

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA – PPGMEC  
MESTRADO PROFISSIONAL**

**SAMUEL INÁCIO VELHO**

**DETERMINAÇÃO DO INTERVALO DE MÁXIMA EFICIÊNCIA NA USINAGEM  
DE TAMBORES DE FREIO FUNDIDO CINZENTO SAE J431 G3500 COM  
FERRAMENTAS DE CBN**

**CAXIAS DO SUL**

**2022**

**SAMUEL INÁCIO VELHO**

**DETERMINAÇÃO DO INTERVALO DE MÁXIMA EFICIÊNCIA NA USINAGEM  
DE TAMBORES DE FREIO FUNDIDO CINZENTO SAE J431 G3500 COM  
FERRAMENTAS DE CBN**

Dissertação apresentada como requisito  
para a obtenção do título de Mestre em  
Engenharia Mecânica pela Universidade  
de Caxias do Sul.

Orientador Prof. Dr. Rodrigo Panosso  
Zeilmann

**CAXIAS DO SUL**

**2022**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Universidade de Caxias do Sul  
Sistema de Bibliotecas UCS - Processamento Técnico

V436d Velho, Samuel Inácio

Determinação do intervalo de máxima eficiência na usinagem de tambores de freio fundido cinzento SAE J431 G3500 com ferramentas de CBN [recurso eletrônico] / Samuel Inácio Velho. – 2022.

Dados eletrônicos.

Dissertação (Mestrado) - Universidade de Caxias do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2022.

Orientação: Rodrigo Panosso Zeilmann.

Modo de acesso: World Wide Web

Disponível em: <https://repositorio.ucs.br>

1. Ferro fundido. 2. Torneamento. 3. Usinagem. 4. Eficiência industrial. I. Zeilmann, Rodrigo Panosso, orient. II. Título.

CDU 2. ed.: 669.131.6

Catalogação na fonte elaborada pela(o) bibliotecária(o)  
Márcia Servi Gonçalves - CRB 10/1500

**SAMUEL INÁCIO VELHO**

**DETERMINAÇÃO DO INTERVALO DE MÁXIMA EFICIÊNCIA NA USINAGEM  
DE TAMBORES DE FREIO FUNDIDO CINZENTO SAE J431 G3500 COM  
FERRAMENTAS DE CBN**

Dissertação apresentada como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica pela Universidade de Caxias do Sul.

Orientador Prof. Dr. Rodrigo Panosso Zeilmann

**Aprovado em: 15/12/2022**

**Banca examinadora:**

Prof. Dr. Rodrigo Panosso Zeilmann  
Universidade de Caxias do Sul - UCS

Prof. Dr. Alexandre Fassini Michels  
Universidade de Caxias do Sul - UCS

Prof. Dra. Zaida Cristiane dos Reis  
Universidade de Caxias do Sul - UCS

Prof. Dr. Gilmar Ferreira Batalha  
Universidade de São Paulo - USP

## RESUMO

Esta dissertação tem por objetivo realizar a identificação do intervalo de máxima eficiência na usinagem de tambores de freio fabricados a partir de ferro fundido cinzento SAE J431 G3500. Para esta determinação, grupos distintos de tambores de freio foram usinados com velocidades de corte de 800, 900, 1.000, 1.100 e 1.200 metros por minuto. Após o término dos ensaios, identificou-se o desgaste que cada inserto de CBN apresentou, relacionando a quantidade de tambores de freio usinados com a velocidade de corte empregada, o tempo utilizado e o custo associado ao processo de usinagem. Como resultado, a condição econômica de usinagem pôde ser determinada quando a velocidade de corte de 800 metros por minuto é utilizada, apresentando um custo de usinagem de \$ 9,18 por tambor usinado. A condição de máxima produção foi identificada no emprego da velocidade de 900 metros por minuto, onde foi possível a usinagem de 29 tambores de freio por hora. Com o emprego de velocidades de corte de 800 à 900 metros por minuto, estratégias produtivas devem ser utilizadas dentro deste intervalo, para a obtenção de uma máxima eficiência no processo de usinagem de tambores de freio fabricados a partir de ferro fundido cinzento, quando utilizados insertos de CBN.

**Palavras-chave:** Ferro fundido cinzento. Máxima eficiência. Torneamento. CBN.

## **ABSTRACT**

This dissertation aims to identify the range of maximum efficiency in the machining of brake drums made from gray cast iron SAE J431 G3500. For this determination, distinct groups of brake drums were machined with cutting speeds of 800, 900, 1.000, 1.100, and 1.200 meters per minute. After the end of the tests, the wear that each CBN insert presented was identified, relating the number of machined brake drums with the cutting speed used, the time used, and the cost associated with the machining process. As a result, the economic machining condition could be determined when the cutting speed of 800 meters per minute is used, presenting a machining cost of \$ 9,18 per machined drum. The maximum production condition was identified using a speed of 900 meters per minute, where it was possible to machine 29 brake drums per hour. With cutting speeds of 800 to 900 meters per minute, productive strategies must be used within this range to obtain maximum efficiency in the machining process of brake drums manufactured from gray cast iron, when using inserts of CBN.

**Keywords:** Gray cast iron. Maximum efficiency. Turning. CBN.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Processos de torneamento.....	17
Figura 2 – Formação do cavaco em representação esquemática .....	18
Figura 3 – Usinabilidade de diversos tipos de ferros fundidos .....	19
Figura 4 – Aparência de um cavaco de ruptura .....	20
Figura 5 – Diagrama dos mecanismos de desgaste de ferramentas.....	22
Figura 6 – Presença de material aderido à ferramenta de corte.....	23
Figura 7 – Desgaste abrasivo da ferramenta de corte .....	23
Figura 8 – Desgaste por difusão da ferramenta de corte .....	24
Figura 9 – Desgaste de entalhe na ferramenta de corte.....	25
Figura 10 – Dissipação do calor gerado na formação do cavaco .....	26
Figura 11 – Principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte.....	26
Figura 12 – Geometria da ferramenta de corte .....	27
Figura 13 – Tipos de Desgastes .....	27
Figura 14 – Comportamento do desgaste de uma ferramenta de usinagem.....	28
Figura 15 – Inserto de CBN com desgaste de flanco de corte.....	29
Figura 16 – Inserto com desgaste de cratera .....	29
Figura 17 – Desgaste de ferramenta de corte por lascamento .....	30
Figura 18 – Tempo de produção por peça x Velocidade de corte .....	35
Figura 19 – Velocidade econômica de corte .....	39
Figura 20 – Intervalo de máxima eficiência.....	40
Figura 21 – Tambor de freio de implemento rodoviário.....	41
Figura 22 – Dimensional da pista de frenagem .....	41
Figura 23 – Tambor de freio durante análise de dureza.....	46
Figura 24 – Gráfico com o comportamento da dureza dos lotes ensaiados .....	47
Figura 25 – Preparação dos corpos de prova.....	47

Figura 26 – Corpo de provas após ensaio de tração .....	48
Figura 27 – Força máxima de tração (N) .....	48
Figura 28 – Microestrutura presente nos corpos de prova .....	50
Figura 29 – Conjunto do sistema de corte da máquina ferramenta .....	51
Figura 30 – Comportamento da curva de vida durante o Pré-Teste .....	52
Figura 31 – Desgaste do gume de corte dos insertos de CBN ( $V_B$ ) .....	53
Figura 32 – Gráfico dos resíduos padronizados .....	53
Figura 33 – Desgaste do gume de corte dos insertos .....	54
Figura 34 – Gráfico de resíduos para análise ANOVA .....	55
Figura 35 – Capabilidade do processo para velocidade de 800 m/min.....	56
Figura 36 – Representação das parcelas dos tempos de fabricação em função da velocidade de corte.....	62
Figura 37 – Composição dos custos de usinagem .....	67
Figura 38 – Intervalo de máxima eficiência.....	68

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificação do inserto utilizadas .....	43
Tabela 2 – Composição química dos corpos de provas .....	49
Tabela 3 – Quantidade de tambores usinados por pré-teste .....	52
Tabela 4 – Análise ANOVA para um fator .....	55
Tabela 5 – Resultados estatísticos do processo .....	56
Tabela 6 – Tempos NAV no ciclo produtivo .....	58
Tabela 7 – Tempos de agregação de valor por velocidade de corte .....	59
Tabela 8 – Tempos de corte calculados .....	60
Tabela 9 – Tempo para troca de ferramenta.....	61
Tabela 10 – Custo relacionado ao tempo de corte.....	63
Tabela 11 – Custo relacionado a vida da ferramenta de corte.....	64
Tabela 12 – Custo relacionado a troca da ferramenta de corte.....	65
Tabela 13 – Custo associado aos tempos improdutivos.....	66
Tabela 14 – Custo total de fabricação.....	66

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AV	Operações que agregam valor
C <sub>1</sub>	Constante independente da velocidade de corte em R\$/peça
C <sub>2</sub>	Soma das despesas com mão-de-obra e com máquina em R\$/hora
C <sub>3</sub>	Constante de custo relativo à ferramenta
CBN	Nitreto de Boro Cúbico
CNC	Controle Numérico Computadorizado
CP	Corpo de Prova
d	Diâmetro da peça em milímetro
Em	Espaço ocupado pela máquina em m <sup>2</sup>
f	Avanço em milímetro por revolução
FC	Ferro fundido cinzento
H	Número de horas de trabalho por ano
j	Taxa de juros por ano
K <sub>B</sub>	largura da cratera
K <sub>e</sub>	Custo do m <sup>2</sup> ocupado pela máquina em R\$/m <sup>2</sup> .ano
K <sub>M</sub>	distância do centro da cratera à aresta de corte
K <sub>mc</sub>	Custo anual com manutenção da máquina em R\$/ano
K <sub>p</sub>	Custo de produção por peça
K <sub>pi</sub>	Custo de aquisição da pastilha intercambiável
K <sub>T</sub>	Profundidade de cratera
K <sub>uf</sub>	Custo das ferramentas de usinagem
K <sub>um</sub>	Custo de operação da máquina
K <sub>us</sub>	Custo da mão-de-obra de usinagem
l <sub>f</sub>	Percurso de avanço em milímetro

m	Metro
m <sub>l</sub>	Idade da máquina em anos
M	Vida prevista para máquina em anos
min	Minuto
NAV	Não agregam valor
N <sub>fp</sub>	Vida média do porta-ferramenta, em quantidade de arestas de corte até fim de vida
N <sub>s</sub>	Número de arestas de corte da pastilha intercambiável
N <sub>t</sub>	Número de troca de ferramentas de usinagem durante o lote de produção
PCBN	Nitreto de Boro Cúbico Policristalino
S <sub>h</sub>	Salário e encargos do operador em Reais por hora
S <sub>m</sub>	Custo total da máquina em R\$/hora
T	Vida da ferramenta conforme a fórmula de Taylor
t <sub>1</sub>	Tempo improdutivo
t <sub>2</sub>	Tempo de troca da ferramenta
t <sub>a</sub>	Tempos de deslocamento da ferramenta de corte
t <sub>c</sub>	Tempo de corte
t <sub>ft</sub>	Tempo de troca de ferramenta
t <sub>p</sub>	Tempo de preparo da máquina
t <sub>s</sub>	Tempo secundário
t <sub>t</sub>	Tempo total de usinagem de uma peça
v <sub>0</sub>	Velocidade de mínimo custo
V <sub>B</sub>	Largura do desgaste de flanco
V <sub>BC</sub>	Largura do entalhe interno da superfície de folga
V <sub>Bmax</sub>	Largura máxima do desgaste de flanco
V <sub>BN</sub>	Largura do entalhe externo da superfície de folga
v <sub>c</sub>	Velocidade de corte em metros por minuto

VDI	Porta ferramenta estática
$V_{mi}$	Valor inicial de aquisição do equipamento
$v_{mxp}$	Velocidade de máxima produção
$V_{si}$	Custo de aquisição do porta-ferramenta
Z	Tamanho do lote de produção

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	13
1.2	JUSTIFICATIVA .....	13
1.3.	OBJETIVO .....	14
1.4.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	15
<b>2.</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	16
2.2	USINAGEM .....	16
<b>2.2.1</b>	<b>Processos de usinagem</b> .....	16
<b>2.2.2</b>	<b>Processo de torneamento</b> .....	17
<b>2.2.3</b>	<b>Torneamento do ferro fundido cinzento</b> .....	17
<b>2.2.4</b>	<b>Mecânica do corte do ferro fundido cinzento</b> .....	18
<b>2.2.6</b>	<b>Ferramentas empregadas para torneamento do ferro fundido cinzento</b> .....	20
<b>2.2.7</b>	<b>Avarias e desgastes da ferramenta de corte</b> .....	21
2.2.7.1	Mecanismo de adesão.....	22
2.2.7.2	Mecanismo de abrasão .....	23
2.2.7.3	Mecanismo por difusão .....	24
2.2.7.4	Mecanismo por oxidação.....	24
<b>2.2.8</b>	<b>Desgaste nas ferramentas de corte</b> .....	25
2.2.8.1	Desgaste frontal ou de flanco .....	28
2.2.8.2	Desgaste de Cratera.....	29
2.2.8.3	Desgaste por lascamento .....	30
2.3	VIDA ÚTIL DE FERRAMENTA .....	31
<b>2.3.1</b>	<b>Fatores de influência no desgaste e vida da ferramenta</b> .....	31
2.4	ANÁLISE DAS CONDIÇÕES ECONÔMICAS DE USINAGEM.....	31
<b>2.4.1</b>	<b>Ciclos e tempos de usinagem</b> .....	32
<b>2.4.2</b>	<b>Velocidade de corte de máxima produção</b> .....	33
<b>2.4.3</b>	<b>Custos de produção</b> .....	35
2.5	VELOCIDADE ECONÔMICA DE CORTE.....	37
2.6	INTERVALO DE MÁXIMA EFICIÊNCIA.....	39
<b>3.</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	41
3.1.	ESTRATÉGIA DE USINAGEM .....	41
3.2.	MATERIAL UTILIZADO NOS ENSAIOS .....	42
3.3.	EQUIPAMENTOS UTILIZADOS.....	42
3.4.	FLUÍDO LUBRIRREFRIGERANTE .....	42
3.5.	FERRAMENTA DE CORTE.....	43

3.6	VARIÁVEIS DE ENTRADA .....	43
3.7	VARIÁVEIS DE SAÍDA.....	44
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>46</b>
4.1	ANÁLISE DA DUREZA DOS SUBGRUPOS DOS TAMBORES DE FREIO .....	46
4.2	ANÁLISE DOS ENSAIOS MECÂNICOS.....	47
4.3	ANÁLISE DOS RESULTADOS METALÚRGICOS E QUÍMICOS .....	49
4.4	DISPOSIÇÃO DO AMBIENTE TESTE .....	50
4.5	PRÉ-TESTE.....	51
4.6	DETERMINAÇÃO DA QUANTIDADE DE PEÇAS USINADAS .....	53
4.7	ESTABILIDADE DO PROCESSO DURANTE O TORNEAMENTO.....	55
4.8	DETERMINAÇÃO DOS TEMPOS DE USINAGEM.....	57
<b>4.8.1</b>	<b>Tempo sem agregamento de valor .....</b>	<b>57</b>
<b>4.8.2</b>	<b>Tempo com agregamento de valor.....</b>	<b>58</b>
<b>4.8.3</b>	<b>Determinação do intervalo de máxima produtividade .....</b>	<b>59</b>
4.9	DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE ECONÔMICA DE USINAGEM.....	63
4.10	DETERMINAÇÃO DO INTERVALO DE MÁXIMA EFICIÊNCIA .....	68
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>70</b>
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	70
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>72</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Em um ambiente competitivo, a indústria de manufatura tem como objetivo produzir produtos de alta qualidade, com máxima eficiência e baixo custo de fabricação. Esses objetivos têm sido a principal motivação dos engenheiros de processos na busca e implementação de metodologias que visam na constante melhoria dos processos de fabricação, permitindo um crescimento na lucratividade, com a redução dos custos de produção. O uso de uma usinagem econômica é cada vez mais difundido, no entanto, falta-lhe uma base de conhecimento profundamente enraizada e necessária para facilitar a implementação.

Na usinagem de materiais, a velocidade de corte é o principal fator econômico do processo de fabricação como um todo. Quando se aumenta a velocidade de corte, o tempo de usinagem diminui, mas o desgaste do gume de corte da ferramenta acelera. Esse desgaste prematuro do gume de corte da ferramenta de usinagem, apresenta um aumento no número de paradas de máquina devido a necessidade da troca da ferramenta de corte desgastada, a ajustes de máquina, a controles dimensionais extra, a ineficiência produtiva, entre outros.

Dessa forma, devem existir condições de usinagem que apresentem uma máxima eficiência na usinagem de tambores de freio. Essa competência é determinada entre a velocidade de corte econômica, na qual se permita maior vida útil do inserto de usinagem, e a velocidade de corte que promova a máxima produção, devido ao menor tempo de usinagem dos tambores de freio.

### 1.2 JUSTIFICATIVA

Observando o processo de fabricação de tambores de freio para implementos rodoviários fabricados a partir de ferro fundido cinzento, em uma empresa de transformação, pode-se estratificar uma variação de 18% no consumo de ferramentas de usinagem, mais especificamente, em insertos de torneamento. Essa variação pode ser identificada pelo aumento da demanda produtiva das linhas de usinagem de tambores de freio para implementos rodoviários, e a estratégia adotada pela empresa, em manter operando apenas um turno de trabalho nessa linha de produção. Para atender o aumento da demanda e a estratégia produtiva da empresa, uma ação tomada pela engenharia de processos foi a redução no tempo de usinagem dos tambores de

freio, aumentando a velocidade de corte aos parâmetros dos equipamentos CNC (Controle Numérico Computadorizado).

Conforme apresentam Andrade, Pereira e Souza (2016), Hazza, Najwa e Bakhari (2016) e Ferraresi (2014), a velocidade ou o avanço de corte apresentam uma relação intimamente ligada ao custo de fabricação na usinagem de uma peça. Ferraresi (2014) complementa que com o aumento dessas duas variáveis de forma unitária ou combinada, o tempo máquina diminui consideravelmente, reduzindo assim parte do custo de fabricação relacionada à máquina ferramenta. Utilizando dessa estratégia de fabricação (aumento da velocidade e avanço de corte durante a usinagem) há uma visível redução na vida da ferramenta de corte, aumentando assim os custos de fabricação relacionados à respectiva ferramenta.

Machado et al. (2011) e Diniz, Marcondes e Coppini (2006) destacam que à medida que a velocidade de corte cresce, a temperatura na interface peça, cavaco e ferramenta de corte também crescem. Para Santos e Sales (2007) o calor gerado na zona de cisalhamento secundário é a fonte de calor que mais influência nas temperaturas da ferramenta de corte, sendo um fator controlador na taxa de remoção, em materiais duros e de alto ponto de fusão como o caso do ferro fundido, aumentando assim o desgaste do gume de corte. Hazza, Najwa e Bakhari (2016) apresentam que se a ferramenta de corte atingir o fim de sua vida muito rapidamente, haverá um aumento consideravelmente no custo associado ao consumo de ferramenta de corte.

Ferraresi (2014) define a velocidade econômica de corte como aquela que o custo de fabricação em uma indústria é mínimo. Nessa definição deve ser computado o custo direto e indireto da matéria-prima, despesas diretas e indiretas de usinagem ou transformação. O trabalho realizado por Wouters e Stecher (2016) apresenta de forma detalhada o impacto no custeio final de um produto, levando em consideração as variáveis apresentadas por Ferraresi (2014).

Tendo em vista a relação da velocidade de corte e o consequente impacto nos custos no torneamento do ferro fundido cinzento com insertos de CBN, há necessidade de determinação e compreensão do intervalo de máxima eficiência, compreendido entre a velocidade de mínimo custo ( $v_0$ ) e a de máxima produção ( $v_{m\text{xp}}$ ), visto a carência de uma fonte de dados atual que correlacionem estas variáveis.

### 1.3. OBJETIVO

Determinar o Intervalo de Máxima Eficiência (IME), compreendido entre a velocidade

de mínimo custo de produção e a velocidade de máxima produtividade, do processo de torneamento de tambores de freio e quantificar o ponto de equilíbrio econômico na manufatura industrial.

#### 1.4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) identificar o intervalo em que seja possível realizar a maior taxa de remoção de cavacos, preservando ao máximo a integridade do inserto de torneamento - condição econômica de usinagem;
- b) estabelecer o intervalo de maior produtividade com o mínimo tempo de torneamento de tambores de freio - condição de máxima produção; e
- c) apresentar o intervalo de máxima eficiência para o processo de torneamento de tambores de freio, compreendida entre a condição econômica de usinagem e a condição de máxima produção.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A indústria de transformação metal mecânica atenta à concepção de produtos cada vez mais eficientes, que visam uma maior durabilidade, funcionalidade e baixos custos de produção, emprega diversas estratégias produtivas durante a fabricação. Cada etapa visa a obtenção dos requisitos estabelecidos no projeto do produto e são escalonadas seguindo um roteiro de fabricação pré-definido. Entre os processos produtivos, destacam-se: processo de conformação (laminação, dobra, corte, entre outros); de união (juntas soldadas, aparafusadas, rebitadas, entre outros); sinterização (pó metálicos ou cerâmicos); fusão e por remoção de material (fresamento, torneamento, furação, entre outros).

Dentre os processos de fabricação citados, destaca-se a usinagem de materiais. Esse processo consiste no melhoramento das propriedades do produto fabricado, realizando a remoção de material excedente na forma de cavaco.

### 2.2 USINAGEM

A usinagem é o processo de fabricação que, ao remover material sobressalente na forma de cavaco, consiste no melhoramento das peças a serem produzidas, permitindo a obtenção de formas, dimensões e acabamentos superficiais específicos que atendam às necessidades estabelecidas ao projeto do produto. Conforme ressaltam Andrade, Pereira e Souza (2016), o cavaco, que é a porção de material arrancado da peça, resultante das forças cisalhantes entre a peça usinada e a ferramenta de corte utilizada, apresenta inúmeras informações referentes ao processo de usinagem empregado e a matéria-prima utilizada para a fabricação da peça.

#### 2.2.1 Processos de usinagem

De acordo com Fitzpatrick (2013), os processos de usinagem são aqueles que ao serem empregados para dar forma, acabamento ou dimensão específica ao produto, removem material na forma de cavaco. Santos e Sales (2007) classificam os processos de usinagem em: abrasivos como brunimento, lapidação, lixamento e retificação; processos não convencionais como eletro

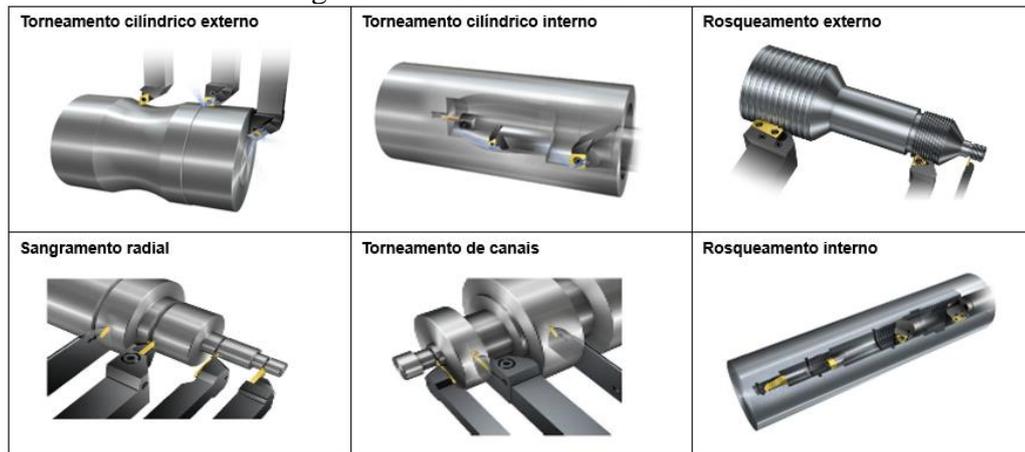
erosão, eletroquímica, feixe de elétrons, jato abrasivo, jato d'água, *laser* e plasma; e em processos convencionais como alargamento, brochamento, fresamento, furação, mandrilamento, retificação, roscamento, serramento e torneamento.

