

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ
Escola Politécnica
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica-PPGEM

IRINEU GUSSO

**INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA E QUEBRA-CAVACO DA
FERRAMENTA NO TORNEAMENTO DO AÇO SAE 4144**

Curitiba
Agosto - 2024

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ
Escola Politécnica
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica-PPGEM

IRINEU GUSSO

**INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA E QUEBRA-CAVACO DA
FERRAMENTA NO TORNEAMENTO DO AÇO SAE 4144**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Escola Politécnica, Pontifícia Universidade Católica do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Álisson Rocha Machado

Curitiba
Agosto - 2024

Dados da Catalogação na Publicação
Pontifícia Universidade Católica do Paraná
Sistema Integrado de Bibliotecas – SIBI/PUCPR
Biblioteca Central
Luci Eduarda Wielganczuk – CRB 9/1118

G982i
2024 Gusso, Irineu
Influência da geometria e quebra-cavaco da ferramenta no torneamento do
aço SAE 4144 / Irineu Gusso ; orientador: Álisson Rocha Machado. – 2024.
115 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Paraná,
Curitiba, 2024
Bibliografia: f. 104-108

1. Engenharia mecânica. 2. Usinagem de precisão. 3. Torneamento de aço.
4. Geometria de insertos. 5. Morfologia do cavaco. 6. Quebra-cavacos.
I. Machado, Álisson Rocha. II. Pontifícia Universidade Católica do Paraná.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD 20. ed. – 620.1



Pontifícia Universidade Católica do Paraná
Escola Politécnica
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

TERMO DE APROVAÇÃO

Irineu GUSO

Influência da Geometria e Quebra Cavaco da Ferramenta no Torneamento do Aço SAE 4144

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de mestre no Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Escola Politécnica da Pontifícia Universidade Católica do Paraná, perante uma banca examinadora composta pelos seguintes membros:


Prof. Dr. Alexandre Mendes ABRÃO

Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG, Relator



Prof. Dr. Fred Lacerda AMORIM

Pontifícia Universidade Católica do Paraná, PUCPR



Prof. Dr. Álisson Rocha Machado

Pontifícia Universidade Católica do Paraná, PUCPR, orientador

Curitiba, 09 de agosto de 2024

AGRADECIMENTOS

Agradeço meu orientador Álisson Rocha Machado, pela oportunidade em aceitar este projeto com muita dedicação, gratidão por todos os momentos de orientação desprendidos durante o meu mestrado, por todo o aprendizado e pelo incentivo para realização deste projeto.

Agradecimento especial ao Fred Amorim, Ricardo Torres, Paulo Soares, Michele Sostag Meruvia, Sergio Manenti e a todos os professores do programa de pós-graduação da PUC-PR que de alguma forma me ajudaram a alcançar o objetivo.

A empresa Robert Bosch Limitada representada na Figura dos Srs. Gustavo Cercal, Henrique Oliveira, Rafael Mendes, Felipe Bach, Bismark Mendes, Gabryel Oliveira, Klivan Zanardini, Taynan Caitano, Marco Valente e Rafael Albarello pela parceria, contribuição de conhecimento e toda a ajuda para a realização deste projeto.

Agradeço a empresa Sandvik Coromant em nome do Dr. Denis Boing, Gustavo May, Daniel Reketis, Fernando Morelo, Denis Vasconcelos e Luciano Matzembacher por todo o suporte e parceria para a realização dos experimentos, que foram fundamentais para atingir o objetivo deste trabalho.

Aos colegas de estudo pelo aprendizado e aos técnicos da PUCPR Raynier Garrido e Michell Ramos, que auxiliaram nos ensaios de usinagem, oferecendo suporte e acompanhamento com os equipamentos de medição, que certamente foi fundamental para a realização deste trabalho.

Agradecimento especial à minha família pela compreensão nos momentos ausentes, incentivo e motivação que me fizeram chegar até aqui.

Aos amigos e principalmente a Deus por me conceder mais esta oportunidade com otimismo saúde e disposição, colocando pessoas maravilhosas nesta jornada rumo ao conhecimento e conquistas.

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS	iv
LISTA DE QUADROS	v
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	vi
SIMBOLOGIA.....	vii
RESUMO.....	ix
ABSTRACT	x
1 INTRODUÇÃO	11
1.1 HISTÓRICO, DEFINIÇÕES E LEVANTAMENTO DO PROBLEMA	12
1.2 OBJETIVOS	18
1.2.1 Objetivo Geral	18
1.2.2 Objetivos Específicos	18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1 USINAGEM	20
2.1.1 Usinabilidade.....	23
2.2 TORNEAMENTO.....	25
2.2.1 Ferramentas de torneamento	26
2.2.2 Formação do cavaco	27
2.2.2.1 Fases do processo de formação do cavaco	27
2.3 GRAU DE RECALQUE	30
2.4 MORFOLOGIA DO CAVACO	32
2.5 FORMAS DE CAVACOS	33
2.5.1 Classes e formas de cavacos mais problemáticas.....	35
2.6 HISTÓRICO E PROBLEMAS CAUSADOS PELOS CAVACOS	36
2.6.1 Fator de Empacotamento	37
2.7 CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS FRENTE À PROBLEMAS MAIS CRÍTICOS NA FORMAÇÃO DE CAVACOS.....	37
2.7.1 Técnicas utilizadas para reduzir a formação de cavacos longos.....	38
2.8 TEORIA DO CONTROLE DE CAVACOS	39
2.8.1 Raio de curvatura natural do cavaco	40
2.8.2 Deformação crítica para quebra do cavaco.....	40
2.8.3 Distribuição térmica na formação do cavaco.....	40

2.8.4 Ângulo de posição	41
2.8.5 Materiais críticos	42
2.8.6 Processo de evacuação dos cavacos	42
2.9 MÉTODOS PARA CONTROLE DE CAVACOS	43
2.9.1 Métodos especiais	43
2.9.2 Utilização de quebra-cavacos	44
2.10 GEOMETRIA DE QUEBRA-CAVACOS	45
2.10.1 Quebra-cavacos para desbaste	45
2.10.2 Quebra-cavacos para acabamento	46
2.10.3 Influência do material da peça	46
2.10.4 Influência do material da ferramenta	46
2.11 CONDIÇÕES DE CORTE NO CONTROLE DO CAVACO	48
2.11.1 Influência dos parâmetros de corte	48
2.11.2 Influência das condições lubri-refrigerantes	48
2.11.3 Influência da máquina ferramenta e tipo de operação	49
2.12 TECNOLOGIA PRIME TURNING	49
2.12.1 Segunda geração de insertos do tipo “B”	51
2.13 PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS (DOE)	52
3 METODOLOGIA	53
3.1 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	53
3.1.1 Equipamentos	54
3.2 SELEÇÃO DO MATERIAL DE TESTE	54
3.2.1 Preparação das amostras	54
3.2.2 Análise de dureza	55
3.2.3 Análise metalográfica do material	55
3.3 FERRAMENTAS DE CORTE	56
3.4 CONFIGURAÇÃO DOS ENSAIOS DE USINAGEM	60
3.5 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DE CORTE	61
3.6 COLETA DE DADOS NA USINAGEM	62
3.6.1 Medição do grau de recalque	62
3.6.2 Medição do fator de empacotamento	63
3.6.3 Análise microscópica do cavaco	64
3.6.4 Avaliação do desgaste dos insertos	65
3.6.5 Análise metalográfica dos insertos MEV/EDS	66

3.6.6 Medição da qualidade das peças usinadas	67
3.6.7 Medição dos esforços de corte	68
3.6.8 Medição da temperatura.....	69
4 RESULTADOS.....	73
4.1 AVALIAÇÃO DO CAVACO NA USINAGEM	73
4.1.1 Avaliação dos cavacos gerados na usinagem com os insertos nos experimentos.....	73
4.1.2 Comparativo dos cavacos em fotos tiradas no MEV	77
4.1.3 Avaliação dos cavacos no microscópio óptico.....	79
4.1.4 Avaliação da espessura do cavaco	81
4.1.5 Grau de recalque.....	83
4.1.6 Fator de empacotamento	85
4.1.7 Avaliação de desgaste dos insertos - Microscópio	86
4.1.8 Avaliação dos mecanismos de desgaste dos insertos – MEV/EDS	89
4.1.9 Avaliação das forças de usinagem	92
4.1.10 Avaliação da temperatura de corte	93
4.2 AVALIAÇÃO DA GEOMETRIA DOS INSERTOS SEM QUEBRA CAVACO.....	95
4.3 AVALIAÇÃO DA PEÇA USINADA.....	96
4.3.1 Caracterização da rugosidade da superfície usinada.....	96
4.3.2 Avaliação da circularidade	98
4.4 RESUMO DOS EXPERIMENTOS.....	99
5 CONCLUSÕES	101
6 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	103
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104
APÊNDICE 1 – FOTOS ACABAMENTO SUPERFICIAL.....	109
APÊNDICE 2 – RESULTADOS ESTATÍSTICOS	110

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Sistema de injeção CRI (<i>Common Rail Injector</i>)	13
Figura 1.2 - Caso real de ninhos de cavacos formados no torneamento do aço SAE 4144 em uma multinacional.....	13
Figura 1.3 - Perdas por problemas de cavacos longos	15
Figura 1.4 - Pesquisa Plataforma Scopus " <i>Chip control in machining</i> "	17
Figura 2.1 - Formato de insertos para torneamento	26
Figura 2.2 - Diagrama da cunha cortante	28
Figura 2.3 - Mecanismo de formação de cavaco.....	30
Figura 2.4 - Espessura do cavaco h'	31
Figura 2.5 - Esquema da formação de cavaco: a) contínuo; b) segmentado; c) descontínuos	33
Figura 2.6 - Tipologia de Cavaco.....	34
Figura 2.7 - Formação do cavaco: a) cavaco de cisalhamento ou parcialmente contínuo; b) cavaco contínuo	36
Figura 2.8 - Ângulo de posição " χ_r "	41
Figura 2.9 - (a) Raio de curvatura natural do cavaco; (b) Quebra-cavaco postiço; (c) Quebra-cavaco integral	45
Figura 2.10 - Tecnologia <i>Prime Turning</i>	50
Figura 2.11 - <i>Prime Turning</i> Tipo "B"	51
Figura 3.1 - Fluxograma dos experimentos abordados	53
Figura 3.2 - Análise metalográfica e de dureza do material	55
Figura 3.3 - Microestrutura do aço SAE 4144	56
Figura 3.4 - Inserto ISO WNMG de 6 arestas - 080408 PR4415.....	57
Figura 3.5 - Inserto Prime Turning "B" de 4 arestas - CP-B1208D-L4 4415	57
Figura 3.6 – Análise química do metal duro Inserto WNMG.....	58
Figura 3.7- Análise química revestimento Inserto WNMG	58
Figura 3.8 - Análise química do metal duro - Inserto Prime Turning.....	59
Figura 3.9 - Análise química revestimento Inserto Prime Turning	60
Figura 3.10 - Estratégia de modelagem software NX Unigraphics	61
Figura 3.11 - Caixas para coleta dos cavacos	63
Figura 3.12 - Cavacos para análise embutidos em baquelite.....	65
Figura 3.13 - Microscópio de medição Zoller.....	66

Figura 3.14 - Microscópio Eletrônico de Varredura	67
Figura 3.15 - Aquisição de dados de força e dinamômetro Kistler	68
Figura 3.16 - Medição da temperatura com termopares torno Romi GL250M	69
Figura 3.17 - Retrabalho dos suportes e insertos na Eletroerosão Charmilles	70
Figura 3.18 - Suportes e insertos após retrabalho para inserção dos termopares	70
Figura 3.19 - Aquisição de sinal do termopar no inserto	71
Figura 3.20 - Insertos retrabalhados (Face Plana)	72
Figura 3.21 - Câmera de alta velocidade	72
Figura 4.1 - Cavacos gerados pelos insertos WNMG (W) e <i>Prime Turning</i> (P) nos experimentos 1 a 3 ($a_p = 0,3\text{mm}$; $v_c = 200\text{m/min}$)	74
Figura 4.2 - Cavacos gerados pelos insertos WNMG (W) e <i>Prime Turning</i> (P) nos experimentos 4 a 6 ($a_p = 0,5\text{mm}$; $v_c = 200\text{m/min}$)	75
Figura 4.3 - Cavacos gerados pelos insertos WNMG (W) e <i>Prime Turning</i> (P) nos experimentos 7 a 9 ($a_p = 0,7\text{mm}$; $v_c = 200\text{m/min}$)	76
Figura 4.4 - Estágios da usinagem e cavacos gerados nos experimentos 4W e 4P $f = 0,3\text{mm/rot}$; $a_p = 0,5\text{mm}$; $v_c = 200\text{m/min}$	77
Figura 4.5 - Fotos MVE cavacos do inserto WNMG (condição 4W) $f = 0,3\text{mm/rot}$; $a_p = 0,5\text{mm}$; $v_c = 200\text{m/min}$	78
Figura 4.6 - Fotos MVE cavacos do inserto <i>Prime Turning</i> (condição 4P) $f = 0,3\text{mm/rot}$; $a_p = 0,5\text{mm}$; $v_c = 200\text{m/min}$	78
Figura 4.7 - Sessão longitudinal do cavaco destacando a zona de fluxo para o inserto WNMG ($a_p = 0,5\text{mm}$; $v_c = 200\text{m/min}$)	79
Figura 4.8 - Sessão longitudinal do cavaco destacando a zona de fluxo para o inserto <i>Prime Turning</i> ($a_p = 0,5\text{mm}$; $v_c = 200\text{m/min}$)	80
Figura 4.9 - Comportamento da espessura da zona de fluxo	81
Figura 4.10 - Espessura dos cavacos dos experimentos dos insertos WNMG (W) e <i>Prime Turning</i> (P) gerados na usinagem	82
Figura 4.11 - Largura dos cavacos dos experimentos dos insertos WNMG (W) e <i>Prime Turning</i> (P) gerados na usinagem	83
Figura 4.12 - Comparativo do grau de recalque	84
Figura 4.13 - Fator de empacotamento	86
Figura 4.14 - Áreas de desgaste dos insertos WNMG (W)	87
Figura 4.15 - Análise do desgaste inserto <i>Prime Turning</i> (P)	87
Figura 4.16 - Medições do desgaste na superfície de folga dos insertos	88

Figura 4.17 - Medições do desgaste na superfície de saída dos insertos	89
Figura 4.18 - Avaliação MEV/EDS da superfície de folga do inserto WNMG após 200pçs usinadas	90
Figura 4.19 - Superfície de folga do inserto <i>Prime Turning</i> após 200pçs usinadas...	91
Figura 4.20 - Comparativo força eixo “X” - Força Passiva.....	92
Figura 4.21 - Comparativo força eixo “Y” - Força de Avanço.....	92
Figura 4.22 - Comparativo força eixo “Z” - Força de Corte.....	93
Figura 4.23 - Comparativo de temperatura na usinagem	95
Figura 4.24 - Estágios do processo de usinagem com insertos face plana.....	95
Figura 4.25 - Comparativo acabamento superficial	97
Figura 4.26 - Desvios de circularidade das peças usinadas com os dois insertos	98
Figura 7.1 - Vista da superfície da peça usinada com o inserto ISO WNMG	109
Figura 7.2 - Vista da superfície da peça usinada com o inserto <i>Prime Turning</i>	109
Figura 8.1 - Estatística (ANOVA) - Rugosidade dos experimentos 1, 2 e 3.....	110
Figura 8.2 - Estatística (ANOVA) - Rugosidade dos experimentos 4, 5 e 6.....	111
Figura 8.3 - Estatística (ANOVA) - Rugosidade dos experimentos 7, 8 e 9.....	112
Figura 8.4 - Estatística (ANOVA) - Circularidade dos experimentos 1, 2 e 3.....	113
Figura 8.5 - Estatística (ANOVA) - Circularidade dos experimentos 4, 5 e 6.....	114
Figura 8.6 - Estatística (ANOVA) - Circularidade dos experimentos 7, 8 e 9.....	115

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Composição do material SAE 4144	54
Tabela 3.2 - Medição da dureza HB 5/750 do material SAE 4144.....	55
Tabela 3.3 - Análise metalográfica material SAE 4144	56
Tabela 3.4 - Composição química do metal duro – Inseto WNMG	58
Tabela 3.5 - Composição química do revestimento – Inseto WNMG	59
Tabela 3.6 - Composição química do metal duro - Inseto <i>Prime Turning</i>	59
Tabela 3.7 - Composição química do revestimento – Inseto <i>Prime Turning</i>	60
Tabela 3.8 - Especificação dos parâmetros de corte dos experimentos.....	62
Tabela 4.1 - Espessura média do cavaco e grau de recalque	84
Tabela 4.2 - Fator de empacotamento dos insertos WNMG e <i>Prime Turning</i>	85
Tabela 4.3 - Resultados das análises de EDS (para o inserto ISO WNMG.....	90
Tabela 4.4 - Resultados das análises de EDS para o inserto <i>Prime Turning</i>	91
Tabela 4.5 - Resumo geral dos experimentos com indicação do percentual de desempenho entre os insertos	99

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 - Variáveis independentes e variáveis dependentes.....	22
Quadro 2.2 - Fatores e critérios de usinabilidade.....	24
Quadro 2.3 - Técnicas para reduzir a formação de cavacos longos	39
Quadro 3.1 - Características avaliadas e frequência de medição	68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CNC	Comando Numérico Computadorizado
CVD	<i>Chemical Vapor Deposition</i>
CRIN	<i>Common Rail Injector</i>
DIN	<i>Deutches institut fur normun</i>
DOE	<i>Design of Experiments</i>
ed.	Edição
EDS	Espectroscopia de Energia Dispersiva
EDM	<i>Electrical Discharge Machining</i>
f.	Folha
HB	Unidade de dureza Brinell
HRC	Unidade de dureza Rockwell na escala C
ISBN	<i>International Standard Book Number</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LAUS	Laboratório de Pesquisa em Usinagem
MEV	Microscópio Eletrônico por Varredura
MQL	Mínima Quantidade de Lubrificante
NBR	Norma Brasileira Regulamentar
p.	Pagina
PhD	<i>Doctor of Philosophy</i>
PPGEM	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais
PUCPR	Pontifícia Universidade Católica do Paraná
PVD	<i>Physical Vapor Deposition</i>
SAE	<i>Society of Automotive Engineers - International</i>

SIMBOLOGIA

a_p	Profundidade de corte
Al	Alumínio
Al_2O_3	Óxido de Alumínio
bar	Unidade de pressão
C	Carbono
Ca	Cálcio
Co	Cobalto
Cr	Cromo
Cu	Cobre
d	Densidade
F_a	Força de avanço
F_c	Força de corte
Fe	Ferro
FE	Fator de empacotamento
f	Avanço de corte
F_p	Força passiva
Fps	Frames por segundo
H	Espessura de corte
h'	Espessura do cavaco
m	Metro
m/min	Metros por minuto
mm/min	Milímetros por minuto
mm	Milímetro
Mn	Manganês
Mo	Molibdênio
N	Nitrogênio
N	Newton
Ni	Níquel
O	Oxigênio
P	Fósforo
Q	Taxa de remoção de material

r_c	Raio de curvatura
RPM	Rotações por minuto
rot	Rotações
S	Enxofre
Si	Silício
Rz	Parâmetro de rugosidade – Altura máxima do vale do perfil
Ti	Titânio
TiN	Nitreto de Titânio
TiCN	Carbonitreto de Titânio
v	Volume
v_c	Velocidade de corte
v_{se}	Volume do sólido equivalente
χ_r	Ângulo de posição do inserto
W	Tungstênio
°C	Graus Celsius
μm	Micrometro
%	Porcentagem
ϕ	Ângulo de cisalhamento

RESUMO

Este estudo se propõe a investigar a influência da geometria e quebra-cavaco da ferramenta na usinagem de torneamento do material SAE 4144, um aço de alta resistência amplamente utilizado na indústria mecânica, visando melhorias do processo. A escolha desse tema surge da necessidade de compreender como a morfologia dos cavacos afeta diretamente a eficiência e a qualidade dos processos de usinagem. A usinagem desempenha um papel fundamental na fabricação de componentes mecânicos de alta precisão, e o controle adequado dos cavacos gerados durante o processo é essencial para evitar problemas como desgaste prematuro da ferramenta, baixa qualidade da peça usinada e riscos à segurança no ambiente de trabalho. Os cavacos longos, por exemplo, podem se enrolar em torno da ferramenta ou da peça, causando interrupções no processo e potencialmente resultando em peças defeituosas. Esse trabalho foi desenvolvido para reduzir um problema em um caso real, na operação de torneamento no chão de fábrica, com problemas de cavacos contínuos e longos de uma empresa do ramo automobilístico, que atualmente utiliza insertos com geometria ISO do tipo “W”. A metodologia deste estudo seguiu uma abordagem em um ambiente controlado, que envolveu a realização de testes práticos de torneamento, onde foram variados os parâmetros de corte para investigar e comparar as geometrias atuais ISO e a nova tecnologia *Prime Turning*, que se destaca por apresentar menores ângulos de posição (χ_r), reduzindo a espessura do cavaco (h') com excelente controle do cavaco. Os parâmetros de saída considerados neste estudo foram a vida das ferramentas, os mecanismos de desgaste, a temperatura de usinagem, esforço de corte, morfologia dos cavacos e qualidade das peças usinadas. Nos testes experimentais foram utilizados equipamentos consagrados e técnicas de medição específicas para cada situação.

Os cavacos predominantes nos experimentos com os insertos *Prime Turning* na maioria dos experimentos, foram da classe contínua, na forma de lascas ou helicoidal curto, não ocorrendo o acúmulo de cavacos no interior da máquina, com uma consequente redução do seu volume. Nos experimentos realizados com os insertos WNMG, o cavaco predominante foi da classe contínua em forma de fita, normalmente longa, com paradas constantes no processo de usinagem para sua retirada.

Os resultados dos experimentos avaliados, na operação de torneamento, mostram que o inserto WNMG obteve um melhor resultado de acabamento superficial para a rugosidade (R_z) medida em aproximadamente 10%, quando comparados com os insertos *Prime Turning*, que exigiram maiores forças de usinagem, em função do maior contato da aresta de corte.

Em contrapartida, o inserto *Prime Turning* obteve menores temperaturas de corte, sendo na ordem de 6% a 31%, obtendo uma melhor formação do cavaco, influenciado principalmente pela sua geometria e o seu ângulo de posição menor, proporcionando melhores condições de usinagem para redução dos cavacos longos, com consequente ganho de produtividade e performance quando comparado com o inserto WNMG.

Palavras-chave: Usinagem de precisão; Torneamento de aço; Quebra-cavacos; Morfologia do cavaco; Geometrias de insertos.

ABSTRACT

This study aims to investigate the influence of tool geometry and chip-breaker on the turning machining of SAE 4144, a high-strength steel widely used in the mechanical industry, aiming at the improvement of the process. The choice of this topic arises from the need to understand how chip morphology directly affects the efficiency and quality of the machining processes. Machining plays a fundamental role in the manufacture of high-precision mechanical components, and proper control of the chips generated during the process is essential to avoid issues such as premature tool wear, low quality of the machined part, and safety risks in the workplace. Long chips, for example, can wrap around the tool or workpiece, causing interruptions in the process and potentially resulting in scrapped parts. This work was developed to reduce a problem in a real case, in the turning process operation on the shopfloor, with problems of continuous and long chips in a company of the automobile sector, which currently uses inserts with ISO "W" type geometry. The methodology followed an approach in a controlled environment, which involves practical turning tests, where the cutting parameters were varied to investigate and compare the current ISO geometry and the new *Prime Turning* technology, with smaller position angles (χ_r), reducing chip thickness (h') with excellent chip control. The output variables considered were the tool life and wear mechanism analysis, the machining temperature, machining forces, chip morphology and quality of the machined workpieces. In the experimental tests, established equipment and specific measurement techniques were used for each situation.

The predominant chips in the experiments with *Prime Turning* inserts in most experiments were of the continuous class and short helical form, no accumulation of the chips inside the machine, with a consequent reduction in their volume. In the experiments carried out with WNMG inserts, the predominant chip was of the continuous class in the form of a ribbon, normally long, with constant stops in the machining process to remove it.

The results of the evaluated experiments, in the turning operation for surface finishing, show that the WNMG insert obtained better roughness (R_z) results, by approximately 10%, when compared to the *Prime Turning* inserts, which also required greater machining forces, due to the greater cutting edge contact.

On the other hand, the *Prime Turning* insert obtained lower cutting temperatures, in the order of 6% to 31%, obtaining better chip formation, mainly influenced by its geometry and its smaller position angle, providing better machining conditions for reduction of long chips, with consequent productivity and performance gains when compared to the WNMG insert.

Keywords: Precision machining; Turning of steels; Chip-breakers; Chip morphology; Insert geometry.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A usinagem é um processo de fabricação essencial na indústria, amplamente utilizado para dar forma, precisão e acabamento a uma variedade de componentes e peças mecânicas. Esse processo envolve a remoção controlada de material de uma peça bruta, muitas vezes através da rotação de uma ferramenta de corte contra a superfície da peça, podendo também ocorrer pela rotação da peça, como no caso do torneamento. A usinagem é conhecida por sua versatilidade, permitindo a produção de peças com tolerâncias extremamente apertadas e geometrias complexas, tornando-a indispensável em setores como aeroespacial, automotivo, médico e muitos outros (SILVA *et al.*, 2022).

O material SAE 4144, uma classe de aço de alta resistência e médio teor de carbono, desempenha um papel significativo em várias aplicações industriais, devido à sua excelente combinação de propriedades mecânicas, incluindo a resistência à tração. Composto principalmente por ferro, carbono, cromo, e manganês, o aço SAE 4144 é notável por sua tenacidade, dureza e capacidade de suportar cargas substanciais. Essas características o tornam adequado para componentes submetidos a altas tensões e impactos, como engrenagens, eixos, parafusos e outros elementos de transmissão de potência (POLLI; CARDOSO, 2022).

A elevada resistência mecânica do aço SAE 4144 requer esforços significativos para a remoção de metal, resultando em cavacos que podem ser mais longos e mais difíceis de quebrar em comparação com materiais menos resistentes. Logo, observa-se que sua usinagem apresenta desafios específicos devido à sua resistência e composição química.

Fazendo um comparativo, o aço SAE 4144 e o SAE 4140 têm durezas semelhantes, tipicamente entre 28-32 HRC após têmpera e revenido, já o aço SAE 4340 pode alcançar uma dureza ligeiramente superior, até 34 HRC e o aço SAE 1045 possui dureza relativamente menor, cerca de 20-30 HRC.

Composição Química: O aço SAE 4144 é muito similar ao aço SAE 4140, com pequenas variações na composição de cromo e molibdênio, o aço SAE 1045 possui menor teor de cromo e molibdênio, e o aço SAE 4340 tem um conteúdo significativo de níquel, o que contribui para sua alta resistência e tenacidade.

Características Mecânicas: O aço SAE 4340 geralmente apresenta melhores propriedades mecânicas em termos de resistência à tração e limite de escoamento em comparação com os outros aços. O aço SAE 4144 e o SAE 4140 têm propriedades mecânicas bastante semelhantes, enquanto o aço SAE 1045 tem um desempenho ligeiramente inferior.

Aplicações: Os aços SAE 4144 e SAE 4140, são usados em aplicações similares, como eixos e engrenagens, onde são necessários boa resistência e tenacidade. O aço SAE 4340 é preferido para aplicações de alta performance, e o aço SAE 1045 é utilizado em situações que não requerem as propriedades mecânicas mais elevadas dos outros aços.

