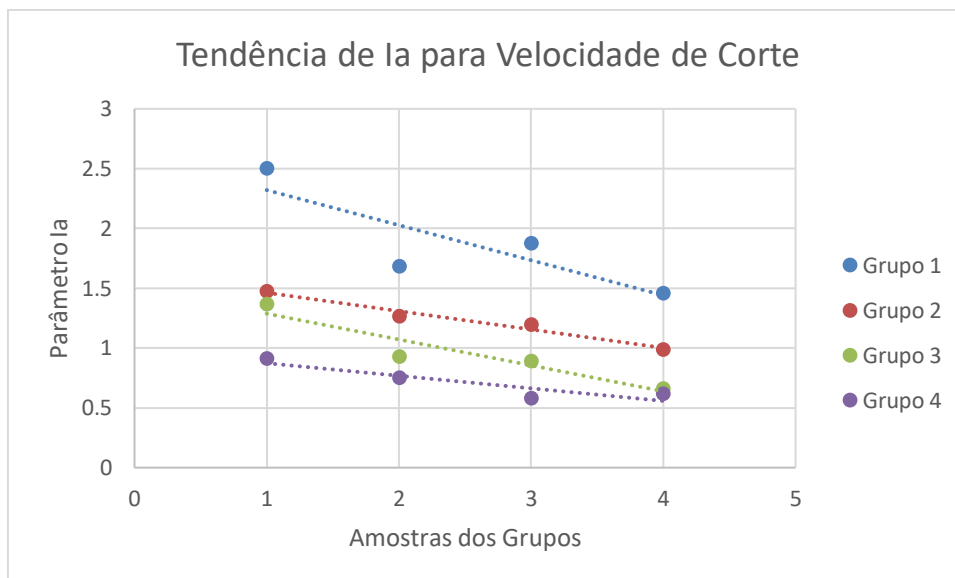
Se separarmos as amostras com diferentes avanços por dente utilizados, têm-se os seguintes grupos distintos de amostras, representados no quadro a seguir:

**Quadro 1 - Grupos de diferentes avanços por dente**

	Velocidade de Corte (m/min)			
	110	120	130	140
Grupo 1 - (0,07mm/rot)	1	5	9	13
Grupo 2 - (0,08mm/rot)	2	6	10	14
Grupo 3 - (0,09mm/rot)	3	7	11	15
Grupo 4 - (0,10mm/rot)	4	8	12	16

As amostras dentro de cada grupo possuem como único parâmetro de valor distinto a velocidade de corte, se analisadas as amostras dentro de cada grupo, pode-se inferir como a velocidade de corte influencia no parâmetro Ia, ou seja, o quanto o cálculo teórico se aproxima do experimental conforme se altera a velocidade de corte.

**Figura 51 - Tendência dos grupos 1 ao 4**



Fonte: Produzido pelo autor

Pode-se notar que para o aumento da velocidade de corte, todas as amostras tenderam a reduzir o valor do parâmetro Ia. Isto se deve ao fato de que maiores velocidades de corte tendem a reduzir a rugosidade experimental, e pode ser observado por meio da linha pontilhada de tendências expressa no gráfico para cada grupo. Vale frisar que o aumento da rugosidade não necessariamente contribuiu para a aproximação do cálculo teórico com o experimental, mas sim reduzir o valor de rugosidade, o que pode ser comprovado a partir do grupo 4, onde o aumento da velocidade de corte fez com que as amostras se distanciassem do valor 1 de Ia, indo para valores menores do que 1.

Outra observação é a de que a linha de tendência dos grupos caminha no sentido de – Aumento do valor de avanço por dente leva à diminuição do parâmetro Ia – o que pode ser observado através do fato de que o grupo 1 (avanço por dente 0,07 mm/rot) tem sua linha de tendência mais distante do valor 1 para Ia, ao passo que para o grupo 2 (avanço por dente 0,08 mm/rot) a linha de tendência se aproxima mais do valor 1 de Ia. Sendo que o grupo 3 apresentou o melhor resultado para sua linha de tendência e o grupo 4 já volta a se distanciar do valor 1 de Ia para valores menores que 1 em Ia.

Uma análise muito similar pode ser feita para as amostras de 17 a 32 (que possuem raio de quina de 0,8 mm), mas tal análise foi omitida neste trabalho por chegar às mesmas conclusões.