### 2.2.2 Processo de torneamento

Conforme explicam Ferraresi (2014) e Klocke (2011), o processo de torneamento consiste em uma ação mecânica de usinagem em que a peça fabricada é posta em rotação em torno do eixo principal da máquina, e a ferramenta de corte se desloca simultaneamente, seguindo uma direção paralela com o eixo referido. Ao realizar os dois movimentos simultâneos, o equipamento produzirá superfícies de revolução.

Devido à trajetória com que a ferramenta de corte é empregada, os processos de torneamento apresentam formas distintas para as superfícies de revolução. A Figura 1 apresenta as trajetórias que Ferraresi (2014) classifica como trajetórias retilíneas (torneamento cilíndrico, cônico, radial ou perfilamento) e trajetórias curvilíneas.

Figura 1 – Processos de torneamento



Fonte: Adaptado de Ferraresi (2014)

### 2.2.3 Torneamento do ferro fundido cinzento

Segundo Guesser (2009), uma característica notoriamente apreciada no torneamento

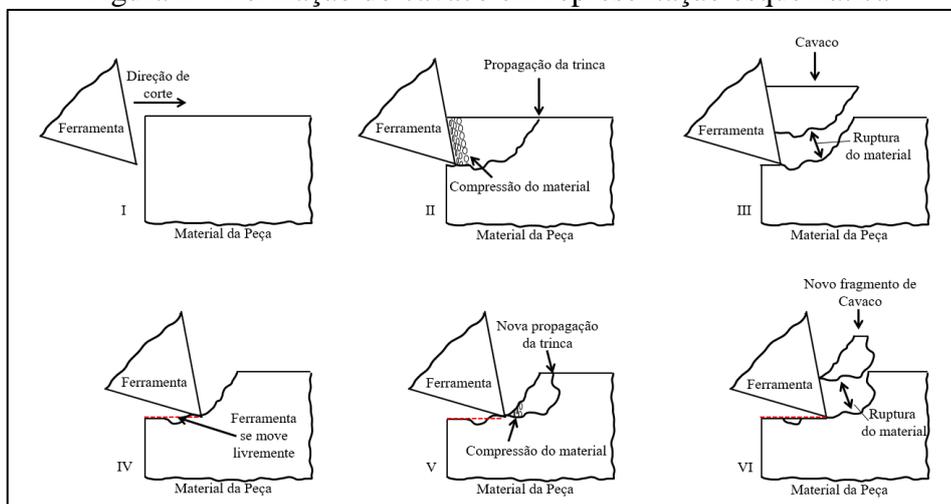
do FC é a facilidade com que o cavaco se quebra durante o corte. A presença de sulfeto de manganês e grafita, presente na forma lamelar, favorecem a quebra do cavaco, reduzindo a área de aderência e o tempo de contato do cavaco com a ferramenta.

Sousa, Sales e Machado (2017) e Guessser (2009) ainda ressaltam que durante o processo de corte do material é possível verificar a formação de trincas na frente do cavaco. Essas trincas favorecem a formação do cavaco, apresentando forças de corte menores, contudo podem ocasionar prejuízos ao acabamento superficial da peça. No caso de ferros fundidos cinzentos com presença de partículas grosseiras de grafita, a distância entre a formação da trinca e a zona afetada pela usinagem apresenta um aumento considerável, fazendo com que o cavaco seja arrancado de forma descontínua e precipitada.

#### 2.2.4 Mecânica do corte do ferro fundido cinzento

Durante a usinagem do ferro fundido cinzento, a ferramenta de corte ao realizar o movimento de aproximação à superfície do material a ser usinado, cria uma compressão inicial no material. Conforme apresenta Ventura e Hassui (2009), a grafita presente no ferro fundido em forma de veios, sofre uma concentração de tensão em suas extremidades, e devido ao fato dos veios serem interconectadas, cria-se planos de propagação de trincas à frente da aresta de corte. A Figura 2 apresenta de forma esquemática a formação das trincas, cavaco durante o corte do material usinado.

Figura 2 – Formação do cavaco em representação esquemática



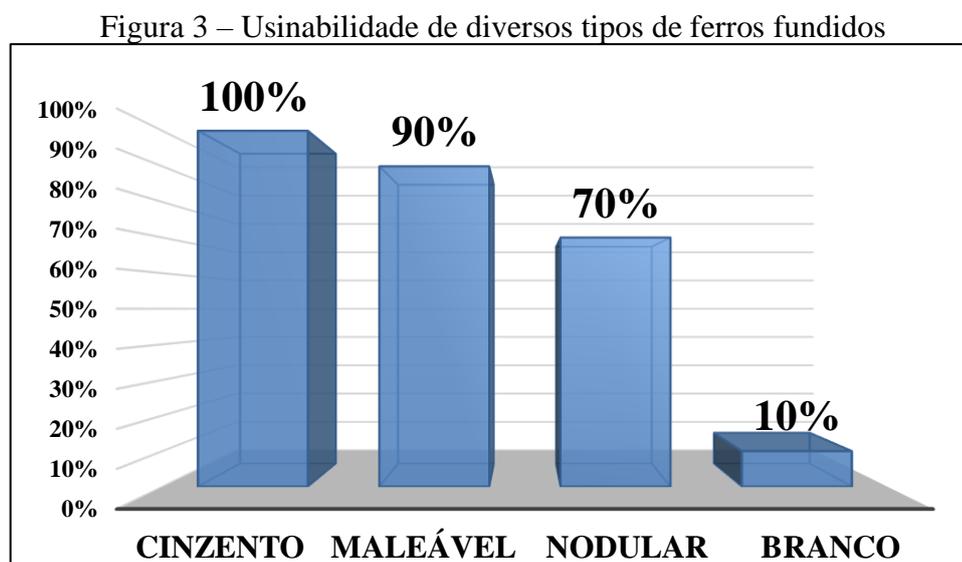
Fonte: Adaptado de Cohen, Vogt e Marwanga (2000)

Com o avanço da ferramenta sobre o material a ser usinado, Cohen, Vogt e Marwanga (2002) salientam que a remoção do material ocorre com um menor esforço, visto que a ferramenta de corte experimenta em determinados momentos um deslocamento livre pelo plano de usinagem. Este deslocamento livre também é apresentado na Figura 2, juntamente a etapa IV. Santos (2007) concorda com Cohen, Vogt e Marwanga (2002) e complementa que durante o processo de corte do material, a grafita apresenta propriedades similares a um lubrificante sólido, contribuindo com a redução dos esforços de corte durante a usinagem.

### 2.2.5 Usinabilidade do ferro fundido cinzento

Conforme definido por Stemmer (1989), usinabilidade pode ser entendida como uma propriedade do material para se trabalhar com ferramentas de corte. Há vários critérios para a avaliação dessa propriedade como, por exemplo, vida da ferramenta, força e potência consumida durante o corte e acabamento superficial. Ferraresi (2014) complementa, citando ainda a temperatura do corte, a produtividade e características do cavaco produzido durante a usinagem.

Dentre os ferros fundidos que apresentam grafita em sua estrutura, os melhores resultados de usinabilidade são obtidos com os ferros fundidos cinzentos, devido a grafita se apresentar em forma de veios que agem como um lubrificante sólido, facilitando a ruptura do cavaco cortado. A Figura 3 ilustra a usinabilidade de diversos tipos de ferros fundidos.



Fonte: Adaptado de Diniz, Marcondes e Coppini (2006)

Guessser (2009) e Cohen, Vogt e Marwanga (2002) defendem que a formação do cavaco no FC está relacionada a fratura frequente a região de corte e que o tamanho do cavaco gerado está relacionado ao tamanho de grafita presente na estrutura. Li (2013) e Diniz, Marcondes e Coppini (2006) concordam com Guessser quando é mencionado que carbono, apresentando-se na forma de grafita, facilitaria a fratura do cavaco na região de corte do material, fazendo com que o FC apresente cavacos de ruptura, diferentemente dos ferros fundidos maleáveis e nodulares, os quais tendem a apresentar cavacos de forma mais alongados. A Figura 4 apresenta formas mais comuns em que os cavacos de FC tendem a aparecer após o processo de corte.

Figura 4 – Aparência de um cavaco de ruptura



Fonte: Adaptado de Klocke (2011)

Cohen, Vogt e Marwanga (2002) destacam que a presença de veios de grafita à estrutura do FC facilitam a deformação e fratura do material a frente e abaixo da ferramenta de corte. Esta propriedade permite ao material removido uma aparência de pequenos fragmentos de metal na forma de vírgulas, conforme apresentado na Figura 4.

## 2.2.6 Ferramentas empregadas para torneamento do ferro fundido cinzento

Segundo Fitzpatrick (2013), materiais cerâmicos podem ser utilizados com sucesso na produção de ferramentas de corte, desde que apresentem uma boa estabilidade química em relação ao material a ser trabalhado, assim evitariam um desgaste acentuado devido às altas temperaturas durante o corte do material.

Opaluwa, Oyetunji, Seidu (2015) e Diniz, Marcondes e Coppini (2006) concordam

com Fitzpatrick e acrescentam que para produzir produtos com qualidade e apresentarem vida útil aceitável para o processo de usinagem uma ferramenta de corte, deve-se obter quatro características essenciais, tais como dureza a quente e a frio para resistir à força abrasiva e resistência à tração final, estabilidade química que evite a difusão permitindo que as ferramentas não se lascam ou se quebram facilmente, mesmo a altas temperaturas, tenacidade que absorva a energia e resistência ao desgaste.

Portanto, os cerâmicos à base de nitreto são mais adequados para torneamento em desbaste e operações com corte interrompido ou variações térmicas, enquanto que os cerâmicos à base de óxidos são mais adequados para a usinagem em acabamento e semi-acabamento quando o fundido apresenta boa qualidade e condições de usinagem estáveis (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2006, p.95). Uma opção para a escolha de ferramenta de corte é a utilização de insertos compostos por nitreto de boro cúbico (CBN ou PCBN).

Conforme apresentado por Schultheiss et al. (2018), Cerce e Pušavec (2016) e Boing, Schroeter e Oliveira (2015), o emprego de Insertos de CBN é muito utilizado onde há necessidade de elevadas taxas de remoção de cavacos, em materiais que apresentam elevadas durezas e temperaturas, e onde o mecanismo de desgaste predominante é a abrasividade. Essas características estão presentes durante a usinagem de ferros fundidos.

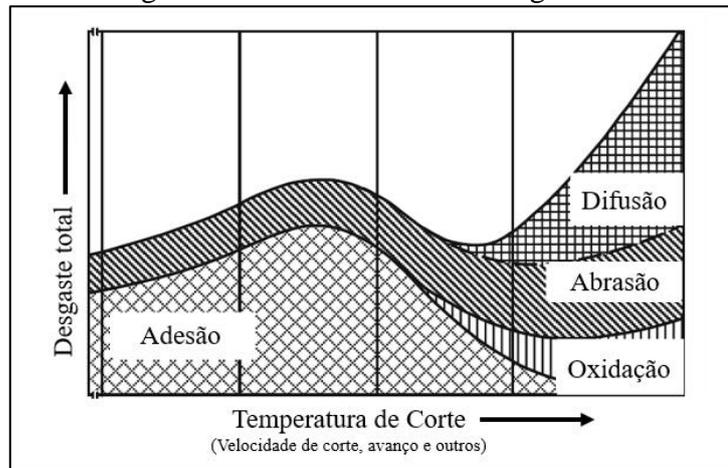
Ferramentas de CBN são frequentemente empregadas em processos de torneamento de desbaste, em que a espessura de material a ser removido possa apresentar uma faixa entre 0,5 à 3 mm e para processos de acabamento em que a espessura máxima deva ser de até 0,5 mm. Devido às propriedades presentes em insertos fabricados com a tecnologia CBN, Soshi, Ueda e Mori (2013), Meurer, Boehs e Guesser (2007) e Diniz, Marcondes e Coppini (2006) destacam a eficiência desses insertos ao realizar o corte de materiais que necessitam de forças de corte elevadas, como o caso de materiais com elevadas durezas ou na presença de cortes interrompidos.

### **2.2.7 Avarias e desgastes da ferramenta de corte**

Durante os processos de usinagem, estão presentes vários fenômenos causadores de desgaste das ferramentas de corte tais como desgaste de flanco, desgaste de cratera, deformação plástica da aresta de corte, lascamento, trincas entre outros. Ferraresi (2014), Klocke (2011), Machado et al. (2011) e Santos (2007) apresentam que os desgastes das ferramentas de cortes aconteçam devido aos vários mecanismos de desgaste.

Klocke (2011) os classifica os mecanismos de desgaste em adesão, abrasão, difusão e oxidação (presentes em elevadas temperaturas) e salienta que todas as formas de desgaste são originadas devido a, pelo menos, um desses mecanismos de desgaste, e que esses mecanismos são apresentados em função da temperatura presente no momento do corte do material usinado. A Figura 5 apresenta o diagrama dos mecanismos causadores de desgaste em ferramentas de corte, em virtude da temperatura apresentada pelos diversos fatores de usinagem.

Figura 5 – Diagrama dos mecanismos de desgaste de ferramentas



Fonte: Adaptado de Klocke (2011)

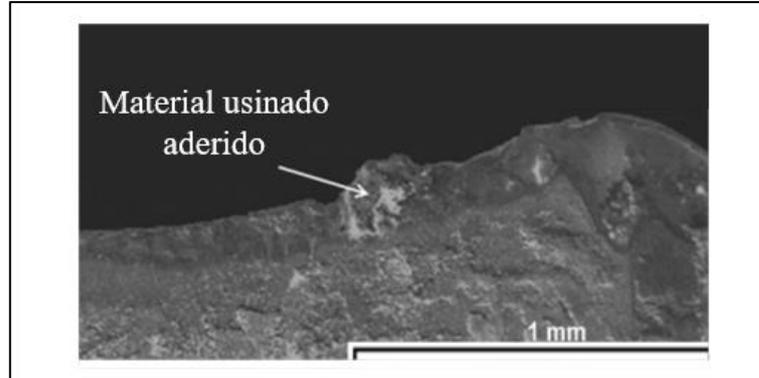
Em baixas velocidades de corte, há predominância do desgaste classificado como adesão, devido ao elevado tempo de contato entre a ferramenta de corte, o material que está sendo arrancado e a pressão realizada neste processo. Conforme a velocidade de corte é aumentada, mecanismos de difusibilidade, abrasividade e oxidação tendem a predominar.

#### 2.2.7.1 Mecanismo de adesão

Durante o processo de usinagem, o material que está sendo cortado se deposita sobre o flanco de corte, aderindo à ferramenta, e devido ao fluxo de cavaco nessa região, o material aderido ao flanco de corte da ferramenta acaba sendo arrancado. Este mecanismo de desgaste geralmente está presente quando há o emprego de baixas velocidades de corte, que permite ao material que está sendo arrancado, tempo suficientemente grande para o contato com a superfície da ferramenta de corte. Machado et al. (2011) destaca que fragmentos microscópicos são arrancados da superfície da ferramenta e arrastados junto com o fluxo de cavaco. A Figura 6

apresenta parte do material usinado aderido na ferramenta de corte após processo de usinagem.

Figura 6 – Presença de material aderido à ferramenta de corte



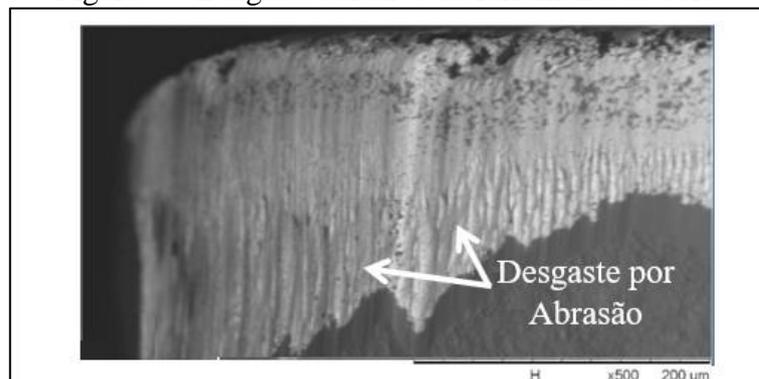
Fonte: Adaptado de Diniz, Machado e Corrêa (2016)

Esse mecanismo geralmente está presente na região de escorregamento, devido a utilização de parâmetros de corte (velocidade) relativamente baixos e a elevadas pressões presentes na interface entre ferramenta e cavaco produzido.

#### 2.2.7.2 Mecanismo de abrasão

Esse mecanismo apresenta perda de material por microsulcamento, microcorte ou microlascamento. Boing, Schroeter e Oliveira (2017) e Diniz, Marcondes e Coppini (2006) ressaltam que o desgaste gerado pela abrasão é incentivado pela presença de partículas duras no material da peça a ser usinada, que em decorrência da redução na dureza da ferramenta de corte devido às elevadas temperaturas em que a ferramenta de corte está inserida, favorecem este mecanismo. A Figura 7 apresenta o desgaste abrasivo na ferramenta de corte.

Figura 7 – Desgaste abrasivo da ferramenta de corte



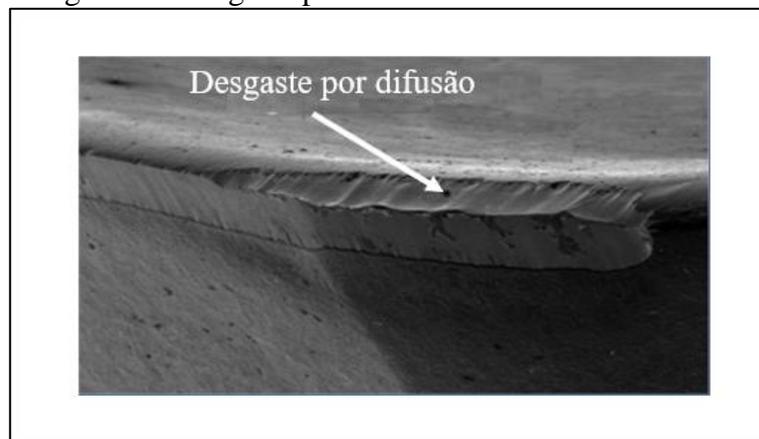
Fonte: Adaptado de Diniz, Machado e Corrêa (2016)

Dessa forma, quanto maior a dureza a quente da ferramenta, maior será sua resistência ao desgaste abrasivo. Esta propriedade fará com que a ferramenta de corte preserve suas propriedades construtivas, aumentando sua vida útil.

#### 2.2.7.3 Mecanismo por difusão

Consiste na perda de elétrons ou átomos da ferramenta de corte para o cavaco gerado e é dependente da temperatura presente durante o corte do material. Diniz, Marcondes e Coppini (2006) explicam que a presença de elevadas temperaturas na zona de corte do material propicia uma interação química entre a estrutura molecular da ferramenta de corte e o cavaco gerado, citando como exemplo as reações químicas presentes no processo de usinagem de ligas ferrosas com o emprego de ferramentas de diamante. A Figura 8 caracteriza esse desgaste presente na ferramenta de corte.

Figura 8 – Desgaste por difusão da ferramenta de corte



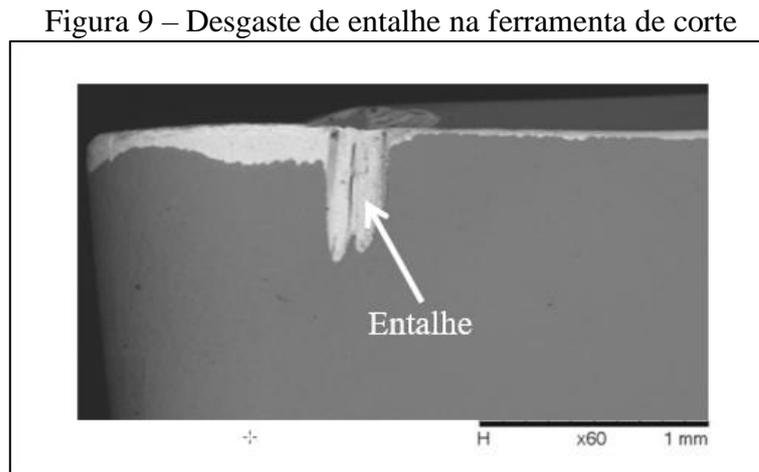
Fonte: Adaptado de Diniz, Machado e Corrêa (2016)

Em temperaturas superiores a  $600^{\circ}\text{C}$ , devido a afinidade presentes entre o carbono do diamante da ferramenta de corte e o ferro existente no cavaco gerado, o processo de difusão é grandemente incentivado, permitindo a presença de desgastes do tipo difusivo.

#### 2.2.7.4 Mecanismo por oxidação

Durante o processo usinagem, a abrasividade faz com que o oxigênio presente na at-

mosfera ou na água (presente nos fluidos utilizados como lubrificante), fragilize o gume de corte da ferramenta. Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2006), o desgaste gerado pela oxidação se forma especialmente nas extremidades do contato da ferramenta de corte com o cavaco gerado, devido à presença de oxigênio nessa região, podendo ser um dos causadores do desgaste de entalhe. A Figura 9 apresenta o desgaste por entalhe.



Fonte: Adaptado de Diniz, Machado e Corrêa (2016)

Santos e Sales (2007) destacam que o entalhe na forma de V pode ser formado por rebarbas presentes nas arestas laterais do cavaco, devido à presença de uma camada encruada de material na superfície da peça. Machado et al. (2011) concorda com Santos e Sales (2007), e complementa que além da rebarba do material presente, outros fatores podem contribuir para este desgaste, como concentrações de tensões devido a um gradiente de tensão na superfície livre, presença de uma camada abrasiva de óxidos na superfície, fadiga da ferramenta entre outros.

### 2.2.8 Desgaste nas ferramentas de corte

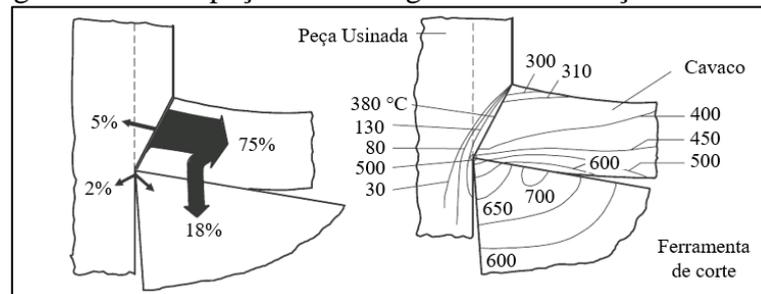
O desgaste de uma ferramenta de corte pode ser atribuído à ocorrência da deterioração do material devido às forças externas presentes durante uma ação mecânica entre duas superfícies. Essa ação mecânica pode ser evidenciada principalmente na forma de atrito, já que o calor gerado muda a estrutura dos materiais postos em contato, fazendo com que apresentem perdas progressivas de material.