Garantir os melhores resultados nos vários processos de usinagem, dentre eles o processo de torneamento, é fundamental o uso de ferramentas de corte de alta performance para se obter a excelência nos resultados na indústria. Uma dessas ferramentas é o inserto de metal duro que tem se destacado pela sua durabilidade, precisão e eficiência. Cada vez mais com os avanços tecnológicos aparecem novas geometrias, novos materiais e coberturas superficiais, possibilitando grande ganho de produtividade e qualidade nos produtos.

Ao investigar a literatura, vê-se que alguns trabalhos oferecem perspectivas importantes sobre a usinagem e suas variáveis relacionadas, que podem ser relevantes para o presente estudo. Tem-se o destaque da complexidade e a interconexão de fatores que influenciam os processos de usinagem e a formação do cavaco, incluindo a influência da ferramenta e sua geometria, aliada as condições de corte que podem afetar a qualidade da usinagem, produtividade, performance das ferramentas, riscos operacionais e ambientais relacionados ao cavaco.

1.1 HISTÓRICO, DEFINIÇÕES E LEVANTAMENTO DO PROBLEMA

A motivação deste estudo se deu através de um problema real em um processo de usinagem, especificamente na usinagem de corpos injetores diesel (Figura 1.1) utilizados em veículos de passeio e comerciais, fabricados em uma empresa multinacional.

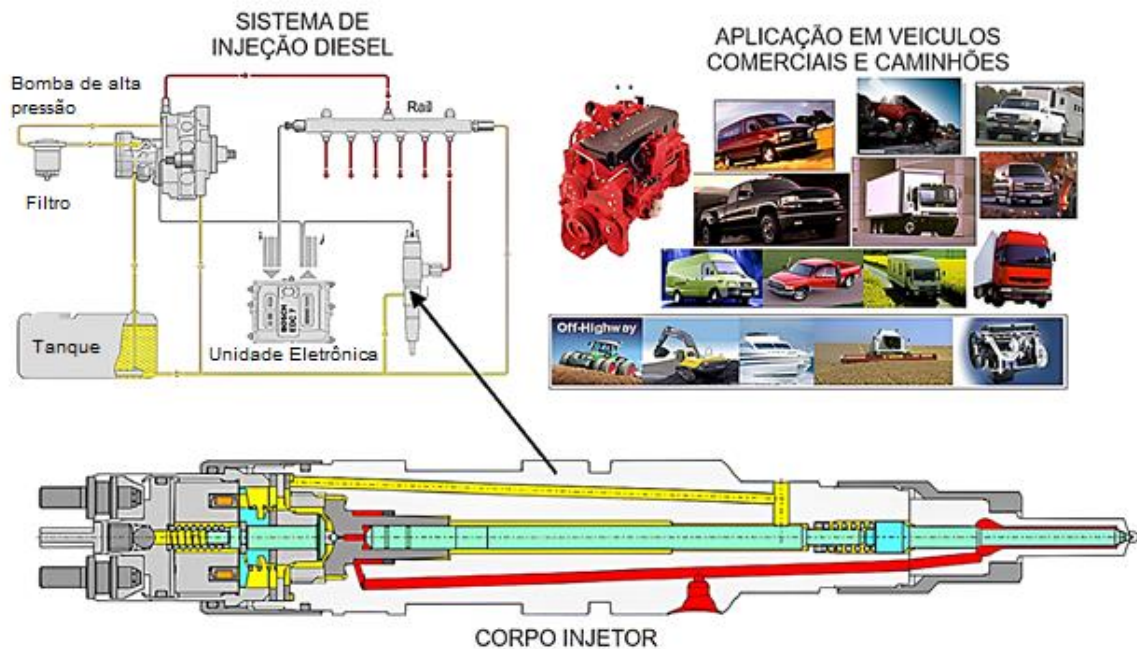


Figura 1.1 - Sistema de injeção CRI (*Common Rail Injector*)

Fonte: Multinacional (2024).

Os cavacos longos gerados na operação de torneamento do material SAE 4144 com insertos ISO geometria WNMG (Figura 1.2) oferecem riscos ao operador, com várias ocorrências de acidentes para sua retirada no processo de usinagem. Isto ocorre porque eles ficam acumulados entre a peça, torre porta-ferramentas e transportador de cavacos no interior da máquina, dificultando também o seu transporte e descarte com um alto volume de cavaco gerado. Além disso ocorrem as perdas de produtividade, baixo desempenho e qualidade da superfície usinada.



Figura 1.2 - Caso real de ninhos de cavacos formados no torneamento do aço SAE 4144 em uma multinacional

Fonte: O autor (2024).

Na Figura 1.3 destacam-se os principais problemas e seus percentuais de custo em uma linha de produção, que geram perdas por cavacos longos no processo de torneamento dentro da multinacional:

- Custos com perdas de produtividade está em primeiro lugar, com 32% em função das várias paradas de máquina com a necessidade da retirada dos cavacos pelo operador, intervenção para manutenção da máquina e troca de ferramentas danificadas no processo de usinagem;
- Performance das ferramentas está em segundo lugar, com 19% do custo gerado, devido a danos nas ferramentas e baixo desempenho;
- Qualidade das peças usinadas fica em terceiro lugar, com problemas de danificação da superfície usinada e necessidade de ações adicionais de controle, como por exemplo, exame visual e de qualidade em 100% das peças usinadas na linha de produção;
- Os custos de Manutenção estão em quarto lugar com 14%, devido à necessidade de reparos nas máquinas, em função do travamento da esteira de cavacos e torre porta ferramentas;
- Transporte e descarte do cavaco está em quinto lugar, com 12% dos custos. O alto volume acumulado nas caçambas exige uma logística mais frequente para a remoção e descarte, quando comparados aos cavacos fragmentados em formas de lascas;
- Em sexto lugar ficam os custos operacionais, que aparecem com 8% no indicador, proveniente de acidentes por afastamento de trabalho e ações de segurança, necessárias para redução do risco operacional.

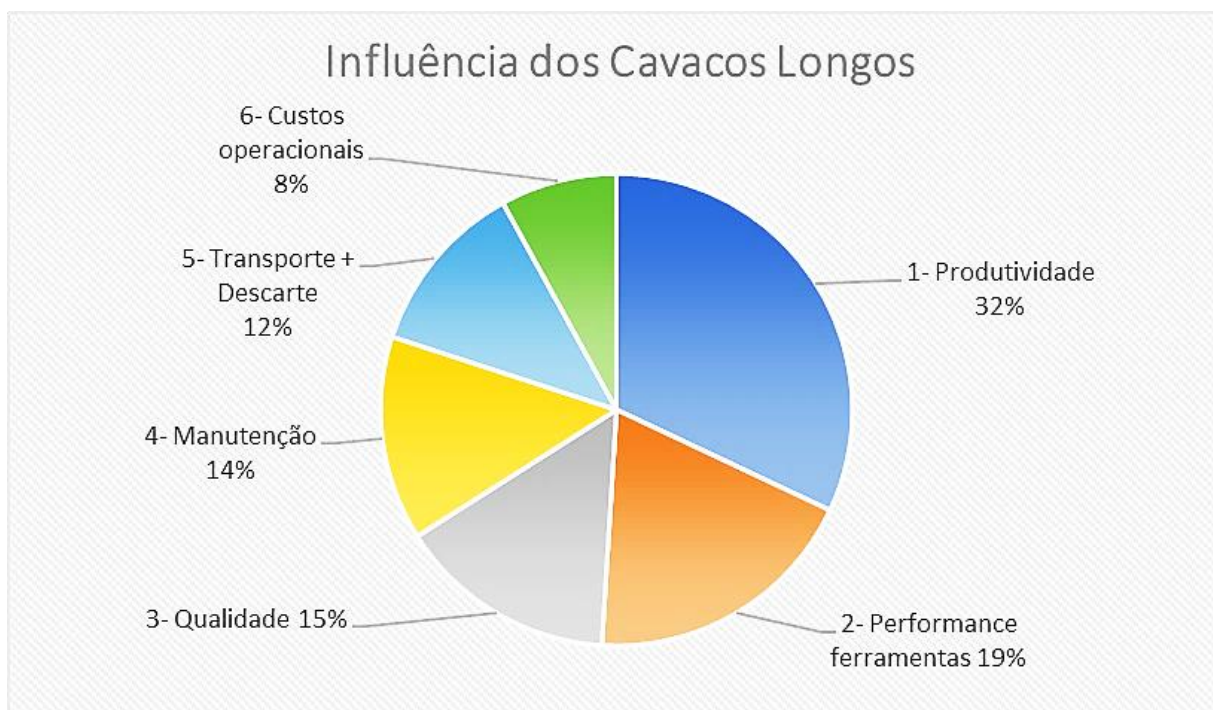


Figura 1.3 - Perdas por problemas de cavacos longos

Fonte: O autor - Resultados indicadores multinacional (2024).

A necessidade de resolver os problemas relacionados à produção de cavacos longos incentivou a proposição de uma investigação do tema. Neste estudo, foram formuladas duas hipóteses fundamentadas que se baseiam em uma análise rigorosa da literatura e na investigação de estudos relacionados. Essas hipóteses foram concebidas com o propósito de direcionar a presente pesquisa em busca de uma compreensão aprofundada da influência do tipo de geometria para a quebra de cavaco no torneamento do aço SAE 4144. Cada hipótese aborda aspectos específicos que são fundamentais para o contexto da usinagem desse material e seus desafios inerentes. A exploração dessas hipóteses permitirá uma análise crítica das implicações da quebra de cavacos na eficiência, qualidade, sustentabilidade e competitividade na indústria de fabricação, reforçando a relevância deste estudo no campo acadêmico e industrial.

H1- Considerando as conclusões do estudo de Marques (2018), que enfatizou a importância do controle de cavacos nas operações de usinagem, pode-se estabelecer a hipótese de que a ineficácia no controle da formação e expulsão de cavacos durante a usinagem do aço SAE 4144, com a formação de cavacos inadequados, podendo afetar a segurança dos processos automatizados, prejudicando a confiabilidade das operações.

H2 - Com base na pesquisa conduzida por Rehfeldt *et al.* (2021), que analisaram a recuperação de cavacos de usinagem para reciclagem, pode-se postular a hipótese de que o tipo de quebra de cavaco durante a usinagem do aço SAE 4144 desempenha um papel essencial na quantidade e qualidade dos cavacos que podem ser recuperados e reciclados. A ineficácia no controle da quebra de cavacos pode resultar em perdas significativas de material e afetar tanto os aspectos econômicos, relacionados ao reaproveitamento dos resíduos, quanto os aspectos ambientais, devido ao descarte responsável exigido pelas normas ambientais.

À vista disso, entende-se que este estudo assume uma posição de relevância multifacetada, abordando sua justificativa sob três viés distintos: social, profissional e acadêmico. Do ponto de vista social, a presente dissertação é de suma importância, uma vez que os processos de fabricação desempenham um papel fundamental na economia global e na produção de bens essenciais para a sociedade. A compreensão aprofundada dos desafios associados à quebra de cavacos neste contexto contribui para a melhoria da segurança dos processos industriais, reduzindo possíveis impactos negativos na saúde e no bem-estar dos trabalhadores. Além disso, de acordo com Miranda *et al.* (2021), a otimização da usinagem pode resultar em uma produção mais eficiente, o que beneficia a sociedade como um todo ao tornar produtos mais acessíveis e sustentáveis.

No âmbito profissional, a pesquisa atende à necessidade da indústria de fabricação de componentes mecânicos, especialmente em setores que envolvem materiais de alta resistência, como o aço SAE 4144. A investigação rigorosa sobre o controle de cavacos durante a usinagem deste material, pode proporcionar contribuições de interesse para engenheiros, projetistas e operadores de máquinas-ferramenta. Consoante ao entendimento de Cruz (2018), a melhoria das práticas de usinagem com base em evidências científicas contribui para a redução de custos operacionais, o aumento da vida útil das ferramentas e a produção de peças de maior qualidade, tornando-se uma vantagem competitiva para as empresas e profissionais envolvidos na área de usinagem.

No contexto acadêmico, este estudo preenche uma lacuna de conhecimento essencial, uma vez que a influência do quebra-cavaco no torneamento de materiais de alta resistência como o aço SAE 4144, ainda é um tema subexplorado na literatura científica. Ao investigar a formação e o controle de cavacos nesse contexto específico, esta pesquisa contribui para o enriquecimento do corpo de conhecimento em

engenharia de fabricação e usinagem. Além disso, abre caminho para futuras pesquisas e estudos acadêmicos que podem aprofundar ainda mais o entendimento dos processos de usinagem em materiais desafiadores, beneficiando assim a comunidade acadêmica e científica.

Como parte da pesquisa, foi levantado o “estado da arte” na literatura, realizando uma investigação na plataforma Scopus para identificar trabalhos acadêmicos e artigos científicos relacionados ao tema '*chip control in machining*' (controle do cavaco em usinagem). Este termo-chave abarca o entendimento das nuances do controle de cavacos durante o processo de usinagem, algo fundamental para a eficiência e qualidade da produção. A Figura 1.4 mostra o número de artigos publicados sobre o tema, evidenciando o panorama das tendências e avanços recentes nesta área, fornecendo uma base para nossa pesquisa.

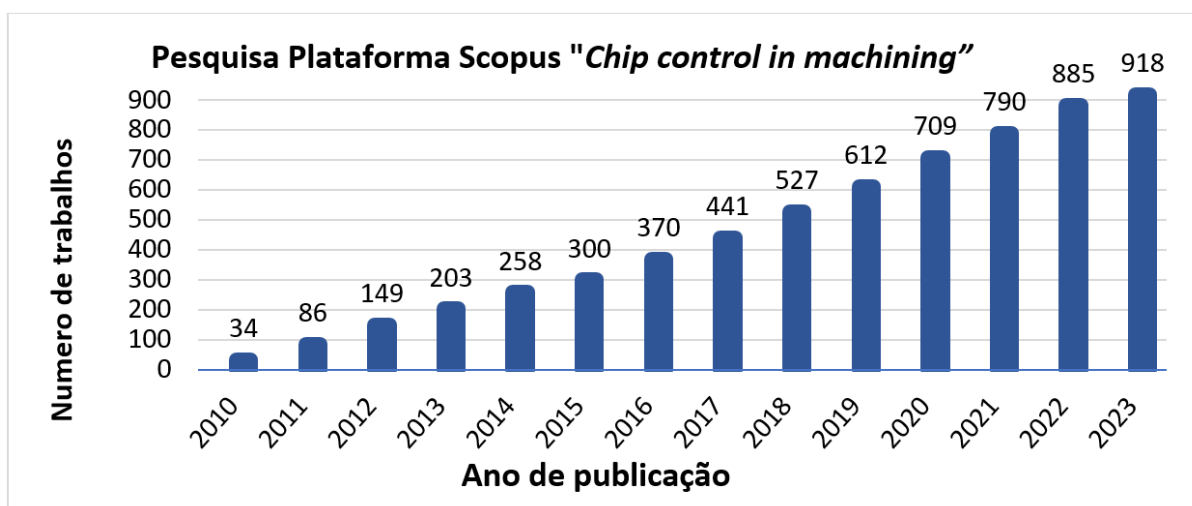


Figura 1.4 - Pesquisa Plataforma Scopus "*Chip control in machining*"

Fonte: O autor - Resultados da pesquisa (2023).

Esse aumento nas publicações sugere uma crescente conscientização e importância atribuída ao controle de cavacos na indústria de usinagem. Observa-se, portanto, que a comunidade acadêmica tem dado enfoque em compreender os desafios e desenvolver soluções para otimizar a formação e o controle de cavacos durante os processos de usinagem. Essa tendência é relevante para este estudo sobre a influência do tipo de quebra-cavaco na usinagem de torneamento do material SAE 4144, pois demonstra que a comunidade acadêmica está ativamente envolvida na pesquisa e no desenvolvimento de tecnologias e técnicas para melhorar a

eficiência e a qualidade da usinagem, algo que pode ser diretamente aplicado no contexto do estudo.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral investigar a influência da geometria do inserto e do tipo de quebra-cavaco na usinagem de torneamento do aço SAE 4144, utilizando duas geometrias diferentes de insertos de metal duro, visando a compreensão aprofundada dos efeitos dessa variável no processo de usinagem, comparando os insertos tradicionais ISO com geometria WNMG utilizados ao longo dos anos nos processos de torneamento, com a tecnologia de insertos *Prime Turning*.

1.2.2 Objetivos Específicos

Para os objetivos específicos, o presente estudo busca:

- Classificar e analisar em detalhes as características dos cavacos gerados durante o processo de torneamento do material SAE 4144 com os dois insertos, incluindo as formas, tamanhos, tipos e determinação do fator de empacotamento;
- Investigar as técnicas e estratégias disponíveis para o controle de cavacos durante a usinagem, com foco na redução dos problemas causados pela geração de cavacos longos;
- Identificar os principais problemas e desafios associados aos dois diferentes tipos de quebra-cavacos no contexto da usinagem, considerando fatores como vida e desgaste de ferramentas, temperatura de corte, esforços de usinagem, qualidade superficial das peças e eficiência operacional;
- Realizar experimentos práticos com variação dos parâmetros de corte avaliando os ângulos de posição menores (χ_r), afim de evitar o cavaco longo, atingindo as tolerâncias exigidas no torneamento do material SAE 4144.

Para a estruturação, a presente dissertação foi seccionada em cinco partes (ou capítulos), a saber:

- O capítulo 1 compreende esta introdução, onde o problema foi levantado, culminando com a apresentação dos objetivos gerais e específicos da pesquisa experimental, destacando a importância da investigação;
- No capítulo 2, tem-se a revisão bibliográfica com a pesquisa relacionada ao estudo, que abrange conceitos essenciais relacionados à usinagem, à formação de cavacos e às características do aço SAE 4144. Exploram-se estudos anteriores que oferecem contribuições sobre a quebra de cavaco e seu papel nas operações de usinagem. Esta seção fornece uma base sólida para a compreensão das questões abordadas na pesquisa;
- O capítulo 3, tem-se o percurso metodológico, que envolve uma abordagem experimental, com a realização de testes preliminares para coletar dados relevantes. Para isso, foi estabelecido um ambiente de laboratório controlado, com a disposição de um torno específico e ferramentas adequadas para a usinagem do aço SAE 4144. Logo, são detalhados os métodos de coleta de dados, os parâmetros de usinagem empregados e a lógica por trás das escolhas metodológicas. Essa seção busca oferecer uma visão clara de como foi conduzido o estudo;
- No capítulo 4 são apresentados e interpretados os resultados obtidos a partir dos experimentos realizados. A análise e discussão dos resultados apresentados serão inseridos nesta parte para permitir uma compreensão aprofundada dos efeitos dos tipos de quebra-cavaco na usinagem do aço SAE 4144;
- Por fim, no capítulo 5, tem-se as considerações finais, com uma síntese dos principais pontos abordados, culminando com as principais conclusões e sugestões para trabalhos futuros sobre o tema no capítulo 6.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O trabalho de revisão da literatura foi desenvolvido de maneira abrangente e focado no tema da pesquisa e afins. Esta revisão aborda os seguintes itens: usinagem, com definições e importância; usinabilidade com definições, variáveis que a afetam e geometrias de quebra cavaco desenvolvidas para redução do cavaco longo em forma de fita. Serão apresentados na sequência, de maneira condensada, os principais tópicos da revisão bibliográfica diretamente ligados ao tema deste trabalho.

2.1 USINAGEM

A usinagem é um dos processos fundamentais na fabricação de componentes mecânicos e desempenha um papel essencial na indústria moderna. Este processo envolve a remoção controlada de material de uma peça bruta para dar forma a uma peça final com dimensões, tolerâncias e acabamento desejados.

Um dos aspectos fundamentais da usinagem é a precisão. Os equipamentos de usinagem modernos são capazes de alcançar tolerâncias extremamente estreitas, muitas vezes na ordem de micrômetros. Isso significa que as peças usinadas podem ser fabricadas com alta precisão e consistência, atendendo aos mais rigorosos requisitos de qualidade. Além disso, a usinagem permite a criação de peças complexas com geometrias intrincadas, algo que é difícil de alcançar por meio de outros métodos de fabricação (COELHO; SILVA, 2018a).

Outro ponto-chave é a versatilidade da usinagem. Ela pode ser aplicada a uma ampla gama de materiais, incluindo metais, plásticos, cerâmicas e compósitos. Isso torna a usinagem uma escolha valiosa para a produção de peças em diversos setores. Além disso, a flexibilidade da usinagem permite a fabricação de protótipos e peças personalizadas, atendendo às necessidades específicas de cada aplicação (MARQUES, 2018).

A usinagem consiste na obtenção de um produto a partir de um bloco inicial de matéria-prima, eliminando material através de diversos tipos de máquinas-ferramentas. As primeiras publicações focadas na usinagem, foram feitas entre as décadas de 1870 e 1880. Os trabalhos de Taylor propuseram ideias fundamentais

como a importância do atrito entre ferramenta e peça no processo de formação de cavacos.

Em 1907, Taylor propôs em sua obra “Sobre a arte de cortar metais” a relação entre a vida útil da ferramenta de corte e os fenômenos térmicos na usinagem, e realizou através de uma equação empírica, que estima a vida útil da ferramenta com base em uma constante, multiplicada pela velocidade de corte elevada a uma constante empírica (LOPES, 2021). Essa relação é apresentada na Equação 2.1.

$$T = K \cdot V_C^{-X} \quad (2.1)$$

Sendo que:

- T: vida da ferramenta [min];
- V_C : velocidade de corte em [m.min⁻¹];
- K e X: constantes, que dependem do material da peça e da ferramenta, entre outros fatores.

Nesta equação é destacada a influência da velocidade de corte na vida da ferramenta.

Na década de 1920, Carl J. Salomon desenvolve o conceito de usinagem de alta velocidade em Hannover, Alemanha. Salomon hipotetiza que à medida que a velocidade de corte aumenta, a temperatura aumenta, atinge um máximo e depois diminui (SILVA *et al.*, 2019). Obviamente que nesta abordagem, Salomon se refere à temperatura da peça, uma vez que na ferramenta, a queda na temperatura com o contínuo aumento da velocidade de corte não ocorre. Comentando essa hipótese de Salomon, (Komanduri R, 1989) foi enfático: “Em usinagem não existe a terra prometida. Se alguém insistir em procurá-la, acabará encontrando o vale da morte”. Ou seja, o contínuo aumento da velocidade de corte vai acarretar contínuo aumento de temperatura da interface cavaco-ferramenta, até o limite em que ocorrerá o colapso da ferramenta. Desta forma, o conceito de alta velocidade precisa confiar na qualidade da ferramenta para suportar as elevadas temperaturas desenvolvidas.

A análise dos processos de usinagem de metais fornece ao pesquisador toda uma gama de possibilidades para o desenvolvimento de novas ideias, que levem a uma melhor compreensão do conjunto de fenômenos complexos envolvidos. Os

esforços para compreender melhor os processos de corte de metal não têm sido poucos ao longo da história e nas últimas décadas. No entanto, o processo de usinagem ainda representa um desafio para a pesquisa científica, pois a complexidade dos fenômenos envolvidos no corte de metal, tais como as deformações plásticas, a transformação do trabalho mecânico em calor, as condições tribológicas das interfaces peça-ferramenta-cavaco fazem com que vários estudos busquem soluções nesta esfera.

No Quadro 2.1 são apresentadas as variáveis independentes e dependentes que intervêm no processo de usinagem

Quadro 2.1 - Variáveis independentes e variáveis dependentes

Variáveis Independentes	Variáveis Dependentes
– Ferramenta de corte e suas condições. tipo de material e propriedades; – Material a ser cortado, condições e propriedades; – Formato da ferramenta, geometria, superfície de contato e de corte; – Condições de corte como: velocidade, avanço e profundidade; – Características da máquina; – Uso de fluido lubri-refrigerante.	– Tipo de cavaco; – Geração e dissipação de energia no processo de corte; – Aumento da temperatura na peça de trabalho, na ferramenta e no cavaco; – Esforços envolvidos (força de usinagem e suas componentes); – Desgaste e danos na ferramenta; – Integridade da superfície usinada da peça.

Fonte: Adaptado de Rehfeldt *et al.* (2021).

As variáveis independentes são fatores que podem ser controlados ou ajustados pelo operador durante a usinagem. Isso inclui a escolha da ferramenta de corte e suas condições, como o tipo de material da ferramenta e suas propriedades, o material a ser cortado e suas condições, o formato da ferramenta (geometria), a superfície de contato da ferramenta e as condições de corte, como velocidade, avanço e profundidade com o uso de um fluido lubri-refrigerante.

Por outro lado, as variáveis dependentes são os resultados ou as respostas do processo de usinagem. Isso engloba o tipo de cavaco produzido, a forma e quantidade da energia mecânica transformada em calor e sua dissipação no processo de corte, o

aumento de temperatura na peça de trabalho, na ferramenta e no cavaco com os esforços envolvidos, o desgaste e danos na ferramenta e a qualidade da superfície da peça usinada. A compreensão e o controle dessas variáveis desempenham um papel fundamental na otimização do processo de usinagem e na garantia da qualidade das peças produzidas (MATTIODA, 2018).

2.1.1 Usinabilidade

De uma maneira abrangente, a usinabilidade é definida como a resposta de um metal à usinagem, sendo que uma elevada usinabilidade implica em longa vida da ferramenta de corte em comparação com outros materiais, proporcionando um bom acabamento superficial, gerando cavacos fragmentados e dando origem a peças com precisão dimensional adequada, obtidas ao menor custo e com o menor consumo de energia.

De acordo com Araújo *et al.* (2020), a usinabilidade deve estar associada à facilidade ou dificuldade com que um material pode ser usinado, sob determinadas condições operacionais (velocidade de corte, avanço, profundidade de corte, lubrificação etc.). Também se refere a esta propriedade como uma medida da resposta de um material quando usinado com determinado material da ferramenta, para uma vida útil da ferramenta aceitável, proporcionando acabamento superficial e características funcionais aceitáveis nos componentes fabricados.

Rehfeldt *et al.* (2021) referem-se à usinabilidade de um metal como a facilidade de conseguir uma produção necessária de usinagem de componentes em relação ao custo. Geralmente considera-se que um processo de usinagem é afetado por uma série de variáveis; alguns têm o caráter de variáveis de entrada, ou seja, são variáveis independentes ou controláveis externamente. Outras, chamadas variáveis dependentes, são o resultado ou saída do processo de corte. A usinabilidade dependerá, em primeiro lugar, das variáveis de entrada ou variáveis impostas ao processo, o qual afetará o resultado das variáveis de saída obtidas.

Vê-se na literatura que é comum a análise do comportamento de ligas metálicas durante a usinagem, seguindo os seguintes critérios: i) acabamento superficial; ii) desgaste e vida útil da ferramenta; iii) morfologia dos cavacos; iv) temperatura de corte; v) força e potência de usinagem.

Os estudos atuais visam o desenvolvimento de técnicas que permitam determinar quais e como os fatores de entrada, influenciam as variáveis de saída na avaliação da usinagem de um determinado material e para uma determinada operação de usinagem. O Quadro 2.2 oferece uma visão abrangente dos fatores e critérios de usinabilidade que desempenham um papel fundamental na determinação da eficácia do processo de usinagem. Esses fatores podem ser divididos em cinco categorias principais: Material da peça, Ferramenta, Parâmetros de Corte, Lubrificação e Operação.