## 5. CONCLUSÕES

Respondendo aos objetivos deste trabalho, este teve como objetivo analisar a influência dos parâmetros de corte na rugosidade final de uma peça acabada, nos processos de torneamento e fresamento, e junto a isso, analisar a eficácia do cálculo teórico no que diz respeito a se aproximar dos valores experimentais medidos por rugosímetro.

A principal conclusão que se chega, englobando os dois processos e os dois parâmetros de rugosidade analisados ( $R_a$  e  $R_t$ ) foi de que apesar das fórmulas que calculam a rugosidade não levarem em consideração velocidade de corte, este parâmetro é de extrema importância para a determinação da rugosidade, serve por tanto de bom hábito o emprego das corretas velocidades de corte nos processos de usinagem, muitas vezes já determinadas por fabricantes de ferramentas de corte e insertos.

O desempenho do parâmetro  $I_a$  e  $I_t$  para medir a eficácia do cálculo teórico atendeu ao objetivo, pois foram capazes de mensurar a razão entre valores experimentais e teóricos.

Para o torneamento, dentre os fatores de usinagem estudados, o avanço foi o parâmetro que individualmente mostrou maior influência tanto sobre  $R_a$  quanto sobre o  $R_z$ . A sua influência sobre  $R_a$  pode ser prevista pela Fórmula I, que informa que a rugosidade teórica é proporcional ao quadrado do avanço, ou seja, em um processo de torneamento para se obter uma rugosidade baixa deve-se utilizar avanços pequenos. Este comportamento foi confirmado pelo gráfico da Figura 40, onde a reta de maior inclinação (em módulo) é a de avanço.

Ainda no torneamento, o emprego de uma maior velocidade de corte em geral levou a uma redução dos valores de  $R_t$ , mesmo que nem sempre levasse à redução de  $R_a$ , como observado nas Figuras 30 e 31.

De forma geral, quando se compara os valores dos parâmetros  $I_a$  entre o processo de torneamento e fresamento, percebe-se que o primeiro apresentou maiores valores do que o segundo, indicando que houve um maior desvio entre o teórico e o experimental no processo de torneamento, uma possível razão que justifique tal

fenômeno pode estar associada à presença de vibrações na região do contraponto onde as amostras de apoiaram durante a confecção, isto acarretaria em um aumento da rugosidade média Ra e Rz que não seria prevista pela fórmula do cálculo teórico.

Para o fresamento, percebe-se que as Fórmulas III e IV conseguiram se aproximar mais dos dados experimentais do que em relação às Fórmulas I e II dadas para o torneamento, uma vez que se comparando os gráficos de barras das Figuras 39 e 49 observa-se que para a primeira, obtém-se erros na ordem de 14 vezes o teórico, ao passo que para a segunda, o máximo de erro obtido foi na ordem de 3 vezes o teórico.

Pode-se também fazer a mesma análise feita para a influência do avanço na rugosidade durante o torneamento. Entretanto, para o fresamento a influência do avanço por dente foi um tanto quanto imprevisível, pois para o raio de quina de 0,4 mm o aumento do avanço por dente gerou menores valores de rugosidade Ra (o que não era esperado pela Fórmula III), porém para o raio de quina de 0,8 mm, o aumento do avanço por dente levou à superfícies com maiores valores de rugosidade média Ra (o que era esperado pela Fórmula III). Ou seja, geraram tendências contrárias.

O que se pode concluir disto é que, baseado nos experimentos apresentados neste trabalho, a Fórmula III se aproxima mais da realidade dos dados experimentais para maiores valores de raio de quina, uma vez que para estes maiores valores, o avanço por dente apresenta a tendência esperada pela Fórmula III. Mesmo que, conforme foi visto na Figura 50, os valores de  $\text{LOG}_2(I_a)$  para o menor raio de quina tenham se aproximado mais do valor 0, o que indicaria ser uma melhor faixa para aplicação da Fórmula III.

Sugere-se para trabalhos futuros o estudo da influência do ângulo de saída da ferramenta de corte, no processo de torneamento, na rugosidade final da peça acabada, uma vez que neste trabalho, os valores empregados ( $-6^\circ$  e  $6^\circ$ ) podem ter sido pouco expressivos devido aos valores relativamente pequenos.