Santos e Sales (2007) apresenta que durante o processo de usinagem do ferro fundido, ocorre um contato direto entre a ferramenta de corte utilizada com a peça a ser usinada, promo-

vendo a extração de material em forma de cavaco. O cavaco por sua vez, após o processo de corte, experimenta um contato físico com a ferramenta de corte durante o seu escoamento. Esses sucessivos contatos da ferramenta de corte com o material a ser cortado geram o cavaco e fazem com que a geometria original da ferramenta mude em virtude da ocorrência de desgaste progressivo.

Para Melo et al. (1999), durante o processo de corte, a maior parte da potência consumida é utilizada durante a aplicação de força de cisalhamento, a qual promove o deslizamento de planos cristalinos do material usinado para fora da superfície usinada em forma de cavaco. Essa remoção de material durante o processo de cisalhamento apresenta uma grande concentração de energia em forma de calor. Estimam-se que cerca de 97% a 99% do calor gerado flui diretamente para o cavaco, para a peça, para a ferramenta e para o meio circunvizinho. A Figura 10 apresenta a dissipação do calor gerado durante o processo de usinagem.

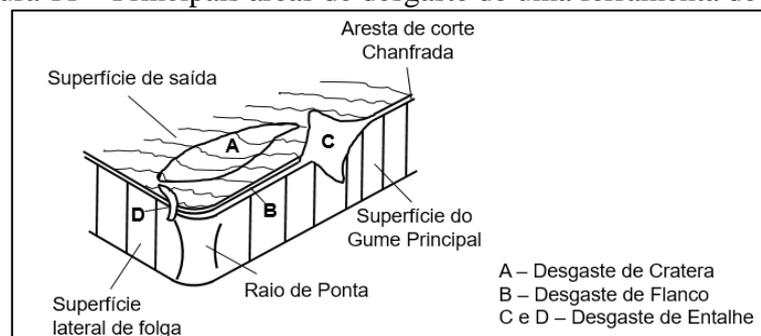
Figura 10 – Dissipação do calor gerado na formação do cavaco



Fonte: Adaptado de Klocke (2011)

Ferraresi (2014) expõe que a perda da capacidade de corte é avaliada geralmente através de um determinado grau de desgaste da ferramenta, tendo como referência a forma da ferramenta antes de gerar os esforços cisalhantes. A Figura 11 apresenta as principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte.

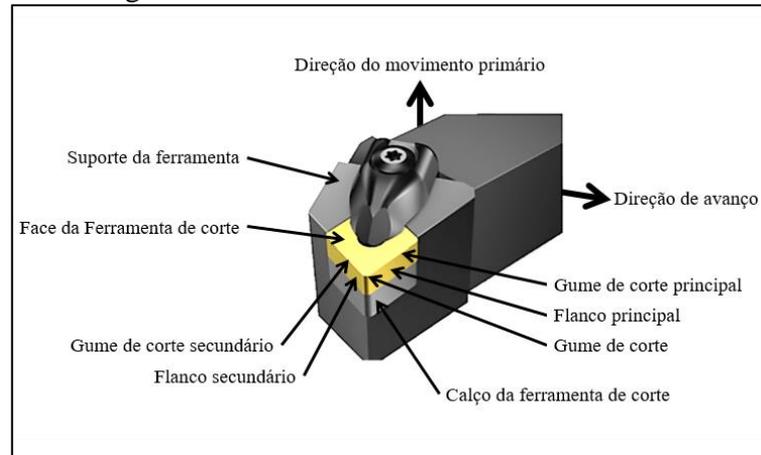
Figura 11 – Principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte



Fonte: Adaptado de Santos e Sales (2007)

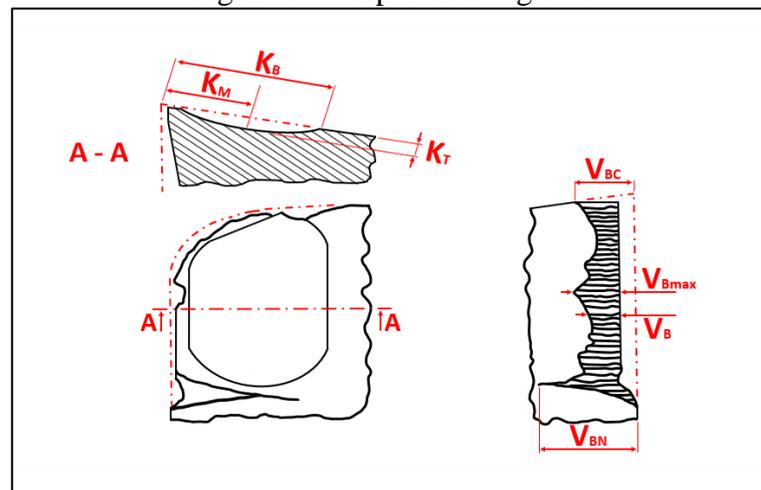
Conforme apresentado por Diniz, Marcondes e Coppini (2006), conveniuiu-se medir os desgastes no plano ortogonal da ferramenta em desgastes presentes na superfície de saída e na superfície de folga da ferramenta. As Figuras 12 e 13 ilustram a geometria e os desgastes que uma ferramenta de corte pode apresentar.

Figura 12 – Geometria da ferramenta de corte



Fonte: Adaptado de Klocke (2011)

Figura 13 – Tipos de Desgastes



Fonte: Adaptado de Diniz, Marcondes e Coppini (2006)

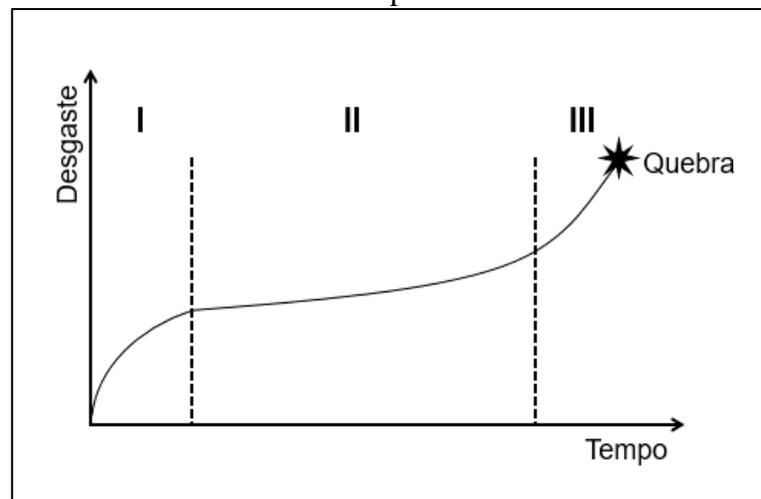
Na superfície de saída, apresentam-se os desgastes de profundidade de cratera ( $K_T$ ), largura da cratera ( $K_B$ ) e distância do centro da cratera à aresta de corte ( $K_M$ ). Já na superfície de folga da ferramenta, mede-se a largura do desgaste de flanco ( $V_B$ ) que consiste em um valor médio do desgaste ou retração do flanco de corte, a largura máxima do desgaste de flanco

( $V_{Bmax}$ ) e os valores dos desgastes gerados na superfície de folga pelos entalhes ( $V_{BN}$  e  $V_{BC}$ ).

### 2.2.8.1 Desgaste frontal ou de flanco

O desgaste de flanco é apresentado como o tipo de desgaste mais comum durante o processo de usinagem. Para Santos e Sales (2007), esse desgaste é apresentado devido à perda do ângulo de folga da ferramenta e o material, tornando o atrito maior nessa área. Todo o processo de usinagem ocasiona um desgaste que provoca a deterioração do acabamento superficial e a perda das qualidades dimensionais da peça usinada. Machado et al. (2011) apresenta a curva da evolução de desgaste de flanco de uma ferramenta de corte, ilustrada na Figura 14, em que destaca os três estágios característicos de desgaste de flanco de uma ferramenta de corte.

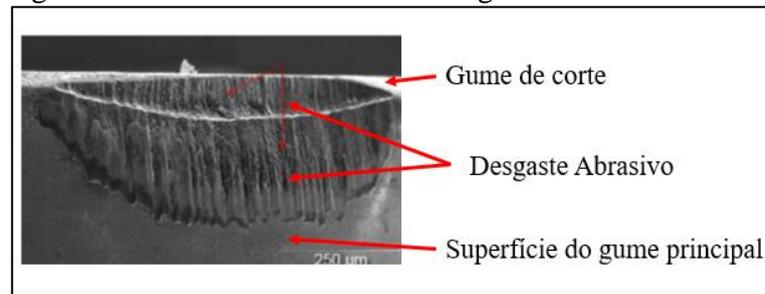
Figura 14 – Comportamento do desgaste de uma ferramenta de usinagem com o tempo de corte



Fonte: Adaptado de Machado et al. (2011)

O estágio I corresponde ao período de ajuste do gume em que o desgaste da ferramenta é mais acelerado. O estágio II corresponde ao período de desgaste constante da ferramenta de corte e no estágio III ocorre uma aceleração acentuada na taxa de desgaste da ferramenta, provendo, em um curto espaço de tempo, a quebra catastrófica da ferramenta. A Figura 15 apresenta o aspecto físico do inserto de CBN utilizado para o torneamento, ressaltando o desgaste de flanco de corte por abrasividade.

Figura 15 – Inseto de CBN com desgaste de flanco de corte



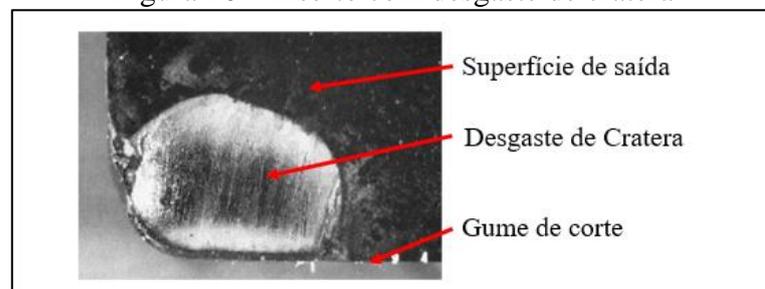
Fonte: Adaptado de Cerce e Pušavec (2016)

No desgaste de flanco por abrasividade, é possível identificar a remoção do material da ferramenta presente, em pequenas ranhuras. Para Santos e Sales (2007) esta remoção acontece quando há uma remoção de material da superfície devido a ação de partículas duras presentes no material que está sendo usinado.

#### 2.2.8.2 Desgaste de Cratera

Desgaste de cratera, conforme Diniz, Marcondes e Coppini (2006), é o tipo de desgaste que ocorre na saída da ferramenta, causado pelo atrito entre a ferramenta e o cavaco. Esse desgaste pode ser ocasionado quando o material da peça a ser usinado é frágil, gerando cavacos curtos. Stemmer (1989) complementa que o colapso da ferramenta pode se dar pela cratera, pela marca de desgaste ou pelo efeito combinado. A Figura 16 ilustra um inserto utilizado no processo de torneamento, onde esse apresentou o desgaste classificado como cratera.

Figura 16 – Inseto com desgaste de cratera



Fonte: Adaptado de Inácio, Costa e Santos (2018)

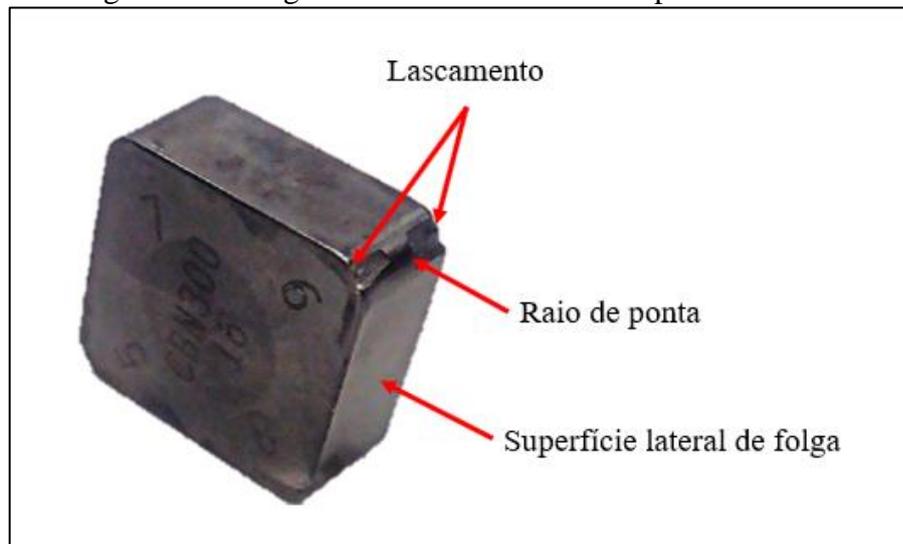
Conforme apresentado por Diniz, Marcondes e Coppini (2006) e Stemmer (1989) esse desgaste é causado pelo atrito entre a ferramenta e o cavaco produzido durante o processo de

torneamento. Tooptong, Park e Kwon (2017) e Santos e Sales (2007) citam que através do contato da ferramenta de corte e o cavaco gerado durante a usinagem, há uma transferência de átomos da ferramenta para o cavaco, incentivado pela temperatura de interface e a solubilidade dos elementos da zona de fluxo.

### 2.2.8.3 Desgaste por lascamento

É caracterizado por uma falha acidental e prematura em que ocorre a ruptura de lascas de material de uma única vez. De acordo com Diniz, Marcondes e Coppini (2006), normalmente ocorre junto à ferramenta constituída de material frágil ou quando a aresta de corte é pouco reforçada, prejudicando o acabamento da peça a ser usinada. A Figura 17 ilustra uma ferramenta de corte danificada por lascamento.

Figura 17 – Desgaste de ferramenta de corte por lascamento



Fonte: Adaptado de Cerce e Pušavec (2016)

Conforme Stemmer (1989), a origem do desgaste por lascamento é devido às condições de usinagem do material. Estas condições podem ser originadas por solicitações de origem mecânica durante cortes interrompidos, impactos especialmente sobre materiais muito tenazes, dimensões excessivas de cavacos e durante vibrações de qualquer origem (presentes em fixações de peças insuficientes, porta ferramentas muito longas, entre outros) ou sobre solicitações térmicas, que conduzem a um fissuramento da aresta de corte

## 2.3 VIDA ÚTIL DE FERRAMENTA

A definição “vida de ferramenta” é utilizada para denominar o tempo em que essa trabalha efetivamente em contato com a peça, produzindo cavaco até perder sua capacidade de corte, mantendo qualidade superficial e tolerâncias dimensionais. Ferraresi (2014) salienta que a vida da ferramenta pode ser definida através de um grau de desgaste previamente estabelecido.

O tamanho desse desgaste pode estar relacionado a inúmeros fatores. González et al. (2018) e Santos e Sales (2007) concordam com Ferraresi (2014) e apresentam os seguintes fatores a serem considerados: se o desgaste de uma ferramenta de corte ocorrer de forma acelerada, haverá o receio de quebra da cunha da ferramenta, variações dimensionais acima do especificado no projeto do material, acabamento superficial não mais satisfatória, aumento de forças de usinagem, entre outros.

### 2.3.1 Fatores de influência no desgaste e vida da ferramenta

Condições de usinagem como velocidade de corte utilizado, avanço da ferramenta junto à peça e a profundidade são fatores que influenciam diretamente no desgaste das ferramentas. Diniz, Marcondes e Coppini (2006) ressaltam que entre os parâmetros citados anteriormente, a velocidade de corte é a variável que mais influencia no desgaste da ferramenta, devido ao aumento da temperatura gerado durante o processo. O aumento do avanço de corte também é um fator que tende a elevar a temperatura na interface ferramenta, peça e cavaco, aumentando assim a área da ferramenta que recebe calor. O fator que menos apresenta aceleração no desgaste da ferramenta é a profundidade. Diniz, Marcondes e Coppini (2006) apresentam que a profundidade não influencia significativamente no aumento da energia na formação do cavaco, apenas apresenta uma maior taxa de remoção de cavaco.

Outro fator importante é a geometria da ferramenta. Conforme apresentado por Diniz, Marcondes e Coppini (2006), ferramentas que apresentam maiores raios de ponta, maiores ângulos de saída do cavaco e o crescimento do ângulo de folga tendem a apresentar uma maior vida útil.

## 2.4 ANÁLISE DAS CONDIÇÕES ECONÔMICAS DE USINAGEM

Para manter-se financeiramente competitivas, as empresas de manufatura devem criar

valor agregado usinando produtos no menor tempo possível, com elevada qualidade. Portanto, há necessidade de se fabricar peças com breves tempos de usinagem, minimizando os desgastes das ferramentas de corte e os custos operacionais.

Conforme apresenta Machado et al. (2011), o desgaste das ferramentas utilizadas na usinagem de materiais é influenciado pela velocidade de corte empregada durante o processo de geração de cavaco. Li et al. (2016) acrescenta que a velocidade de corte é mais significativa do que outros parâmetros, como avanço e profundidade de corte.

O emprego de velocidades de corte mais elevadas apresenta reduções nos tempos de usinagem, porém o desgaste do gume de corte se acelera de forma significativa. González et al. (2018), Shabtay e Kaspi (2016) e Ferraresi (2014) destacam que a baixa vida útil da ferramenta é antieconômica devido aos altos custos com substituição de ferramentas, e que, por sua vez, o uso de baixas velocidades aumenta a vida das ferramentas. No entanto, esta se apresenta inviável economicamente por causa de uma baixa taxa de produção e elevados ciclos de fabricação e tempos de usinagem.

#### 2.4.1 Ciclos e tempos de usinagem

O tempo de usinagem de um item desempenha um papel importante no planejamento e programação do processo de fabricação. Conforme Liu et al. (2012), é atribuído ao tempo de usinagem um dos fatores mais decisivos e importantes para a composição de custos produtivos.

Para Liu et al. (2012), os fatores de impacto do tempo de usinagem em um equipamento CNC podem ser classificados em quatro tipos: as informações de movimento; desempenho da máquina; método de interpolação e condição de usinagem. Já Hbaieb, Othmani e Bouzid (2010) consideram como tempo de usinagem a somatória dos tempos de corte, tempos de troca da ferramenta, retração, aproximação e o tempo de carregamento da ferramenta usada.

A análise realizada por Tang (2006) apresenta que o tempo de usinagem é a soma do tempo de corte (gerando cavaco) e os tempos associados aos deslocamentos das ferramentas de corte (sem o contato com a peça). Ferraresi (2014), Groover (2010), Machado et al. (2011), Diniz, Marcondes e Coppini (2006) concordam com Tang (2006) e apresentam a Equação 1 para determinar o tempo total de usinagem, desmembrando cada parcela de tempo dentro do ciclo completo de usinagem.

$$t_t = t_c + t_s + t_a + \frac{t_p}{Z} + \frac{N_t \cdot t_{ft}}{Z} \quad (1)$$

Onde:

$t_t$  - Tempo total de usinagem de uma peça

$t_c$  - Tempo de corte

$t_s$  - Tempo secundário (colocação, remoção e inspeção da peça)

$t_a$  - Tempos de deslocamento da ferramenta de corte (aproximação e afastamento)

$t_p$  - Tempo de preparo da máquina (*setup* e ajuste de dispositivos)

$t_{ft}$  - Tempo de troca de ferramenta (substituição de ferramenta desgastada e ajuste de nova ferramenta)

$N_t$  - Número de troca de ferramentas de usinagem durante o lote de produção

$Z$  - Tamanho do lote de produção

#### 2.4.2 Velocidade de corte de máxima produção

O torneamento é um processo de usinagem amplamente utilizado na fabricação de produtos, portanto, uma seleção ideal de parâmetros de corte para satisfazer uma meta produtiva é de suma importância. Conforme apresentam Lee e Tarng (2000), para determinar os parâmetros ideais de corte, modelos matemáticos confiáveis devem ser formulados para associar os parâmetros de corte ao melhor desempenho produtivo. Machado et al. (2011) e Diniz, Marcondes e Coppini (2006) destacam que a Equação 1 pode ser reescrita, dividindo-a em três partes, conforme apresentada na Equação 2.

$$t_t = t_c + t_1 + t_2 \quad (2)$$

Onde:

$t_t$  - Tempo total de usinagem de uma peça

$t_c$  - Tempo de corte

$t_1$  - Tempo improdutivo, referente a colocação, inspeção e retirada da peça, aproximação e afastamento da ferramenta, substituição e preparo de máquina

$t_2$  - Tempo para a troca da ferramenta desgastada durante o processo de usinagem

Na aplicação do torneamento cilíndrico de uma peça, Ferraresi (2014) e Diniz, Marcondes e Coppini (2006) e apresentam que o tempo de corte é uma função entre as dimensões da peça a ser torneada com parâmetros de corte a serem utilizados. A Equação 3 apresenta, de forma teórica, o tempo correspondente ao corte de material a ser torneado.

$$t_c = \frac{l_f \cdot \pi \cdot d}{1.000 \cdot f \cdot v_c} \quad (3)$$

Onde:

$l_f$  - Percurso de avanço em mm

$d$  - Diâmetro da peça em mm

$f$  - Avanço em mm/volta

$v_c$  - Velocidade de corte em m/mm

Quanto à parcela correspondente ao tempo improdutivo e ao tempo relacionado com a troca da ferramenta desgastada durante o processo de usinagem, Ferraresi (2014) e Diniz, Marcondes e Coppini (2006) apresentam juntamente as Equações 4 e 5.

$$t_1 = t_s + t_a + \frac{t_p}{Z} - \frac{t_{ft}}{Z} \quad (4)$$

$$t_2 = \frac{l_f \cdot \pi \cdot d}{1.000 \cdot f \cdot T} \cdot t_{ft} \quad (5)$$

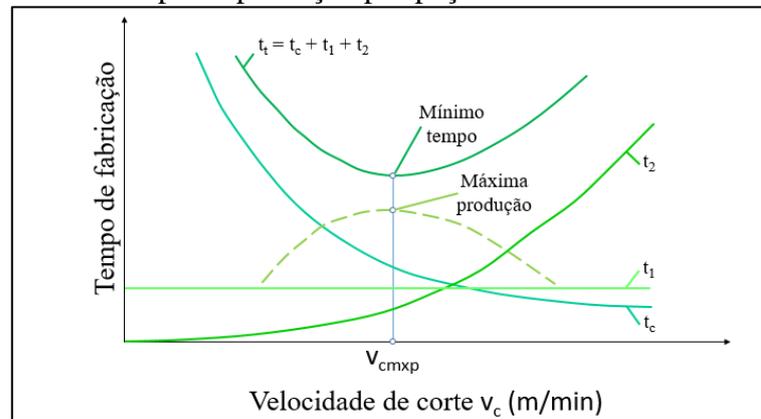
Onde:

$T$  - Vida da ferramenta conforme a fórmula de Taylor

A variação destas 3 parcelas, o tempo de corte ( $t_c$ ), o tempo improdutivo referente a colocação, inspeção e retirada da peça, aproximação e afastamento da ferramenta, substituição e preparo de máquina ( $t_1$ ) e do tempo relacionado com a troca da ferramenta desgastada durante o processo de usinagem em função da velocidade de corte ( $t_2$ ), é apresentada por Ferraresi (2014), Machado et al. (2011) e Diniz, Marcondes e Coppini (2006) qualitativamente junto a

Figura 18, que ilustra de forma gráfica, o tempo de produção de uma peça tendo como variação no processo a velocidade de corte utilizada no processo.