Quadro 2.2 - Fatores e critérios de usinabilidade

Material da peça	Ferramenta de corte	Parâmetros de corte	Lubrificação	Operação (máquina-ferramenta)
- Propriedades físicas - Propriedades químicas - Composição - Microestrutura - Tratamento térmico	- Material e propriedades - Geometria - Revestimento - Acabamento	- Velocidade de corte - Avanço - Profundidade de corte	- Fluido de corte e forma de aplicação (Jorro, MQL) - Seco Criogênico (LN, CO₂) - Ar	- Vida útil - Rigidez - Vibrações - Configuração - Ferramenta - Potência - Parâmetros
Afetam de forma direta				
Mecanismo de Corte		Força de Corte	Temperatura de Corte	
Critérios				
Morfologia do cavaco	Força de corte Potência de corte	Qualidade superficial	Desgaste e vida útil da ferramenta	Temperatura de Corte

Fonte: Marques (2018).

Na categoria Material da peça, são considerados os atributos físicos, químicos e estruturais do material a ser usinado, incluindo propriedades como composição, microestrutura e tratamento térmico. A escolha do material influencia diretamente o comportamento da usinagem (MARQUES, 2018).

A categoria Ferramenta aborda os aspectos relacionados à ferramenta de corte, incluindo o material, propriedades físicas e mecânicas, geometria, revestimento e acabamento da ferramenta. A seleção adequada da ferramenta é crucial para alcançar resultados eficientes.

Os Parâmetros de Corte são os elementos que podem ser ajustados durante o processo de usinagem, como a velocidade de corte, avanço e profundidade de corte. Esses parâmetros afetam diretamente o desempenho da usinagem e a qualidade das peças usinadas.

A Lubrificação refere-se aos métodos de resfriamento e lubrificação utilizados durante a usinagem, como fluidos de corte, que podem ser aplicados na forma de jorro ou MQL (Minimum Quantity Lubrication), criogênico, que pode ser usado o nitrogênio líquido (LN) ou CO₂ e ainda a possibilidade de se usar o ar comprimido. A escolha adequada do sistema lubri-refrigerante pode afetar tanto a eficiência quanto a vida útil das ferramentas.

Por fim, a categoria Operação envolve fatores que estão relacionados à configuração da máquina-ferramenta, potência, vibrações, rigidez da estrutura e operação em si, como o controle de parâmetros durante o processo de usinagem.

Além desses fatores, a Tabela também lista os critérios de avaliação que são usados para medir o desempenho do processo de usinagem, incluindo morfologia do cavaco, força de corte, potência de corte, qualidade superficial, desgaste e vida útil da ferramenta, e temperatura de corte. Esses critérios são essenciais para determinar a eficácia do processo de usinagem e garantir a qualidade das peças produzidas.

2.2 TORNEAMENTO

O torneamento é a operação mais comum na usinagem, podendo ser cilíndrico ou de faceamento. Durante o processo de torneamento cilíndrico, uma ferramenta de corte, geralmente monocortante, remove material do diâmetro externo ou interno de uma peça de trabalho que está em rotação, produzindo superfícies de revolução.

No torneamento, normalmente, a matéria prima (tarugo) tem inicialmente a forma cilíndrica. Na operação de corte a ferramenta executa movimento de translação, enquanto a peça gira em torno de seu próprio eixo. O principal objetivo do torneamento é modificar o diâmetro da peça de trabalho para a dimensão desejada, podendo ser realizado por operações de desbaste ou acabamento.

Existem, no entanto, várias aplicações distintas no processo de torneamento, como o torneamento longitudinal, faceamento e perfilamento.

Cada uma dessas aplicações requer ferramentas, parâmetros de corte e programação específica para garantir a máxima eficiência durante a operação e geração de cavacos.

2.2.1 Ferramentas de torneamento

As ferramentas de um modo geral, incluindo as ferramentas para torneamento, sofreram um processo evolutivo ao longo do tempo. A demanda da produção busca ferramentas mais duráveis e eficientes com materiais de alta performance, desde os aços de alta resistência, metal duro sem ou com revestimentos adicionais a base de titânio até as pastilhas cerâmicas e os ultraduros (PCD e CBN), aliadas às melhores geometrias para a operação de corte.

A busca de melhores características de resistência e durabilidade, exigiu o desenvolvimento de novos modelos construtivos focados em exigências ao controle de cavacos, segurança do processo e qualidade da peça, sincronizando as necessidades de desempenho, custos e redução dos tempos de parada no processo produtivo. Como resultado desta evolução consagrou-se o uso de ferramentas compostas, onde o elemento de corte é uma pastilha montada sobre uma base, normalmente de aço.

Existem diferentes tipos de pastilhas e sistemas de fixação. As pastilhas podem assumir diferentes formas geométricas. As formas possíveis são mostradas na Figura 2.1. Elas podem também ser classificadas por tipo; face simples, dupla face, com ou sem quebra cavaco.

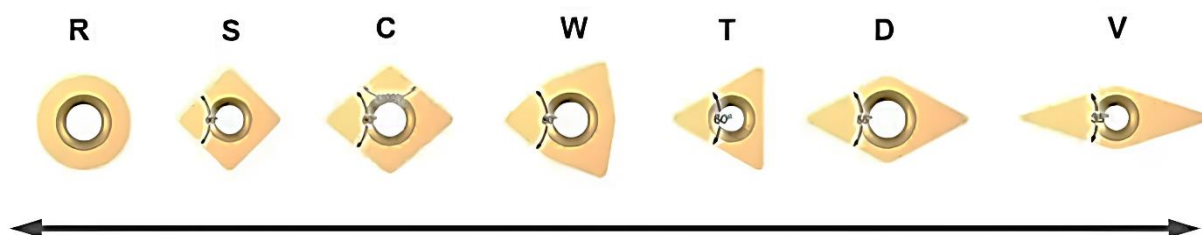


Figura 2.1 - Formato de insertos para torneamento

Fonte: Sandvik (2024).

O formato da pastilha deve ser selecionado em relação à acessibilidade do ângulo de posição da ferramenta. O maior ângulo de ponta possível deve ser selecionado para propiciar resistência e confiabilidade à pastilha. Porém, isso deve ser balanceado de acordo com a variação de cortes que precisam ser executados. Um ângulo de ponta grande é robusto, porém requer maior potência da máquina e tem maior tendência à vibração. Um ângulo de ponta pequeno é mais fraco e tem menor contato da aresta de corte, o que pode tornar a pastilha mais sensível aos efeitos mecânicos e térmicos.

2.2.2 Formação do cavaco

O estudo do processo de formação do cavaco é melhor entendido quando se considera o corte ortogonal. Trata-se de uma simplificação, onde o sistema real que ocorre tridimensionalmente é abordado no sistema bidimensional, onde a largura de corte é desprezada, considerando o fenômeno ocorrendo no plano de trabalho. Detalhes adicionais do corte ortogonal podem ser encontrados em Machado *et al.* (2015); Peixoto (2018); Braga (2019); Pessoa (2020); Saraiva (2021) e Almeida *et al.* (2022). A compreensão teórica do corte ortogonal é fundamental para analisar a formação de cavacos durante o processo de usinagem, contribuindo para a melhoria dos processos e a qualidade das peças usinadas. Ferreira *et al.* (2022) oferece contribuições valiosas sobre a influência das variáveis de usinagem na formação do cavaco, enriquecendo ainda mais o conhecimento nessa área de estudo.

2.2.2.1 Fases do processo de formação do cavaco

O estudo da formação de cavacos é fundamental na compreensão dos processos de usinagem. Machado *et al.* (2015) destacam que esses estudos têm sido uma fonte inestimável de avanços na usinagem, influenciando o desenvolvimento de ferramentas de corte mais eficazes e materiais avançados para essas ferramentas. Segundo estes autores, o cavaco se forma de uma maneira cíclica, por lamelas, que passam por etapas distintas. A Figura 2.2 apresenta a cunha cortante no corte ortogonal, identificando um o volume de material “klmn” ainda solidário à peça que ao passar pelas regiões de cisalhamento se deformam para “pqrs”.

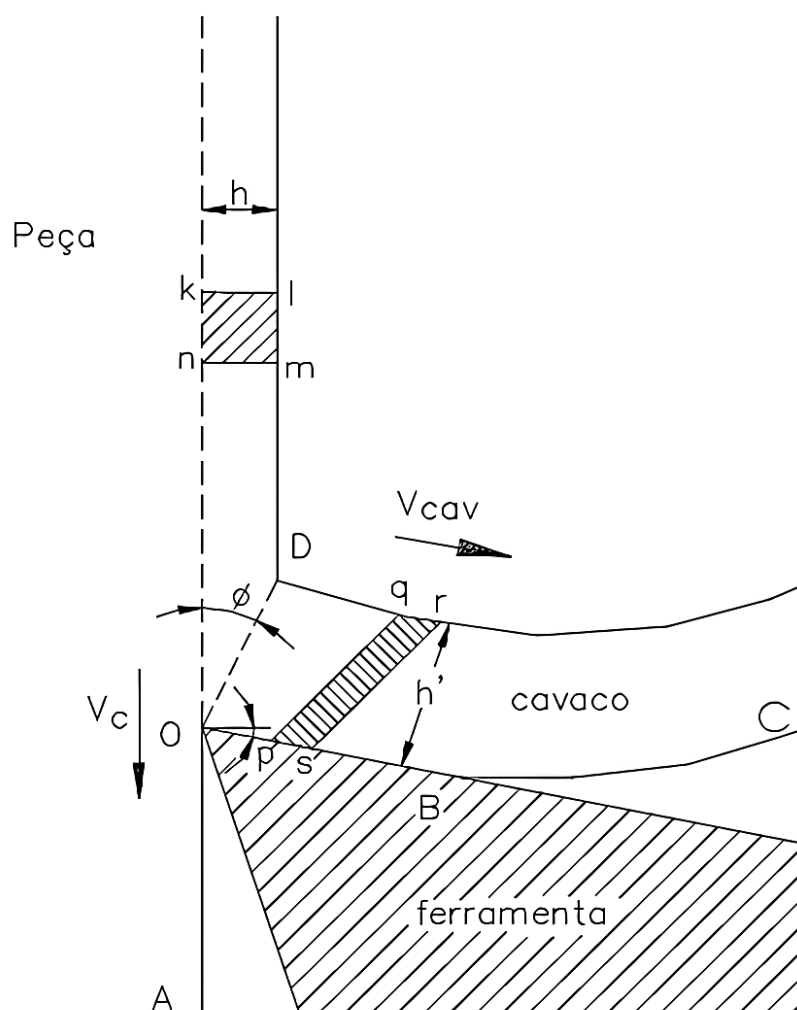


Figura 2.2 - Diagrama da cunha cortante

Fonte: Peixoto (2018).

O volume de material considerado no processo de formação do cavaco passa por fases (ou etapas) que envolvem a deformação elástica e plástica de uma, que é recalcado contra a superfície de saída da ferramenta. Inicialmente, ocorre a deformação elástica, seguida da deformação plástica e, posteriormente, a ruptura do cavaco, ocorrendo na aresta de corte da ferramenta (ponto “O” da Figura 2.2). A natureza dessa ruptura, se parcial ou completa, depende da ductilidade do material da peça (SILVA, 2019). Essas etapas são detalhadas a seguir:

- Recalque: A primeira fase do processo de formação do cavaco ocorre quando a aresta da ferramenta entra em contato com o material da peça. Nesse estágio inicial, ocorrem deformações elásticas no volume de material considerado “klmn”. Essa fase é caracterizada por uma

deformação momentânea que se recupera se a usinagem for interrompida;

- Deformação Plástica: Após a fase inicial de deformação elástica, ocorre a deformação plástica, na qual há escorregamento de planos cristalinos, motivados pela movimentação de discordâncias. Essa deformação é contínua e aumenta progressivamente à medida que as tensões cisalhantes aumentam;

- Ruptura do Cavaco: Conforme a penetração da ferramenta continua, a tensão de cisalhamento atinge um ponto crítico, levando à ruptura parcial ou completa do cavaco. Esse processo segue o plano de cisalhamento primário e depende da ductilidade do material e das condições de usinagem;

- Escorregamento do Cavaco: À medida que a usinagem prossegue, a porção de material deformada e cisalhada (lamela de cavaco deformada para “pqrs”) começa a escorregar sobre a superfície de saída da ferramenta. Enquanto isso, novas porções de material continuam a se formar e a cisalhar, repetindo o fenômeno de escorregamento sobre a superfície da ferramenta.

Na Figura 2.2 observa-se que duas novas superfícies são geradas durante a usinagem: a superfície da peça (no sentido O para A) e a superfície inferior do cavaco (no sentido O para B). Vale destacar que a energia necessária para formar essas superfícies é relativamente baixa em comparação com a energia necessária para deformar plasticamente o material removido (SILVA e REIS, 2022).

Compreender as fases do processo de formação do cavaco é fundamental para uma melhor percepção dos princípios subjacentes à usinagem. Como Ferraresi (2018) destaca, isso permite uma compreensão mais profunda dos fundamentos do processo de usinagem. Machado e Silva (2004) afirmam que muitos dos desafios práticos e econômicos enfrentados na usinagem, podem ser esclarecidos por meio do estudo do comportamento do material de trabalho e da forma como o cavaco é formado e se move sobre a superfície da ferramenta. Na Figura 2.3 são destacados os diversos fatores que influenciam o processo de formação dos cavacos.



Figura 2.3 - Mecanismo de formação de cavaco

Fonte: Ferreira *et al.* (2022).

2.3 GRAU DE RECALQUE

Durante o processo de formação de cavacos, são definidos planos instantâneos de deformação, ruptura e propagação de trincas, delimitando a chamada zona de cisalhamento primária. Para simplificar o tratamento matemático, essa região é considerada como um plano, denominado plano de cisalhamento primário, representado na Figura 2.4 pela linha OB. O ângulo entre o plano de cisalhamento primário e o plano de corte é chamado de ângulo de cisalhamento (ϕ) (PESSOA, 2020).

Conforme Pessoa (2020), após passar pela zona de cisalhamento primária, o cavaco desliza sobre a superfície de saída da ferramenta, caracterizando a zona de cisalhamento secundária. Nessa região, o material do cavaco continua sofrendo deformações plásticas, com aumentos de temperatura. É importante notar que, com o aumento da velocidade de corte, a frequência do processo de formação de cavacos também aumenta.

A espessura do cavaco (h') não é determinada apenas pela geometria da ferramenta e pela espessura de corte (h), equivalente ao avanço (f) no corte ortogonal. Condições de atrito na interface cavaco/ferramenta pode afetar essa espessura.

Diferentemente de outros processos de conformação, onde a forma final do material deformado é determinada pela geometria da ferramenta, no processo de formação de cavacos, a espessura do cavaco (h') pode variar (COELHO E SILVA, 2018a).

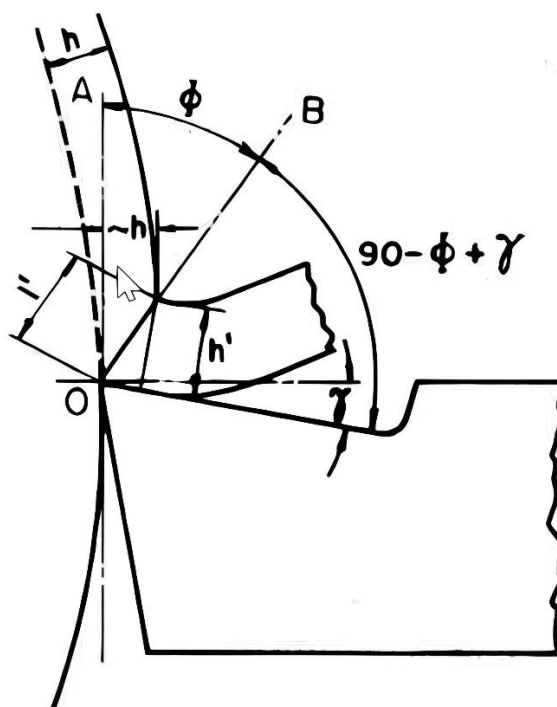


Figura 2.4 - Espessura do cavaco h'

Fonte: Pessoa (2020).

Um parâmetro importante relacionado ao processo de formação de cavacos é o grau de recalque (R_c), que representa a razão entre a espessura do cavaco h' e a espessura de corte h . O grau de recalque está relacionado à quantidade de deformação ocorrida no processo, sendo que altos valores de R_c indicam uma alta quantidade de deformação na zona de cisalhamento primária. Santos *et al.* destacaram que o grau de recalque também está relacionado ao comprimento de contato entre o cavaco e a ferramenta. Aumentos na velocidade de corte podem diminuir esse comprimento e, consequentemente, o grau de recalque.

Isto posto, diversos fatores, como atrito, força, movimento relativo, calor e desgaste, estão envolvidos no processo de formação de cavacos e podem impactar significativamente a usinagem (FERREIRA *et al.* 2022).

2.4 MORFOLOGIA DO CAVACO

As características morfológicas do cavaco obtidas durante a usinagem podem afetar a integridade da superfície da peça usinada, sua precisão dimensional, a vida útil da ferramenta, a temperatura, as forças de usinagem e a continuidade do processo. Portanto, o monitoramento e o controle de cavacos é um aspecto a ter em conta na melhoria do desempenho de processos de usinagem.

Segundo Machado *et al.* (2015), os cavacos são classificados quanto à classe e quanto à forma. As classes de cavacos são categorias que descrevem suas características predominantes em relação ao seu estado físico, continuidade, deformação e condições de usinagem.

De acordo com Ferreira (2020) e Machado *et al.* (2015), as principais classes de cavacos incluem:

- a) Cavacos Contínuos: Nesta classe, os cavacos permanecem uniforme e contínuos durante o processo de usinagem. Eles são geralmente associados a materiais dúcteis, onde a deformação plástica é mais pronunciada do que a ruptura;
- b) Cavacos Parcialmente Contínuos: Também chamados de cavacos de cisalhamento, os cavacos parcialmente contínuos representam uma categoria intermediária entre o contínuo e o descontínuo, na qual parte do cavaco permanece contínua, enquanto outras áreas podem apresentar interrupções;
- c) Cavacos Descontínuos: Os cavacos descontínuos são mais comuns quando usinando materiais frágeis, como o bronze e os ferros fundidos cinzentos, que não são capazes de suportarem grandes quantidades de deformações sem fratura. Esta classe de cavacos apresenta interrupções significativas ao longo de seu comprimento, formando pedaços ou lamelas distintas e separadas (FERREIRA, 2020);
- d) Cavacos Segmentados: Os cavacos segmentados são caracterizados por grandes deformações continuadas em estreitas bandas entre segmentos com muito pouca, ou quase nenhuma, deformação no interior destes segmentos. São comumente produzidos na usinagem de materiais pobre condutores de calor, como o titânio.

Na Figura 2.5 têm-se as classes de cavacos contínuos, segmentados e descontínuos.

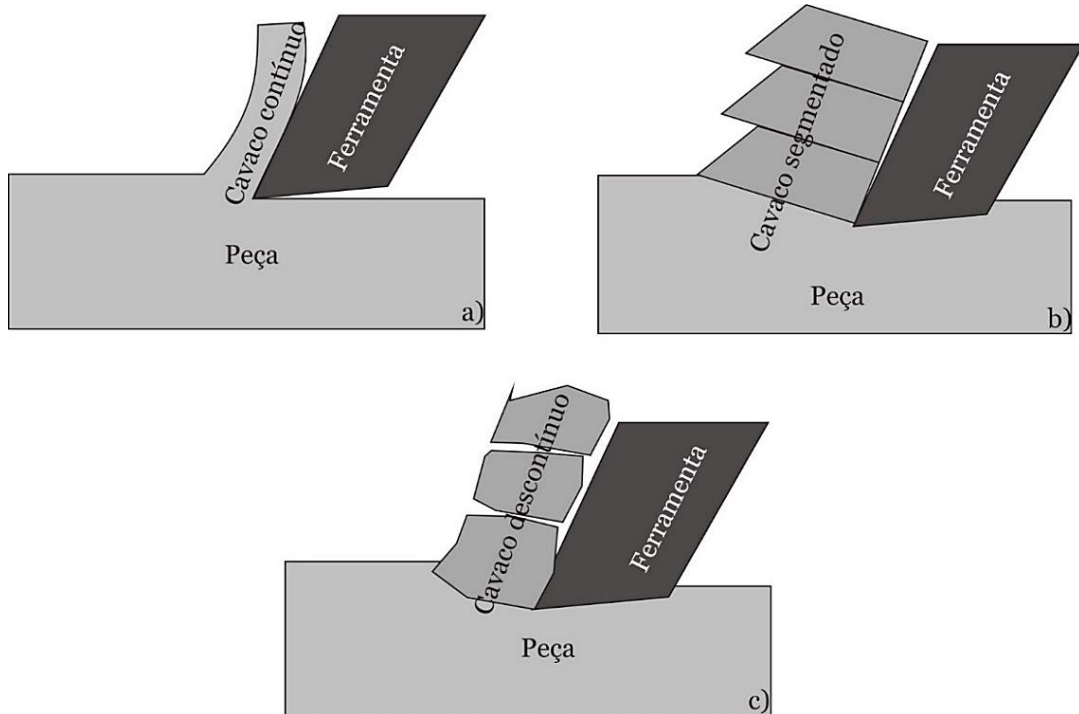


Figura 2.5 - Esquema da formação de cavaco: a) contínuo; b) segmentado; c) descontínuos

Fonte: Ferreira (2020).

2.5 FORMAS DE CAVACOS

Outro critério comum de classificação de cavacos é aquele refletido no padrão ISO 3685 (1993), com base no tamanho e formato do cavaco, eles são classificados em oito grupos, tendo em conta a sua forma. Cada um desses grupos é subdividido em subgrupos, dependendo do tamanho e das características físicas (ver Figura 2.6).

1 - Cavaco em fita	2 - Cavaco tubular	3 - Cavaco espiral	4 - Cavaco hel. tipo arruela	5 - Cavaco hel. cônico	6 - Cavaco em arco	7 - Cavaco fragmentado	8 - Cavaco tipo agulha
1-1- Longo	2-1- Longo	3-1- Plano	4-1- Longo	5-1- Longo	6-1- Conect.		
1-2- Curto	2-2- Curto	3-2- Cônico	4-2- Curto	5-2- Curto	6-2- Salto		
1-3 - Emaranhado	2-3 - Emaranhado		4-3 - Emaranhado	5-3 - Emaranhado			

Figura 2.6 - Tipologia de Cavaco

Fonte: ISO 3685 (1993).

A obtenção de cavacos curtos é considerada uma operação com usinabilidade favorável. Fitas longas ou emaranhadas, de modo geral, são comuns para materiais com usinabilidade desfavorável. No entanto, esta regra é com base em resultados experimentais normalmente na usinagem de aços e ferro fundidos.

Segundo DINIZ *et al.* (2006) quanto maior a deformação do cavaco sendo formado, menor o ângulo de cisalhamento e maiores os esforços de corte. As formas dos cavacos são determinadas pela geometria das arestas de corte da ferramenta e pelas condições de usinagem, mas também dependem da sua classe. As formas mais Comuns de cavacos incluem:

a) Cavacos Fita curtos ou Longos: São caracterizados por sua extensão ao longo da direção de corte. Essa forma é frequentemente observada em operações de torneamento, onde o material é removido de maneira contínua ao longo da superfície da peça. Cavacos longos são típicos de materiais dúcteis, nos quais a deformação plástica é predominante, neste caso precisa se obter um cavaco que seja removido fácil e rapidamente, evitando o seu acúmulo entre a peça e a ferramenta (KLOCKE *et al.*, 2011; STEMMER, 2008).

b) Cavacos Helicoidais: Os cavacos helicoidais possuem uma forma helicoidal, enrolando-se em torno de seu eixo. Esse tipo de cavaco é

comum em operações de fresamento e furação, podendo ocorrer também no torneamento. A formação de cavacos helicoidais pode estar relacionada a uma combinação de rotação da ferramenta e movimento de avanço. Essa forma é geralmente associada a materiais com características intermediárias entre ductilidade e fragilidade;

c) Cavacos Espirais: esses cavacos possuem uma configuração espiral, e podem ocorrer em materiais que apresentam maior resistência e menor deformação plástica. Depende muito da relação geometria da ferramenta e das condições de corte, principalmente a profundidade de corte;

d) Cavaco em Lascas ou Pedacos: Em algumas condições de usinagem, especialmente ao lidar com materiais mais frágeis e formam cavacos descontínuos ou quando ocorrem vibrações excessivas, ou ainda quando se usa um sistema de quebra-cavacos eficiente, os cavacos podem assumir a forma de lascas ou pedaços. Essa configuração de cavaco é a mais desejada, pois são evacuados naturalmente da região de corte, ocupam pouco espaço.

2.5.1 Classes e formas de cavacos mais problemáticas

No contexto deste trabalho, é importante identificar e compreender as classes e formas de cavacos que apresentam desafios significativos durante o processo (MACHADO, 2015). Dentre as categorias mais problemáticas, destacam-se os "Cavacos Longos, Contínuos". Esses cavacos, caracterizados por sua continuidade ao longo da operação de usinagem, são frequentemente observados em materiais dúcteis, onde a deformação plástica prevalece sobre a ruptura (SILVA *et al.* 2022). Entretanto, cavacos segmentados e parcialmente contínuos (ou de cisalhamento) também podem se apresentar de forma longa e, portanto, problemáticos. Na Figura 2.7 tem-se a ilustração da formação dos cavacos de cisalhamento e contínuos.

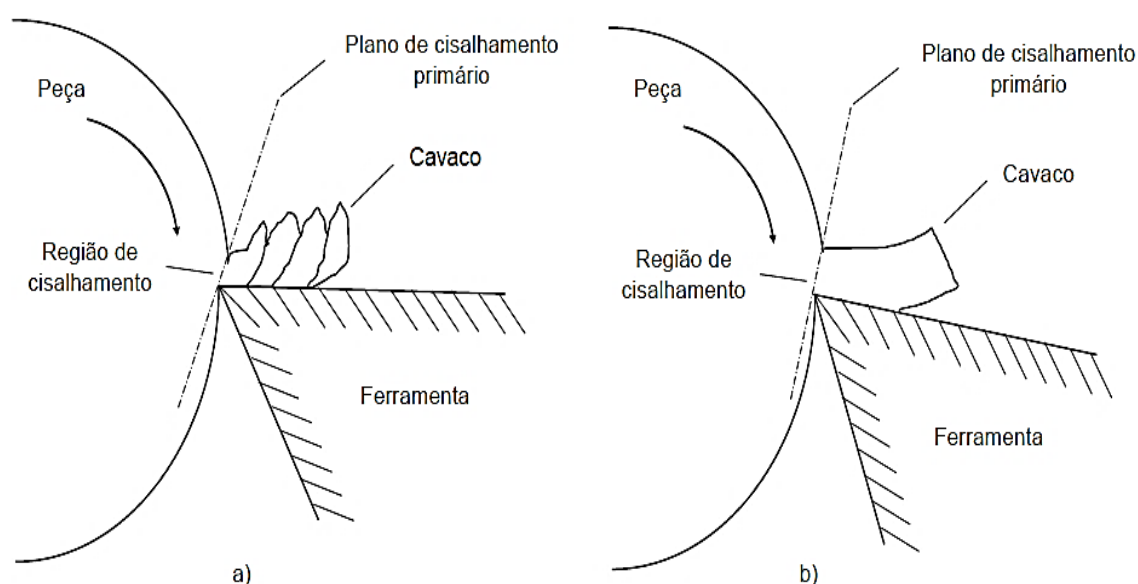


Figura 2.7 - Formação do cavaco: a) cavaco de cisalhamento ou parcialmente contínuo; b) cavaco contínuo

Fonte: Adaptado de FERRARESI (1970, p.90).