Outra possível sugestão para trabalhos futuros seria o estabelecimento de uma constante de proporcionalidade que sirva para aproximar os valores teóricos de Ra e Rt aos experimentais, buscando assim uma forma de tornar mais eficiente e correta a escolha dos parâmetros de corte nos processos de usinagem.

## REFERÊNCIAS

- ABNT NBR ISO 4287. **Termos, Definições e Parâmetros de Rugosidade**, Especificações Geométricas do produto (GPS) – Rugosidade – Método do Perfil, 18p., 2002.
- ABNT NBR ISO 4288. **Regras e Procedimentos para Avaliação de Rugosidade**, Especificações Geométricas do produto (GPS) – Rugosidade – Método do Perfil, 10p., 2008.
- AGOSTINHO, O. L.; RODRIGUES, A. C. S., LIRANI, J. **Tolerância, ajuste, desvios e análise de dimensões**. São Paulo: Edgard Blücher, 1981.
- 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.
- BIASIBETTI, G. R. S. **Análise da rugosidade superficial de barras de aço SAE 1045 após torneamento** Matéria (Rio J.) vol.24 no.1 Rio de Janeiro 2019.
- BYRNE, G. **Advancing Cutting Technology**. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0007850607602005>>. Acesso em: 13/11/2020
- COELHO, R. T.; JANONNE, E. S. **Introdução ao Planejamento de Processos de Usinagem**. Disponível em: <[https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5709835/mod\\_resource/content/1/3-Planejamento%20de%20Processos%20de%20Usinagem\\_V1.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5709835/mod_resource/content/1/3-Planejamento%20de%20Processos%20de%20Usinagem_V1.pdf)>
- DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 6. ed. São Paulo, Artliber, 2008.
- FERRARESI D., **Fundamentos da usinagem dos metais**, São Paulo, Editora blucher, 1970.
- HÜBNER, H. B., **Estimação da rugosidade gerada no processo de fresamento frontal via redes neurais artificiais**. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) – UFRGS. Porto Alegre, p.125. 2016
- JASINEVICIUS, R. G. **SEM 0343 Processos de Usinagem**. Disponível em: <[https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/1910949/mod\\_resource/content/1/Aula%20Torneamento%20SEM0343%202016.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/1910949/mod_resource/content/1/Aula%20Torneamento%20SEM0343%202016.pdf)>. Acesso em: 13/11/2020
- JOSSO, B; BURTON, D. R.; LALOR, M. J. **Frequency normalised wavelet transform for surface roughness analysis and characterisation**. Disponível em:

<<https://engenheirodemateriais.com.br/2017/02/08/rugosidade-de-uma-superficie/>>.

Acesso em: 13/11/2020

KÖNIG, W.; KLOCKE, F. **Manufacturing Processes 1: Cutting**. Londres: Editora Springer, 2011.

KRATOCHVIL, R. **Moldes de Injeção Plásticos**. Disponível em: <<http://moldesinjecaoplasticos.com.br/fundamentos-do-processo-de-usinagem/>>.

Acesso em: 13/11/2020

LUZ, G. (2017). **Aço SAE 1045 Propriedades Mecânicas e Composição Química**.

<Disponível em: <https://www.materiais.gelsonluz.com/2017/10/aco-sae-1045-propriedades-mecanicas.html>>. Acesso em: 13/11/2020

MACHADO, Á. R., ABRÃO, A. M., COELHO, R. T., SILVA, M. B. da, & RUFFINO, R. T. (2009). **Teoria da usinagem dos materiais**. São Paulo: Edgard Blücher.

MONMA, A. C. **Bancada para Ensaio com Vistas À Modelagem e Simulação de Forças no Brochamento**. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/107135/317605.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 13/11/2020

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

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

SANDVIK COROMANT. [Site Institucional]. Disponível em: <<https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/machining-formulas-definitions/pages/milling.aspx>>. Acesso em: 13/11/2020

SANTOS, C. E., **Slides de Aula – Rugosidade**. CEFET-MG, 2016.

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

STOETERAU, R. L. **Fundamentos dos Processos de Usinagem** Disponível em: <<http://sites.poli.usp.br/d/pmr2202/arquivos/aulas/PMR2202-AULA%20RS1.pdf>>.

Acesso em: 13/11/2020