Figura 18 – Tempo de produção por peça versus a velocidade de corte



Fonte: Adaptado de Diniz, Marcondes e Coppini (2006)

Machado et al. (2011) apresenta que a primeira parcela ( $t_1$ ) possui uma forma constante, independente da velocidade de corte utilizada. A segunda parcela ( $t_2$ ) se eleva de forma exponencial com o aumento da velocidade de corte. A terceira parcela ( $t_c$ ) apresenta uma forma inversa a velocidade de corte e conforme a velocidade de corte é aumentada, seu valor é reduzido. Ferraresi (2014) e Machado et al. (2011) destacam que no ponto mínimo identificado ao somatório das três parcelas de tempo corresponde a velocidade de corte de máxima produção.

### 2.4.3 Custos de produção

À medida que as empresas percebem a importância dos custos em sua gestão, esses passam a figurar como elementos primordiais na busca da competitividade. Conforme apresentado por Eyerkauffer et al. (2013), numa indústria, os custos de produção representam a maior proporção do conjunto de gastos. Diniz, Marcondes e Coppini (2006) apresentam que a composição do custo de produção na usinagem de forma simplificada pode ser expressa conforme a Equação 6.

$$K_p = K_{us} + K_{um} + K_{uf} + K_{ft} \quad (6)$$

Onde:

$K_p$  - Custo de produção por peça

$K_{us}$  - Custo da mão-de-obra de usinagem

$K_{uf}$  - Custo das ferramentas de usinagem (depreciação, afiação, etc.)

$K_{ft}$  - Custo com a troca da ferramenta

$K_{um}$  - Custo de operação da máquina (depreciação, manutenção, espaço, energia consumida, etc.)

Quanto à parcela correspondente ao custo da mão-de-obra, Diniz, Marcondes e Coppini (2006) demonstram que ela pode ser expressa em função do salário dos operadores e pelo tempo de fabricação. A Equação 7 ilustra essa aplicação.

$$K_{us} = t_t \cdot \frac{S_h}{60} \left[ \frac{R\$}{Peça} \right] \quad (7)$$

Onde:

$t_t$  - Tempo total de confecção por peça em minutos

$S_h$  - Salário e encargos do operador em Reais por hora

Já na parte equivalente ao custo com máquinas, Diniz, Marcondes e Coppini (2006) desmembram essa parcela entre o valor e idade do equipamento, vida prevista para os equipamentos e taxa de juros por ano. A Equação 8 apresenta essas variáveis.

$$K_{um} = \frac{t_t}{H \cdot 60} \cdot \left[ \left\{ \left( V_{mi} - V_{mi} \cdot \frac{m1}{M} \right) \cdot j \right\} + \frac{V_{mi}}{M} + K_{mc} + (E_m \cdot K_e \cdot j) \right] \left[ \frac{R\$}{Peça} \right] \quad (8)$$

Onde:

$V_{mi}$  - Valor inicial de aquisição do equipamento

- m1 - Idade da máquina em anos
- M - Vida prevista para máquina em anos
- j - Taxa de juros por ano
- $K_{mc}$  - Custo anual com manutenção da máquina em R\$/ano
- $E_m$  - Espaço ocupado pela máquina em  $m^2$
- $K_e$  - Custo do  $m^2$  ocupado pela máquina em R\$/ $m^2$ .ano
- $S_m$  - Custo total da máquina em R\$/hora
- H - Número de horas de trabalho por ano

No caso de se utilizar insertos intercambiáveis para o custo associado à ferramenta de corte, Diniz, Marcondes e Coppini (2006) elucidam aquele junto a Equação 9.

$$K_{ft} = \frac{V_{si}}{N_{fp}} + \frac{K_{pi}}{N_s} \left[ \frac{R\$}{\text{vida da ferramenta}} \right] \quad (9)$$

Onde:

$V_{si}$  - Custo de aquisição do porta-ferramenta

$N_s$  - Número de gumes de corte da pastilha intercambiável

$K_{pi}$  - Custo de aquisição da pastilha intercambiável

$N_{fp}$  - Vida média do porta-ferramenta, em quantidade de arestas de corte até fim de vida

## 2.5 VELOCIDADE ECONÔMICA DE CORTE

A velocidade de corte é sem dúvida o parâmetro que apresenta maior influência no desgaste de ferramentas de corte. Znojkwicz, Korzeniewski e Wiciak (2017) apresentam que a velocidade de corte é a responsável pelo aumento da temperatura de corte, acelerando o desgaste da ferramenta de corte. O trabalho realizado por Sahoo e Mishra (2014) para determinar

uma modelagem preditiva na otimização da temperatura de corte, apresentou como fator determinante no desgaste da ferramenta o emprego de velocidades extremas de corte.

Para Hazza e Bakhari (2016) a velocidade de usinagem econômica é aquela em que a velocidade de corte preserva a seguinte relação: custo mínimo por unidade - máxima vida útil da ferramenta de corte. Diniz, Marcondes e Coppini (2006) apresentam a Equação 10 que expressa a composição dos custos da operação de usinagem, tendo como variável a velocidade de corte.

$$K_p = C_1 + \frac{t_c}{60} \cdot C_2 + \frac{t_c}{T} \cdot C_3 \quad (10)$$

Onde:

$C_1$  - Constante independente da velocidade de corte em R\$/peça

$C_2$  - Soma das despesas com mão-de-obra e com máquina em R\$/hora

$C_3$  - Constante de custo relativo à ferramenta

Para o processo de torneamento cilíndrico, o tempo de corte ( $t_c$ ) é dado pela Equação 11.

$$t_c = \frac{l_f \cdot \pi \cdot d}{1.000 \cdot f \cdot v_c} \quad (11)$$

Onde:

$l_f$  - percurso de avanço em milímetro

$d$  - Diâmetro da peça em milímetro

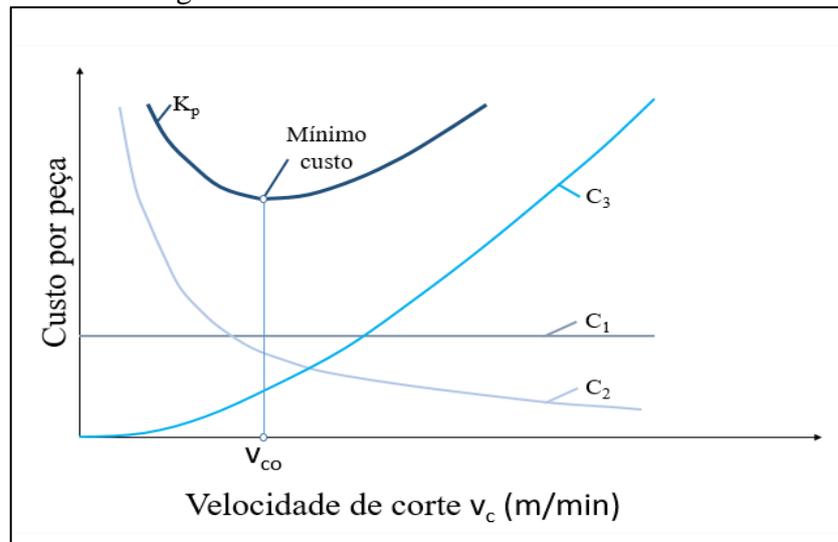
$f$  - Avanço em milímetro por revolução

$v_c$  - Velocidade de corte em metros por minuto.

A Figura 19 apresenta de forma gráfica, o comportamento em que cada uma das cons-

tantes referentes ao custo fixo independente da velocidade de corte ( $C_1$ ), ao custo associado à soma das despesas com mão-de-obra e com máquina ( $C_2$ ) e ao custo relativo à ferramenta ( $C_3$ ), apresentam de forma individual, e combinada, em função da velocidade de corte empregada durante a usinagem de produtos.

Figura 19 – Velocidade econômica de corte



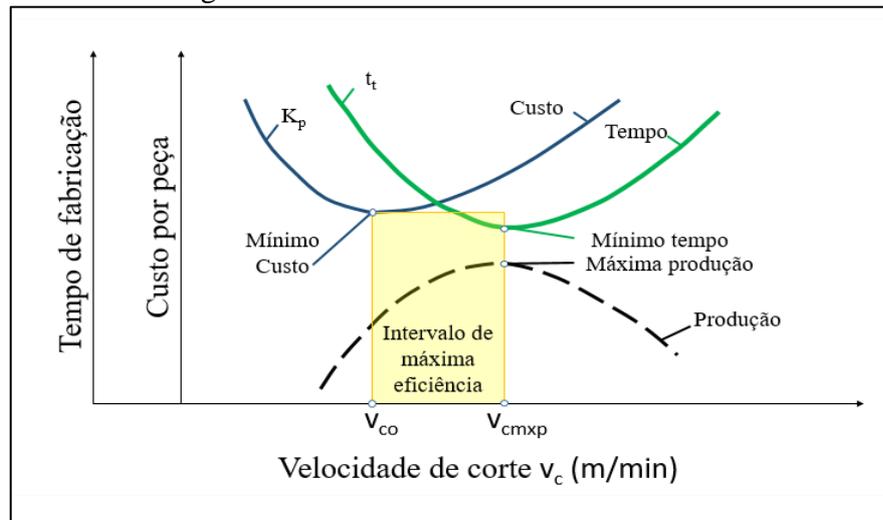
Fonte: Adaptado de Diniz, Marcondes e Coppini (2006)

A utilização de ferramentas de CBN para realizar o corte de materiais que necessitam de forças de corte muito elevadas permite o emprego de uma ampla faixa para velocidade de corte. Estudos para determinar o desgaste de ferramentas e seus esforços, apresentam faixas para a velocidade de corte na ordem de 120 a 160m/min para Ferro Fundido Branco com elevado teor de cromo (Gutnichenko et al., 2017), 100 a 480m/min para Ferro Fundido Nodular (Grzesik et al., 2012) e de 1382m/mim para Ferro Fundido Cinzento (Cerce e Pušavec, 2016).

## 2.6 INTERVALO DE MÁXIMA EFICIÊNCIA

A determinação do intervalo de máxima eficiência é apresentada por Diniz, Marcondes e Coppini (2006) como sendo aquele compreendido entre a velocidade de mínimo custo ( $v_{co}$ ) e a de máxima produção ( $v_{cmxp}$ ). A Figura 20 apresenta de forma esquemática a representação do intervalo de máxima eficiência.

Figura 20 – Intervalo de máxima eficiência



Fonte: Adaptado de Diniz, Marcondes e Coppini (2006)

Machado et al. (2011) destaca que, em velocidades inferiores a velocidade de mínimo custo ( $v_{co}$ ), tem-se um aumento de custos devido aos elevados tempos de usinagem, custo de operação das máquinas e dos operadores. Quando se utiliza velocidades superiores a velocidade de máxima produção ( $v_{cmxp}$ ), também é possível identificar um acréscimo nos custos de operação. Esse acréscimo é devido ao crescente consumo das ferramentas de corte, pela baixa produtividade com máquinas e operadores parados em razão do aumento do tempo de máquina parada para substituição de ferramentas desgastadas.

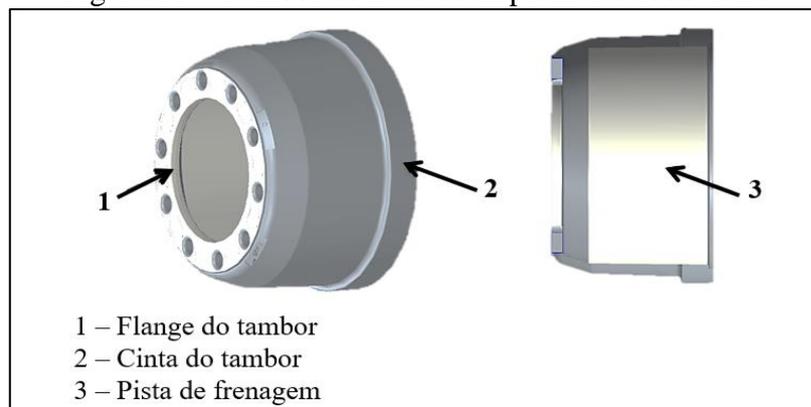
### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo aborda todo o procedimento experimental realizado no trabalho, apresentando os materiais, os equipamentos e as técnicas utilizadas para obtenção dos resultados.

#### 3.1. ESTRATÉGIA DE USINAGEM

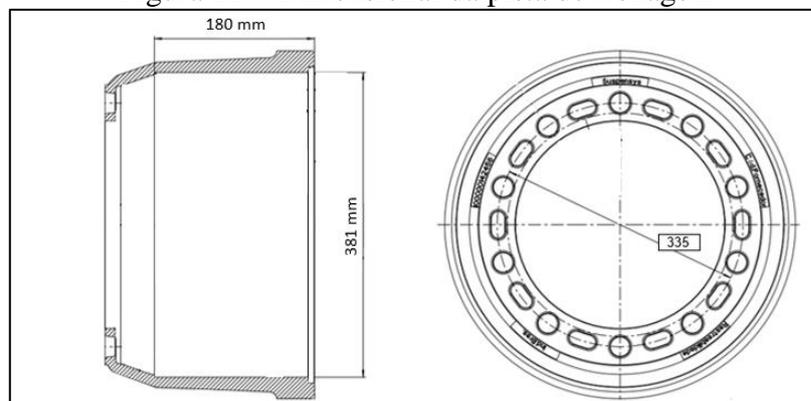
Para a realização do processo de usinagem dos tambores de freio, o inserto testado efetuará o torneamento da região definida como pista de frenagem, conforme apresentado nas Figuras 21 e 22. A etapa a ser realizada consiste na operação de acabamento por apresentar um sobre metal constante e livre de inclusões não metálicas, removidas na operação de desbaste previamente realizada.

Figura 21 – Tambor de freio de implemento rodoviário



Fonte: Elaboração do Autor (2020)

Figura 22 – Dimensional da pista de frenagem



Fonte: Elaboração do Autor (2020)

Tendo em vista que o intuito principal deste trabalho é a identificação do intervalo de máxima eficiência no processo de torneamento, a principal variável inserida no processo de torneamento é a velocidade de corte. Essa inicia de 800 a 1.200 metros por minuto, com uma variação de 100 metros por minuto a cada teste experimental. Para cada teste será realizada uma réplica. Durante os testes experimentais, serão mantidos constantes os parâmetros de corte em 0,2 milímetros por rotação, para a velocidade de avanço ( $V_f$ ) e de 0,30 mm à profundidade de corte ( $A_p$ ).

### 3.2. MATERIAL UTILIZADO NOS ENSAIOS

Para a realização dos ensaios de torneamento e determinação do intervalo de máxima eficiência, serão utilizados tambores de freio fabricados a partir do ferro fundido cinzento. A larga utilização do Ferro Fundido Cinzento para a fabricação de tambores de freio, conforme Guessser (2009) apresenta, é devido a ótima condutividade térmica e capacidade de amortecimento de vibrações em virtude da presença de veios de grafita presente na estrutura do material. Chiaverini (1996) salienta que a presença do carbono livre em forma de veios de grafita junto o ferro fundido cinzento apresenta limites de resistência (LR) na faixa de 100 a 400 MPa.

### 3.3. EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

A máquina ferramenta utilizada nos experimentos será um torno vertical da marca Okuma, de fabricação japonesa. O modelo do equipamento é 2SP-V80 de duplo *spindle*, de dois eixos comandados numericamente, com potência de 30 kW (40 HP).

A medição dos desgastes de inserto de torneamento será obtida com o auxílio de um estereomicroscópio trinocular, do fabricante Carl Zeiss, que permitirá uma ampliação do gume de corte em 30 vezes (15 vezes pela lente ocular e 2 vezes pela lente objetiva), modelo Stemi 305, de fabricação alemã. A obtenção das imagens e medição dos desgastes dos gumes de corte serão realizadas pela câmera e *software* de medição para microscopia colorida do mesmo fabricante do estereomicroscópio trinocular, modelo Axiocam 105 color com 5 Mega Pixels.

### 3.4. FLUÍDO LUBRIRREFRIGERANTE

O fluido lubrificador utilizado será o Synergy 905 do fornecedor Blaser Swiss-

lube. Esse fluído é uma emulsão diluída em água, na proporção 95% de água e 5% de fluído. Será empregado em todas as etapas do processo de torneamento de forma abundante. O fluído é uma mistura de ácidos orgânicos (sais) que contêm nitrogênio e inibidores. O produto não contém óleo mineral, cloro, nitrito, liberadores de nitrito, boro, triazina (HHT), dietanolamina, NDELA, silicones, PCB, PCT, TCDD ou outras substâncias contendo dioxinas. Antes do início da execução dos ensaios, todo o equipamento será drenado, limpo e utilizado fluído lubrificante novo.

### 3.5. FERRAMENTA DE CORTE

Para o processo de torneamento dos tambores de freio, serão utilizadas ferramentas de corte novas. Essas ferramentas foram fornecidas pela empresa KORLOY Tools. A Tabela 1 apresenta as características construtivas do inserto utilizado.

Tabela 1 – Especificação do inserto utilizadas

Modelo do inserto de torneamento	Comp. balanço ferramenta (mm.)	Qde. gumes de corte	Ângulo ponta	Comp. gume (mm.)	Comp. efetivo corte (mm.)	Raio de ponta (mm.)	Espes. do inserto (mm.)
CNMN120416 KS800	297	4	80°	12,9	3,9	1,6	4,8

Fonte: Adaptado de Korloy Tools (2020)

A utilização de insertos intercambiáveis padronizados é muito utilizado na indústria metal mecânica, visto a facilidade na troca e preparação nas operações de usinagem.

### 3.6 VARIÁVEIS DE ENTRADA

Para a identificação do ponto de máxima eficiência para o processo de torneamento de tambores de freio, será avaliado a influência da variação da velocidade de corte durante o torneamento dos tambores de freio com ferramentas de CBN. Essa variação será iniciada com a velocidade de 800m/min, e elevada em intervalos de 100m/min, até a velocidade máxima de 1.200m/min. Durante os cinco experimentos, foram realizados três ensaios por intervalo de velocidade de corte. Esses intervalos de velocidade de corte já são empregados durante a usinagem

de tambores de freio pela área de Engenharia de Processos da empresa por apresentarem estabilidade dimensional das peças usinadas durante a produção de peças seriadas.

Os demais parâmetros de usinagem, tais como a velocidade de avanço ( $V_f$ ) e profundidade de corte ( $A_p$ ), serão constantes durante o processo de torneamento de todas as amostras, respectivamente em 0,20 mm/rot e 0,30 mm. Essa estratégia visa em reduzir o número de variáveis durante o processo de usinagem.

### 3.7 VARIÁVEIS DE SAÍDA

Após o processo de torneamento das amostras dos cinco grupos de velocidade experimentada, cada gume de corte dos insertos de CBN será verificado o seu desgaste apresentado. Essa verificação será possível através de medição do desgaste de flanco ( $V_B$ ), que cada gume de corte irá apresentar.

Os critérios para definição de fim de vida deverão ser monitorados pelo desgaste de flanco ( $V_B$ ) de 0,50 mm, pela quebra da aresta de corte do inserto, pela presença de rebarbas na região usinada ou pelo número máximo de 50 tambores de freio torneados. Os critérios de desgaste de flanco de 0,50 mm e quantidade máxima de tambores torneados deverão ser validados na etapa de pré-teste. Esses controles deverão ser realizados a cada troca de tambor de freio a ser torneado.

Para identificação da velocidade de máxima produção, será necessária a determinação do Tempo Total de Fabricação ( $t_t$ ) composto pelos Tempos de Corte ( $t_c$ ), Tempo Improdutivo ( $t_1$ ) e Tempo de Troca ( $t_2$ ). A composição desses tempos será estratificada em função da velocidade de corte experimentada durante os testes de usinagem para a operação de acabamento.

Para a determinação da velocidade econômica de corte, será necessário identificar o ponto mínimo para o Custo de Produção por Peça ( $k_p$ ). Esse custo será esboçado sobre a análise dos custos da mão-de-obra ( $K_{us}$ ), da operação da máquina ( $K_{um}$ ) e das ferramentas de corte ( $K_{uf}$ ) utilizadas durante a usinagem dos tambores de freio sobre cada teste experimentado.

Após o torneamento das amostras, uma análise dos desgastes apresentados pelas ferramentas de corte será realizada, comparando os mecanismos de desgastes presentes para cada velocidade de corte experimentada. Os desgastes serão confrontados entre a quantidade de peças produzidas e a velocidade de corte empregada.

Com o intuito da validação estatística dos dados obtidos durante os procedimentos experimentais, será empregado uma Análise da Variância (ANOVA) com um nível de confian-

ça de 95%. Essa análise permitirá identificar se haverá diferenças entre as médias de peças em relação a velocidade de corte utilizada, e o desgaste do gume de corte que cada inserto apresentará.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados dos experimentos de usinagem que demonstram o intervalo de máxima eficiência utilizado no torneamento de tambores de freio. Os insertos utilizados, tornearam tambores de freio experimentando diferentes velocidades de corte.

### 4.1 ANÁLISE DA DUREZA DOS SUBGRUPOS DOS TAMBORES DE FREIO

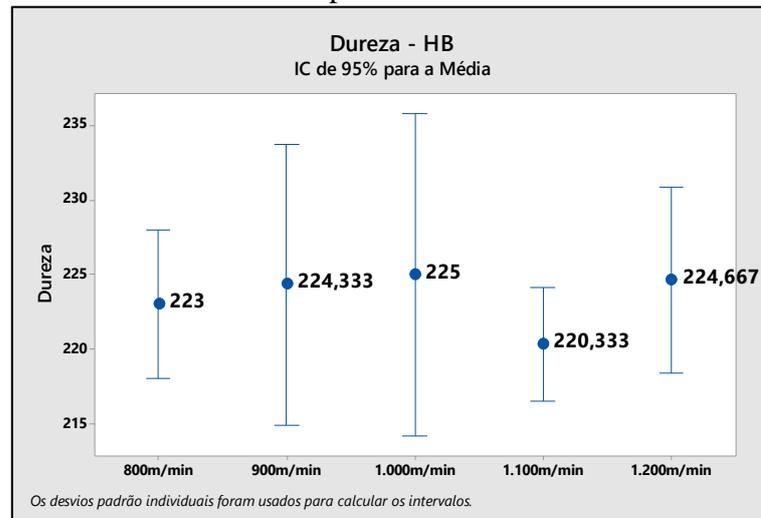
Como primeira análise dos esforços de usinagem, realizou-se a medição da dureza dos subgrupos dos tambores de freio, ao início de cada um dos ensaios de usinagem. A cada ensaio de dureza, um tambor de freio bruto (no estado anterior ao de usinado) foi retirado do subgrupo e encaminhado para a análise. Esta variável pôde ser mensurada pelo ensaio não destrutivo realizado pelo durômetro Wpm. Conforme apresentado por Guessser (2009) o ensaio de dureza consiste em comprimir lentamente uma esfera de aço sobre a superfície plana, polida e limpa de um metal através de uma carga, de forma automática. Após esta etapa, a esfera é retraída e com o auxílio de um microscópio, mede-se a impressão deixada pela esfera de aço convertendo a medição realizada para a escala Brinell. As Figuras 23 e 24 ilustram um tambor de freio submetido ao ensaio de dureza superficial durante um dos ensaios, e os valores encontrados na escala Brinell (HB), respectivamente.