A geometria da ferramenta de corte também é um dos fatores significativos para a formação do cavaco. Ferramentas com arestas de corte bem definidas e geometrias projetadas para quebra do cavaco, como os quebra-cavacos integrados, promovem a fragmentação precoce dos cavacos. Isso resulta em cavacos mais curtos e controlados, reduzindo os problemas associados à formação de cavacos longos (ARAÚJO *et al*, 2020).

2.6 HISTÓRICO E PROBLEMAS CAUSADOS PELOS CAVACOS

Historicamente, conforme ressaltado por Silva *et al.* (2018), a usinagem de materiais metálicos tem sido caracterizada pela formação de cavacos longos ou curtos, que são aparas de material retiradas da peça durante o processo. Esses cavacos podem se estender a distâncias consideráveis após deixarem a superfície de saída da ferramenta de corte antes de se quebrarem ou serem removidos. Esse processo remonta aos primórdios da usinagem e tem sido objeto de estudo e preocupação ao longo dos anos (COELHO e SILVA, 2018a).

Conforme Marques (2018), cavacos longos apresentam uma série de problemas significativos na usinagem. Primeiramente, eles podem causar desgaste prematuro nas ferramentas de corte, resultando em custos elevados de manutenção

e substituição. Outra consequência desafiadora da formação de cavacos longos é a dificuldade em seu gerenciamento e remoção adequada do processo de usinagem. Isso pode levar à obstrução das áreas de corte, aumentando o risco de acidentes e prejudicando a qualidade da superfície das peças usinadas, além de comprometer o descarte ou transporte para reprocessamento (MACHADO *et al.*, 2015; FERREIRA *et al.*, 2022).

2.6.1 Fator de Empacotamento

O estado do cavaco pode ser expresso pelo “fator de empacotamento”, R, que é definido como sendo o volume total ocupado pelo cavaco, dividido pelo volume de um sólido equivalente ao seu peso, conforme a Equação 2.2 (MACHADO *et al.*, 2015).

$$R = \frac{\text{Volume do cavaco}}{\text{Volume de um sólido equivalente ao seu peso}} \quad (2.2)$$

Cavacos contínuos e longos apresentam fator de empacotamento da ordem de 50 ou superiores (podendo chegar a valores tão altos quanto 1000), enquanto cavacos em lascas ou pedaços podem ter esse valor reduzido à 3 (BOOTHROYD & KNIGHT, 1989).

2.7 CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS FRENTE À PROBLEMAS MAIS CRÍTICOS NA FORMAÇÃO DE CAVACOS

Para compreender plenamente os desafios associados à formação de cavacos longos na usinagem, é imperativo considerar as características dos materiais envolvidos, especialmente aqueles em que o problema se torna mais premente. O problema da formação de cavacos longos atinge sua magnitude máxima em materiais com propriedades específicas, que ampliam os desafios inerentes ao processo de usinagem (SILVA e REIS, 2022).

Materiais metálicos, notadamente ligas de alta resistência e/ou tenacidade, frequentemente se destacam como os maiores protagonistas desse desafio. As características dos materiais mais propensos à formação de cavacos longos incluem elevada ductilidade, baixa condutividade térmica e propensão à deformação plástica,

podendo ainda ter elevada resistência mecânica (DIEHL, 2023). Esses atributos, embora essenciais para diversas aplicações industriais, contribuem para a complexidade da usinagem e a formação de cavacos longos.

Conforme Miranda *et al.* (2021), a resistência mecânica elevada dos materiais exige mais energia para serem quebrados e impõe forças de corte significativamente maiores durante a usinagem, aumentando a tendência à formação de cavacos longos. Além disso, a baixa condutividade térmica desses materiais resulta em temperaturas locais mais elevadas na zona de corte, tornando-os mais suscetíveis ao amolecimento térmico e difíceis de quebrar, consequentemente, levando à formação de cavacos longos.

2.7.1 Técnicas utilizadas para reduzir a formação de cavacos longos

No contexto da usinagem e da mitigação do problema da formação de cavacos longos, diversas técnicas e estratégias têm sido desenvolvidas e amplamente adotadas ao longo do tempo. Essas abordagens têm como objetivo primordial reduzir ou eliminar a formação indesejada de cavacos longos, aprimorando, assim, a eficiência dos processos de usinagem e assegurando a integridade das peças usinadas (MATTIODA, 2018). Conforme Marques (2018), as técnicas mais proeminentes e comumente utilizadas para enfrentar esse desafio são destacadas no Quadro 2.3.

Quadro 2.3 - Técnicas para reduzir a formação de cavacos longos

Técnica	Descrição
Controle de Parâmetros de Corte	A otimização dos parâmetros de corte, como a velocidade de corte (v_c), a taxa de avanço (f) e a profundidade de corte (a_p), desempenha um papel fundamental na redução da formação de cavacos longos. Normalmente, a recomendação é reduzir a velocidade de corte e aumentar o avanço e a profundidade de corte.
Uso de Fluidos de Corte Adequados	A aplicação de fluidos de corte, como óleos ou emulsões, desempenha um papel essencial na refrigeração da zona de corte, ajudando a controlar o aumento de temperatura. Esses fluidos também auxiliam na remoção eficiente dos cavacos da zona de corte, minimizando a possibilidade de aderência e a formação de cavacos longos. O fluido de corte aplicado a alta pressão é um dos mais eficientes métodos de controle dos cavacos.
Geometria da Ferramenta de Corte	Ferramentas com geometrias apropriadas, como arestas de corte afiadas e quebra-cavacos integrados, promovem a fragmentação precoce dos cavacos, reduzindo, assim, seu comprimento.
Avanços em Materiais de Ferramentas	A utilização de materiais de ferramentas mais avançados pode ajudar a reduzir o atrito e a aderência, contribuindo para a formação de cavacos mais curtos e controlados.
Utilização de Quebra-Cavacos	A incorporação de quebra-cavacos mecânicos pode ser um aliado para controlar a formação de cavacos longos. Esses recursos atuam para reduzir o raio de curvatura dos cavacos, promovendo sua fragmentação e reduzindo seu comprimento.
Sistemas de Monitoramento Avançados	A implementação de sistemas de monitoramento avançados, como sensores de carga e temperatura, pode auxiliar na detecção precoce de problemas relacionados à formação de cavacos longos, permitindo a tomada de medidas corretivas oportunas.

Fonte: Marques (2018).

2.8 TEORIA DO CONTROLE DE CAVACOS

A teoria do controle de cavacos é uma parte vital da usinagem, pois visa otimizar o processo de remoção de material, garantindo eficiência, segurança e economia. Para isso, é necessário considerar vários aspectos essenciais, conforme são evidenciados nos subtópicos a seguir.

2.8.1 Raio de curvatura natural do cavaco

Um raio de curvatura adequado é fundamental para evitar problemas, como cavacos longos e finos (DURAN 2019). Um cavaco com um raio de curvatura controlado adequadamente é mais fácil de ser gerenciado e descartado, contribuindo para a eficiência geral do processo de usinagem (REHFELDT *et al.*, 2021). Quanto menor o raio de curvatura, maior a capacidade de quebra do cavaco.

2.8.2 Deformação crítica para quebra do cavaco

A deformação crítica necessária para a quebra do cavaco é o nível de deformação que o cavaco deve experimentar para se romper. Compreender esse ponto crítico é crucial para promover as quebras desejadas de cavacos durante a usinagem (RUBEL, 2021). Quanto mais frágil for o material, menor é essa deformação crítica.

2.8.3 Distribuição térmica na formação do cavaco

A maior parte da potência consumida na usinagem dos metais é convertida em calor próximo a aresta cortante da ferramenta, e muitos problemas técnicos e econômicos são causados direta ou indiretamente pela ação deste aquecimento (Trent, 1988). A energia dispendida na formação de cavacos é praticamente toda transformada em calor, que é distribuído entre a peça, a ferramenta e o cavaco, em proporções que dependem dos diversos fatores relacionados as propriedades do material da peça e da ferramenta, geometria da ferramenta e das condições de corte.

A energia gasta no processo de formação de cavacos é percebida na forma de calor em 3 regiões distintas da formação de cavacos: (i) na zona do plano de cisalhamento primário; (ii) na interface entre o cavaco e a superfície de saída da ferramenta (zona secundária de cisalhamento) e (iii) na interface de contato da peça com a superfície de folga da ferramenta (zona terciária de cisalhamento).

Para medição de temperatura na região de formação de cavacos, os termopares ou radiação infravermelha têm sido muito empregados. No caso dos termopares, pode-se empregar o mesmo princípio do par termoelétrico de SHORE

(1925) ou GOTTWEIN (1925) ou HERBERT (1926), onde usam-se fios de reduzido diâmetro inseridos em furos realizados nos suportes e ferramentas o mais próximo da aresta de corte da ferramenta, para a medição da temperatura local que se conectam a um equipamento de medição, gerenciados com auxílio de um software.

Por meio de radiação utiliza-se sensores infravermelhos, ou pirômetros, bastante utilizado para obtenção da temperatura da superfície da peça, do cavaco ou da ferramenta. Os raios infravermelhos estão associados ao calor dos corpos, pois todos emitem radiação térmica no campo dos infravermelhos.

2.8.4 Ângulo de posição

Para êxito da operação de torneamento, é importante escolher o ângulo de posição " χ_r " (ângulo medido no plano de corte da ferramenta, formado pelo plano de corte principal e o plano de trabalho), formado entre a aresta de corte e a direção perpendicular à de avanço, conforme Figura 2.8. O ângulo de posição/de ataque influencia:

- Formação de cavacos;
- Direção de forças de corte;
- Distribuição de tensões no início e final do corte;
- Variação da grandeza do ângulo de quina;
- Comprimento da aresta de corte em corte, ou largura de corte.

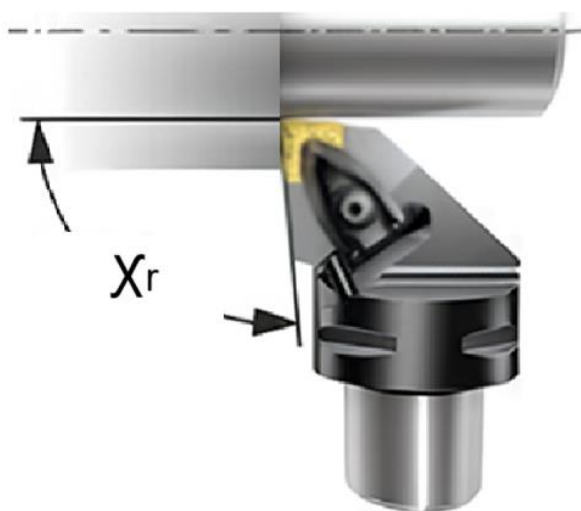


Figura 2.8 - Ângulo de posição " χ_r "

Fonte: Adaptado de Sandvik (2023).

Ângulo de posição grande “ χ ” – Tecnologia ISO WNMG:

- As forças são direcionadas para o mandril. Há menor tendência à vibração;
- As forças de corte mais altas, especialmente, na entrada e na saída do corte;
- Largura de usinagem diminui com espessura do cavaco maior;
- A tendência ao desgaste tipo entalhe.

Ângulo de posição pequeno “ χ_r ” - Tecnologia *Prime Turning*:

- As forças radiais mais altas direcionadas para a peça causarão tendência à vibração;
- Tensão reduzida na aresta de corte;
- Reduz a força específica por unidade de comprimento do gume, com desgaste menor;
- Largura de usinagem aumenta com espessura do cavaco menor;
- Usinagem de material de alta resistência.

2.8.5 Materiais críticos

Em alguns materiais, como ligas metálicas endurecidas e metais de alta resistência, o controle de cavacos é especialmente crítico. Esses materiais apresentam maior tendência a formar cavacos longos, o que pode causar desafios significativos na usinagem (GAMBARATO, 2020).

2.8.6 Processo de evacuação dos cavacos

A evacuação eficiente dos cavacos da região de corte é importante para evitar superaquecimento na zona de corte, o que pode afetar negativamente a qualidade da peça e a vida útil da ferramenta, além disso, cavacos que não são evacuados podem obstruir a área de corte da ferramenta, resultando em desgaste prematuro e desgaste irregular (MARQUES, 2018).

A evacuação adequada dos cavacos ajuda a evitar marcas indesejadas na superfície da peça usinada, resultando em um acabamento superficial de melhor

qualidade beneficiando a eficiência da usinagem, evitando paradas frequentes para limpeza e aumentando a produtividade com redução dos riscos de acidentes com cortes acidentais, portanto, imprescindível para a proteção dos operadores, facilitando sua remoção e a reciclagem (DIEHL 2023).

2.9 MÉTODOS PARA CONTROLE DE CAVACOS

2.9.1 Métodos especiais

Os métodos especiais para controle de cavacos na usinagem envolvem técnicas específicas projetadas para lidar com situações particulares ou materiais de usinagem desafiadores. Esses métodos incluem:

- a) Utilização de Fluidos de Corte Adequados: A escolha e aplicação de fluidos de corte apropriados podem reduzir o atrito entre a ferramenta e a peça, e mais eficiente se aplicado em altas pressões (podendo chegar a 36 MPa) para resfriar a zona de corte e ajudar na quebra de cavacos. Isso é especialmente importante ao usinar materiais de alta resistência, como aços endurecidos, superligas de níquel e titânio, onde a temperatura de corte é crítica para o controle dos cavacos (NAVES e SILVA, 2021);
- b) Geometria Especial de Ferramentas: Ferramentas com geometrias específicas, como arestas de corte afiadas ou geometrias de quebra-cavacos incorporadas, podem ajudar a controlar o processo de formação e quebra de cavacos. Essas geometrias especiais são projetadas para promover a formação de cavacos desejados e evitar problemas, como cavacos longos e finos (VIEIRA *et al*, 2018);
- c) Monitoramento e Controle de Parâmetros em Tempo Real: A utilização de sistemas de monitoramento em tempo real, como sensores de força e temperatura, permite ajustar automaticamente os parâmetros de corte e desgaste da ferramenta para manter o controle sobre os cavacos. Essa abordagem é especialmente útil para lidar com variações no material da peça ou na ferramenta (LIMA, 2021).

2.9.2 Utilização de quebra-cavacos

O uso de quebra-cavacos é a técnica mais popular e valiosa para o controle eficaz de cavacos (FERNANDES, 2018). Esses dispositivos são projetados para interromper a formação de cavacos longos e finos, que podem ser prejudiciais ao processo de usinagem. Aqui estão algumas considerações importantes sobre a utilização de quebra-cavacos:

- a) Princípio de Funcionamento: Os quebra-cavacos funcionam com base em princípios mecânicos, geométricos ou hidráulicos. Eles são projetados para aplicar forças específicas nos cavacos em pontos estratégicos durante a usinagem, aumentando a sua curvatura e induzindo a quebra controlada dos cavacos (DALLA CORTE, 2020).
 - b) Aplicação Adequada: A aplicação precisa do quebra-cavacos depende da máquina, do tipo de usinagem e do material sendo trabalhado. É essencial ajustar corretamente o dispositivo para otimizar o processo (PEREIRA, 2018).
 - c) Benefícios: O uso de quebra-cavacos pode aumentar a segurança do processo de usinagem, minimizar o desgaste das ferramentas e melhorar a qualidade das peças usinadas, evitando a formação de cavacos indesejados (DALLA CORTE, 2020).
- Aprimoramento da Qualidade da Superfície: Além do controle de cavacos, os quebra-cavacos também podem contribuir para a melhoria da qualidade da superfície das peças usinadas, minimizando a formação de rebarbas e irregularidades (REHFELDT *et al.* 2021).

O quebra-cavaco atua para aumentar a curvatura do cavaco (diminuir r_c) e podem ser postigos ou integrais (superfícies de saída com formatos especiais). O raio de curvatura r_c pode ser estimado de acordo com as dimensões dos quebra-cavacos, conforme indicado na Figura 2.9, que também ilustra os dois tipos de quebra-cavacos.

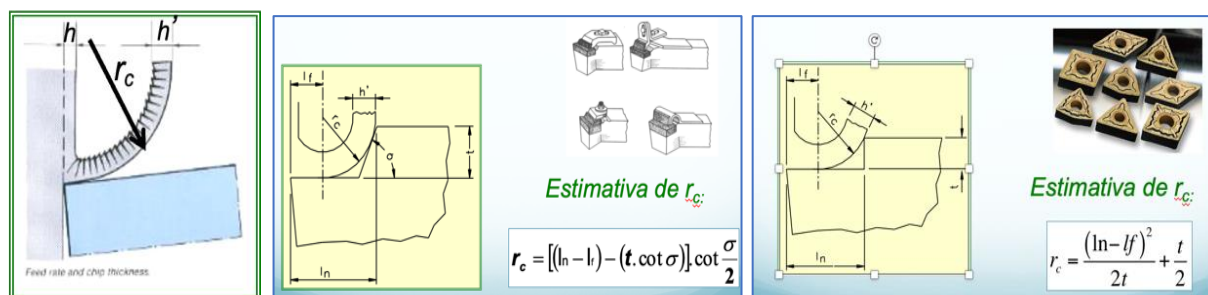


Figura 2.9 - (a) Raio de curvatura natural do cavaco; (b) Quebra-cavaco postiço; (c) Quebra-cavaco integral

Fonte: Adaptado de Machado *et al.* (2015).

Em resumo, os métodos para controle de cavacos são um conjunto de técnicas avançadas e dispositivos especializados que desempenham um papel crítico na usinagem (FERREIRA, 2022). Eles oferecem soluções adaptadas aos desafios específicos associados à formação e ao gerenciamento de cavacos, resultando em operações de usinagem mais eficazes, seguras e com melhor qualidade. A escolha adequada e a aplicação correta desses métodos são essenciais para a otimização do processo de usinagem (RUBEL *et al.*, 2021).

2.10 GEOMETRIA DE QUEBRA-CAVACOS

2.10.1 Quebra-cavacos para desbaste

Durante a fase de desbaste, é comum enfrentar volumes significativos de material a ser removido em um curto espaço de tempo (SILVA e CECHIN, 2018). Nesse contexto, a geometria de quebra-cavacos visa:

Cavacos Curtos e Espessos: Para desbaste eficiente, a geometria do quebra-cavacos é projetada para produzir cavacos curtos e espessos, grandes avanços e profundidades com baixas velocidades de corte. Isso minimiza o risco de cavacos longos e finos que podem prejudicar a eficiência da usinagem e aumentar o desgaste da ferramenta (LACERDA, 2018).

Ângulos de Quebra-cavacos Adequados: Os ângulos das lâminas ou pinos de quebra-cavacos são ajustados para quebrar os cavacos de forma eficaz, evitando a

formação de cavacos indesejados. Esses ângulos são adaptados para otimizar a ação de quebra em condições de desbaste (RUSSI *et al.*, 2021).

2.10.2 Quebra-cavacos para acabamento

Na etapa de acabamento, o objetivo é obter uma superfície de peça de alta qualidade com tolerâncias precisas (DURAN *et al.*, 2019). Portanto, a geometria de quebra-cavacos tem características distintas:

Cavacos Curtos e Controlados: Durante o acabamento, os cavacos devem ser mantidos curtos e controlados com baixos avanços e profundidades, altas velocidades de corte para evitar danos à superfície da peça e garantir acabamento de alta precisão (BORTOLOTTI, 2019).

Ângulos Ajustados para Acabamento: Os ângulos de quebra-cavacos são ajustados de maneira mais precisa e delicada, com a finalidade de controlar a formação de cavacos durante operações de acabamento. Isso é fundamental para evitar marcas na peça usinada (BORTOLOTTI, 2019).

2.10.3 Influência do material da peça

O material da peça desempenha um papel significativo na determinação da geometria de quebra-cavacos (FERREIRA, 2022). Diferentes materiais podem ter características de usinagem distintas. Por exemplo:

Materiais Dúcteis: Materiais como alumínio e aço macio geralmente permitem geometrias de quebra-cavacos mais flexíveis, uma vez que os cavacos tendem a ser mais maleáveis (SILVA, 2019).

Materiais Frágeis: Materiais duros e resistentes e compósitos podem requerer geometrias de quebra-cavacos mais agressivas, uma vez que os cavacos tendem a ser mais resistentes e difíceis de controlar (REIS *et al.*, 2019).

2.10.4 Influência do material da ferramenta

O sistema ISO classifica as ferramentas de corte para aplicação na usinagem de diferentes tipos de materiais de peças de trabalho. Assim, em função do material

da peça, cada grupo ISO (P, M, K, N, S e H) produz cavacos previsíveis, a seleção da ferramenta e da condição de corte deve corresponder ao comportamento do material.

O grupo ISO P (aço) inclui materiais com ductilidade bastante alta e tendência a cavacos longos. Isso requer precauções apropriadas para manter os cavacos em uma forma e comprimento aceitáveis.

Os grupos ISO K (materiais fundidos) e H (aços duros) incluem materiais com baixa ductilidade, que produzem cavacos curtos ou extremamente finos. Isso facilita o controle de cavacos.

Os grupos ISO M (aço inoxidável), S (superligas) e N (materiais não ferrosos) incluem materiais com ductilidade relativamente elevada, mas também uma natureza visivelmente adesiva. Esses materiais formam os chamados cavacos de "borda postiça". Os grupos das classes M e S ainda são resistentes, produzindo cavacos difíceis de quebrar ou controlar.

Para Ramos Junior (2023), a escolha do material da ferramenta também influencia a geometria de quebra-cavacos:

Ferramentas de Metal Duro: Ferramentas de metal duro podem suportar geometrias de quebra-cavacos mais agressivas, devido à sua boa tenacidade e resistência ao desgaste. Isso é especialmente útil em materiais abrasivos (CRUZ, 2018). O metal duro é um material da metalurgia do pó, composto por partículas de carboneto de tungstênio (WC) e um ligante rico em cobalto metálico (Co). O corpo dos insertos de metal duro utilizados na operação de torneamento são produzidos através do processo de prensagem do pó ou técnicas do molde por injeção. O tamanho do grão do carboneto de tungstênio (WC), é um dos parâmetros para definir a dureza e tenacidade de uma classe de metal duro. As classes ainda são divididas por durezas, onde números baixos como P05/P10 indicam classes mais duras ou mais resistentes ao desgaste, enquanto P20/P25 são classes para usinagem média, e P30/P40 são classes mais tenazes, que resistem melhor as condições de corte interrompido.

Ferramentas de Cerâmica: Ferramentas de cerâmica podem requerer geometrias mais delicadas de quebra-cavacos, uma vez que são mais sensíveis ao choque mecânico e térmico e ao desgaste (SILVA, 2019). Pela fragilidade dessas ferramentas, normalmente são usados quebra-cavacos postiços (MACHADO *et al.*, 2015).

Neste sentido, a geometria de quebra-cavacos desempenha um papel essencial na usinagem, sendo adaptada às necessidades específicas das operações

de desbaste e acabamento. Ela também é influenciada pelas propriedades do material da peça e da ferramenta, garantindo um controle preciso dos cavacos e à obtenção de peças de alta qualidade (LACERDA, 2022).

2.11 CONDIÇÕES DE CORTE NO CONTROLE DO CAVACO

2.11.1 Influência dos parâmetros de corte

O controle do cavaco na usinagem é profundamente afetado pelas condições de corte empregadas. Estes parâmetros de corte, que incluem a velocidade de corte (v_c), a taxa de avanço (f) e a profundidade de corte (a_p), desempenham um papel fundamental no controle dos cavacos (VALADARES *et al.*, 2023).

A velocidade de corte (v_c), influencia diretamente a temperatura durante a usinagem. Altas velocidades de corte podem resultar na maior geração de calor e a tendência à formação de cavacos longos.

Avanço (f): determina a taxa na qual o material é removido. Um aumento na taxa de avanço produz cavacos mais espessos e curtos. Portanto, a escolha deve ser equilibrada para manter o controle dos cavacos.

Profundidade de corte (a_p): afeta a largura do cavaco. A profundidade de corte maior pode resultar em cavacos mais largos e resistentes, com risco de formação de cavacos longos, embora com maior facilidade de quebra. O ajuste é necessário para controlar o tamanho dos cavacos.

2.11.2 Influência das condições lubri-refrigerantes

As condições lubri-refrigerantes desempenham um papel crítico no controle dos cavacos e no desempenho geral da usinagem (DIEHL, 2023).

Refrigeração Adequada: A aplicação adequada de líquidos refrigerantes resfria a zona de corte, reduzindo a temperatura e a tendência à deformação plástica dos cavacos. Isso ajuda a manter os cavacos sob controle, especialmente em materiais sensíveis ao calor (SEIXAS, 2022).

Lubrificação: A lubrificação adequada reduz o atrito entre a ferramenta e a peça, melhorando a formação e o controle dos cavacos. Além disso, ela contribui para prolongar a vida útil da ferramenta (FRANÇA, 2021).

2.11.3 Influência da máquina ferramenta e tipo de operação

A escolha da máquina ferramenta e o tipo de operação também influenciam o controle dos cavacos (LOPES, 2021).

Tipo de operação: diferentes tipos de operação, como fresamento, torneamento ou furação, têm requisitos específicos de controle de cavacos. A escolha do tipo de operação influencia diretamente a geometria de quebra-cavacos e outros parâmetros (ALONSO *et al.*, 2023). O torneamento é, sem dúvidas, o processo mais crítico na formação de cavacos longos e problemáticos.

O torneamento com eixo Y é um método de torneamento simultâneo de 3 eixos, onde a ferramenta gira em torno de seu próprio centro. O inserto usina no plano Y-Z, e o eixo árvore que interpola durante o torneamento otimizando o processo e controle. Essa abordagem permite a usinagem de várias características complexas com uma única ferramenta, oferecendo versatilidade e eficiência em operações de torneamento (SANDVIK, 2023).

Esses avanços demonstram os esforços contínuos na indústria de usinagem para melhorar a produtividade, precisão e versatilidade nos processos de torneamento com máquinas mais eficazes. Eles atendem a várias necessidades de usinagem e materiais, proporcionando soluções para uma ampla gama de aplicações.

2.12 TECNOLOGIA PRIME TURNING

Observa-se que à medida que a usinagem de peças se torna cada vez mais complexa e precisa, as empresas líderes em ferramentas de corte estão desenvolvendo soluções avançadas para melhorar a eficiência do processo e a qualidade das peças usinadas.

A tecnologia *Prime Turning* da Sandvik Coromant é um exemplo notável dessas inovações na usinagem de peças. Elas não apenas melhoram a eficiência e a qualidade do processo, mas também têm um impacto positivo nas indústrias que dependem da usinagem de precisão (SANDVIK, 2023).

Essa tecnologia se destaca por apresentar menores ângulos de posição (χ_r) no processo de torneamento, que possibilita dobrar efetivamente o avanço de usinagem (f) e aumentar a velocidade em comparação ao torneamento convencional, permitindo

ganhos de produtividade consideráveis e a produção de uma forma de cavaco favorável. Isso é possível porque os ângulos de posição menores reduzem a espessura do cavaco (h'), que juntamente com a geometria *Prime Turning* da Sandvik Coromant permite em adicional o torneamento em sentido contrário ao convencional, no qual garante um excelente controle de cavaco (ver Figura 2.10).

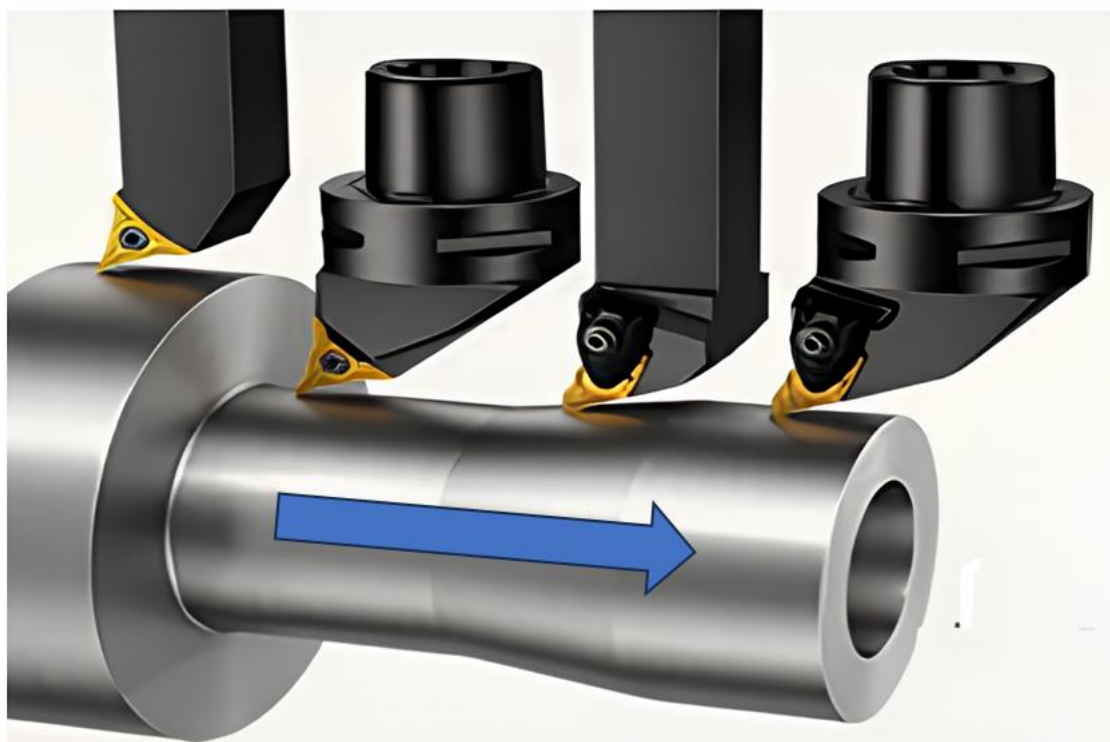


Figura 2.10 - Tecnologia *Prime Turning*

Fonte: Sandvik (2023).

A tecnologia *Prime Turning* da Sandvik tem um impacto direto na formação do cavaco favorável, proporcionando benefícios significativos, resultando em uma usinagem mais suave e menor desgaste da ferramenta. Além disso, oferece um melhor controle da formação do cavaco, minimizando problemas de cavaco longo, contribuindo para maior eficiência e produtividade na usinagem. Sua flexibilidade permite a realização de diversas operações de torneamento com uma única ferramenta, economizando tempo e custos (BARCELOS *et al.*, 2022). Sua influência positiva na eficiência e qualidade da usinagem tem o potencial de revolucionar a forma como as empresas abordam o torneamento de materiais, como no caso do aço SAE 4144.

O inserto *Prime Turning*, pode atingir avanços de corte (f) de até 1,2mm/rot enquanto o inserto ISO W até 0,35mm/rot em uma profundidade de corte (a_p) de 2mm. Comparando a taxa de remoção de material (Q) conforme Equação (2.3), pode-se constatar um ganho de até 118% com esta tecnologia.

$$Q = V_c \cdot a_p \cdot f \quad [\text{cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}] \quad (2.3)$$

– *Inserto Prime Turning:*

$$Q_{\text{máx}} = 200 \cdot 2 \cdot 1,20 = 480 \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$$

– *Inserto ISO WNMG:*

$$Q_{\text{máx}} = 200 \cdot 2 \cdot 0,55 = 220 \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$$

2.12.1 Segunda geração de insertos do tipo “B”

O *CoroTurn Prime* Tipo B de segunda geração oferece insertos negativos de dupla face com quatro arestas de corte, que aplica menores ângulos de posição (χ_r) de 25° a 30° e diferente geometria de quebra cavaco, permitindo a condição ideal para evitar o cavaco longo, produzindo um cavaco mais fino (h'), sendo uma solução econômica para operações de usinagem (ver Figura 2.11). Esses insertos apresentam um novo design robusto de assento da ponta e geometrias atualizadas, tornando-os adequados para materiais desafiadores. (SANDVIK, 2023).

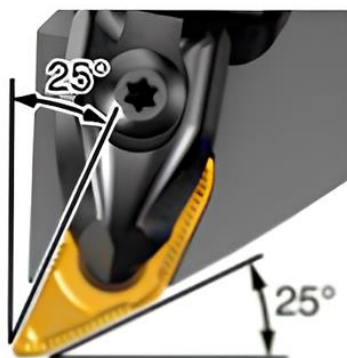


Figura 2.11 - *Prime Turning* Tipo “B”

Fonte: Sandivik (2023).

2.13 PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS (DOE)

O Planejamento de Experimentos (DOE - *Design of Experiments*) é uma metodologia estatística poderosa usada em várias disciplinas, incluindo engenharia, ciências físicas, ciências sociais, ciências da saúde, entre outras. Ele permite que os pesquisadores planejem e conduzam experimentos de forma eficiente para explorar, entender e otimizar processos ou sistemas complexos com confiabilidade (FIDÉLIS *et al.*, 2021).

No Planejamento de Experimentos (DOE), o foco principal é entender como as variáveis de um sistema afetam as respostas observadas. Em vez de realizar experimentos de maneira aleatória ou intuitiva, o DOE segue um plano cuidadosamente estruturado para coletar dados de forma sistemática (OLIVEIRA, 2019). Isso ajuda a responder a perguntas importantes, como quais variáveis têm o maior impacto nas respostas, quais interações podem estar ocorrendo e quais ajustes devem ser feitos para otimizar um processo (DIEHL, 2023).

Os principais benefícios do DOE incluem economia de tempo e recursos, maior compreensão do sistema, identificação eficaz de variáveis críticas e otimização de processos ou produtos (BENATO, 2021).

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA

A metodologia deste estudo é feita por meio de uma abordagem experimental, que envolve a realização de testes práticos de usinagem em um ambiente controlado, onde são variados os parâmetros de corte para investigar diferentes geometrias de insertos com os seus respectivos quebra-cavaco. Neste estudo, são coletados dados relacionados aos parâmetros de usinagem, à morfologia dos cavacos, ao desgaste da ferramenta e à qualidade das peças usinadas. A análise dos resultados é conduzida com base em técnicas estatísticas, como a análise de variância (ANOVA) e a análise de regressão, a fim de identificar relações significativas entre os tipos de quebra-cavaco e as variáveis de interesse.

3.1 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O propósito desta seção é descrever os experimentos e metodologias utilizadas para a realização do estudo. A Figura 3.1 apresenta um fluxograma das atividades realizadas neste trabalho.

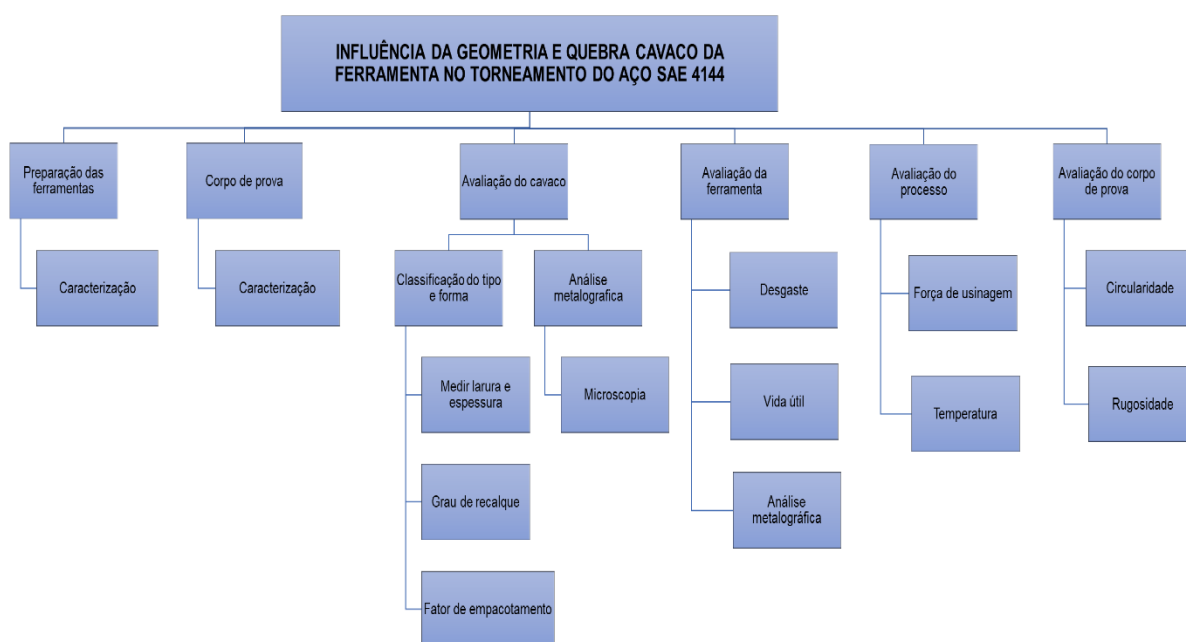


Figura 3.1 - Fluxograma dos experimentos abordados

Fonte: O autor (2024).

Os experimentos apresentados nesta dissertação foram realizados parte no laboratório LAUS da PUCPR, e parte em uma empresa multinacional que fabrica componentes do ramo automobilístico.

3.1.1 Equipamentos

No laboratório LAUS da PUC foi utilizado o torno CNC Cincinnati Milacron Hawk 150 horizontal para a medição dos esforços de usinagem, e o torno CNC Romi GL250M horizontal para a medição da temperatura na usinagem do material SAE 4144. Na multinacional, em um torno Romi GL300M com a utilização do fluido de corte de base mineral Ecocut 610 B do fornecedor Fuchs, foram realizados os experimentos para a avaliação do desgaste da ferramenta, análise da superfície usinada da peça e do cavaco gerado.

3.2 SELEÇÃO DO MATERIAL DE TESTE

Conforme composição química especificada na Tabela 3.1, o material SAE 4144 para a preparação do corpo de prova foi fornecido pela empresa multinacional. O material foi fornecido no estado trefilado, sem tratamento térmico.

Tabela 3.1 - Composição do material SAE 4144

Material	Valor	Percentual de peso (%)								
		Carbono	Manganês	Fósforo	Enxofre	Silício	Cobre	Cromo	Níquel	Molibidênio
		C	Mn	P	S	Si	Cu	Cr	Ni	Mo
SAE 4144	Mín.	0,42	0,9	-	0,01	0,2	-	1,15	-	0,25
	Máx.	0,46	1	0,025	0,02	0,3	0,35	1,3	0,25	0,35

Fonte: VILLARES S.A. (1998).

3.2.1 Preparação das amostras

A empresa multinacional forneceu amostras do material SAE 4144, partindo de uma barra trefilada sem tratamento térmico, com diâmetro de 38mm, cortada em um comprimento de 200mm para cada peça dos experimentos.

3.2.2 Análise de dureza.

Para análise de dureza, cinco amostras foram avaliadas conforme Tabela 3.2, com medições realizadas em 3 pontos distintos na seção transversal no laboratório da multinacional em um equipamento da marca Wolpert.

Tabela 3.2 - Medição da dureza HB 5/750 do material SAE 4144

Amostra	Especificado	Blank 4144 Ø 37,5mm	Média
1		229 – 224 - 224	
2		224 - 229 - 224	
3	Máx. 240 HB	224 – 224 - 229	226 HB
4		229 – 224 - 229	
5		224 – 224 - 224	

Fonte: O autor (2024).

A dureza foi realizada na escala Brinell (HB) com esfera $\varnothing$ 2,5mm e carga 187,5kg e obteve-se uma média de 226HB com um desvio padrão de 5HB para as 15 medições realizadas.

3.2.3 Análise metalográfica do material

As propriedades metalúrgicas analisadas tais como: estrutura metalográfica, inclusão e defeitos do material SAE 4144 foram avaliados conforme Figura 3.2.

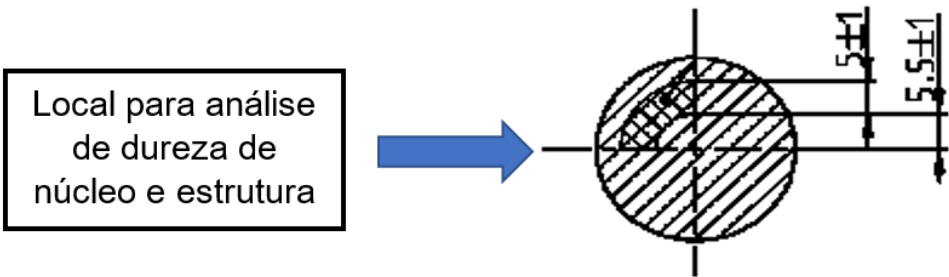


Figura 3.2 - Análise metalográfica e de dureza do material

Fonte: O autor (2024).

Tabela 3.3 - Análise metalográfica material SAE 4144

Amostra	Especificado	Verificado
Barra 4144 Ø 37,5mm	Ferrita/Perlita	Ferrita + Perlita Lamelar

Fonte: O autor (2024)

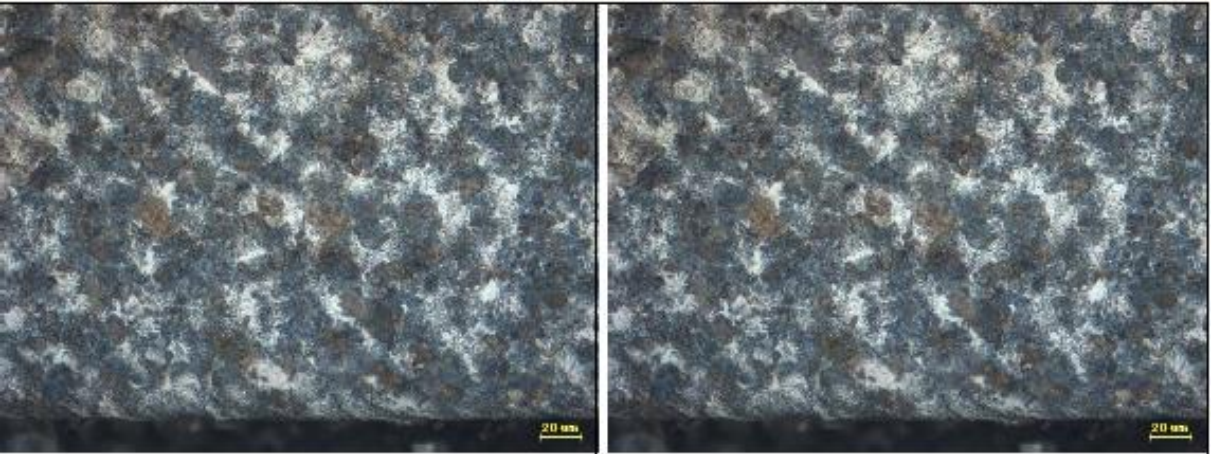


Figura 3.3 - Microestrutura do aço SAE 4144

Fonte: O autor (2024).

A análise metalográfica da microestrutura para a amostra do material SAE 4144 de Ø 37,5mm estão de acordo especificações da norma DIN – 50602 (Figura 3.3).

3.3 FERRAMENTAS DE CORTE

Para análise das ferramentas nos ensaios de usinagem foram realizados nove experimentos, conforme abordado no item 3.5, variando os parâmetros de corte para comparativo entre os insertos ISO WNMG 080408 PR4415 (Figura 3.4) e *Prime Turning* tipo B CP-B1208D-L4 4415 (Figura 3.5), ambos do fornecedor Sandvik Coromant.

Os insertos obtidos pelo processo de metalurgia do pó utilizados nos experimentos, foram selecionados com a mesma especificação da classe do metal duro e revestimento, conforme utilizado na multinacional nos processos de usinagem do aço SAE 4144, que segundo o catálogo do fabricante, são ferramentas da classe P15, cobrindo a faixa de aplicação P(10-20), com a composição química mostrada nas figuras 3.6 e 3.8 com as Tabelas 3.4 e 3.6, e revestimento CVD (deposição química de vapor) triplo de TiCN+Al₂O₃+TiN, conforme figuras 3.7 e 3.9 com as

Tabelas 3.5 e 3.7. Observa-se que em ambas as ferramentas, o revestimento externo de TiN foi retirado da superfície de saída, por jateamento, técnica que segundo o fabricante visa eliminar a tensão residual trativa gerada no processo CVD e restaurar uma tensão residual compressiva, que reduz drasticamente as chances de lascamento das camadas revestidas.

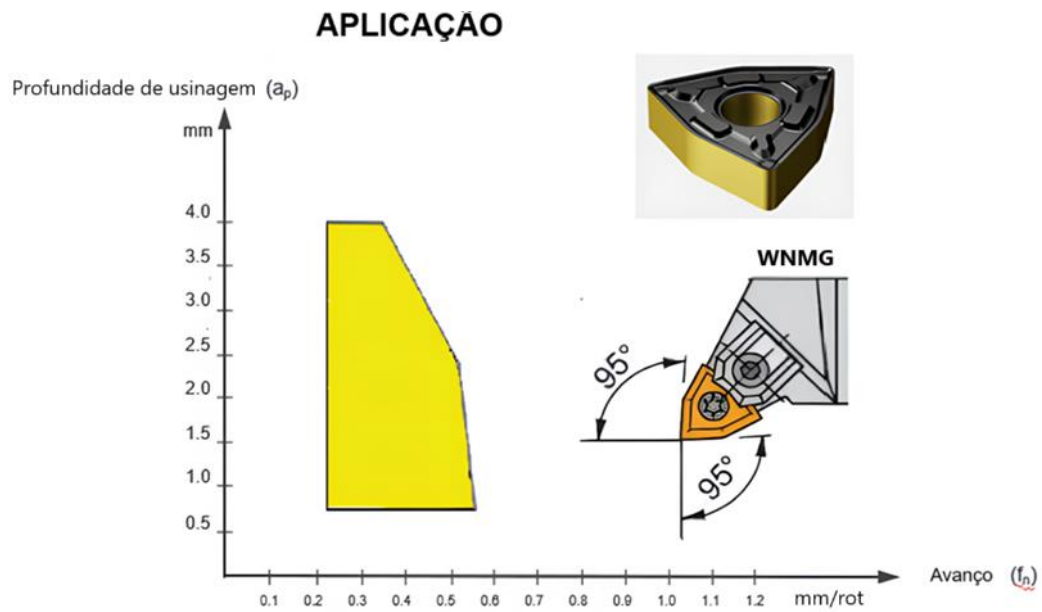


Figura 3.4 - Inserto ISO WNMG de 6 arestas - 080408 PR4415

Fonte: Sandvik (2024).

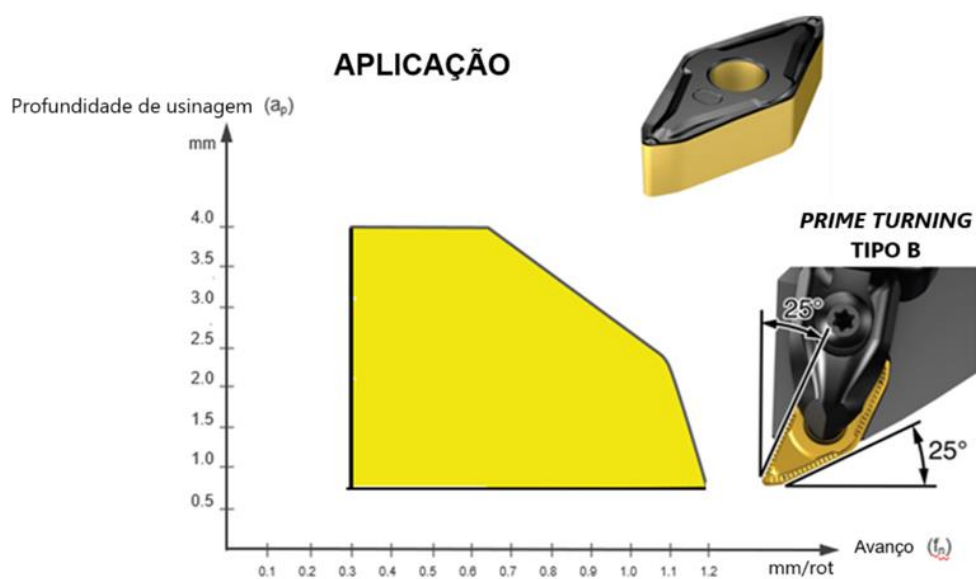


Figura 3.5 - Inserto Prime Turning "B" de 4 arestas - CP-B1208D-L4 4415

Fonte: Sandvik (2024).

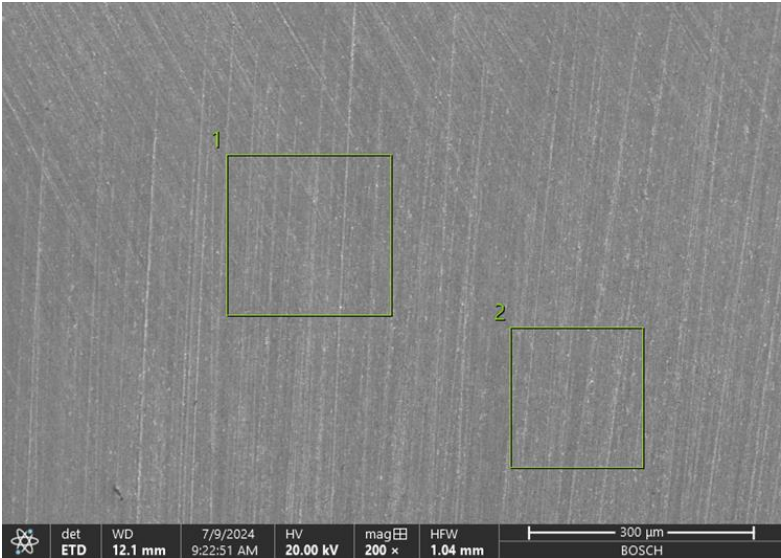


Figura 3.6 – Análise química do metal duro Inserto WNMG

Fonte: Laboratório multinacional (2024).

Tabela 3.4 - Composição química do metal duro – Inserto WNMG

Elemento	Percentual de peso (%)			
	O	Ti	Co	W
Região 1	3,9	3,8	4,1	88,2
Região 2	3,5	4	4	88,5

Fonte: Laboratório multinacional (2024).

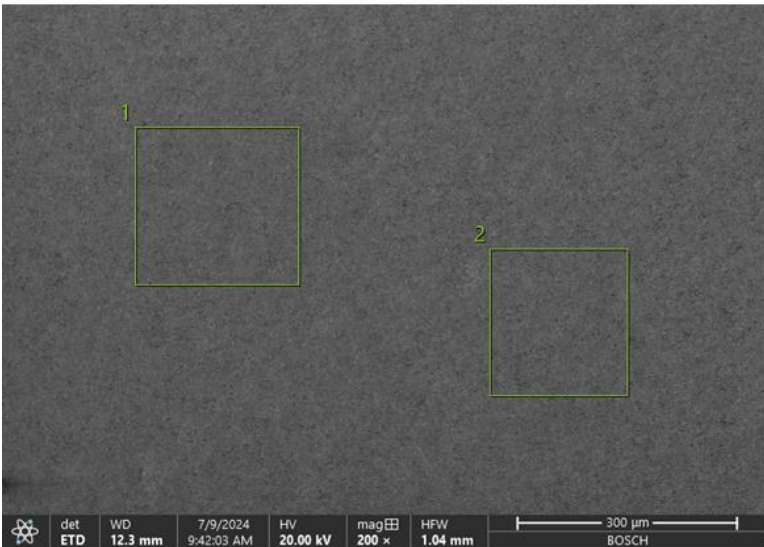


Figura 3.7- Análise química revestimento Inserto WNMG

Fonte: Laboratório multinacional (2024)

Tabela 3.5 - Composição química do revestimento – Inserto WNMG

Elemento	Percentual de peso (%)				
	C	N	O	Al	Si
Região 1	5,8	20,1	7,3	8,2	0,7
Região 2	5,8	20,2	6,0	8,3	0,6

Fonte: Laboratório multinacional (2024).

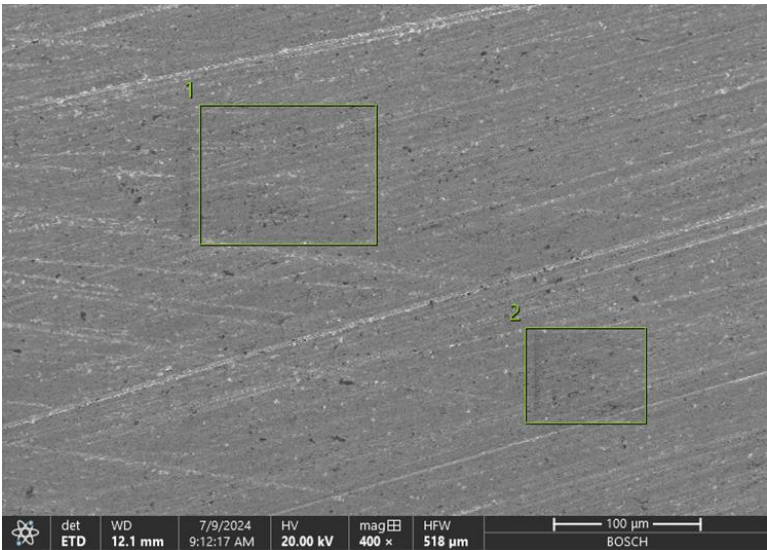


Figura 3.8 - Análise química do metal duro - Inserto Prime Turning

Fonte: Laboratório multinacional (2024).

Tabela 3.6 - Composição química do metal duro - Inserto *Prime Turning*

Elemento	Percentual de peso (%)			
	O	Ti	Co	W
Região 1	3,4	3,6	4,4	88,6
Região 2	3,2	3,5	4,4	88,9

Fonte: Laboratório multinacional (2024)

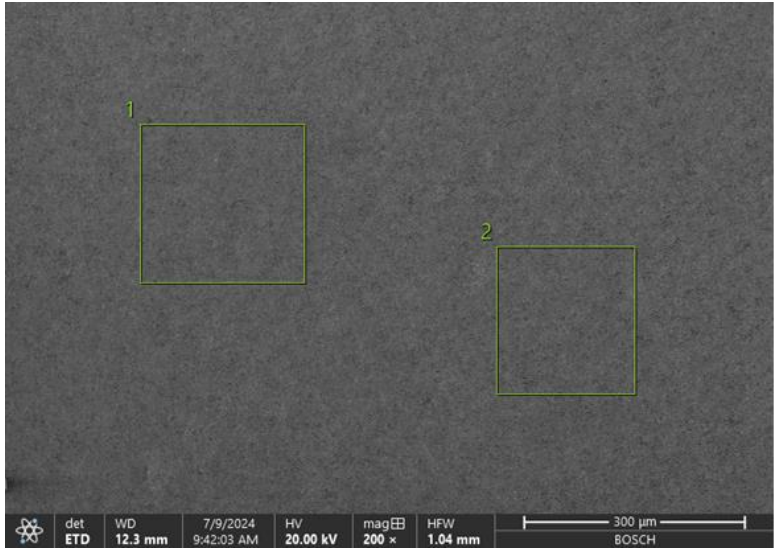


Figura 3.9 - Análise química revestimento Inserto Prime Turning

Fonte: Laboratório multinacional (2024).

Tabela 3.7 - Composição química do revestimento – Inserto *Prime Turning*

Elemento	Percentual de peso (%)					
	C	N	O	Al	Si	Ti
Região 1	7,6	20,1	6,3	9,1	0,6	56,3
Região 2	7,0	21,8	1,3	9,7	0,5	59,7

Fonte: Laboratório multinacional (2024).