Figura 23 – Tambor de freio durante análise de dureza



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Figura 24 – Gráfico com o comportamento da dureza dos lotes ensaiados



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Os tambores utilizados para a análise desta variável apresentaram valores médios para dureza Brinell entre 220 e 225 HB. Conforme Chiaverini (1996) e Guessser (2009), ligas de ferro fundido cinzento podem apresentar valores para esta propriedade entre 175 e 280 HB, sendo assim, os valores encontrados satisfazem as especificações para esta propriedade.

#### 4.2 ANÁLISE DOS ENSAIOS MECÂNICOS

Após o ensaio de dureza realizado nos tambores de freio, os mesmos foram encaminhados ao laboratório de metalurgia, para que fossem extraídos 3 corpos de prova. A Figura 25 ilustra a remoção e preparação dos corpos de prova extraídos da pista de frenagem.

Figura 25 – Preparação dos corpos de prova



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Um dos corpos de prova foi preparado para ensaio de tração conforme norma ISO 6892. A Figura 26 ilustra o CP rompido, após o esforço de tração experimentado no sentido axial.

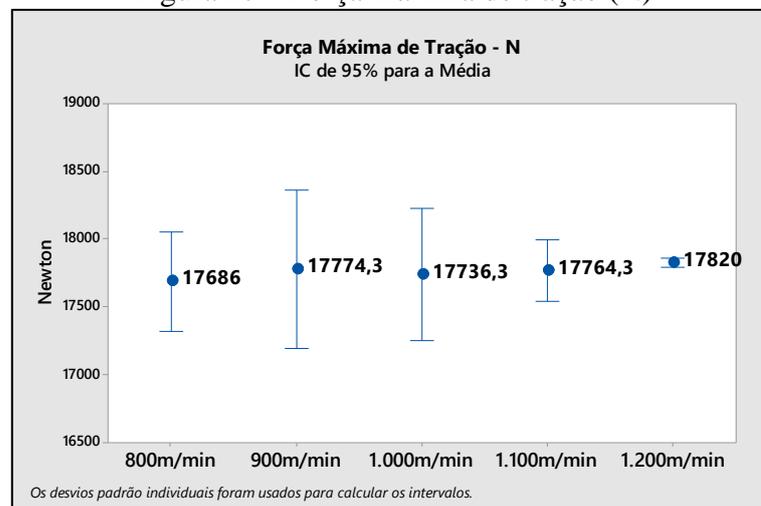
Figura 26 – Corpo de provas após ensaio de tração



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Este corpo de provas foi submetido a um esforço crescente de tração junto ao equipamento Emic, até a sua ruptura. Guessser (2009) apresenta que durante o esforço de tração o equipamento exerce um movimento constante alongando o CP no sentido axial. Chiaverini (1996) ressalta que o FC por apresentar o carbono em forma de grafita lamelar, permite a fratura do CP de forma frágil e repentina, sem que haja uma estrição (afinamento da seção transversal) na região de ruptura. Groover (2010) concorda com Guessser (2009) e complementa que a ductilidade do FC é muito baixa. Para cada ensaio de usinagem, foi realizado três ensaios de tração. A Figura 27 apresenta os resultados obtidos durante o ensaio de tração, até a ruptura dos corpos de provas.

Figura 27 – Força máxima de tração (N)



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Conforme Chiaverini (1996) salienta, a força de tração do ferro fundido cinzento pode apresentar valores compreendidos entre 7.698 à 30.792 Newtons. De acordo com os valores obtidos após o ensaio de tração, as forças médias de tração apresentaram valores em conformidade com a especificação do FC, tendo como resposta valores entre 17.686 e 17.820 Newtons.

Ferraresi (2014) apresenta que a ruptura de um material policristalino sobre cargas estáticas pode ocorrer de duas maneiras, excedendo a resistência ao cisalhamento, como o caso de materiais dúcteis, ou excedendo a resistência à tração, ocorrendo de forma brusca, apresentando uma deformação quase que imperceptível, como o caso de materiais frágeis tal como o FC. Esta propriedade é muito apreciada no processo de usinagem de tambores de freio.

#### 4.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS METALÚRGICOS E QUÍMICOS

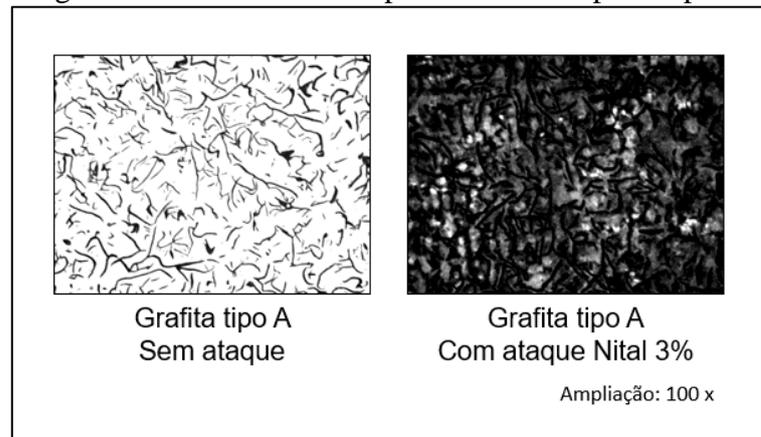
Os outros corpos de provas de cada subgrupo foram direcionados para a análise de composição química realizado pelo espectrômetro CKD e o microscópio metalográfico para identificação da microestrutura, respectivamente. Cada CP apresentou composições químicas e de microestruturas em faixas dentro do especificado em projeto. A Tabela 2 e a Figura 28 apresentam respectivamente os valores encontrados para estas duas análises.

Tabela 2 – Composição química dos corpos de provas

Velocidade de corte	Composição química, %				
	C	Si	Mn	P	S
800m/min	3,51	2,43	0,47	0,37	0,109
900 m/min	3,25	2,52	0,61	0,22	0,086
1.000 m/min	3,58	2,48	0,56	0,20	0,084
1.100 m/min	3,53	2,50	0,63	0,42	0,119
1.200 m/min	3,47	2,55	0,45	0,25	0,090

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Figura 28 – Microestrutura presente nos corpos de prova



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Após a análise metalográfica das amostras, foi possível identificar uma matriz 100% perlítica, com grafita do tipo A, em forma de veios, apresentando tamanho na faixa de 4 à 5 em todas as amostras dos corpos de prova analisados. Conforme destacam Cohen, Vogt e Marwanga (2002), as forças de compressão exercidas pela ferramenta de corte durante a usinagem de FC que apresenta grafita do tipo A em sua microestrutura, facilitam a cisão do material, propagando trincas a frente e abaixo da ferramenta de corte, reduzindo de forma significativa o esforço da usinagem. Chiaverini (1996) e Winck et al. (2020) ressaltam que a estrutura apresentada nos materiais fabricados a partir de FC devem apresentar uma elevada resistência ao desgaste. Esta propriedade é muito apreciada entre componentes de freio, devido a constante sollicitação ao longo de sua utilização.

#### 4.4 DISPOSIÇÃO DO AMBIENTE TESTE

Para realização dos testes de usinagem juntamente ao torno vertical Okuma 2SP V80, no sentido de um melhor desempenho nos testes de usinagem, optou-se pela remoção do conjunto do sistema de fixação de peças, composto por placa de sujeição hidráulica e castanhas de fixação, para limpeza e lubrificação. Após o processo de revisão destes equipamentos, os mesmos foram devidamente reinstalados no torno vertical Okuma. Os elementos de fixação e alojamento do inserto de usinagem formados pela ferramenta, calço e grampo de fixação foram substituídos por equipamentos novos. A Figura 29 apresenta em detalhe o conjunto do sistema de corte formado pelo porta ferramenta, ferramenta utilizada antes da montagem e do inserto montado na ferramenta.

Figura 29 – Conjunto do sistema de corte da máquina ferramenta



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

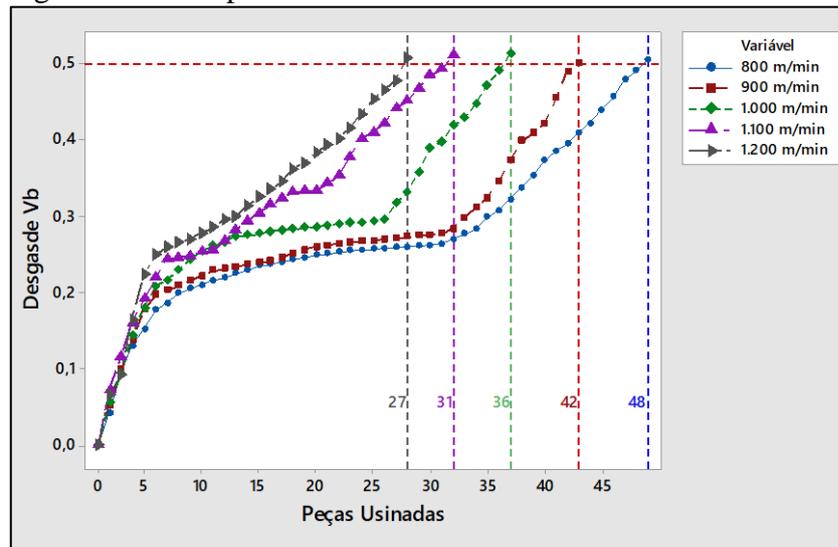
A realização da substituição da ferramenta, do calço e grampo de fixação do inserto intercambiável antes do início do processo de usinagem dos tambores de freio conforme demonstrado, permitiram uma maior rigidez e estabilidade do inserto durante o processo de usinagem das amostras. Este procedimento visou na mitigação de possíveis vibrações que poderiam afetar a vida dos inserts de CBN, durante a usinagem dos tambores de freio fabricados a partir do FC.

#### 4.5 PRÉ-TESTE

A determinação para o critério do fim de vida dos inserts de torneamento apresentado no item 3.7 para cada velocidade de corte experimentada foi validado com a realização do pré-teste de desgaste das ferramentas de corte. Neste procedimento foram utilizados 03 gumes novos para cada teste. Este procedimento visou a obtenção da quantidade máxima de peças usinadas que cada velocidade de corte utilizada pôde atingir, observando os critérios para fim de vida estabelecidos anteriormente.

Durante a realização dos pré-testes, não foi observado fratura dos gumes de cortes, o que pôde propiciar uma excelente medição dos desgastes dos gumes de corte após o término dos ensaios. Para cada um dos pré-testes realizados, executou-se uma tréplica dos ensaios para cada velocidade de corte experimentada. A Figura 30 apresenta a curva de vida que os inserts de CBN apresentaram para o desgaste de  $V_B$  em função da quantidade de tambores torneados.

Figura 30 – Comportamento da curva de vida durante o Pré-Teste



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Com o aumento das velocidades de corte, cada ferramenta utilizada durante a realização do pré-teste apresentou um fim de vida mais precoce. Conforme Machado et al. (2011) apresenta, é possível identificar que a partir do desgaste de  $V_b$  de  $0,22 \pm 0,02$  mm temos o início da fase II, onde os desgastes apresentam um desgaste constante até a marca de  $0,28 \pm 0,02$  mm. A partir desta marca inicia-se a fase III, aonde os desgastes rapidamente chegam até o critério de fim de vida predeterminado. A Tabela 3 apresenta a quantidade de peças usinadas ao atingir o critério para fim de vida.

Tabela 3 – Quantidade de tambores usinados por pré-teste

Pré-teste realizado	Velocidade de corte do pré-teste	Quantidade de peças usinadas
01	800 m/min	48
02	900 m/min	42
03	1.000 m/min	36
04	1.100 m/min	31
05	1.200 m/min	27

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

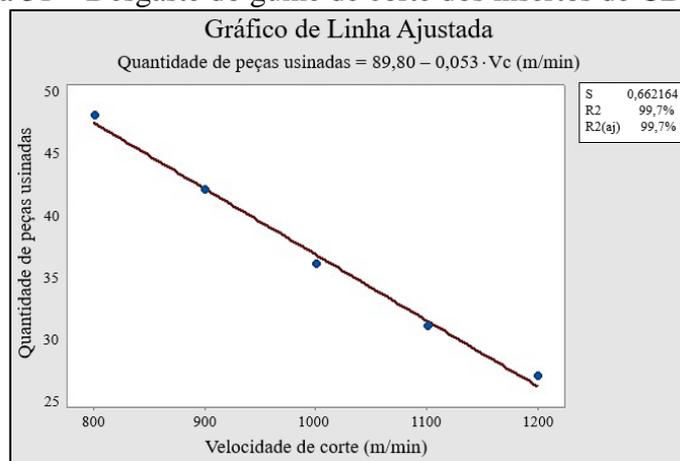
Com o aumento da velocidade de corte, observou-se que os insertos de CBN apresentaram uma redução na quantidade de peças usinadas. Conforme Machado et al. (2011), Klocke (2011) e Diniz, Marcondes e Coppini (2006) a redução na quantidade de peças usinadas para cada uma das velocidades utilizadas, pode ser explicada devido ao aumento da temperatura na interface ferramenta, peça e cavaco. Esse fator reduz algumas propriedades do inserto, permi-

tindo assim que o mesmo seja desgastado com uma velocidade maior quando utilizado elevadas velocidades de corte.

#### 4.6 DETERMINAÇÃO DA QUANTIDADE DE PEÇAS USINADAS

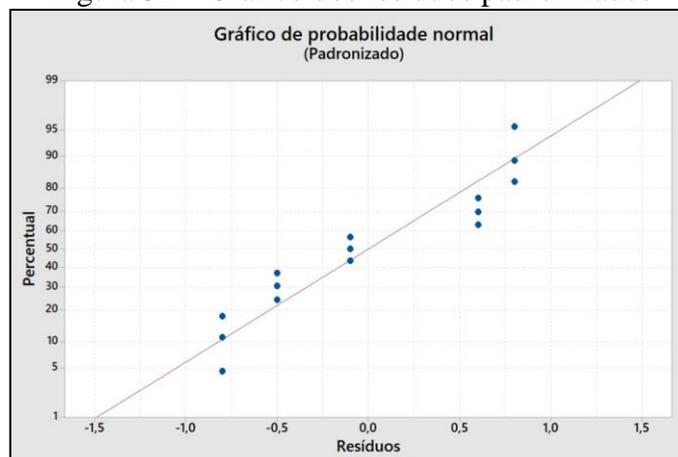
Para avaliar a influência da velocidade de corte, com o desgaste do gume que insertos de CBN experimentaram durante o processo de torneamento, foram utilizados 15 gumes de corte novos. Para cada uma das 05 velocidades utilizadas durante os testes de usinagem, realizou-se 03 ensaios. Ao término de cada um dos ensaios, observou-se a quantidade de peças torneadas indicadas na etapa de pré-teste. A Figura 31 apresenta o gráfico que descreve o comportamento da quantidade de peças usinadas em função da velocidade de corte empregada com a equação da curva gerada, o da Figura 32, o gráfico dos resíduos padronizados para a equação.

Figura 31 – Desgaste do gume de corte dos insertos de CBN ( $V_B$ )



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

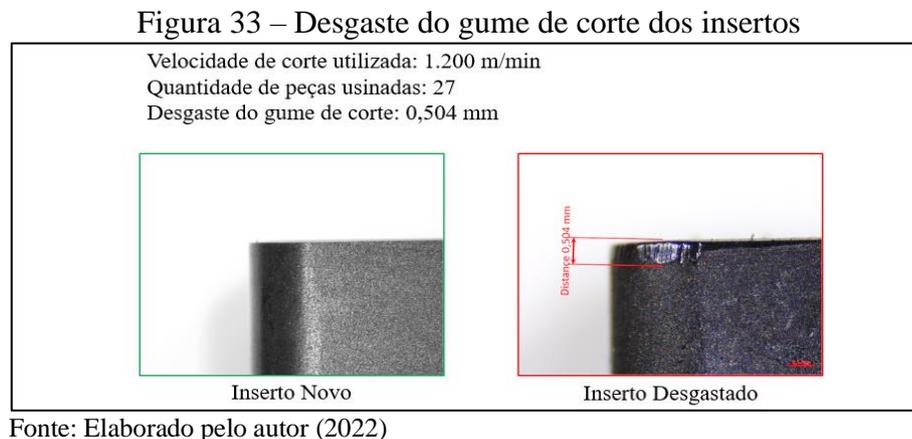
Figura 32 – Gráfico dos resíduos padronizados



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Com o aumento da velocidade de corte é possível identificar que houve uma redução na quantidade de tambores de freio torneados por inserto de CBN, conforme identificado junto à Figura 31. Este comportamento pode ser estimado com uma elevada precisão, mediante a análise dos resíduos padronizados apresentados na Figura 32 que indicou que os valores apresentados estão ajustados de acordo com uma distribuição normal.

Para a definição do fim de vida dos insertos testados após o processo de torneamento dos tambores de freio, para cada inserto de CBN mediou-se o desgaste do gume de corte (apêndice A), ao atingir-se o número máximo de peças usinadas, determinadas para cada velocidade de corte. A Figura 33 apresenta uma imagem do desgaste ao fim de vida do inserto utilizado, este ao atingir o desgaste de gume de  $V_b$  em 0,5 mm.



Após a utilização dos insertos de torneamento, as ferramentas de corte apresentaram desgaste de seu flanco de corte de corte originado por mecanismo abrasivo. Conforme apresentam González et al. (2018), Ferraresi (2014), Klocke (2011) a progressão do desgaste do gume de corte das ferramentas são influenciadas principalmente pelo emprego da velocidade de corte. Machado et al. (2011), Klocke (2011) e Diniz, Marcondes e Coppini (2006) complementam que o aumento da velocidade de corte, propicia também um aumento na temperatura na interface ferramenta, peça e cavaco, fragilizando dessa forma o gume de corte da ferramenta, reduzindo assim sua vida útil.

Ao se realizar a análise estatística para os dados encontrados, a ANOVA para um fator apresenta que para os dados amostrais, há uma significativa diferença entre a quantidade de peças usinadas em função da velocidade de corte utilizada. A Tabela 4 e a Figura 34 apresentam respectivamente o cálculo da ANOVA para um fator e o gráfico de resíduos gerados após esta

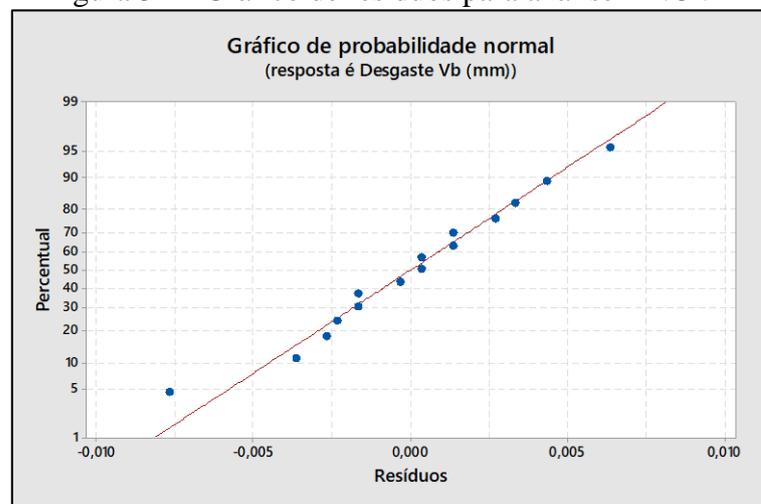
análise.

Tabela 4 – Análise ANOVA para um fator

Fonte	GL	SQ(Aj.)	QM(Aj.)	Valor F	Valor-P
Velocidade de corte (m/min)	4	0,000263	0,000066	3,84	0,038
Erro	10	0,000171	0,000017		
Total	14	0,000434			

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Figura 34 – Gráfico de resíduos para análise ANOVA



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

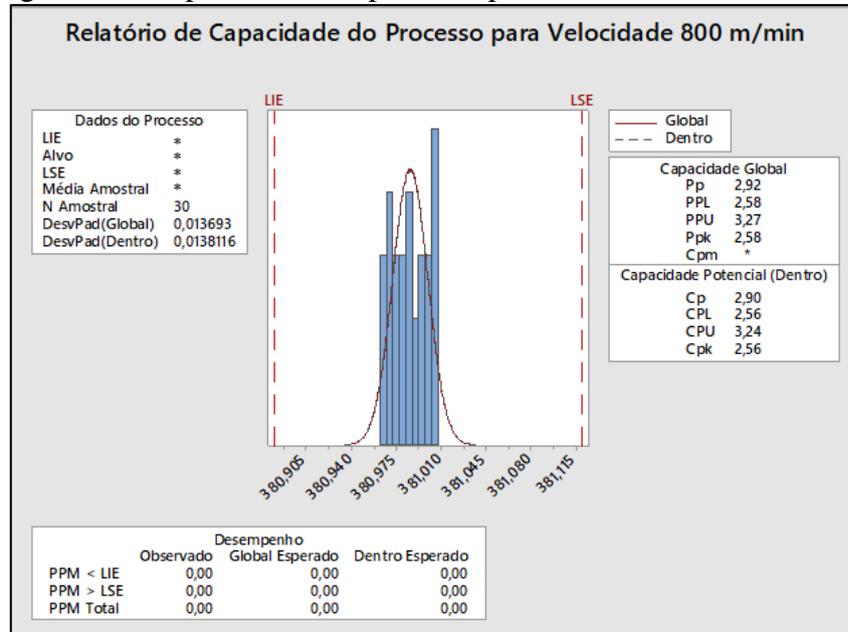
Neste sentido, após o cálculo estatístico da ANOVA, a análise apresentou um Valor-P inferior ao nível de significância de 5%, justificando que a hipótese de que há uma diferença entre o emprego da velocidade de corte, com a quantidade de peças usinadas. Conforme apresentam Farhat (2008) e Mandim (2007), a análise dos resíduos, apresentado juntamente à Figura 34 indica uma variação natural dos dados coletadas, corroborando com essa hipótese.

#### 4.7 ESTABILIDADE DO PROCESSO DURANTE O TORNEAMENTO

Durante o processo de torneamento realizado para cada uma das velocidades de corte experimentadas, realizou-se a medição final da região usinada denominada como pista de frenagem. Através dos resultados dimensionais foi possível realizar estudos estatísticos de capacidade do processo. A Figura 35 e a Tabela 5 apresentam os resultados estatísticos (apêndice

B) para cada um dos ensaios realizados.

Figura 35 – Capabilidade do processo para velocidade de 800 m/min



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Tabela 5 – Resultados estatísticos do processo

Velocidade de corte	Índice CP	Índice CPk
800 m/min	2,90	2,56
900 m/min	2,54	1,95
1.000 m/min	1,75	1,61
1.100 m/min	1,39	1,35
1.200 m/min	1,05	0,82

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Com o aumento da velocidade de corte há uma redução dos índices de CP e CPk. Essa redução ocorreu devido ao aumento da variação do resultado dimensional dos tambores usinados. Conforme apresentam González et al. (2018) e Santos e Sales (2007), com o emprego de menores velocidades de corte, o desgaste do inserto é menor devido à baixa presença de calor na interface ferramenta, peça e cavaco, gerando uma maior estabilidade dimensional da peça usinada. Com o emprego de maiores velocidades de corte e o consequente aumento da temperatura, é possível identificar uma maior degradação do gume de corte do inserto de CBN. Este

aumento no desgaste do gume de corte ocasiona um aumento na amplitude dimensional da região usinada, resultando em uma redução dos índices de CP e CPk.