3.4 CONFIGURAÇÃO DOS ENSAIOS DE USINAGEM

Com a ajuda do software de modelagem *NX Unigraphics* (Figura 3.10), foi realizado a modelagem da peça, os dados para serem exportados para o software *Master CAM* com utilização do modulo *CoroTurn Prime* da Sandvik, que possui todos os algoritmos para entrada da ferramenta em rolagem, que reduz o esforço de corte da ferramenta, aplicando taxas de avanço diferenciadas na utilização do inserto “*Prime Turning*” na operação de desbaste em sentido contrário a usinagem convencional.

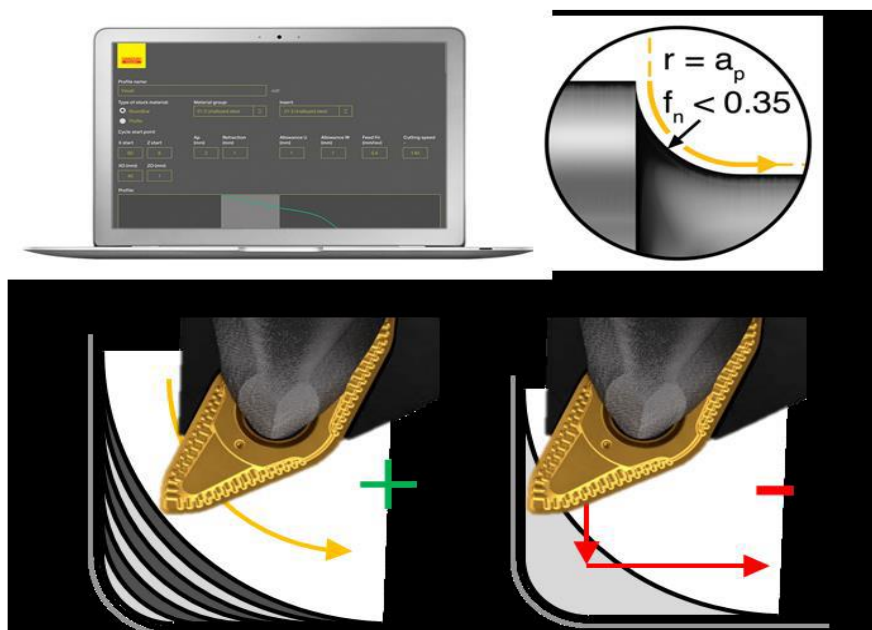


Figura 3.10 - Estratégia de modelagem software NX Unigraphics

Fonte: – Sandvik (2024).

Com o inserto WNMG foi utilizado o recurso de remoção linear de material, que simula a situação do processo de usinagem convencional, que não suaviza a entrada da ferramenta de corte no início do processo, exigindo altos tempos de ciclo devido a limitação nos avanços de corte (f).

3.5 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DE CORTE

Os parâmetros de corte foram planejados com a variação da profundidade de corte (a_p) e o avanço (f), para uma velocidade de corte (v_c) fixa em 200 m/min, conforme Tabela 3.8. Desta forma, utilizou-se um planejamento fatorial 2^3 para cada ferramenta de corte, ou (2×2^3). Cada ensaio foi repetido 3 vezes, totalizando 27 ensaios para cada ferramenta de corte.

Tabela 3.8 - Especificação dos parâmetros de corte dos experimentos

Experimento		Avanço (f) (mm/rot)	Profundidade de corte (a _p) (mm)	Velocidade de corte (v _c) (m/min)
Inserto WNMG	Inserto <i>Prime Turning</i>			
W1	P1	0,3	0,3	200
W2	P2	0,5		
W3	P3	0,7		
W4	P4	0,3	0,5	
W5	P5	0,5		
W6	P6	0,7		
W7	P7	0,3	0,7	
W8	P8	0,5		
W9	P9	0,7		

Fonte: O autor (2024).

3.6 COLETA DE DADOS NA USINAGEM

3.6.1 Medição do grau de recalque

Durante a operação de torneamento, para cada experimento foram realizadas coletas dos cavacos para medição da espessura (h'). Para essa avaliação, utilizou-se um micrômetro de ponta digital, sendo feitas pelo menos 5 medições e a média considerada para o cálculo do grau de recalque (R_c) por meio da Equação 3.1.

$$R_c = \frac{h'}{h} \quad (3.1)$$

Sendo que:

- h: espessura de corte;
- h': espessura do cavaco.

O valor de h é obtido pela Equação 3.2.

$$h = f \cdot \text{sen} \chi \quad (3.2)$$

Sendo que:

- f: avanço de corte;
- χ: ângulo de posição do inserto.

3.6.2 Medição do fator de empacotamento

Para a medição do fator de empacotamento, foram coletados os cavacos de cada experimento em um metro de comprimento linear usinado, sendo estes colocados em caixas com medidas estabelecidas (Figura 3.11). O cálculo para determinar o fator de empacotamento (Equação 3.3), foi realizado com os valores do volume ocupado (Equação 3.4), densidade do material (Equação 3.5), e volume do sólido equivalente (Equação 3.6).



Figura 3.11 - Caixas para coleta dos cavacos

Fonte: Departamento de desenvolvimento (Multinacional)

$$FE = \frac{v}{v_{se}} \quad (3.3)$$

$$v = l . a . c \quad (3.4)$$

$$d = \frac{m}{v} \quad (3.5)$$

$$v_{se} = \frac{m}{d} \quad (3.6)$$

Sendo que;

- FE: fator de empacotamento;
- v: volume ocupado;
- l: largura;
- a: altura;
- c: comprimento;
- d: densidade;
- m: massa;
- V_{se} : volume do sólido equivalente.

3.6.3 Análise microscópica do cavaco

As micrografias dos cavacos dos experimentos dos insertos WNMG 7W, 8W e 9W e insertos *Prime Turning* 7P, 8P e 9P, foram realizadas em amostras coletadas aleatoriamente durante cada ensaio, com ataque de ácido nítrico 2%, gerando as imagens em uma ampliação de 500x. Para esta análise, os cavacos foram embutidos em baquelite, com a ajuda de uma máquina do fabricante Buehler modelo Simplimet 1000, mostrado na Figura 3.12 Após esta etapa, foi realizado o processo de lixamento da face com os cavacos embutidos na lixadeira Buehler modelo Phoenih 2000, executado em três etapas, utilizando lixas de granulometria 200, 400 e 600, com uma etapa adicional de polimento, utilizando feltro e pasta abrasiva de alta viscosidade com granulometria 2 a 4 μ m do fornecedor Norton Saint-Gobain, sendo posteriormente avaliadas em um microscópio óptico modelo BX51M do fabricante Olympus para a obtenção das imagens.

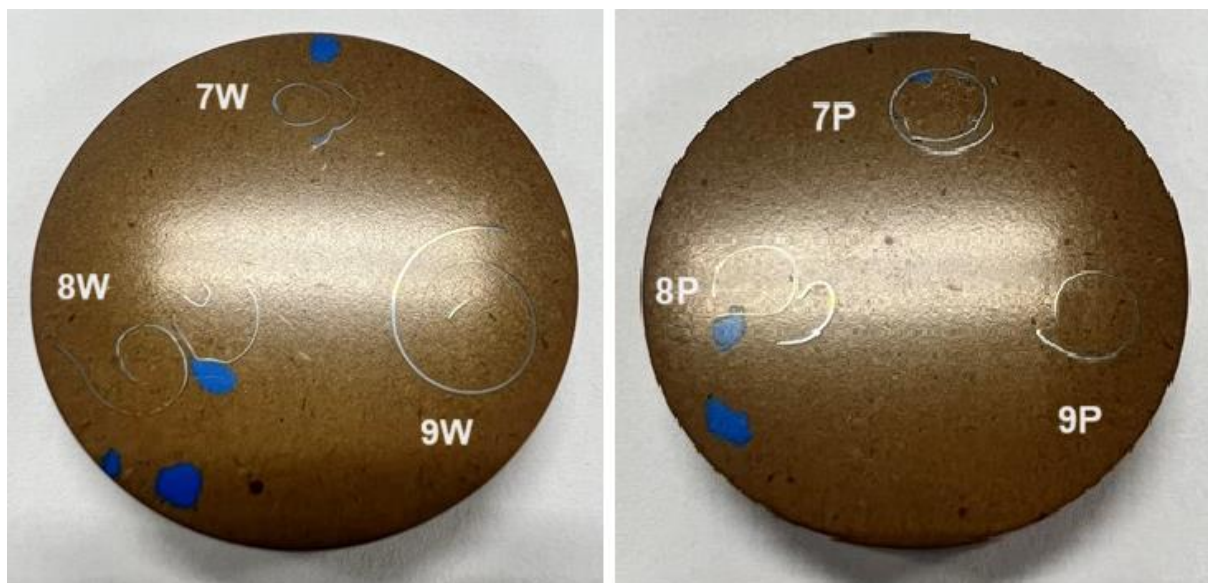


Figura 3.12 - Cavacos para análise embutidos em baquelite

Fonte: O autor (2024).

Em adicional, foram realizadas fotos comparativas com ampliação de 200x dos experimentos intermediários 4W do inserto WNMG e 4P do inserto Prime *Turning*, com o auxílio do Microscópio Eletrônico de Varredura MEV, para ter um melhor entendimento do cavaco gerado na usinagem.

3.6.4 Avaliação do desgaste dos insertos

Na avaliação do desgaste, foram executados testes de vida da ferramenta com critério pré-estabelecido de usinagem com comprimento total usinado de 20 metros de comprimento usinado, sendo realizadas 3 rodadas para cada experimento. Para este fim foi utilizado um microscópio da marca Zoller, conforme Figura 3.13 para avaliação e medição do desgaste de flanco da superfície de folga e da aresta principal de corte da superfície de saída de cada inserto.

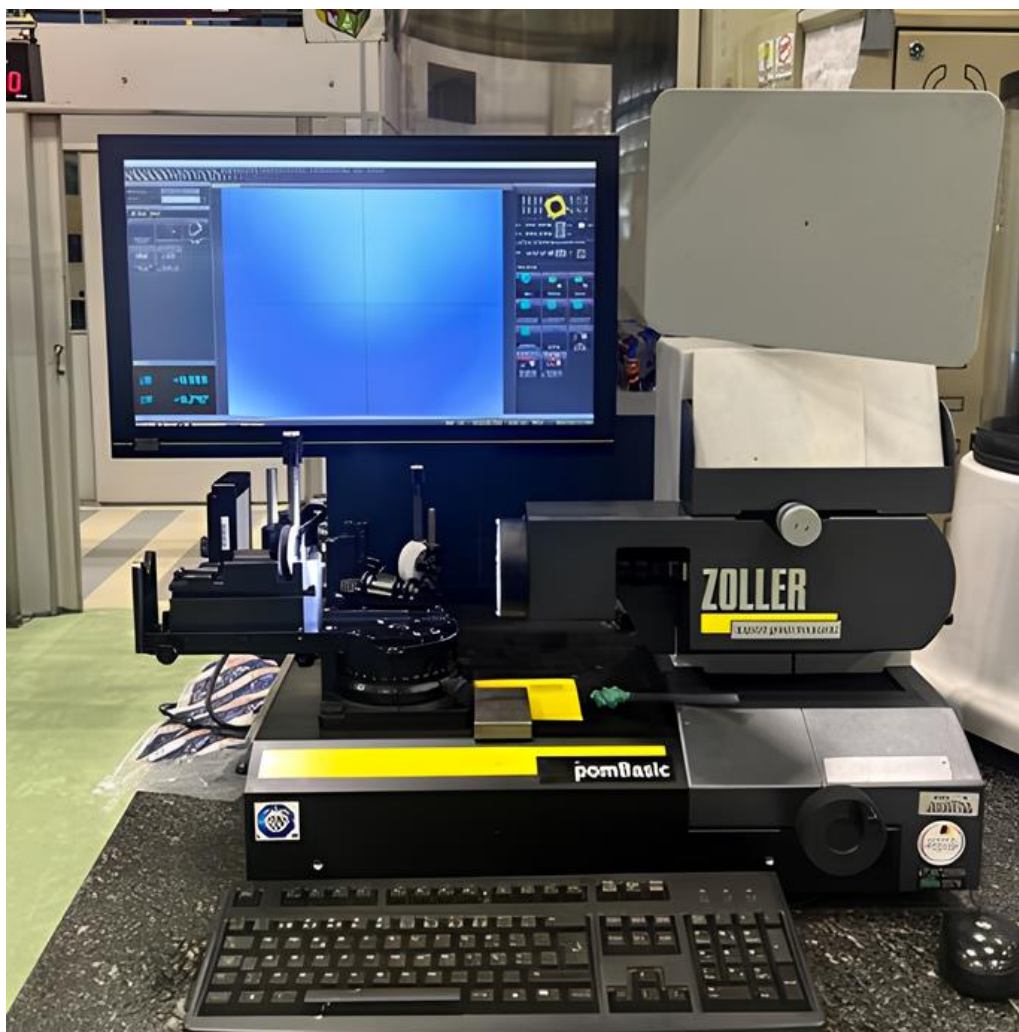


Figura 3.13 - Microscópio de medição Zoller

Fonte: Departamento de desenvolvimento (Multinacional).

Para análises microscópicas do desgaste foram utilizados o inserto WNMG do experimento W9 e o inserto *Prime Turning* do experimento P9, após a usinagem de 200 peças, equivalente a 20 metros de comprimento usinado, com os parâmetros de avanço (f) e profundidade de corte (a_p) de maiores exigência para esta avaliação.

3.6.5 Análise metalográfica dos insertos MEV/EDS

Os desgastes dos insertos foram analisados após a usinagem de 200 peças, equivalente a 20 metros de comprimento usinado, realizados no microscópio eletrônico de varredura (MEV) e por espectroscopia de energia dispersiva (EDS) realizado no equipamento Thermo Scientific “Axia” ChemiSEM, conforme Figura 3.14 para identificar os mecanismos de desgaste envolvidos.

Para esta avaliação foram separados os insertos dos experimentos 9W e 9P com os maiores valores dos parâmetros de corte utilizados para avanço (f) e profundidade de corte (a_p).



Figura 3.14 - Microscópio Eletrônico de Varredura

Fonte: Laboratório da Multinacional.

3.6.6 Medição da qualidade das peças usinadas

As peças utilizadas para avaliação qualitativas foram obtidas dos ensaios de vida das ferramentas descritos no item anterior, considerando as médias encontradas. As características avaliadas e a frequência de medição são mostradas no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 - Características avaliadas e frequência de medição

Característica	Frequência de Avaliação
Exame visual	Última peça usinada
Circularidade	A cada 25 peças
Rugosidade	A cada 25 peças

Fonte: O autor (2024).

A análise visual e metalográfica na superfície usinada das peças produzidas pelos insertos WNMG 4W, 5W, 6W e *Prime Turning* 4P, 5P e 6P dos experimentos intermediários, é realizada para o comparativo.

3.6.7 Medição dos esforços de corte

Para a análise das componentes de força de usinagem, foram utilizados os parâmetros de corte conforme experimentos especificados na Tabela 3.8. Foi utilizada uma plataforma dinamométrica modelo 9272, um amplificador modelo 5070, uma placa de aquisição de dados modelo 5697A e um software Dynoware® versão 2.6.3.12 todos do fabricante Kistler Instrument. Foi utilizado uma taxa de 1000 Hz e um tempo de 5 segundos de aquisição de sinais das componentes dos eixos X, Y e Z. O dinamômetro foi montado no carro principal do torno CNC horizontal Cincinnati Milacron Hawk 150 (conforme Figura 3.15).



Figura 3.15 - Aquisição de dados de força e dinamômetro Kistler

Fonte: LAUS - Laboratório de Usinagem (PUCPR).

3.6.8 Medição da temperatura

Os ensaios de temperatura foram realizados no torno Romi GL250M (Figura 3.16) utilizando termopares do tipo “K” inseridos nos insertos com os parâmetros de corte conforme experimentos especificados na Tabela 3.8.



Figura 3.16 - Medição da temperatura com termopares torno Romi GL250M

Fonte: LAUS - Laboratório de Usinagem (PUCPR).

Nos suportes e insertos utilizados para a avaliação de temperatura, foram retrabalhados os suportes e os insertos na eletroerosão por penetração Charmilles (EDM – *Electrical Discharge Machining*) conforme Figura 3.17.



Figura 3.17 - Retrabalho dos suportes e insertos na Eletroerosão Charmilles

Fonte: LAUS - Laboratório de Usinagem (PUCPR).

Um furo passante de 2mm foi realizado nos suportes e nos insertos o mesmo diâmetro com profundidade chegando em 1mm próximo a face do ângulo de saída, utilizando mesma distância do centro do furo até a aresta de corte em ambos os insertos para inserção do termopar, conforme demonstra a Figura 3.18.



Figura 3.18 - Suportes e insertos após retrabalho para inserção dos termopares

Fonte: LAUS - Laboratório de Usinagem (PUCPR).

A montagem do sistema no torno CNC Romi GL250M é mostrada na Figura 3.19, utilizando uma placa de aquisição de dados modelo 34970A do fabricante Agilent

e o software Agile BenchLink Data Logger versão 1.4.000.512. A aquisição dos sinais do termopar ocorreu durante todo o percurso de avanço na usinagem de cada experimento.



Figura 3.19 - Aquisição de sinal do termopar no inserto

Fonte: LAUS - Laboratório de Usinagem (PUCPR).

3.6.9 Avaliação comparativa da geometria do inserto

Como os insertos possuem quebra-cavacos diferentes, para uma análise comparativa só da geometria dos insertos, eles foram retrabalhados em uma retífica plana, deixando-os com a face plana, sem a geometria de quebra-cavaco, conforme mostra a Figura 3.20. Com a finalidade de comparar em adicional a formação e o tipo de cavaco gerado na usinagem do aço SAE 4144, foram realizadas as avaliações da influência do tipo de cavaco gerado para os insertos com as faces planas, utilizando os parâmetros de usinagem dos insertos WNMG 5W e *Prime Turning* 5P dos experimentos conforme citados na Tabela 3.8.

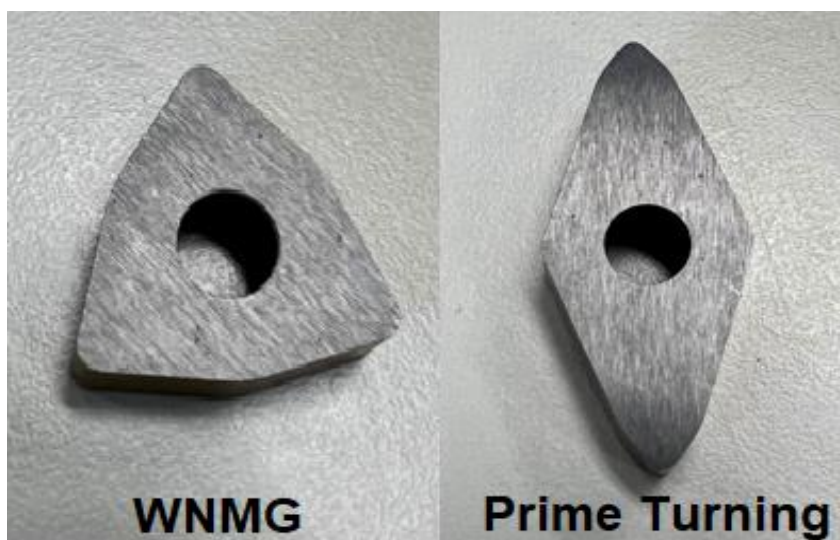


Figura 3.20 - Insertos retrabalhados (Face Plana)

Fonte: O autor (2024).

Com uma câmera de alta velocidade de alta resolução da marca Olympus, velocidade acima de 30.000 fps do modelo ISpeed3 conforme Figura 3.21, foi possível filmar o processo de usinagem com os insertos retrabalhados com face plana no ângulo de saída do cavaco, sendo possível nesta condição avaliar a influência do ângulo de posição (χ_r), aliado a geometria dos insertos, evidenciando a formação de cavaco em cada situação.



Figura 3.21 - Câmera de alta velocidade

Fonte: Olympus (2024).

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os principais resultados da investigação experimental, tais como, a classificação e formação dos cavacos, avaliação da vida da ferramenta, o mecanismo de desgaste predominante, a força de avanço, e a qualidade da superfície usinada, para os insertos WNMG e *Prime Turning*.

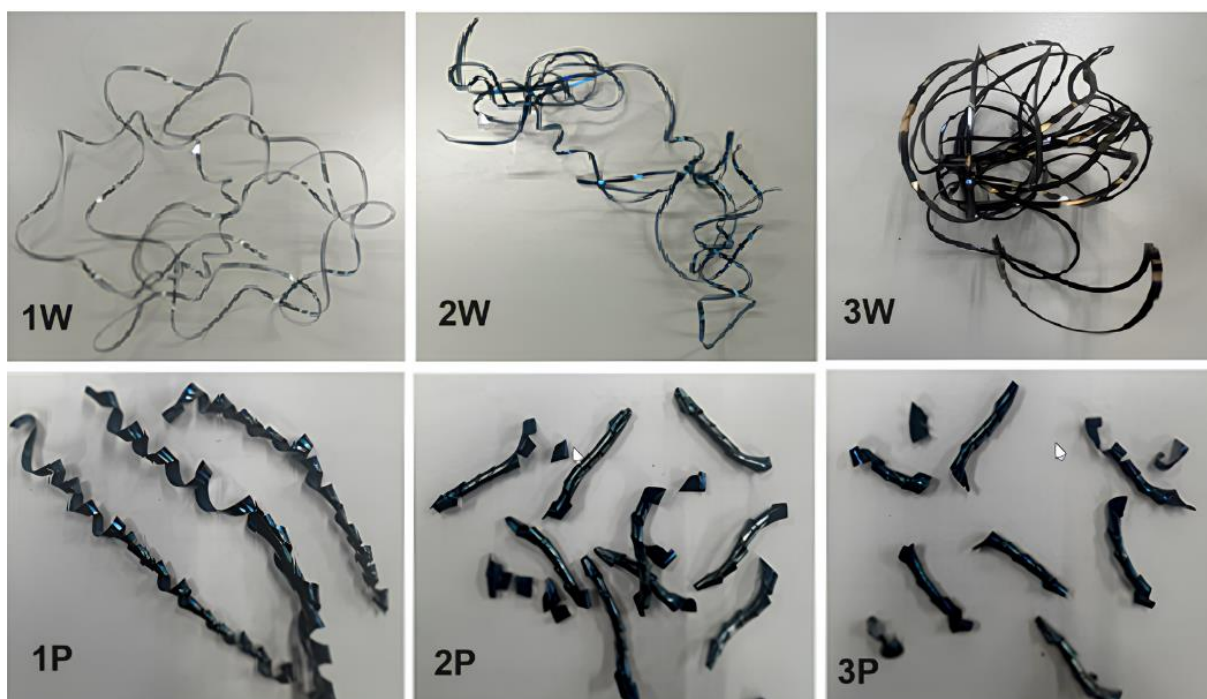
A apresentação dos dados dar-se-á na forma de gráficos, documentação fotográfica, imagens pelo MEV (microscopia eletrônica de varredura), e análises químicas através do sistema EDS (espectroscopia de energia dispersiva) conforme citado na metodologia.

4.1 AVALIAÇÃO DO CAVACO NA USINAGEM

Durante os experimentos foram coletadas amostras dos cavacos para os experimentos conforme descrito no item 3.5, para os ensaios com os insertos ISO WNMG 080408 PR4415 e o Inserto *Prime Turning* tipo “B” CP-B1208D-L4 4415.

4.1.1 Avaliação dos cavacos gerados na usinagem com os insertos nos experimentos

Nos experimentos com o inserto WNMG 1W, 2W e 3W, a velocidade de corte (v_c) 200m/min e profundidade de corte (a_p) 0,3mm foram mantidos constantes, sendo somente alterado o avanço (f) em 0,3mm/rot, 0,5mm/rot e 0,7mm/rot. Conforme pode se observar na Figura 4.1, os cavacos gerados com o inserto WNMG, foi predominante da classe contínuo, tendendo a parcialmente contínuo com o aumento do avanço, dificultando a sua coleta no momento da usinagem. Os cavacos gerados com os insertos *Prime Turning* nos experimentos 1P, 2P e 3 P, quanto a forma foi helicoidal cônico curtos, mas os comprimentos tendem a diminuir com o aumento do avanço, chegando a produzir algumas formas de lascas. A grande largura de corte “b” na usinagem com os insertos *Prime Turning* provavelmente é a responsável pela forma helicoidal cônica.



Avanço (f) = 0,3mm/rot

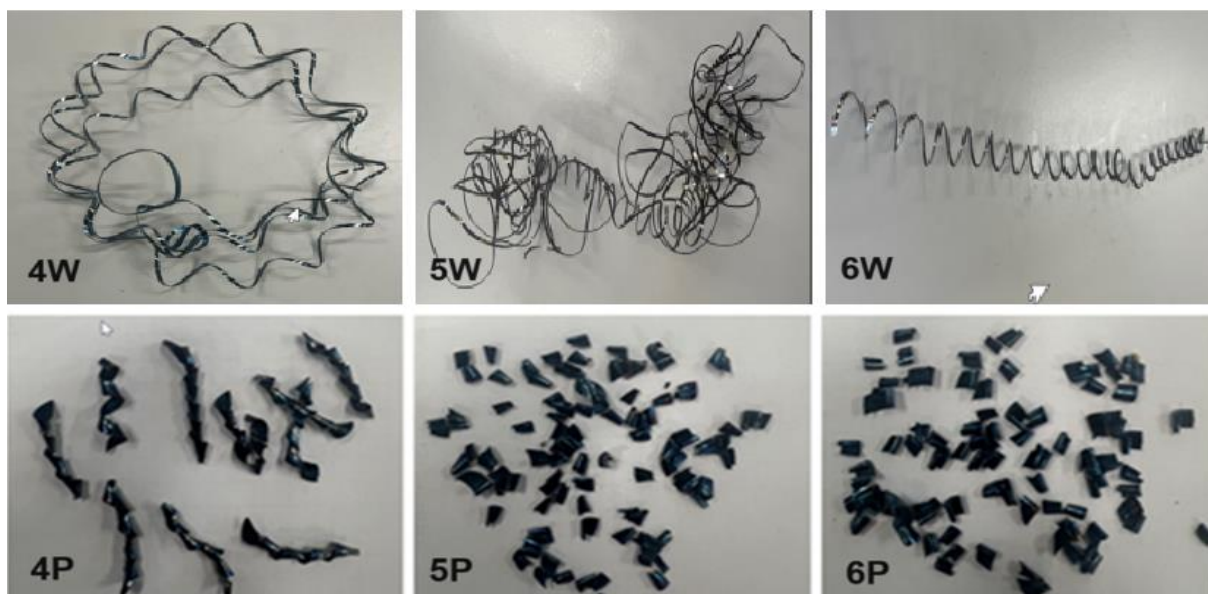
Avanço (f) = 0,5mm/rot

Avanço (f) = 0,7mm/rot

Figura 4.1 - Cavacos gerados pelos insertos WNMG (W) e *Prime Turning* (P) nos experimentos 1 a 3 (a_p = 0,3mm; v_c = 200m/min)

Fonte: O autor (2024).