#### 4.8 DETERMINAÇÃO DOS TEMPOS DE USINAGEM

Para a composição do tempo de ciclo de fabricação, são agrupados os tempos correspondentes a todas as atividades realizadas durante o processo de torneamento. Estes tempos podem ser categorizados como tempos que agregam valor ao processo, como por exemplo o tempo de corte e geração de cavaco, e tempos que não agregam valor. Ferraresi (2014) e Groover (2010) apresentam que o ciclo de usinagem de uma peça pode ser constituído das seguintes etapas:

- a) alimentação da máquina ferramenta com a peça a ser usinada
- b) aproximação ou posicionamento da ferramenta para início de usinagem
- c) corte do material, durante o processo de geração de cavaco
- d) afastamento da ferramenta de corte
- e) inspeções da peça após o processo de usinagem
- f) retirar a peça usinada da máquina ferramenta
- g) setup e ajustes da máquina ferramenta ao início da usinagem do lote
- h) substituição do inserto desgastado após o processo de usinagem

As operações apresentadas nas etapas *a*, *b*, *d*, *e*, *f*, *g* e *h*, podem ser classificadas como tempo sem agregamento de valor ao produto usinado. Já para a etapa *c*, que corresponde à geração de cavaco, pode ser classificada como tempo com agregamento de valor, visto que entre todas as etapas que compõem o ciclo de usinagem, é a única que realiza a transformação do material a ser usinado.

##### 4.8.1 Tempo sem agregamento de valor

Durante o processo de usinagem, o somatório dos tempos correspondentes as etapas *a*, *b*, *d*, *e*, *f*, *g* e *h*, não apresentam correlação com a velocidade de corte empregada durante o

processo de usinagem, e podem ser classificados como tempos que não agregam valor à peça (NAV). Conforme Salwin et al. (2021) estes tempos geralmente são constantes durante todo o ciclo produtivo não criando valor agregado diretamente. Para a identificação destes tempos NAV, foi realizado uma cronoanálise durante o processo de torneamento dos tambores de freio (apêndice C). O resultado desta análise dos tempos NAV são apresentados na Tabela 6:

Tabela 6 – Tempos NAV no ciclo produtivo

Etapa	Descrição	Tempo (s)
a	Abastecimento do torno	23
b	Deslocamento das ferramentas de corte	38
d	Afastamento das ferramentas de corte	24
e	Inspeção dimensional	14
f	Retirar a peça usinada	15
g	Setup e ajustes de ferramentais e de programa CNC	52
h	Substituição das ferramentas desgastadas	5

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Durante a etapa de cronoanálise do processo de torneamento do tambor de freio, pode-se mensurar um tempo total de 171 segundos de operações que não agregam valor a esta operação, ou seja, durante o processo de fabricação, as etapas *a*, *b*, *d*, *e*, *f*, *g* e *h* não geram transformação no tambor usinado, permanecendo constantes para qualquer velocidade de corte utilizada. Salwin et al. (2021) ressalta que estas operações, mesmo não agregando valores a peça que está sendo produzida, em muitas vezes são necessárias do ponto de vista da continuidade do processo de fabricação.

#### 4.8.2 Tempo com agregamento de valor

O tempo efetivo de corte é o tempo mais importante na composição dos custos de fabricação, pois durante este período, o gume de corte está realizando a remoção de material na forma de cavacos, dando forma e dimensões dentro de tolerâncias especificadas no projeto aos tambores de freio torneados. Conforme Salwin et al. (2021) apresenta, o tempo de agregação de valor (VA) é a duração das operações as quais o cliente está disposto a pagar. Durante a etapa de cronoanálise do processo de torneamento, e o tempo de corte para cada velocidade experimentada, correspondente a etapa *c* é apresentada na Tabela 7:

Tabela 7 – Tempos de agregação de valor por velocidade de corte

Etapa	Descrição	Velocidade de corte	Tempo (s)
c	Corte de material	800 m/min	58
		900 m/min	47
		1.000 m/min	43
		1.100 m/min	40
		1.200 m/min	36

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Com o aumento da velocidade de corte durante o processo de usinagem é possível identificar uma redução significativa do tempo de usinagem. Conforme Fitzpatrick (2013) apresenta, durante o processo de usinagem, com o aumento da velocidade de corte no torneamento, a peça que está sendo usinada tende a ser rotacionada mais rapidamente, fazendo com que a ferramenta de corte experimente um tempo menor de contato, mantendo a mesma distância percorrida em metros lineares.

#### 4.8.3 Determinação do intervalo de máxima produtividade

A determinação do intervalo de máxima produtividade durante o processo de torneamento de tambores de freio foi possível, após a análise da composição dos tempos que agregaram (AV) e não agregaram valor (NAV), durante o ciclo produtivo para cada uma das velocidades experimentadas, durante os testes de usinagem. Esta determinação foi possível após o somatório dos tempos de corte e dos tempos improdutivo, conforme apresenta a Equação 2, demonstrada no item 2.4.2:

$$t_t = t_c + t_1 + t_2 \quad (2)$$

A parcela que corresponde ao tempo de corte do material ( $t_c$ ), pode ser reescrita conforme apresentado na Equação 3:

$$t_c = \frac{l_f \cdot \pi \cdot d}{1.000 \cdot f \cdot v_c} \quad (3)$$

Considerando como constantes as parcelas para comprimento, diâmetro usinado e avanço de corte da ferramenta, e contendo apenas como variável ao processo, a velocidade de corte empregada, a Tabela 8 apresenta os tempos de corte calculados para este processo:

Tabela 8 – Tempos de corte calculados

Comprimento usinado ( $l_f$ )	Diâmetro usinado (d)	Velocidade de avanço (f)	Velocidade de corte ( $v_c$ )	Tempo de corte ( $t_c$ )
180 mm	381 mm	0,2 mm/rot	800 m/min	1,35 min
			900 m/min	1,20 min
			1.000 m/min	1,08 min
			1.100 m/min	0,98 min
			1.200 m/min	0,90 min

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

De acordo com Dagostin, Dallafe e Cavaler (2021), a velocidade de corte é um dos principais fatores que contribuem para a redução do tempo de corte, visto que a ferramenta de corte tende a se deslocar de forma mais rápida pela periferia do material que está sendo cortado. Conforme apresenta a Tabela 8, com o emprego da velocidade de corte de 1.200 m/min, foi possível uma redução de 38% no tempo de corte, se comparado a velocidade de corte de 800 m/min.

O tempo improdutivo, referente a colocação, inspeção e retirada da peça, aproximação e afastamento da ferramenta, substituição e preparo de máquina, mantem-se constante durante qualquer velocidade de corte. Esta parte do tempo produtivo pôde ser determinada, com o emprego da Equação 4, para um lote mínimo (Z), de 500 peças usinadas:

$$t_1 = t_s + t_a + \frac{t_p}{Z} \quad (4)$$

$$t_1 = 0,43 \frac{\text{min}}{\text{peça}} + 0,18 \frac{\text{min}}{\text{peça}} + \frac{25 \text{ min}}{500 \text{ peças}}$$

$$t_1 = 0,66 \frac{\text{min}}{\text{peça}}$$

Para o tempo relacionado com a troca da ferramenta desgastada durante o processo de usinagem dos tambores de freio, utilizou-se a Equação 5 apresentada anteriormente. A mesma foi reescrita e incorporando a ela, a fórmula desenvolvida por Taylor para cálculo de usinagem de materiais originando a Equação 12. Este processo teve como intuito principal a determinação da curva de vida do inserto de CBN utilizado no processo de usinagem:

$$t_2 = \left( \frac{l_f \cdot \pi \cdot d \cdot v_c^{x-1}}{1.000 \cdot f \cdot K} - \frac{1}{Z} \right) \cdot t_{ft} \quad (12)$$

O resultado para o tempo de troca de ferramenta calculado para cada velocidade de corte é apresentado na Tabela 9, considerando um lote mínimo (Z), de 500 peças usinadas:

Tabela 9 – Tempo para troca de ferramenta

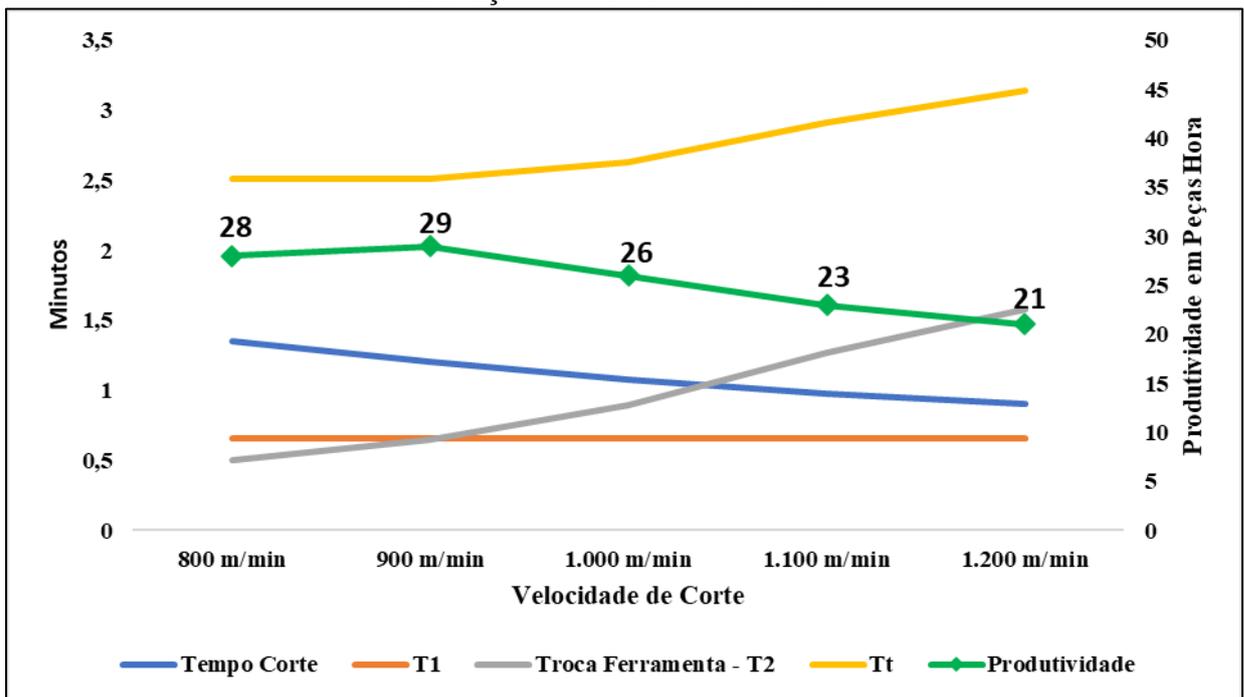
Comp. usinado (l <sub>f</sub> )	Diâmetro usinado (d)	Vel. de avanço (f)	Coef. K - Taylor	Coef. x - Taylor	Tempo fases g-h	Vel. de corte (v <sub>c</sub> )	Tempo Troca da Ferramenta (t <sub>2</sub> )
180 mm	381 mm	0,20 mm/rot.	2,4.10 <sup>10</sup>	3,00	0,23 min	800 m/min	0,50 min
						900 m/min	0,65 min
						1.000 m/min	0,89 min
						1.100 m/min	1,27 min
						1.200 m/min	1,58 min

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Conforme é apresentado na Tabela 9, com a variação da velocidade de corte durante o processo de usinagem dos tambores de freio, há um aumento do tempo relacionado com a troca do inserto desgastado. Dagostin, Dallafe e Cavaler (2021) destacam que com o aumento da velocidade de corte há uma aceleração do desgaste do gume de corte em decorrência da velocidade de corte utilizada, e com isso há um aumento no número de paradas de máquina para a sua substituição.

A composição do intervalo de máxima produtividade é determinada pelo somatório de cada uma das três parcelas que compõe o tempo total de usinagem ( $t_i$ ). A Figura 36 apresenta a variação das parcelas dos tempos de fabricação, em função da velocidade de corte do material usinado.

Figura 36 – Representação das parcelas dos tempos de fabricação em função da velocidade de corte



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Conforme apresentado na Figura 36, o tempo de corte ( $t_c$ ) diminui com o aumento da velocidade de corte ( $v_c$ ), a parcela que corresponde ao tempo improdutivo ( $t_1$ ) referente a colocação, inspeção e retirada da peça, aproximação e afastamento da ferramenta, substituição e preparo de máquina, manteve-se constante para todas as velocidades de corte, já o tempo relacionado a troca da ferramenta desgastada ( $t_2$ ) apresentou uma elevação, visto a aceleração do desgaste e a necessidade mais frequente da troca do gume de corte durante a usinagem do lote produtivo. Com o somatório de todas as parcelas que compõe o tempo total de usinagem ( $t_i$ ), é possível identificar uma produtividade na usinagem de 29 tambores por hora, com o emprego da velocidade de corte de 900 m/min. Esta é maior produtividade alcançada quando se utiliza velocidades de corte na ordem de 800, 900, 1.000, 1.100 e 1.200 m/min.

#### 4.9 DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE ECONÔMICA DE USINAGEM

Para a determinação da velocidade econômica de corte, primeiramente é necessário a identificação dos custos de fabricação dos tambores de freio para cada uma das velocidades de corte experimentadas. A composição destes custos pode ser apresentada em parcelas que agrupam custos por tempo de corte, custos com ferramenta de corte, custos de troca de ferramenta e custos relacionados aos tempos improdutivos. O somatório destes custos pode ser determinado utilizando-se a Equação 6, demonstrada no item 2.4.3:

$$K_p = K_{us} + K_{um} + K_{uf} + K_{ft} \quad (6)$$

A parcela que apresenta os custos referente ao tempo de corte durante o processo de usinagem pode ser calculado a partir da Equação 12:

$$K_{us} = t_c \cdot \frac{C_2}{60} \quad (12)$$

Utilizando como referência uma taxa hora de \$ 200,00, que compreende os custos com salário e encargos dos operadores, consumo de energia elétrica pelo equipamento, conservação e depreciação dos equipamentos, e os tempos de corte correspondentes para cada uma das velocidades experimentadas, a Tabela 10 apresenta os valores calculados para o custo referente ao tempo de corte para o processo de usinagem:

Tabela 10 – Custo relacionado ao tempo de corte

Taxa hora (C <sub>2</sub> )	Velocidade de corte (v <sub>c</sub> )	Tempo de corte (t <sub>c</sub> )	Custo tempo de corte (K <sub>us</sub> )
\$ 200,00/hora	800 m/min	0,97 min	\$ 3,23
	900 m/min	0,79 min	\$ 2,63
	1.000 m/min	0,72 min	\$ 2,40
	1.100 m/min	0,66 min	\$ 2,20
	1.200 m/min	0,60 min	\$ 2,00

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Conforme Dagostin, Dallafe e Cavaler (2021) apresentam, o custo mínimo do processo de usinagem somente pode ser alcançado através de uma alta produtividade obtida com elevadas velocidades de corte. Esta análise também é defendida por Machado et al. (2011) e Souza et al. (2006), visto que com o aumento da velocidade de corte, o custo neste processo também é reduzido, quando se isolam outros custos inerentes ao processo de fabricação.

Em contrapartida o custo associado a vida da ferramenta de corte, apresenta uma correlação inversa ao custo associado ao tempo de corte. A Equação 9 pode ser reescrita e reapresentada conforme a Equação 14, apenas com o custo do inserto intercambiável em função da vida útil de cada gume de corte, uma vez que a vida útil do porta ferramenta apresenta um fim de vida extremamente longo para esta operação:

$$K_{uf} = \frac{K_{ft}}{Z_T} \quad (14)$$

Considerando que o inserto CNMN120416 KS800 possui 04 gumes de corte ativos para a operação de torneamento, a um custo de \$ 100,00 por gume de corte, a Tabela 11 apresenta o custo relacionado a vida da ferramenta de corte:

Tabela 11 – Custo relacionado a vida da ferramenta de corte

Custo da ferramenta por gume ( $K_{ft}$ )	Velocidade de corte ( $v_c$ )	Vida do gume por velocidade de corte ( $Z_T$ )	Custo com ferramenta de corte ( $K_{uf}$ )
\$ 100/gume	800 m/min	48 tambores	\$ 2,08
	900 m/min	42 tambores	\$ 2,38
	1.000 m/min	36 tambores	\$ 2,78
	1.100 m/min	31 tambores	\$ 3,23
	1.200 m/min	27 tambores	\$ 3,70

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

A velocidade de corte é o parâmetro na usinagem que mais influencia o desgaste do gume de corte, e com isso há a necessidade da troca da mesma durante o processo de usinagem. Machado et al. (2011), Groover (2010) e Diniz, Marcondes e Coppini (2006) convergem com o entendimento de que a progressão do desgaste do gume é influenciada principalmente pela

velocidade de corte empregada durante o processo de usinagem. Com a aceleração deste desgaste, Pereira e Souza (2016) e Hazza, Najwa e Bakhari (2016), ressaltam que os custos relacionados a ferramenta de corte tendem a aumentar durante o processo.

Com a redução da vida útil da ferramenta em consequência do aumento da velocidade de corte, é possível identificar um aumento no número de interrupções durante o processo de usinagem, para a substituição dos gumes desgastados e ajustes nos programas CNC dos equipamentos de usinagem. O custo associado com estas trocas pode ser calculado com a utilização da Equação 15:

$$K_{ft} = t_2 \cdot \frac{C_2}{60} \quad (15)$$

Considerando o tempo de troca da ferramenta ( $t_2$ ) calculado, e uma taxa hora ( $C_2$ ) de \$ 200,00, a Tabela 12 apresenta o custo associado a troca da ferramenta de corte:

Tabela 12 – Custo relacionado a troca da ferramenta de corte

Taxa hora ( $C_2$ )	Velocidade de corte ( $v_c$ )	Tempo de troca da ferramenta ( $t_2$ )	Custo da troca da ferramenta ( $K_{ft}$ )
\$ 200,00/hora	800 m/min	0,50 min	\$ 1,67
	900 m/min	0,65 min	\$ 2,17
	1.000 m/min	0,89 min	\$ 2,97
	1.100 m/min	1,27 min	\$ 4,23
	1.200 m/min	1,58 min	\$ 5,27

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Com a redução na vida útil da ferramenta de corte, em decorrência do aumento da velocidade de corte, há a necessidade da substituição do gume desgastado de forma mais precoce. Hazza, Najwa e Bakhari (2016) destacam que a interrupção da operação de usinagem mais frequente durante o processo de usinagem acarreta no aumento do custo associado a esta operação.

Durante a análise do processo de usinagem dos tambores de freio, atividades classificadas por Salwin et al. (2021) como atividades que não agregam valores a peça que está sendo

produzida fazem parte do processo produtivo. O custo para estas operações pode ser calculado, com a utilização da Equação 16:

$$K_{um} = t_1 \cdot \frac{C_2}{60} \quad (16)$$

Tendo em vista o tempo calculado e classificado como não produtivo ( $t_1$ ), e uma taxa hora ( $C_2$ ) de \$ 200,00, este custo é apresentado juntamente a Tabela 13:

Tabela 13 – Custo associado aos tempos improditivos

Taxa hora ( $C_2$ )	Velocidade de corte ( $v_c$ )	Tempo não produtivo ( $t_1$ )	Custo das operações não produtivas ( $K_{um}$ )
R\$ 200,00/hora	800 m/min	0,66 min	\$ 2,20
	900 m/min	0,66 min	\$ 2,20
	1.000 m/min	0,66 min	\$ 2,20
	1.100 m/min	0,66 min	\$ 2,20
	1.200 m/min	0,66 min	\$ 2,20

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

O resultado desta parcela associada ao do custo das operações não produtivas se manteve constante para todas as velocidades de corte experimentas. Salwin et al. (2021) destaca que se durante o processo de usinagem, forem mantidos inalterados os percursos de aproximação e afastamento da ferramenta de corte, assim como mantido constante o tempo de carga e descarga do equipamento de usinagem, o custo associado a esta etapa não passará por alterações.

A composição do custo total do processo de usinagem, apresenta o somatório de cada uma das parcelas classificadas como custo do tempo de corte, com o desgaste da ferramenta, com a substituição e setup da mesma e dos custos associados a atividades que não agregam valor a operação, mas que são de vital importância para a fabricação das peças. A Tabela 14 apresenta o custo total de usinagem para tambores de freio:

Tabela 14 – Custo total de fabricação

(Continua)

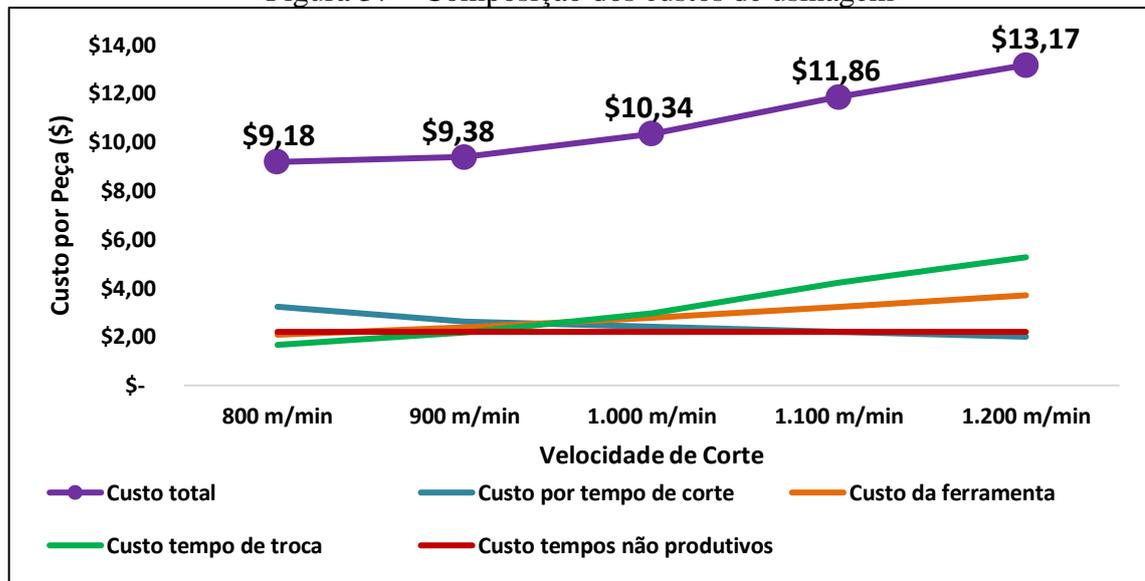
Velocidade de corte ( $v_c$ )	Custo tempo de corte ( $K_{us}$ )	Custo com ferramenta de corte ( $K_{uf}$ )	Custo troca da ferramenta ( $K_{ft}$ )	Custo não produtivo ( $K_{um}$ )	Custo total ( $K_p$ )
800 m/min	\$ 3,23	\$ 2,08	\$ 1,67	\$ 2,20	\$ 9,18

(Conclusão)					
Velocidade de corte ( $v_c$ )	Custo tempo de corte ( $K_{us}$ )	Custo com ferramenta de corte ( $K_{uf}$ )	Custo troca da ferramenta ( $K_{ft}$ )	Custo não produtivo ( $K_{um}$ )	Custo total ( $K_p$ )
900 m/min	\$ 2,63	\$ 2,38	\$ 2,17	\$ 2,20	\$ 9,38
1.000 m/min	\$ 2,40	\$ 2,78	\$ 2,97	\$ 2,20	\$ 10,34
1.100 m/min	\$ 2,20	\$ 3,23	\$ 4,23	\$ 2,20	\$ 11,86
1.200 m/min	\$ 2,00	\$ 3,70	\$ 5,27	\$ 2,20	\$ 13,17

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

A representação gráfica do comportamento de cada uma das parcelas de custo é apresentada na Figura 37, sendo enfatizada a curva correspondente ao custo total de usinagem:

Figura 37 – Composição dos custos de usinagem



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

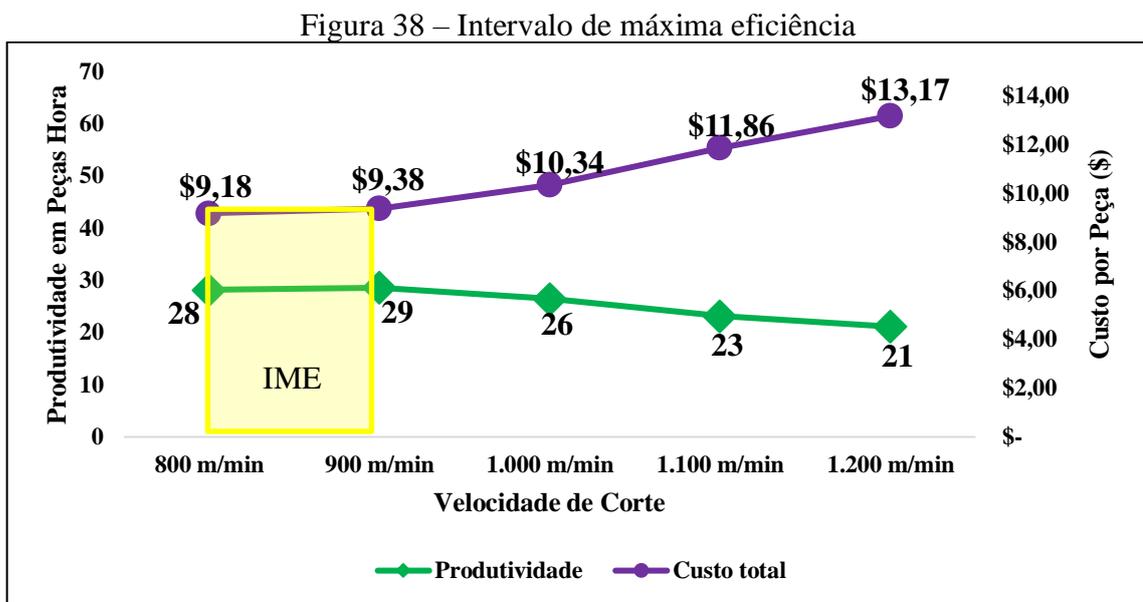
Com o emprego de velocidades de corte entre 800 à 1.200 m/min, foi possível identificar que o mínimo custo apresentado para usinagem de FC com insertos de CBN, está acima do ponto mínimo da curva custo total, conforme demonstram Diniz, Marcondes e Coppini (2006). Žak (2017) e Cerce e Pušavec (2016) destacam que a usinagem de materiais com emprego de insertos de CBN, apresentam melhores resultados quando utilizado velocidade de corte superior a 800 m/min, visto que durante o corte do material, insertos de CBN necessitam de maiores temperaturas durante a usinagem.