Nos experimentos com o inserto WNMG 4W, 5W e 6W a velocidade de corte (v_c) 200m/min e profundidade de corte (a_p) 0,5mm foram mantidos, sendo somente alterado o avanço (f) nas faixas de 0,3mm/rot, 0,5mm/rot e 0,7mm/rot. Conforme podemos observar na Figura 4.2 os cavacos gerados pelo inserto WNMG continuaram sendo da classe contínuo, em que a forma de fita longa predominante tende a passar para helicoidal longa, com o aumento do avanço. Os cavacos gerados pelo inserto *Prime Turning* 4P, 5P e 6P, foram predominantemente da classe parcialmente contínuo, na forma de helicoidal cônico curto, passando para lascas, com o aumento do avanço. No comparativo, podemos constatar que a mudança do ângulo de posição “ χ_r ” tende a mudar o tipo de cavaco gerado.



Avanço (f) = 0,3mm/rot

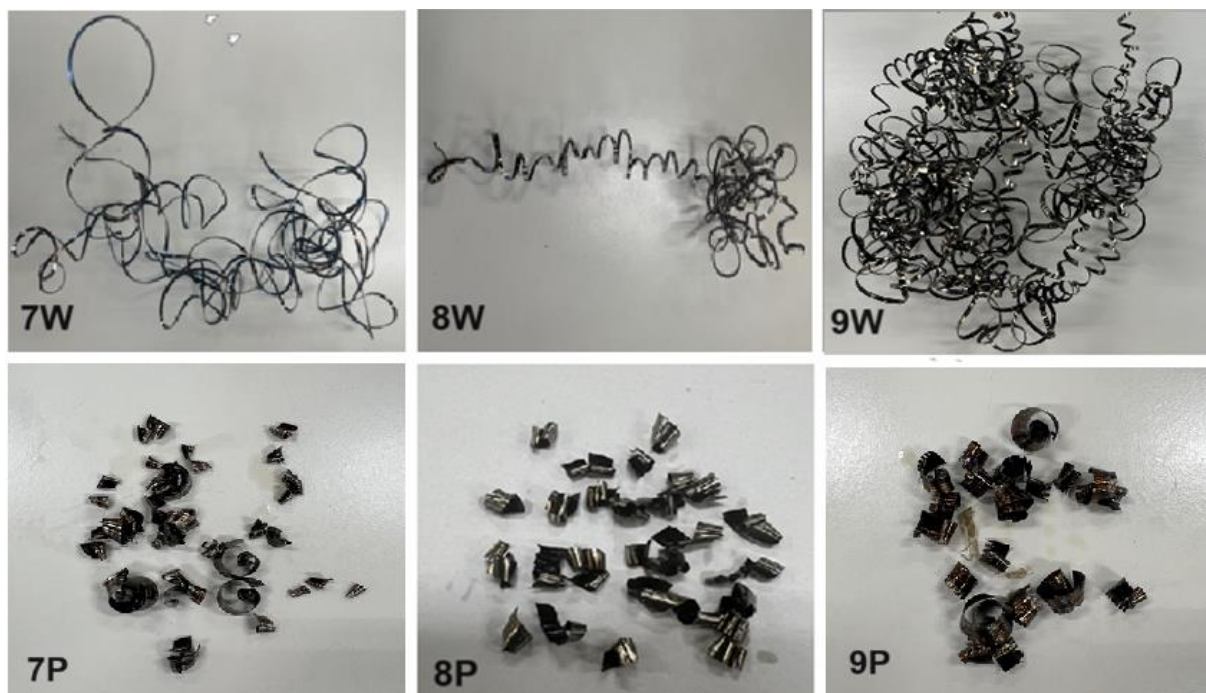
Avanço (f) = 0,5mm/rot

Avanço (f) = 0,7mm/rot

Figura 4.2 - Cavacos gerados pelos insertos WNMG (W) e *Prime Turning* (P) nos experimentos 4 a 6 ($a_p = 0,5\text{mm}$; $v_c = 200\text{m/min}$)

Fonte: O autor (2024).

Nos experimentos com o inserto WNMG 7W, 8W e 9W a velocidade de corte (v_c) 200m/min e profundidade de corte (a_p) 0,7mm foram mantidos, sendo somente alterado o avanço (f) nas faixas de 0,3mm/rot, 0,5mm/rot e 0,7mm/rot. Conforme podemos observar na Figura 4.3 os cavacos para o inserto WNMG foi da classe contínuo, na forma helicoidal. O cavaco gerado pelo inserto *Prime Turning* nos experimentos 7P, 8P e 9P foram predominantes da classe parcialmente contínuo em forma de lascas, com o incremento do avanço. Podemos concluir após estes experimentos, que quanto maior a profundidade de corte (a_p), tem-se melhores condições da geração deste tipo de cavaco com o inserto *Prime Turning*, enquanto com o inserto WNMG não tivemos alterações significativas na geração da classe de cavaco.



Avanço (f) = 0,3mm/rot

Avanço (f) = 0,5mm/rot

Avanço (f) = 0,7mm/rot

Figura 4.3 - Cavacos gerados pelos insertos WNMG (W) e *Prime Turning* (P) nos experimentos 7 a 9 ($a_p = 0,7\text{mm}$; $v_c = 200\text{m/min}$)

Fonte: O autor (2024).

Para ter um melhor entendimento na formação dos cavacos, durante os experimentos com o inserto WNMG 4W e o inserto *Prime Turning* 4P, foram realizadas as filmagens do processo de torneamento conforme Figura 4.4, onde podemos observar durante o percurso da usinagem, a geração dos cavacos formados em três estágios da usinagem, que foram da classe contínuo em forma helicoidal para o inserto WNMG e parcialmente contínuos em forma de lascas para o inserto *Prime Turning*.

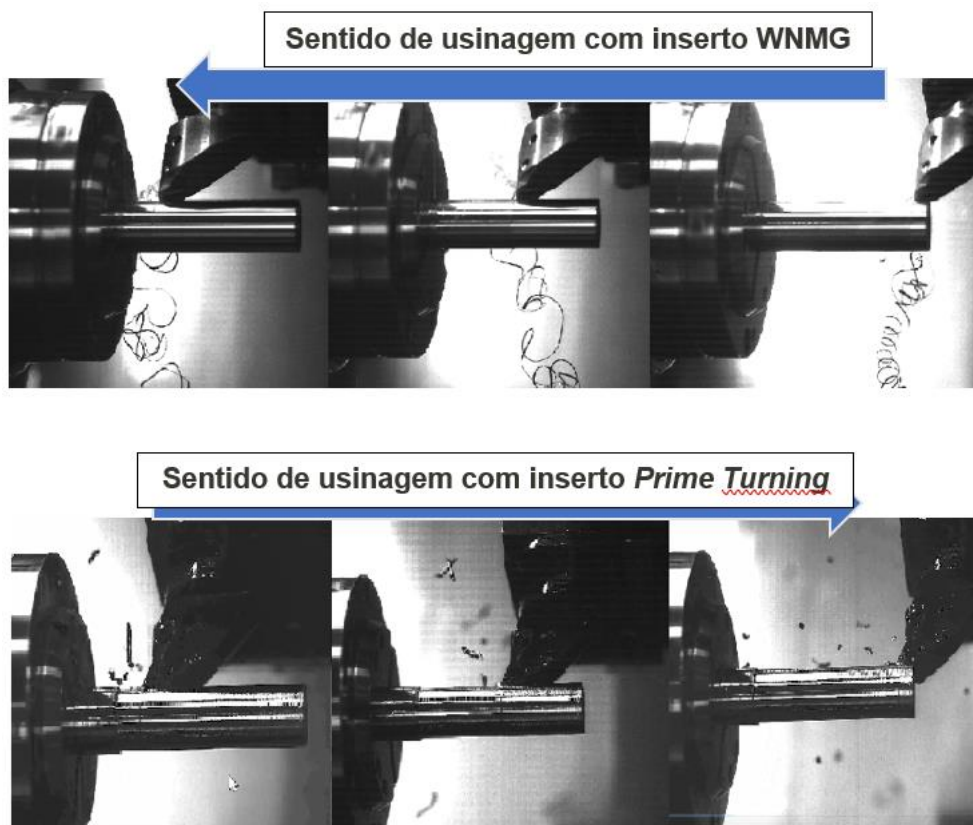


Figura 4.4 - Estágios da usinagem e cavacos gerados nos experimentos 4W e 4P
 $f = 0,3\text{mm/rot}$; $a_p = 0,5\text{mm}$; $v_c = 200\text{m/min}$

Fonte: O autor (2024).

Os resultados apresentados evidenciam a maior eficiência em controlar os cavacos do inserto *Prime Turning* em relação ao inserto WNMG. Isto ocorreu em todas as condições de corte testadas, mesmo naquelas mais favoráveis a produzir cavacos contínuos longos, como nos experimentos com a menor profundidade de corte e menor avanço.

4.1.2 Comparativo dos cavacos em fotos tiradas no MEV

Com a avaliação das fotos feitas no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), pode-se evidenciar detalhes e formas dos cavacos coletados dos experimentos, gerados no processo de torneamento com os insertos WNMG 4W e *Prime Turning* 4P conforme mostram as Figuras 4.5 e 4.6.

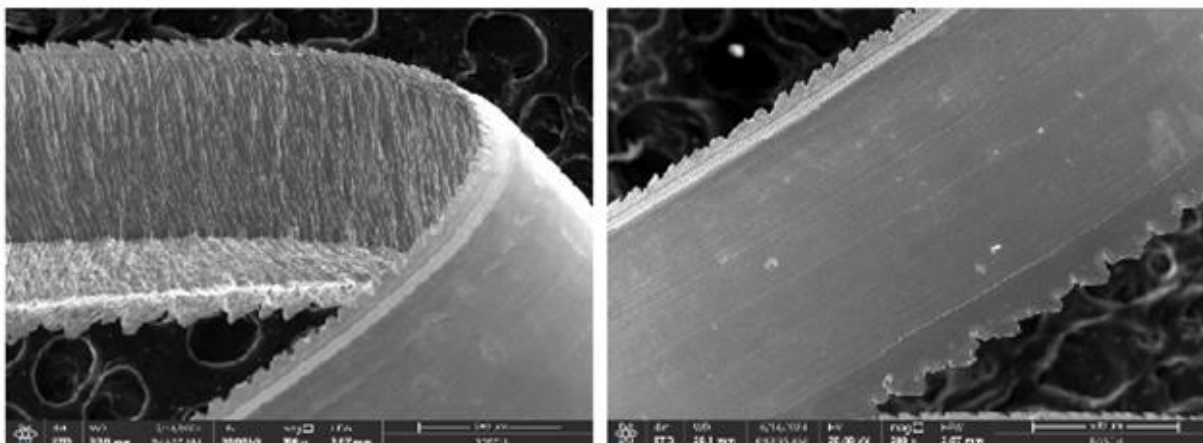


Figura 4.5 - Fotos MVE cavacos do inserto WNMG (condição 4W)
 $f = 0,3\text{mm/rot}$; $a_p = 0,5\text{mm}$; $v_c = 200\text{m/min}$

Fonte: O autor (2024).

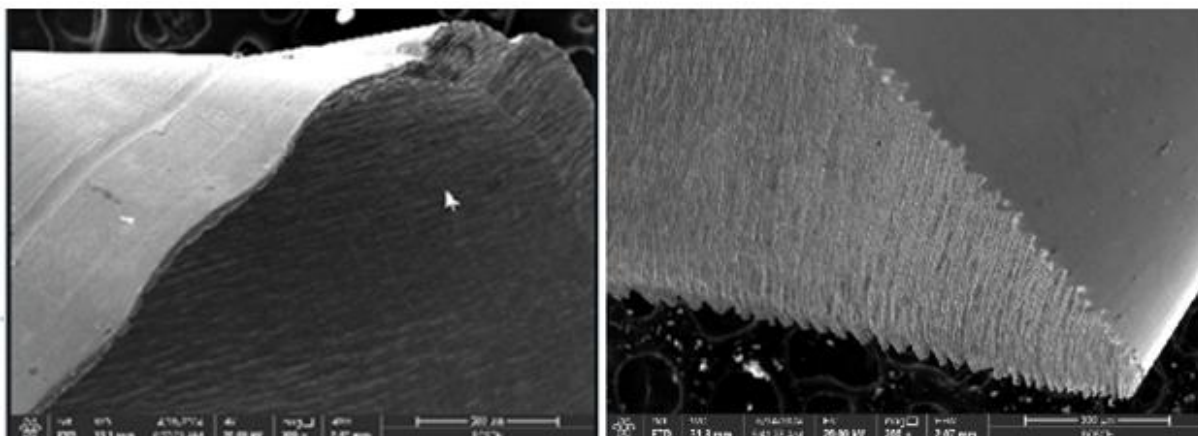


Figura 4.6 - Fotos MVE cavacos do inserto *Prime Turning* (condição 4P)
 $f = 0,3\text{mm/rot}$; $a_p = 0,5\text{mm}$; $v_c = 200\text{m/min}$

Fonte: O autor (2024).

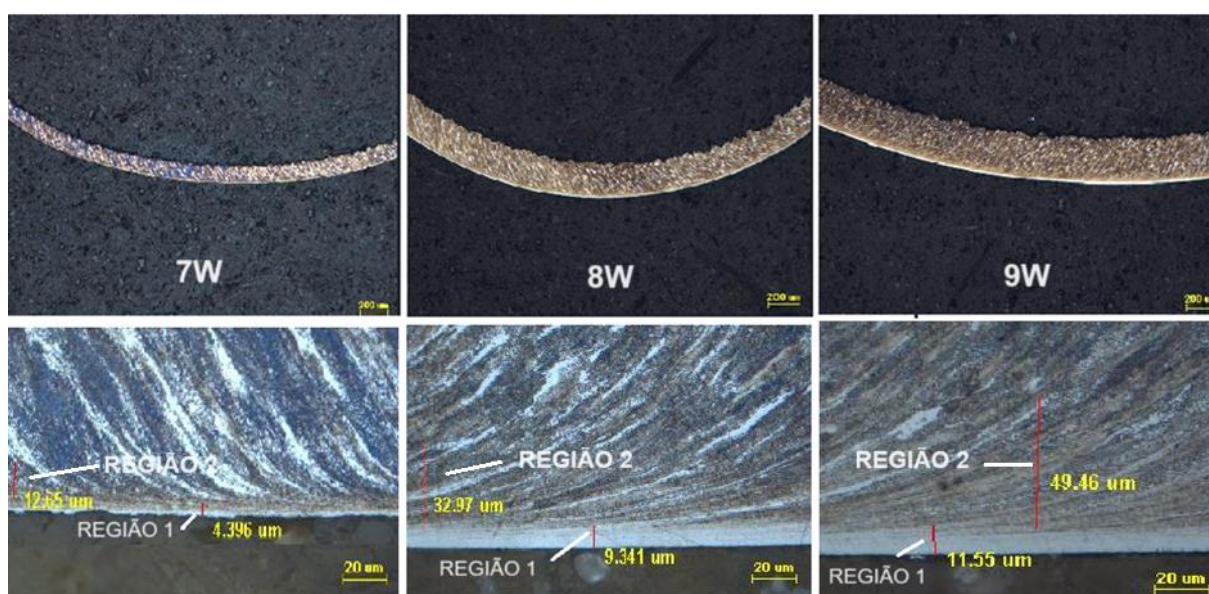
Observa-se que os cavacos gerados com o inserto WNMG são mais espessos com uma largura menor, predominando na sua formação em fita, com um raio de curvatura excessivamente grande. No caso do inserto *Prime Turning* houve um comportamento diferente, gerando durante o processo de usinagem um cavaco predominando helicoidal cônico curto, com um raio de curvatura menor, beneficiando o processo de cisalhamento na região primária para a região de escoamento e ruptura.

4.1.3 Avaliação dos cavacos no microscópio óptico

Foram realizados os exames para a avaliação dos cavacos gerados nos experimentos dos insertos WNMG e *Prime Turning* conforme mostram as Figuras 4.7 e 4.8, respectivamente.

A região mais clara (1) na periferia do cavaco, é um indicativo da presença de martensita, onde ocorreu aquecimento e a maior deformação do cavaco na zona de fluxo do inserto no momento da usinagem.

Na região da amostra, a micrografia evidencia as fases na região 2 acima da região 1 formada por “Ferrita e Perlita Lamelar”, com uma leve deformação na estrutura dos grãos após a usinagem do material SAE 4144 que não foi afetada pelo aquecimento.



Avanço (f) = 0,3mm/rot

Avanço (f) = 0,5mm/rot

Avanço (f) = 0,7mm/rot

Figura 4.7 - Sessão longitudinal do cavaco destacando a zona de fluxo para o inserto WNMG ($a_p = 0,5\text{mm}$; $v_c = 200\text{m/min}$)

Fonte: O autor (2024).

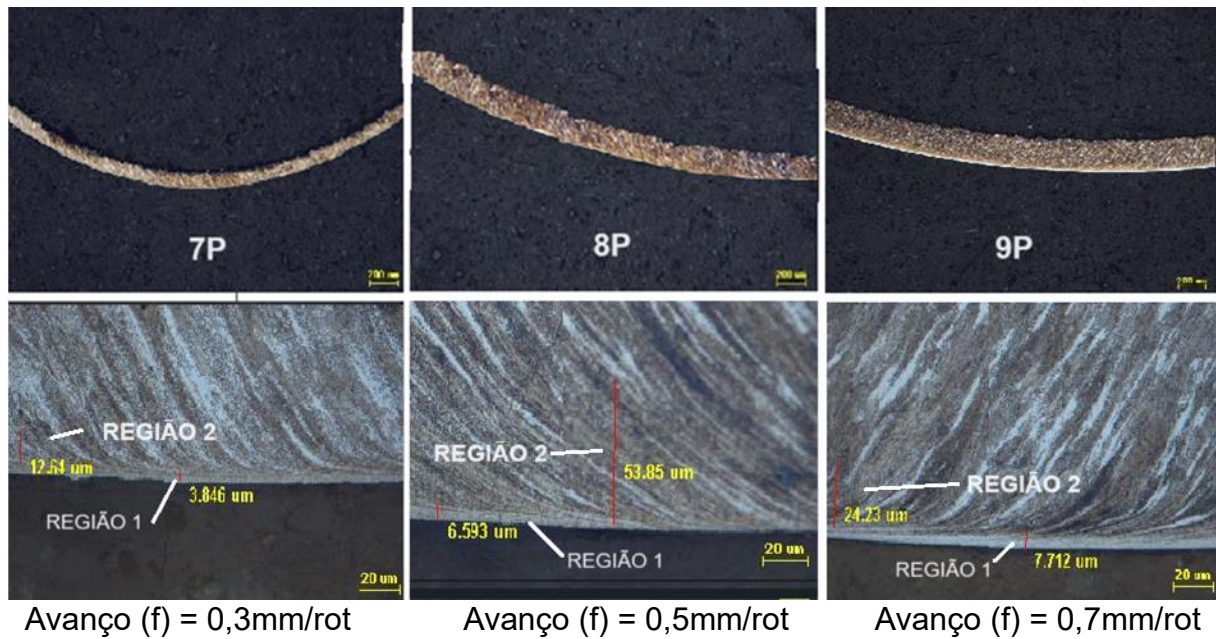


Figura 4.8 - Sessão longitudinal do cavaco destacando a zona de fluxo para o inserto *Prime Turning* ($a_p = 0,5\text{mm}$; $v_c = 200\text{m/min}$)

Fonte: O autor (2024).

A região com maior deformação do cavaco gerado pelo inserto *Prime Turning* é também observada na zona de fluxo do cavaco com o inserto, devido alta temperatura nesta região, mas com menor intensidade e com menor espessura, quando comparada com os cavacos gerados pela inserto WNMG.

Na Figura 4.9 é apresentado a avaliação da medição da espessura na região (1) na dimensão da zona de fluxo do cavaco com o inserto, onde ocorreu a deformação plástica por aquecimento e possível transformação martensítica, que foi maior para os experimentos com o inserto WNMG. Observa-se que o aumento do avanço tende a aumentar o tamanho da zona deformada e com transformação de fases.

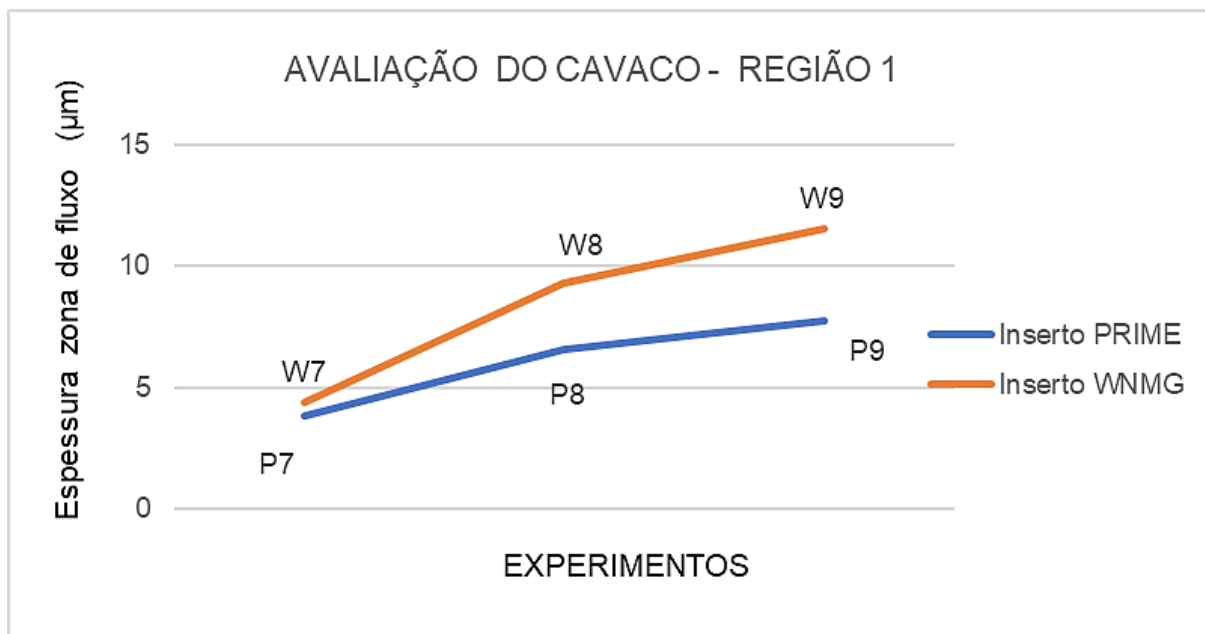


Figura 4.9 - Comportamento da espessura da zona de fluxo

Fonte: O autor (2024).

4.1.4 Avaliação da espessura do cavaco

Na Figura 4.10 são apresentados os resultados da espessura dos cavacos h' , encontrados nos testes experimentais desenvolvidos com as duas tecnologias de inserts. Os testes revelam que a espessura do cavaco conforme Figura 4.10, tende a ser maior quanto maior o avanço, o que era esperado, pois a espessura de corte h , afeta proporcionalmente a espessura do cavaco h' que é diretamente ligada ao avanço. Exceção foram os experimentos de profundidade de corte (a_p) de 0,7mm para o inserto WNMG 9W e inserto *Prime Turning* 9P, com o maior avanço (f) de 0,7mm/rot, apresentando espessuras de cavacos menores que o avanço (f) de 0,5mm/rot, com os experimentos anteriores realizados, dos inserts WNMG 7W e *Prime Turning* 7P. Os cavacos de comprimentos menores (mais quebradiços) podem ter contribuído com esses resultados.

Comparando os resultados, ao utilizar os dois inserts, os menores valores de espessura ficaram para os experimentos com os inserts *Prime Turning*, produzindo cavacos mais finos comparados com o inserto WNMG, onde o ângulo de posição " χ_r " é menor.

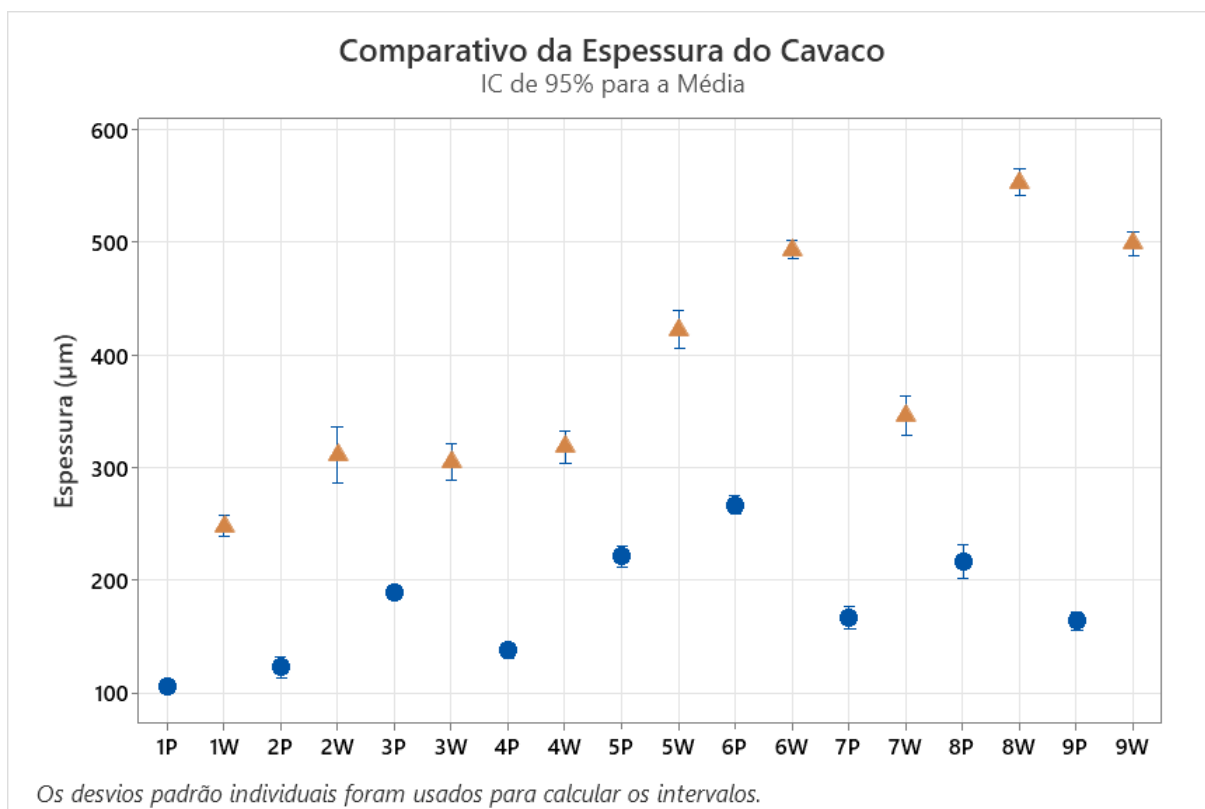


Figura 4.10 - Espessura dos cavacos dos experimentos dos insertos WNMG (W) e *Prime Turning* (P) gerados na usinagem

Fonte: O autor (2024).

A largura dos cavacos variaram conforme mostra a Figura 4.11. Os maiores valores de espessura foram encontrados para os experimentos com os insertos *Prime Turning*, devido ao maior contato da aresta de corte em função do menor ângulo de posição " χ_r ". Observa-se também que, em geral, o aumento da profundidade de corte aumenta a largura dos cavacos, como esperado, pois, a profundidade está diretamente relacionada com a largura de corte b , que está associada à largura do cavaco b' . O efeito do avanço na largura do cavaco é mais evidente nos resultados com o inserto WNMG, onde há maior tendência da largura do cavaco aumentar com o aumento deste parâmetro.