Ferraresi (2014), Groover (2010) e Souza et al. (2006), reforçam que a velocidade econômica de usinagem é alcançada pela velocidade que apresentar o menor custo total de usi-

nagem. Na Figura 37, é demonstrado que o custo de \$ 9,18 por peça usinada é obtida para a velocidade de corte de 800 m/min.

#### 4.10 DETERMINAÇÃO DO INTERVALO DE MÁXIMA EFICIÊNCIA

Para a determinação do intervalo de máxima eficiência no processo de usinagem de tambores de freio, foi necessário a identificação das velocidades de corte para máxima produtividade e para mínimo custo de usinagem. A Figura 38 apresenta destacado em amarelo o intervalo que deverá ser praticado para o atendimento da máxima produtividade ou mínimo custo de usinagem:



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

No intervalo apresentado na Figura 38 é possível identificar que realizando a usinagem dos tambores de freio, a uma velocidade de 800 m/min, é possível alcançar o menor custo de usinagem, quanto esta alcança o valor de \$ 9,18 por peça produzida. Em contrapartida, utilizando a velocidade de corte de 900 m/min, é potencializada a máxima produtividade alcançável, podendo produzir uma quantidade de 29 tambores de freio por hora produzida.

Ferraresi (2014), Machado et al. (2011), Diniz, Marcondes e Coppini (2006) e Souza et al. (2006), destacam que definido o intervalo de máxima eficiência, ao se praticar a usinagem com velocidades menores a velocidade econômica de usinagem, tem-se um aumento dos custos,

devido a elevados tempos de corte, e conseqüentemente o aumento dos custos de produção. No contraponto, ao utilizar a velocidade de corte superior à de máxima produção, tem-se o aumento dos custos associados a ferramentas de corte e o aumento do tempo necessário para a sua substituição.

## 5 CONCLUSÃO

O emprego de uma usinagem econômica e produtiva na indústria de transformação é vital para a saúde financeira das empresas metalmeccânicas. Dessa forma, o entendimento e compreensão do intervalo de máxima produtividade no processo de usinagem é de grande validade para a engenharia de processos.

A análise dos resultados do torneamento de tambores de freio, bem como o entendimento dos custos de usinagem permitiu a identificar que o emprego da velocidade de corte de 800 m/min apresentará o menor custo produtivo, compreendido à \$ 9,18. Conforme apresentam Znojkwicz, Korzeniewski e Wiciak (2017), Hazza e Bakhari (2016), Sahoo e Mishra (2014) e Eyerkauffer et al. (2013), ao utilizar menores velocidades de corte, é possível realizar a usinagem de materiais onde haverá maior preservação do gume de corte dos insertos utilizados no processo de usinagem, principalmente pela menor presença de temperaturas na interface ferramenta, peça e cavaco.

Já a obtenção da maior produção durante o processo de torneamento será alcançável quando a utilização da velocidade de corte for igual a 900 m/min. Nesta velocidade de corte, a produção máxima poderá chegar a 29 tambores de freio por hora.

Tendo em vista a velocidade de corte de 800 m/min, que corresponde à velocidade de mínimo custo, e a velocidade de 900 m/min, que se apresenta como a velocidade de máxima produção, estratégias produtivas deverão ser planejadas dentro deste intervalo de máxima eficiência. Ferraresi (2014), Machado et al. (2011) e Diniz, Marcondes e Coppini (2006) nos ajudam a interpretar que em cenários de baixa demanda produtiva, o emprego da velocidade de corte na condição econômica de usinagem, permitirá a realização de uma usinagem com o menor custo de produção, e em cenários de máxima demanda produtiva, a utilização de velocidade de corte na condição de máxima produção, permitirá a indústria buscar um aumento produtivo sem acrescentar custos desnecessários para a fabricação de peças.

### 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sequência desse trabalho, a fim de continuar o estudo para determinação do intervalo de máxima eficiência para o torneamento de tambores de freio fabricados a partir de ferro fundido cinzento, pode ser feita análises e estudos com diferentes parâmetros de corte, como profundidade de corte ( $a_p$ ) e velocidade de avanço ( $v_f$ ), e o conseqüente custo de usinagem

para o processo de torneamento. Outras possibilidades seriam a instrumentação das ferramentas de corte para a identificação dos esforços de usinagem, buscando um aumentando na vida útil dos insertos e a consequente redução dos custos de usinagem.

## REFERÊNCIAS

ANDRADE, Matheus Nogueira; PEREIRA, Tiago Batista; SOUZA, Marcos Vieira de. Análise da influência da velocidade de avanço no desgaste da aresta de uma ferramenta de corte. **UNI-CEPG**, out. 2016 Disponível em: <[http://www.inicepg.univap.br/cd/INIC\\_2016/anais/arquivos/1010\\_0841\\_02.pdf](http://www.inicepg.univap.br/cd/INIC_2016/anais/arquivos/1010_0841_02.pdf)> Acesso em: 12 janeiro 2022.

BOING, Denis; SCHROETER Rolf Bertrand; OLIVEIRA, Adilson Jose de. Three-dimensional wear parameters and wear mechanisms in turning hardened steels with pcbn tools. **Wear**. Nov. 2017. Disponível em < <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S004316481731325X> > Acesso em: 04 janeiro 2022.

CERCE, Luka; PUŠAVEC, Franci. Increasing machinability of grey cast iron using cubic boron nitride tools: Evaluation of wear mechanisms. **Indian Journal of Engineering and Materials Sciences**. Fev. 2016. Disponível em < <https://www.niscair.res.in/index.php/ScienceCommunication/ResearchJournals/rejour/ijems/ijems0.asp> > Acesso em: 08 janeiro 2022.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e Ferros Fundidos**. 7. ed. São Paulo: ABM, 1996.

COHEN, P. H.; VOGT, R. C. e MARWANGA, R. O. Influence of graphite morphology and matrix structure on chip formation during machining of ductile irons. **AFS Casting Congress, Pittsburg. American Foundrymen's Society**. Mai. 2002. Disponível em: <https://www.thefreelibrary.com/Influence+of+Graphite+Morphology%2C+Matrix+Structure+on+Gray+Iron-a062955700>> Acesso em: 17 outubro 2022.

DAGOSTIN, Grégori Folis; DALLAFE, Anderson; CAVALER, Luiz Carlos de Cesaro. Influência dos parâmetros de corte no torneamento do ferro fundido ASTM A518 GR.3. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**. Out. 2021. Disponível em <https://www.tecnologiammm.com.br/article/10.4322/2176-1523.20212270/pdf/tmm-18-e2270.pdf> Acesso em: 19 julho 2022.

DINZ, Anselmo Eduardo; MACHADO, Álisson Rocha; CORRÊA, Janaina Geilser. Tool wear mechanisms in the machining of steels and stainless steels. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. Abr. 2016. Disponível em < <http://web-a-ebSCO-host.ez314.periodicos.capes.gov.br/ehost/pdfviewer/pdfviewer?vid=1&sid=4caff763-93cb-459d-adbd-6a53983f67f5%40sessionmgr4007> > Acesso em: 23 março 2022.

DINIZ, Anselmo Eduardo; MARCONDES, Francisco Carlos; COPPINI, Nivaldo Lemos. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 5. ed. São Paulo: Artiber, 2006.

EYERKAUFER, Marino Luiz; ODORIZZI, Diego; LUNELLI, Marciano; SILVEIRA, Marília Milena; JAHN, Talita. Análise de custos industriais: um estudo em uma indústria de máquinas. **Revista eletrônica do Alto Vale do Itajaí**. Ago. 2013. Disponível em < <http://www.revistas.udesc.br/index.php/reavi/article/download/3591/2577> > Acesso em: 02 março 2022.

FARHAT, Cecília Aparecida Vaiano. **Introdução à estatística aplicada**. São Paulo: FTD, 2008.

FERRARESI, Dino. **Fundamentos da usinagem dos metais**. 1. vol. São Paulo: Bucher, 2014.

FITZPATRICK, Michael. **Introdução aos processos de usinagem**. Porto Alegre: Bookman, 2013.

GONZÁLEZ, Luis Wilfredo Hernández; AHMED, Yassmin Said; RODRÍGUEZ, Roberto Pérez; ROBLEDO, Patrícia Del Carmen Zambrano; MATA, Martha Patrícia Guerrero. Selection of Machining Parameters Using a Correlative Study of Cutting Tool Wear in High-Speed Turning of AISI 1045 Steel. **Journal of Manufacturing and Materials Processing**. Out. 2018. Disponível em < <https://www.mdpi.com/2504-4494/2/4/66> > Acesso em: 13 janeiro 2022.

GROOVER, Miell P. **Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes and Systems**. Estados Unidos da America: John Wiley & Sons, INC., 2010.

GRZESIK, W.; KISZKA, P.; KOWALCZYKA, D.; RECHB, J.; CLAUDIN, Ch. Machining of nodular cast iron (PF-NCI) using CBN tools. **5th CIRP Conference on High Performance Cutting 2012**. Abr. 2012. Disponível em < <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221282711200087X> > Acesso em: 24 maio 2022.

GUESSER, Wilson Luiz. **Propriedades Mecânicas dos Ferros Fundidos**. 1. ed. São Paulo: Bucher, 2009.

GUTNICHENKO, Oleksandr; BUSHLYA, Volodymyr; ZHOU, Jinming; STÅHL, Jan-Eric. TOOL WEAR AND MACHINING DYNAMICS WHEN TURNING HIGH CHROMIUM WHITE CAST IRON WITH PCBN TOOLS. **Wear**. Ago. 2017. Disponível em < <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043164816308158?via%3Dihub> > Acesso em: 23 maio 2022.

HAZZA, Muataz Hazza F. Al; BAKHARI, Nur Amirah Najwa Bt Mohmad. Optimization of Cutting Parameters to Minimize Tooling Cost in High Speed Turning of SS304 using Coated Carbide Tool using Genetic Algorithm Method. **International Journal of Engineering Materials and Manufacture**. Set. 2016. Disponível em < [https://www.researchgate.net/publication/320678696\\_Optimization\\_of\\_Cutting\\_Parameters\\_to\\_Minimize\\_Tooling\\_Cost\\_in\\_High\\_Speed\\_Turning\\_of\\_SS304\\_using\\_Coated\\_Carbide\\_Tool\\_using\\_Genetic\\_Algorithm\\_Method](https://www.researchgate.net/publication/320678696_Optimization_of_Cutting_Parameters_to_Minimize_Tooling_Cost_in_High_Speed_Turning_of_SS304_using_Coated_Carbide_Tool_using_Genetic_Algorithm_Method) > Acesso em: 15 março 2022.

HBAIEB, Moncef; OTHMANI, Radhouane; BOUZID, Wassila. Time modeling in high-speed machining of mold pocket. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. Jul. 2010. Disponível em: < <http://web-a-ebsohost.ez314.periodicos.capes.gov.br/ehost/pdfviewer/pdfviewer?vid=1&sid=c44f08a3-a214-4fa5-a54b-e3fb747167b8%40sessionmgr4006> > Acesso em: 18 janeiro 2022.

INÁCIO, Ricardo Henrique; COSTA, Cleber Balbino; SANTOS, Edgard Morais. Comparação Entre Estratégias De Usinagens Por Níveis E Trocoidal. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**. Nov. 2018. Disponível em: <<https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-de-producao/estrategias-de-usinagens>> Acesso em: 25 fevereiro 2022.

KLOCKE, Fritz. **Manufacturing Processes 1 Cutting**. Berlin: Springer-Verlag, 2011.

KORLOY TOOLS, Metal Cutting – Turning Tools. Disponível em: < [https:// http://www.korloy.com/pt/download/cata.do](https://http://www.korloy.com/pt/download/cata.do)> Acesso em: 15 março 2022.

LEE, B. J.; TARNG, Y.S. Cutting-parameter selection for maximizing production rate or monimizing production cost in multistage turning operations. **Journal of Materials Processing Tecnology**. Fev. 2000. Disponível em < <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S024013600005823> > Acesso em: 17 fevereiro 2022.

LI, Bin. An experimental investigation of dry cutting performance for machining gray cast iron with carbide coating tool. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. Dez. 2013. Disponível em < <http://web-a-ebsohost.ez314.periodicos.capes.gov.br/ehost/pdfviewer/pdfviewer?vid=1&sid=3b8c717c-8ffe-4c50-a5f3-0e4dd3b300e5%40sdc-v-sessmgr02> > Acesso em: 05 janeiro 2022.

LI, Congbo; CHEN, Xingzheng; TANG, Ying, LI, Li. Selection of optimum parameters in multi-pass face milling for maximum energy efficiency and minimum production cost. **Journal of Cleaner Production**. Jul. 2016. Disponível em < <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652616309829> > Acesso em: 12 janeiro 2022.

LIU, Changqing; LI, Yingguang; WANG, Wei; SHEN, Weiming. A feature-based method for NC machining time estimation. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**. Out. 2012. Disponível em < <https://pdf.sciencedirectassets.com/271446/1-s2.0-S0736584513X00031/1-s2.0-S0736584512001202/main.pdf> > Acesso em: 18 janeiro 2022.

MACHADO, Alison Rocha; ABRÃO, Alexandre Mendes; COELHO, Reginaldo Teixeira; SILVA, Márcio Bacci da. **Teoria da usinagem dos materiais**. São Paulo: Bucher, 2011

MELO, Anderson Clayton A. de; CORDEIRO Edvon A.; MACHADO Álison R.; GUIMARÃES, Gilmar. Potência consumida e geração de calor no processo de torneamento. **ABCM**, nov. 1999. Disponível em < <http://www.abcm.org.br/app/webroot/anais/cobem/1999/pdf/AACIII.pdf>> Acesso em: 02 janeiro 2022.

MANDIM, Daniel. **Estatística descomplicada**. Brasília: Vestcon, 2007.

MEURER, Paulo Roberto; BOEHS, Lourival; GUESSER, Wilson Luiz. Usinabilidade de ferro fundido cinzento ligado utilizado na fabricação de discos de freios automotivos. **ABCM**. Out. 2007. Disponível em < <http://www.abcm.org.br/anais/cobef/2007/files/011039085.pdf> > Acesso em: 8 janeiro 2022.

OLIVEIRA, Adilson José de; BOING, Denis; SCHROETER, Rolf Bertrand. Effect of PCBN tool grade and cutting type on hard turning of high-chromium white cast iron. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. Jun. 2015. Disponível em < <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-015-7426-2> > Acesso em: 04 janeiro 2022.

OPALUWA, A.I; OYETUNJI, A.; SEIDU, S. O. Age Strengthening of Grey Cast Iron Alloys for Machine Cutting Tools Production. **Scientific Research Publishing**, mar. 2015. Disponível em: <<http://www.scirp.org/journal/PaperInformation.aspx?paperID=55216>> Acesso em: 04 janeiro 2022.

SAHOO, Ashok Kumar; MISHRA, Purna Chandra. A response surface methodology and desirability approach for predictive modeling and optimization of cutting temperature in machining hardened steel. **International Journal of Industrial Engineering Computations**. Abr. 2014. Disponível em < [https://www.researchgate.net/publication/272913543\\_A\\_response\\_surface\\_methodology\\_and\\_desirability\\_approach\\_for\\_predictive\\_modeling\\_and\\_optimization\\_of\\_cutting\\_temperature\\_in\\_machining\\_hardened\\_steel](https://www.researchgate.net/publication/272913543_A_response_surface_methodology_and_desirability_approach_for_predictive_modeling_and_optimization_of_cutting_temperature_in_machining_hardened_steel)> Acesso em: 15 março 2022.

SALWIN, Mariusz; JACYNA-GOŁDA, Ilona; BAŃKA, Michał; VARANCHUK, Dari; GAVINA, Anna. Using Value Stream Mapping to Eliminate Waste: A Case Study of a Steel Pipe Manufacturer. **Energies**. Jun. 2021. Disponível em < <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/12/3527/htm>> Acesso em: 13 maio 2022.

SANTOS, Sandro Cardoso; SALES, Wisley Falco. **Aspectos tribológicos da usinagem dos materiais**. São Paulo: Artliber, 2007.

SCHROETER, Rolf Bertrand; WEINGAERTNER, Walter Lindolfo. **Tecnologia da usinagem com ferramentas de corte de geometria definida – parte II**. Florianópolis: UFSC, 2002.

SCHULTHEISS, Fredrik; BUSHLYA, Volodymyr; LENRICK, Filip; JOHANSSON, Daniel; KRISTIANSOON, Stefan; STÅHL Jan-Eric. Tool Wear Mechanisms of PCBN tooling during High-Speed Machining of Gray Cast Iron. **8th CIRP Conference on High Performance Cutting (HPC 2018)**. Ago. 2018. Disponível em < <https://www-sciencedirect.ez314.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S2212827118310503?via%3Dihub>> Acesso em: 05 janeiro 2022.

SHABTAY, Dvir; KASPI Moshe. The efficiency range of economical cutting conditions for a multistage transfer machine under a failure replacement strategy. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. Mai. 2016. Disponível em < <http://web-b-ebshost.ez314.periodicos.capes.gov.br/ehost/pdfviewer/pdfviewer?vid=1&sid=606438d4-b074-4963-98ec-2d23a1456a18%40sessionmgr103> > Acesso em: 12 janeiro 2022

SOSHI, Masakazu; UEDA, Eisaku; MORI, Masahiko. A productive and cost-effective CBN hard milling-based fabrication method of hardened sliding guideways made of refined cast iron. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. Out. 2013. Disponível em < <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-013-5343-9> > Acesso em: 08 janeiro 2022.

SOUSA, José Aécio G. de; SALES, Wisley Falco; MACHADO, Alisson R. Machado. A review on the machining of cast irons. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. Set. 2017. Disponível em <<https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-017-1140-1>> Acesso em: 08 janeiro 2022.

SOUZA, Fernando Bernardi de; BAPTISTA, Elesandro Antônio; GRIVOL, Raphael Furlan; FRANCHI, Regina Helena de Oliveira Lino; COPPINI, Nivaldo Lemos. Otimização de processos de usinagem: uma abordagem baseada na teoria das restrições. **ENEGEP**. Out. 2006. Disponível em <[https://abepro.org.br/biblioteca/enegep2006\\_tr450308\\_7750.pdf](https://abepro.org.br/biblioteca/enegep2006_tr450308_7750.pdf)> Acesso em: 08 janeiro 2022

STEMMER, Gaspar Erich. **Ferramentas de Corte**. Florianópolis: UFSC, 1989.

TANG, Ying. Optimization strategy in end milling process for high speed machining of hardened die mold steel. **Journal of University of Science and Technology Beijing**. Jun. 2006. Disponível em <<https://pdf.sciencedirectassets.com/273514/1-s2.0-S1005885006X60048/1-s2.0-S1005885006600510/main.pdf>> Acesso em: 18 janeiro 2022.

TOOPTONG, Sirisak; PARK, Kyung-Hee; KWON, Patrick. A comparative investigation on flank wear when turning three cast irons. **Tribology International**. Dez. 2017. Disponível em <[https://www.researchgate.net/publication/322038498\\_A\\_comparative\\_investigation\\_on\\_flank\\_wear\\_when\\_turning\\_three\\_cast\\_irons](https://www.researchgate.net/publication/322038498_A_comparative_investigation_on_flank_wear_when_turning_three_cast_irons)> Acesso em: 8 janeiro 2022.

VENTURA, Carlos Eiji Hirata; HASSUI, Amauri. Análise da relação entre a formação do cavaco, vibração da ferramenta e desvio de forma no processo de torneamento. **V Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**. Abr. 2009. Disponível em <[https://www.researchgate.net/publication/307429893\\_Analise\\_da\\_relacao\\_entre\\_a\\_formacao\\_do\\_cavaco\\_vibracao\\_da\\_ferramenta\\_e\\_desvio\\_de\\_forma\\_no\\_processo\\_de\\_torneamento](https://www.researchgate.net/publication/307429893_Analise_da_relacao_entre_a_formacao_do_cavaco_vibracao_da_ferramenta_e_desvio_de_forma_no_processo_de_torneamento)> Acesso em: 14 outubro 2022

WANG, Chengyong; XIE, Yingxing; ZHENG, Lijuan; QIN, Zhe; TANG, Dewen; SONG, Yuexian. Research on the Chip Formation Mechanism during the high-speed milling of hardened steel. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**. Abr. 2014. Disponível em <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0890695514000091>> Acesso em: 15 março 2022.

WINCK, Licurgo Borges; CAMARGO, Gabriel dos Santos; RODRIGUES, Sérgio Junior Martins; SILVA, Thaís Neves. Análise comparativa entre o ferro fundido comercial novo e o refundido em empresa artesanal com aplicação em tambores de freio. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**. Jul. 2022. Disponível em <<https://www.tecnologi-ammm.com.br/article/10.4322/2176-1523.20212145/pdf/tmm-18-e2145.pdf>> Acesso em: 20 julho 2022

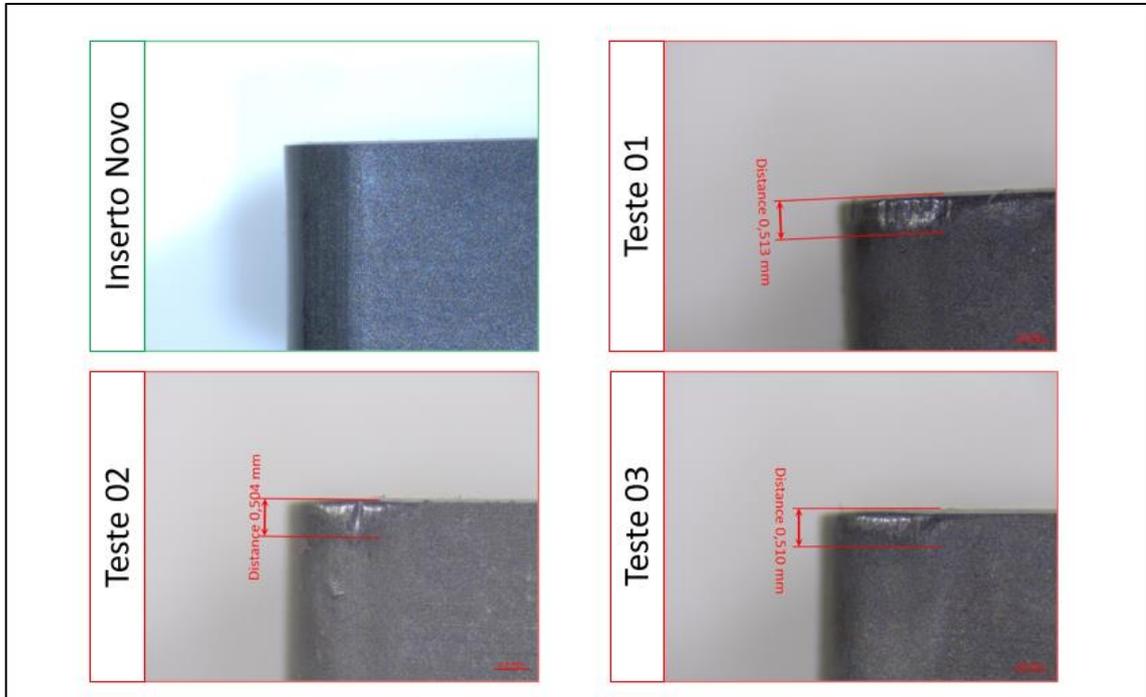
WOUTERS, Marc; STECHER, Julia. Development of real-time product cost measurement: A case study in a medium-sized manufacturing company. **International Journal of Production Economics**, out. 2016. Disponível em < <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925527316302997> > Acesso em: 8 fevereiro 2022.

ŻAK, Krzysztof. Cutting mechanics and surface finish for turning with differently shaped CBN tools. **Archive of Mechanical Engineering**. Set. 2017. Disponível em < [https://www.researchgate.net/publication/319325799\\_Cutting\\_Mechanics\\_and\\_Surface\\_Finish\\_for\\_Turning\\_with\\_Differently\\_Shaped\\_CBN\\_Tools](https://www.researchgate.net/publication/319325799_Cutting_Mechanics_and_Surface_Finish_for_Turning_with_Differently_Shaped_CBN_Tools) > Acesso em: 15 março 2022.

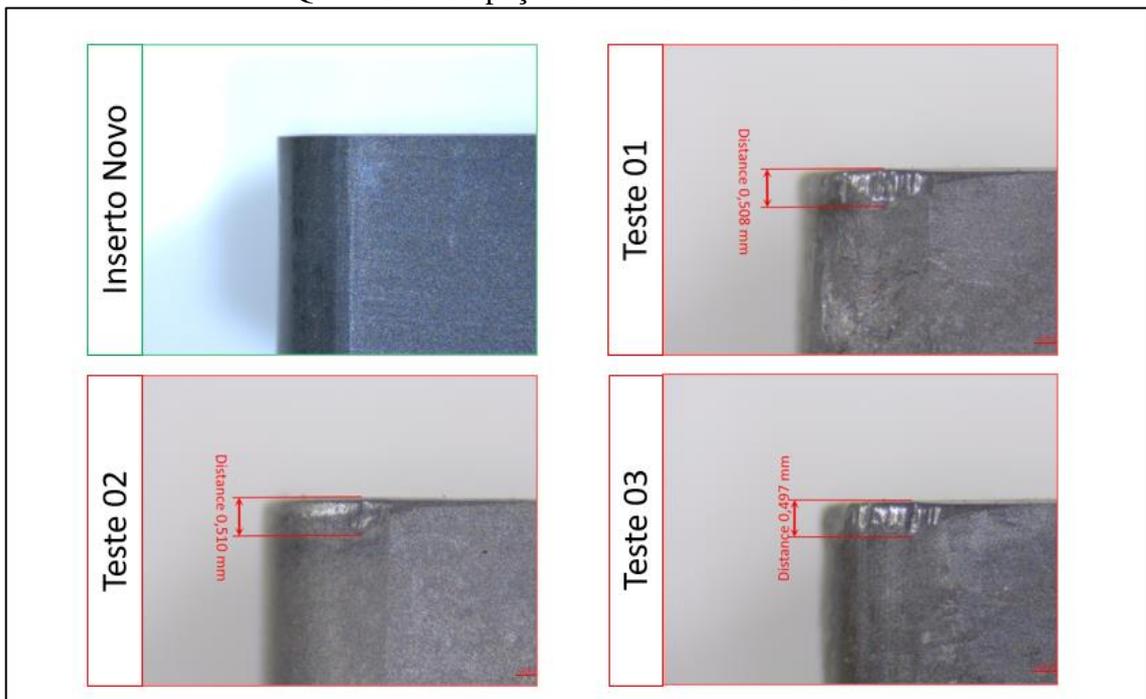
ZNOJKIEWICZ, Natalia; KORZENIEWSKI, Dariusz; WICIAK, Martyna. Wear analysis of cemented carbide during turning of cast iron considering economical machining speed. **Archives of Mechanical Technology and Materials**. Mar. 2017. Disponível em < [https://content.sciendo.com/configurable/contentpage/journals\\$002famtm\\$002f37\\$002f1\\$002farticle-p27.xml](https://content.sciendo.com/configurable/contentpage/journals$002famtm$002f37$002f1$002farticle-p27.xml) > Acesso em: 15 março 2022.

**APÊNDICE A – FOTOS DOS INSERTOS DE CBN**

Velocidade de corte utilizada: de 800 m/min.  
Quantidade de peças usinadas: 48 Tambores

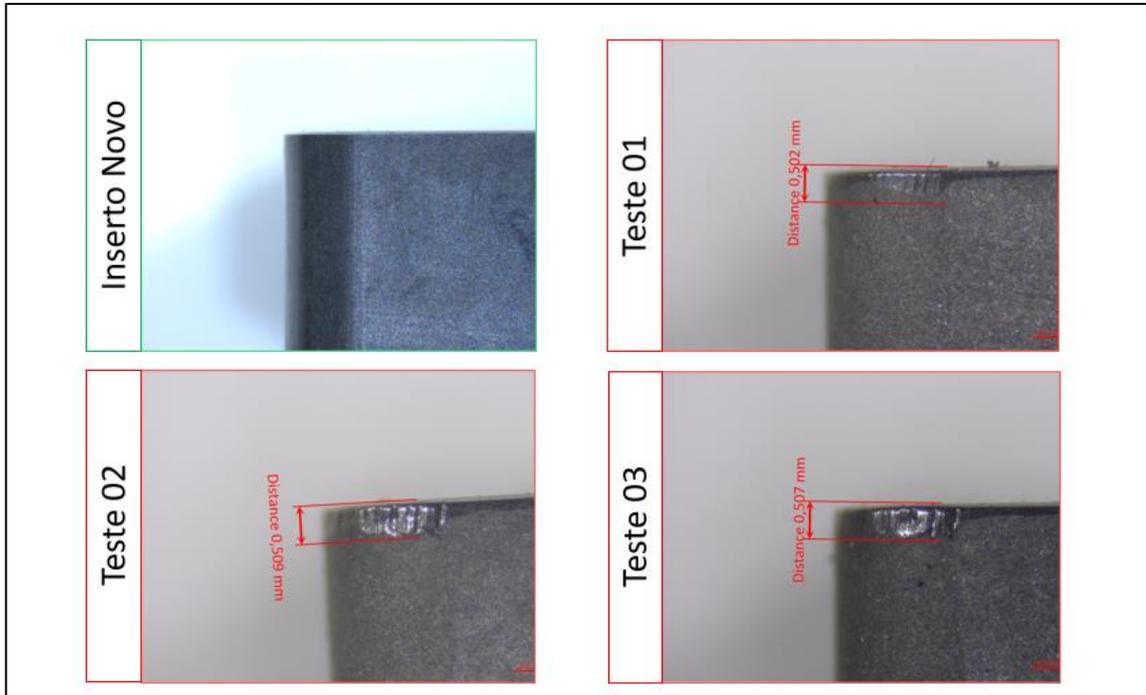


Velocidade de corte utilizada: de 900 m/min.  
Quantidade de peças usinadas: 42 Tambores

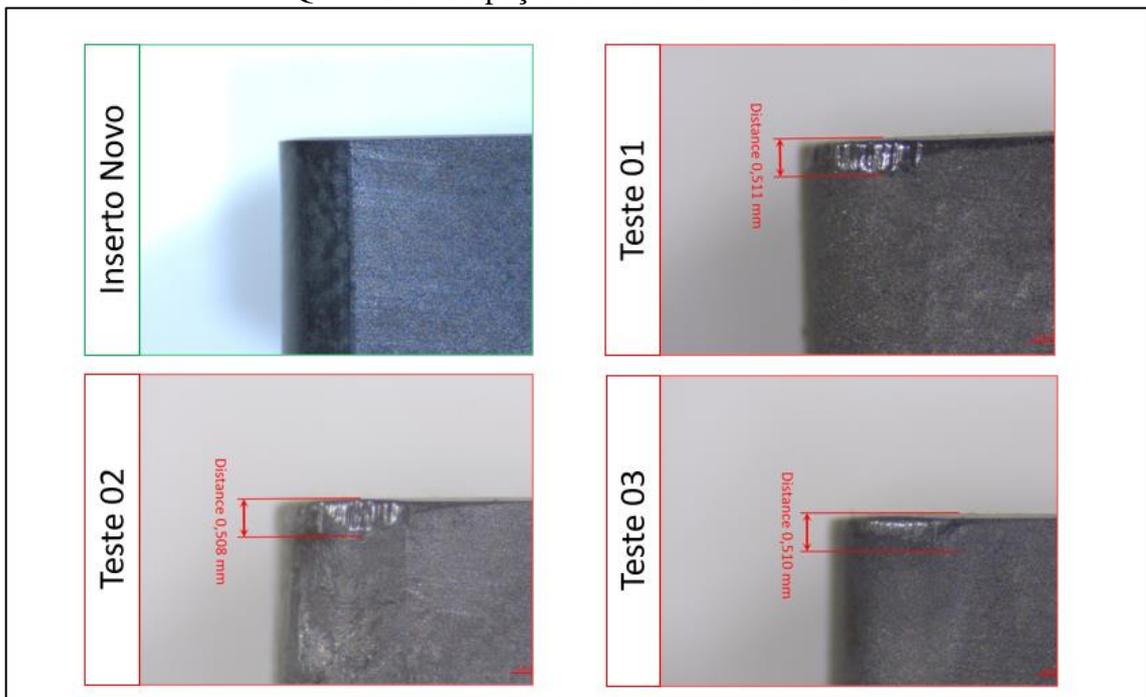


**APÊNDICE A – FOTOS DOS INSERTOS DE CBN**

Velocidade de corte utilizada: de 1.000 m/min.  
Quantidade de peças usinadas: 36 Tambores

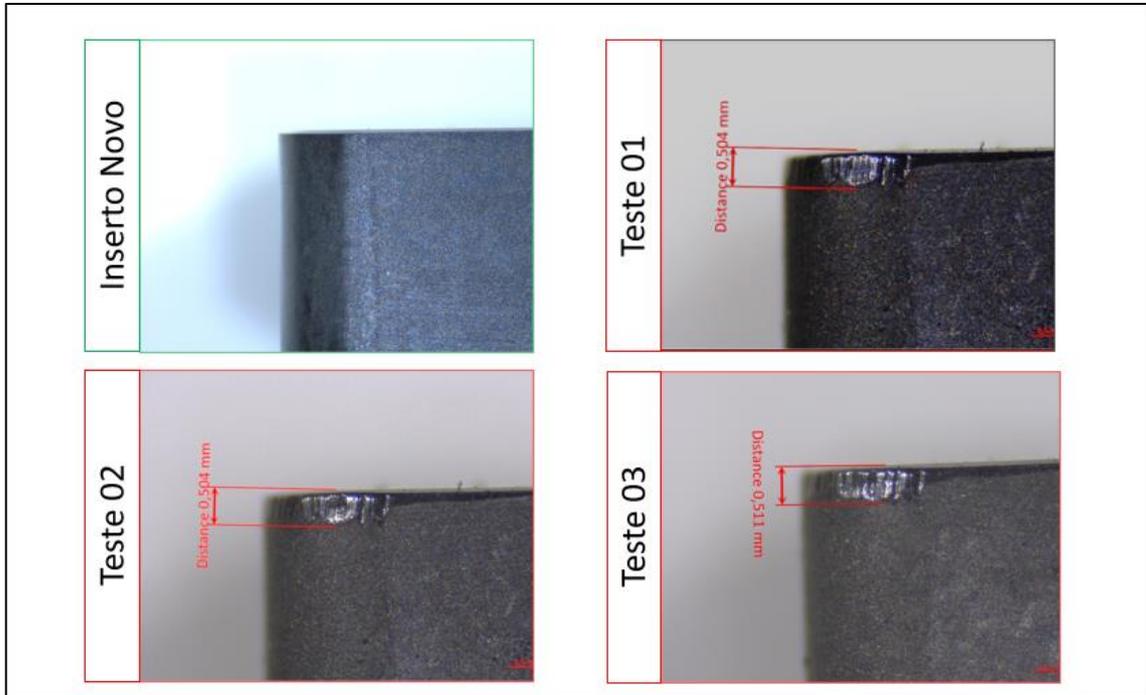


Velocidade de corte utilizada: de 1.100 m/min.  
Quantidade de peças usinadas: 31 Tambores



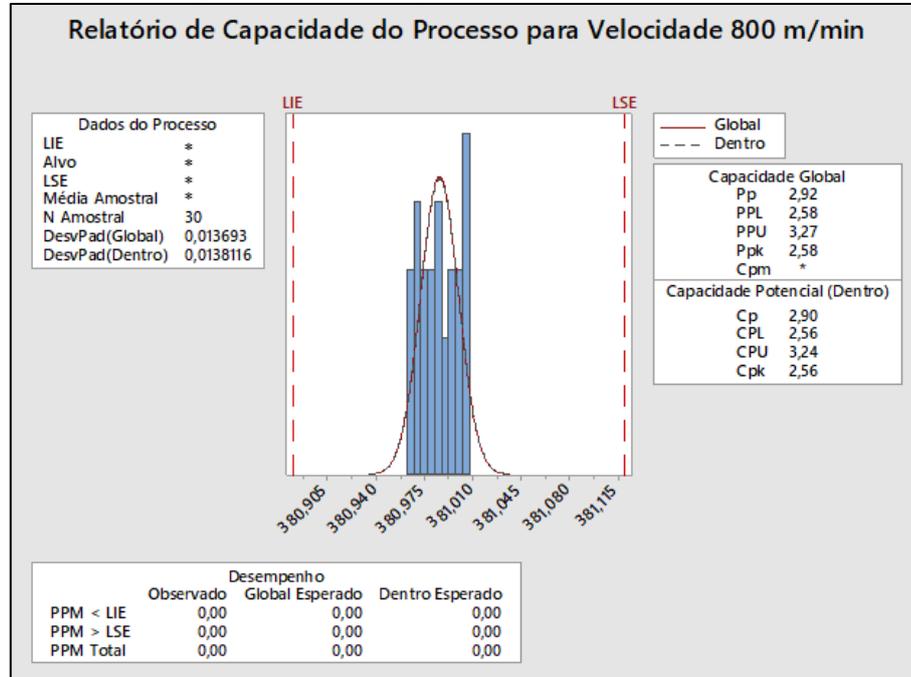
**APÊNDICE A – FOTOS DOS INSERTOS DE CBN**

Velocidade de corte utilizada: de 1.200 m/min.  
Quantidade de peças usinadas: 27 Tambores

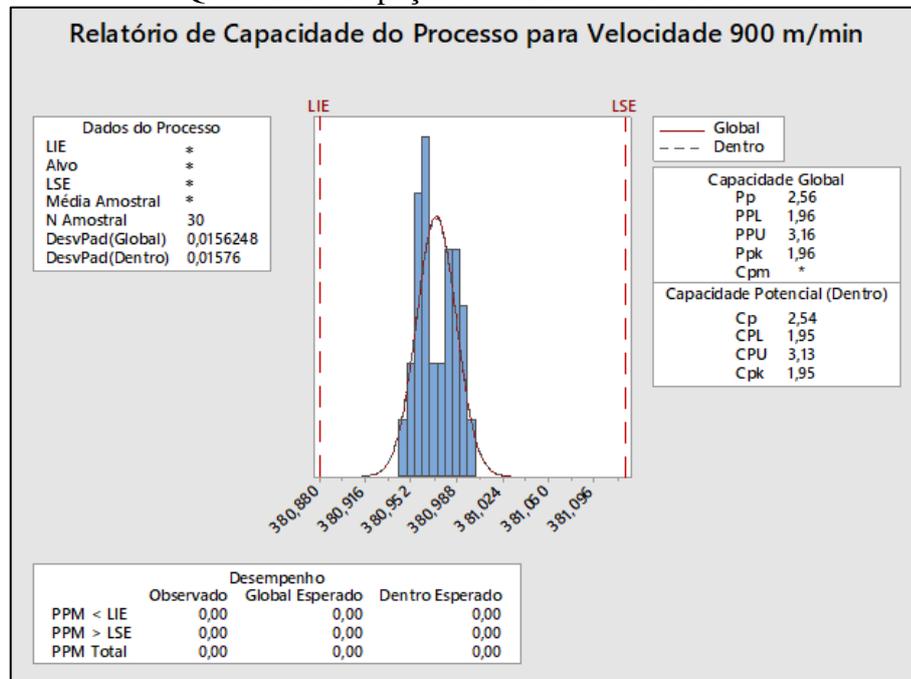


## APÊNDICE B – ESTUDOS DE CAPABILIDADE

Velocidade de corte utilizada: de 800 m/min.  
Quantidade de peças usinadas: 48 Tambores



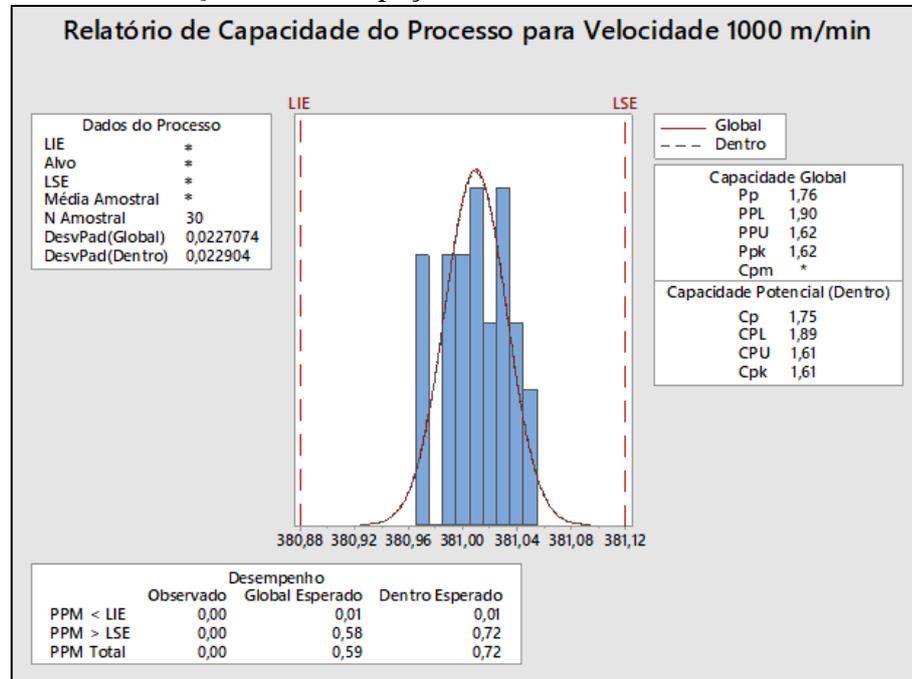
Velocidade de corte utilizada: de 900 m/min.  
Quantidade de peças usinadas: 42 Tambores



## APÊNDICE B – ESTUDOS DE CAPABILIDADE

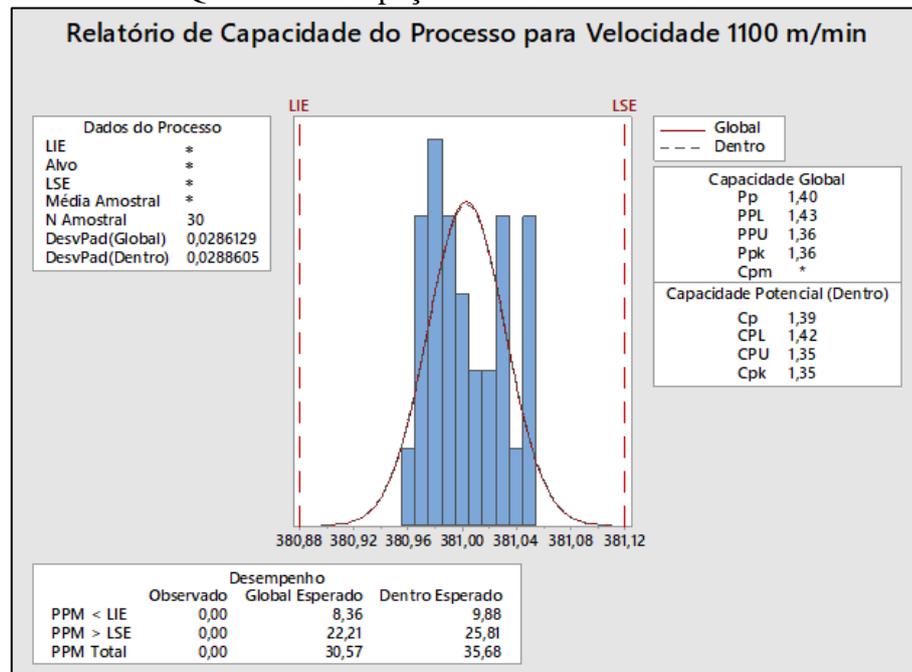
Velocidade de corte utilizada: de 1.000 m/min.

Quantidade de peças usinadas: 36 Tambores



Velocidade de corte utilizada: de 1.100 m/min.

Quantidade de peças usinadas: 31 Tambores



## APÊNDICE B – ESTUDOS DE CAPABILIDADE

Velocidade de corte utilizada: de 1.200 m/min.

Quantidade de peças usinadas: 27 Tambores