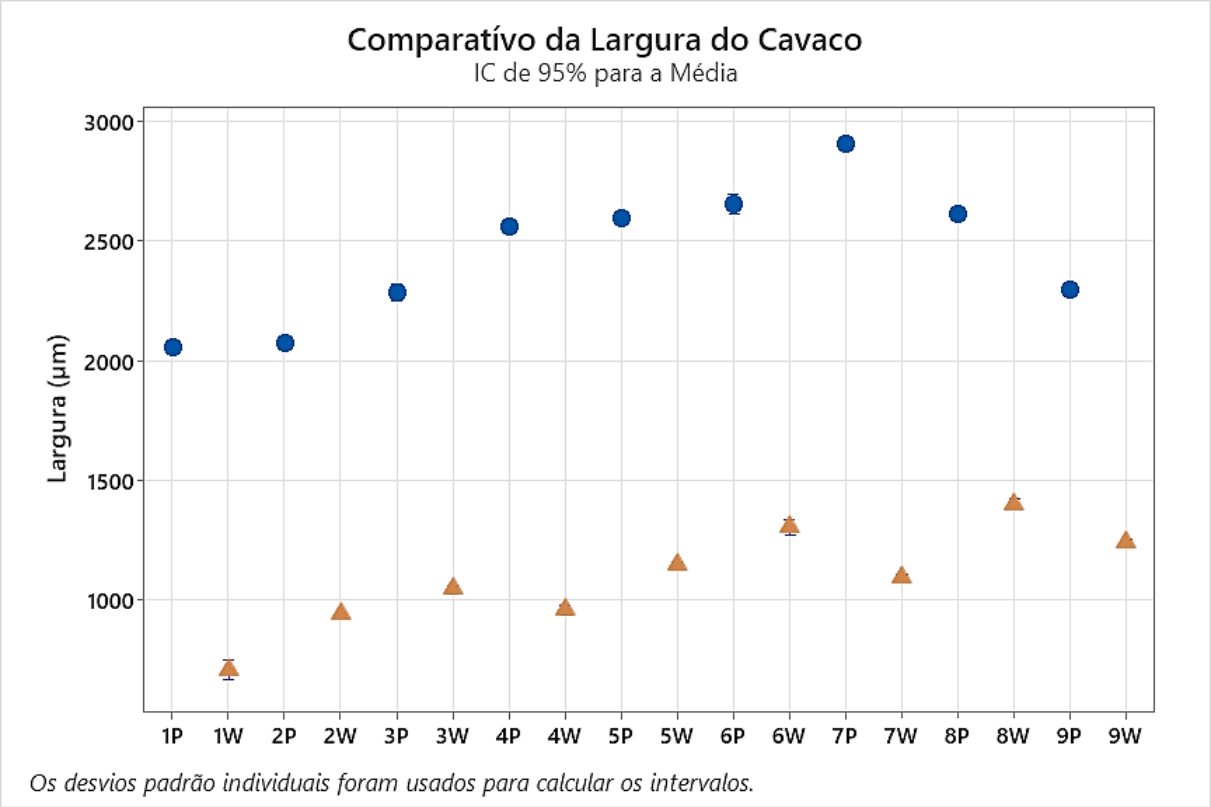


Figura 4.11 - Largura dos cavacos dos experimentos dos insertos WNMG (W) e *Prime Turning* (P) gerados na usinagem

Fonte: O autor (2024).

4.1.5 Grau de recalque

As espessuras de cavaco (h') medidos e o grau de recalque R_c calculados para os dois insertos utilizados são apresentados na Tabela 4.1, respectivamente. Observa-se um maior grau de recalque para o inserto WNMG do que no inserto *Prime Turning* conforme comparativo da Figura 4.12. Isto implica que os cavacos gerados pelo inserto WNMG sofrem maior deformação no plano de cisalhamento primário, por ter maior restrição de escoamento no plano secundário de cisalhamento. Normalmente, este maior grau de recalque implica em maior energia necessária para a formação do cavaco na usinagem do material SAE 4144.

Tabela 4.1 - Espessura média do cavaco e grau de recalque

Experimento	Profundidade de corte (ap) mm	Avanço (f) mm/rot	Espessura média do cavaco (h) mm	Grau de recalque (Rc)
1W	0,3	0,3	0,248	0,82
1P	0,3	0,3	0,105	0,35
2W	0,3	0,5	0,211	0,42
2P	0,3	0,5	0,123	0,24
3W	0,3	0,7	0,305	0,43
3P	0,3	0,7	0,189	0,27
4W	0,5	0,3	0,318	1,06
4P	0,5	0,3	0,137	0,45
5W	0,5	0,5	0,422	0,84
5P	0,5	0,5	0,221	0,44
6W	0,5	0,7	0,493	0,7
6P	0,5	0,7	0,267	0,38
7W	0,7	0,3	0,345	1,15
7P	0,7	0,3	0,166	0,55
8W	0,7	0,5	0,553	1,1
8P	0,7	0,5	0,216	0,43
9W	0,7	0,7	0,499	0,71
9P	0,7	0,7	0,164	0,23

Fonte: O autor (2024).

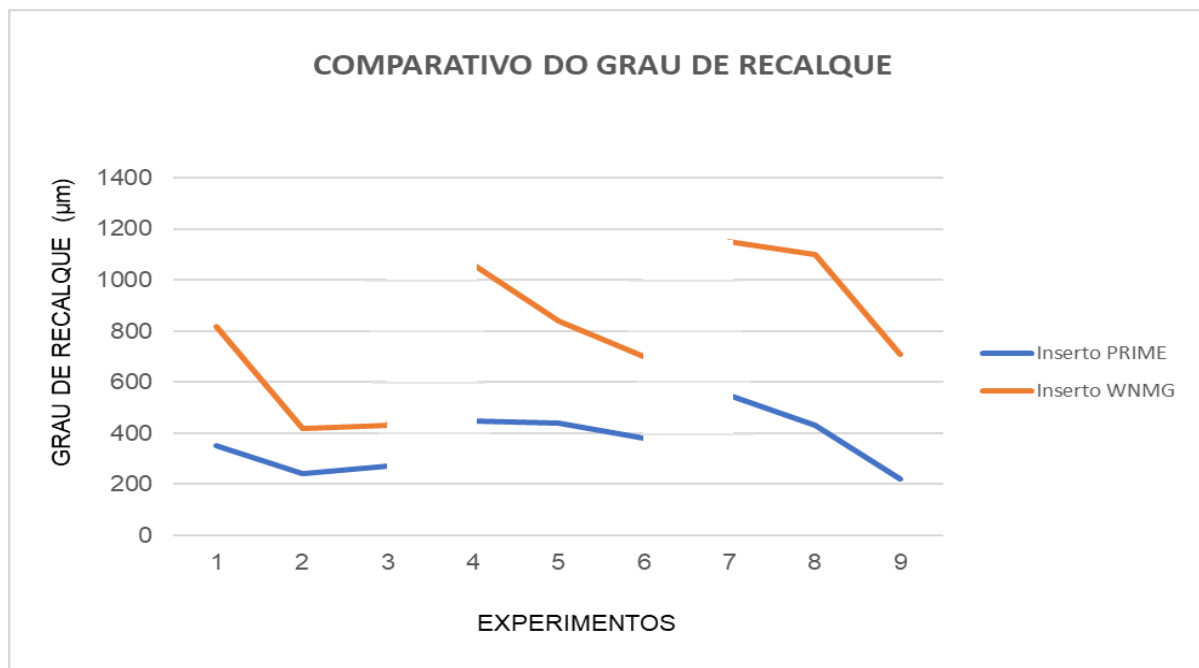


Figura 4.12 - Comparativo do grau de recalque

Fonte: O autor (2024).

4.1.6 Fator de empacotamento

Os resultados do fator de empacotamento (FE), determinados para os cavacos coletados dos experimentos com os dois insertos, são apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Fator de empacotamento dos insertos WNMG e *Prime Turning*

Experimento	Fator de Empacotamento
1W	453,35
1P	261,81
2W	315,89
2P	131,82
3W	316,29
3P	128,10
4W	287,65
4P	129,76
5W	227,52
5P	23,77
6W	165,78
6P	87,33
7W	156,16
7P	38,31
8W	112,08
8P	8,43
9W	112,82
9P	9,19

Verifica-se que o inserto WNMG apresentou maiores valores de FE que o inserto *Prime Turning* conforme gráfico da Figura 4.13, comprovando maior controle dos cavacos, ocupando menores espaços quando comparado aos gerados pelo inserto WNMG.

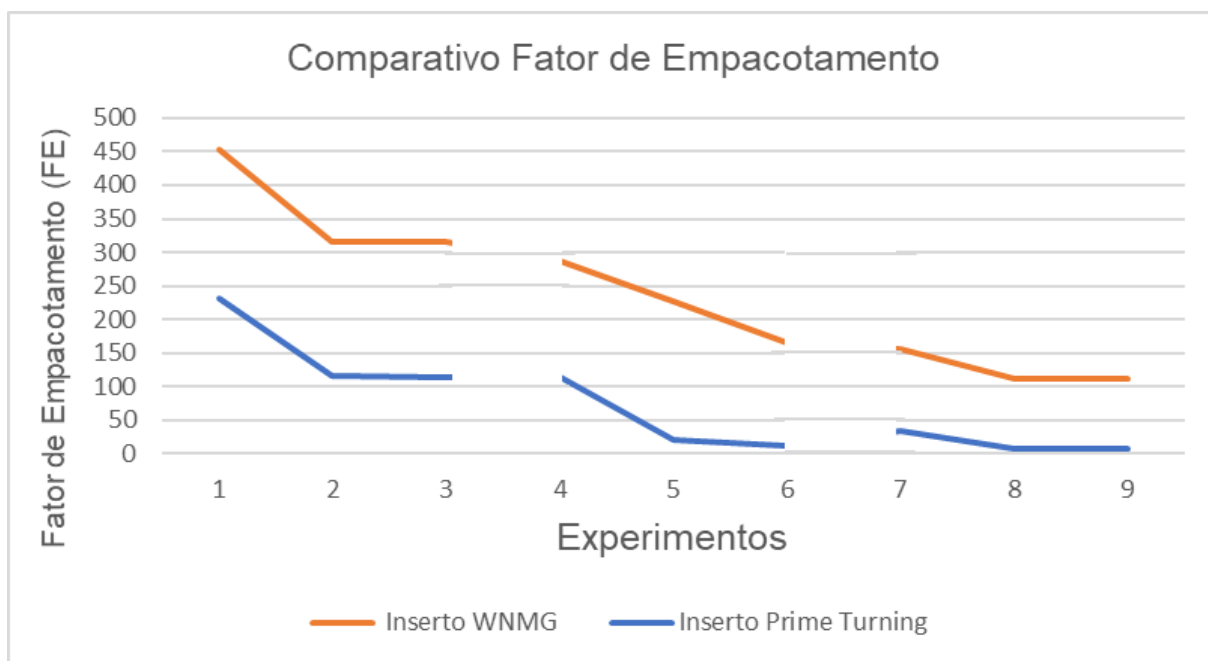


Figura 4.13 - Fator de empacotamento

Fonte: O autor (2024).

Ao observar os valores de FE encontrados, os cavacos gerados nos ensaios com o inserto *Prime Turning* 5P a 9P são bem favoráveis, com valores abaixo de 35. Para os demais testes, o FE é sempre superior a 100. Portanto, os cavacos gerados pelo inserto *Prime Turning* são mais fáceis de transportar, promovem menos riscos operacionais promovendo ganho de produtividade.

4.1.7 Avaliação de desgaste dos insertos - Microscópio

Nas Figuras 4.14 e 4.15 são apresentadas fotos das superfícies de saída e de folga dos insertos WNMG (ensaios 7W, 8W e 9W) e *Prime Turning* (ensaios 7P, 8P e 9P) respectivamente, após a usinagem de 200 peças, equivalente a 20 metros de comprimento usinado, para as condições com maior profundidade de corte (a_p). Observa-se o desenvolvimento maior do desgaste de flanco na superfície de folga e um menor desgaste de cratera na superfície de saída, para os dois insertos, nas condições de corte indicadas. Isto ocorreu para os demais testes também, cujas fotos não são apresentadas.

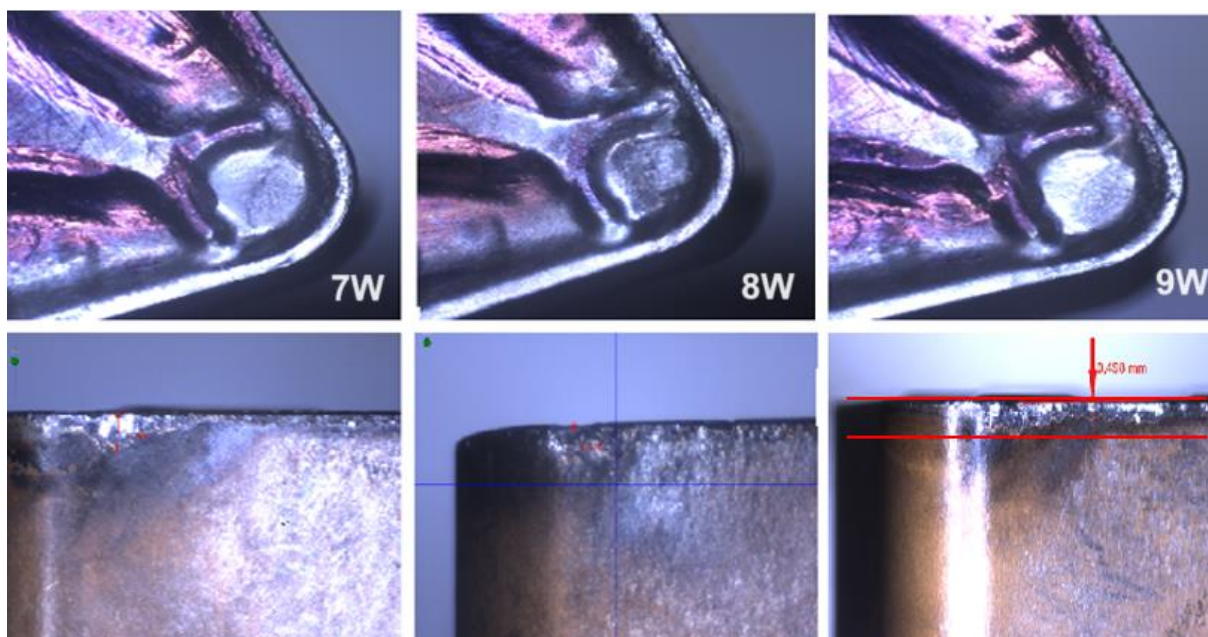


Figura 4.14 - Áreas de desgaste dos insertos WNMG (W)

Fonte: O autor (2024).

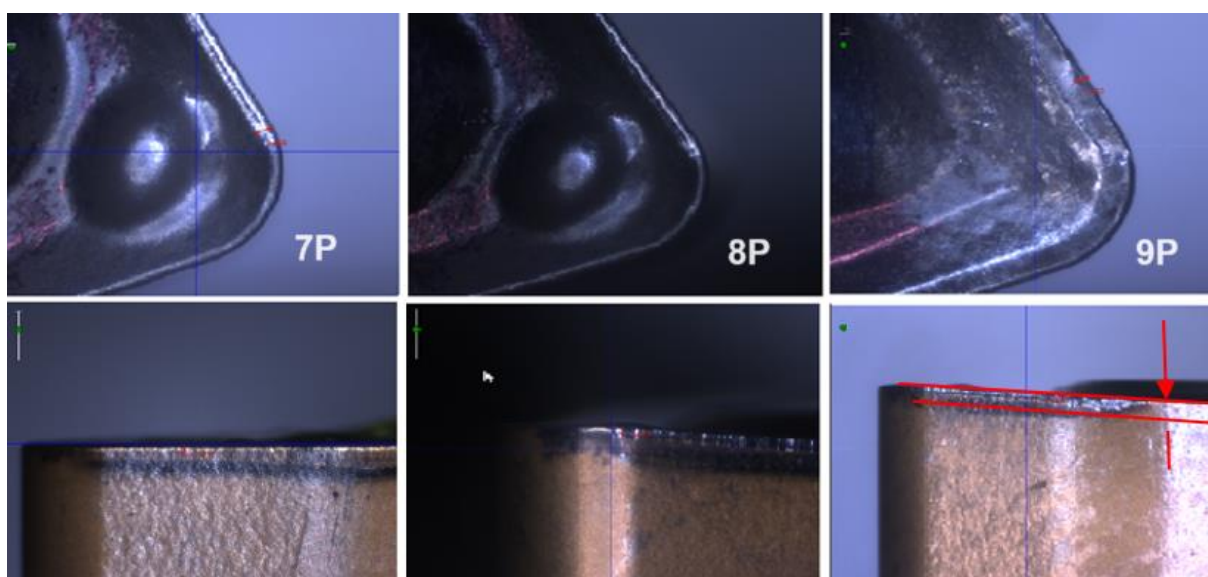


Figura 4.15 - Análise do desgaste inserto *Prime Turning* (P)

Fonte: O autor (2024).

Os resultados dos desgastes de flanco (desgaste de flanco médio) e de cratera (profundidade da cratera) encontrados para os dois insertos testados, após a usinagem de 200 peças (20 metros de comprimento usinado), são apresentados nas Figuras 4.16 e 4.17, respectivamente. No comparativo, os maiores desgastes de flanco e de cratera encontrados foram nos insertos WNMG, ultrapassando o valor de

desgaste de flanco médio de 0,3mm (300 μ m), que é o critério de fim de vida estipulado pela norma ISO 3685 (1993), em pelo menos 4 condições de ensaio (6W, 7W, 8W e 9W) e o inserto *Prime Turning* nenhuma vez ultrapassou esta marca.

Observa-se ainda nestes gráficos que ambos os desgastes aumentam com o aumento do avanço e da profundidade de corte, para ambos os insertos testados.

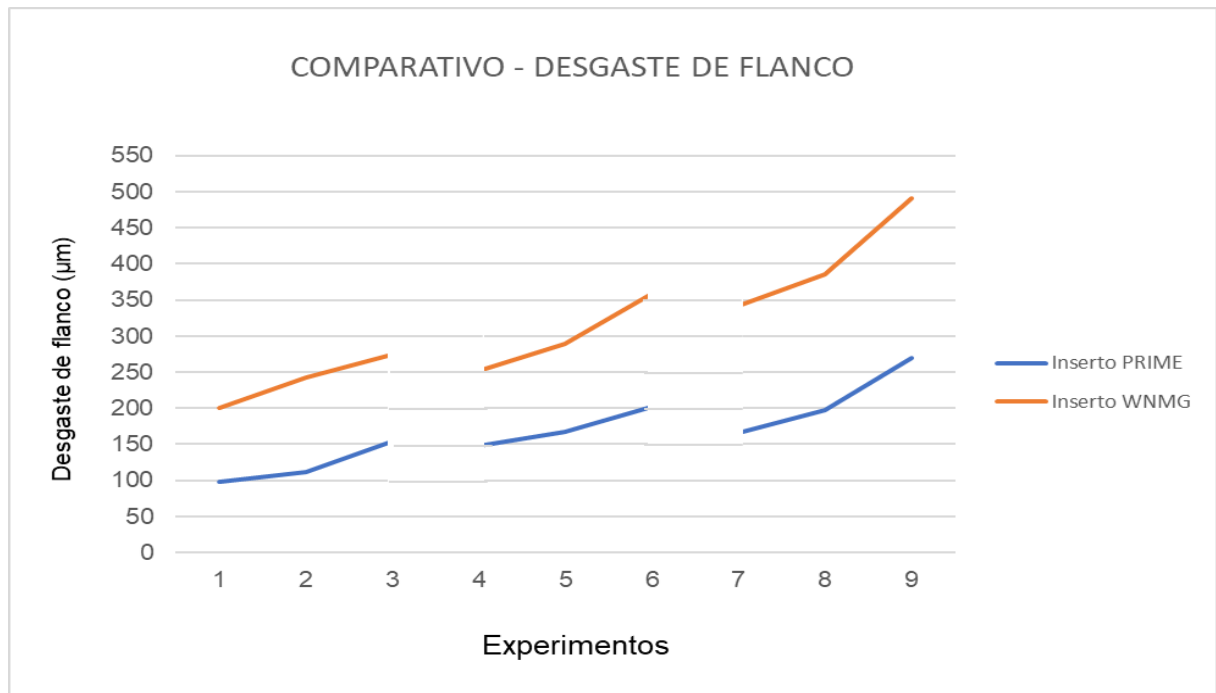


Figura 4.16 - Medições do desgaste na superfície de folga dos insertos

Fonte: O autor (2024).

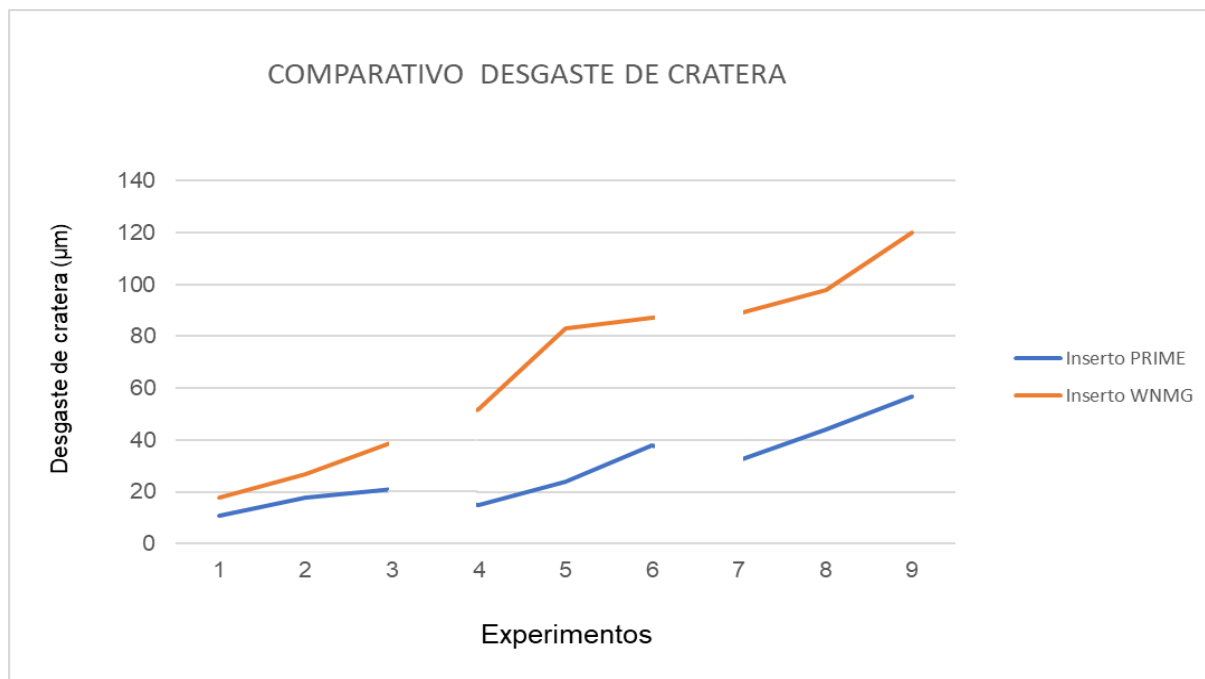


Figura 4.17 - Medições do desgaste na superfície de saída dos insertsos

Fonte: O autor (2024).

4.1.8 Avaliação dos mecanismos de desgaste dos insertsos – MEV/EDS

Os desgastes dos insertsos foram analisados após a usinagem de 200pçs (20 metros de comprimento usinado), no microscópio eletrônico de varredura (MEV) e por espectroscopia de energia dispersiva (EDS) para o inserto WNMG, verifica-se a presença de material da peça aderido na superfície de folga. Foram feitas algumas análises de EDS nas regiões 1, 2, 3 e 4 indicadas na Figura 4.18, cujos resultados são apresentados na Tabela 4.3.

A região 1 na superfície de folga do inserto mais distante da aresta de corte está o revestimento preservado, aparecendo os elementos Titânio (Ti) com 59%, Nitrogênio (N) com 17,3%, Carbono (C) 7,5%, Oxigênio (O) 9,2% e Alumínio (Al) com 5% predominando o revestimento Nitreto de Titânio Alumínio. A presença de Oxigênio (O) revela a presença da segunda camada do revestimento, a Alumina. Na região 2 observa-se a presença de elementos da peça, indicando adesão na ferramenta. Na região 3 de coloração mais clara, verifica-se maior percentual de Carbono (C), Oxigênio (O) e Alumínio (Al), elementos do revestimento da ferramenta. Na região 4, área com um desgaste mais acentuado, observa-se a perda do revestimento, expondo o substrato da ferramenta.

Ao observar a região desgastada, conclui-se que os mecanismos de desgaste predominantes são a abrasão (riscos paralelos na direção do fluxo de material), o desgaste adesivo, (também conhecido por attrition) causado pela adesão e arrancamento de grão do substrato da ferramenta, além de possível difusão, causado pelas altas temperaturas desenvolvidas e evidenciadas por algumas áreas desgastadas bastante lisas, típicas de perdas de átomos da superfície da ferramenta.

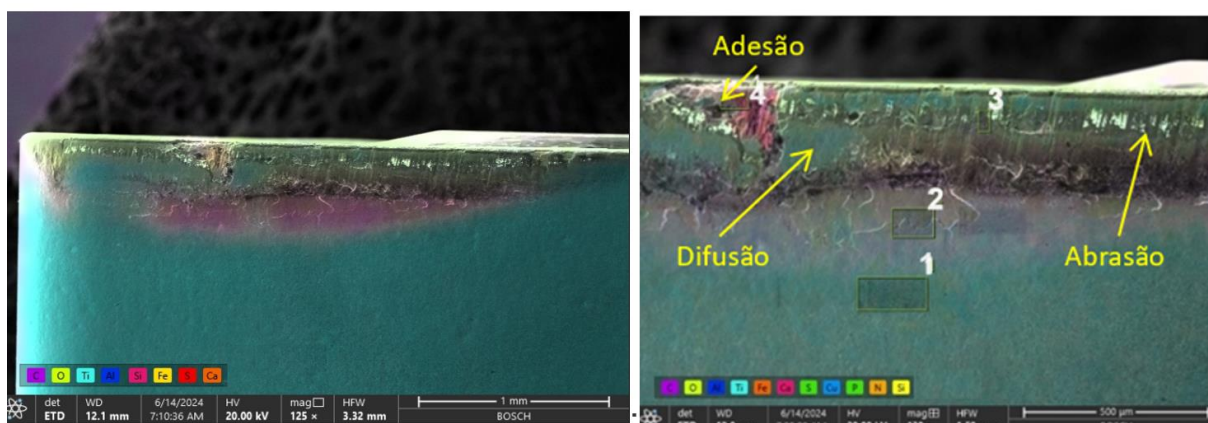


Figura 4.18 - Avaliação MEV/EDS da superfície de folga do inserto WNMG após 200pçs usinadas

Fonte: O autor (2019).

Tabela 4.3 - Resultados das análises de EDS (para o inserto ISO WNMG)

Elemento	Weight Percent (Wt %)												
	C	N	O	Al	Si	Ti	Fe	Cr	Co	Mn	W	S	Ca
Região 1	7.5	17.3	9.2	5.0	0.4	-	59.8	0.8	-	-	-	-	3.3
Região 2	27.3	-	22.8	17.7	-	3.2	5.0	-	-	-	-	20.7	-
Região 3	5.0	-	48.4	45.8	-	0.8	-	-	-	-	-	-	-
Região 4	18.9	-	5.7	-	-	0.8	20.2	0.5	3.4	-	50.5	-	-

Fonte: O autor (2024).

Para o inserto *Prime Turning*, mostra a presença de material da peça de trabalho aderido na superfície de folga com uma maior intensidade, mas com menor desgaste, comparado com o inserto ISO WNMG, após a usinagem de 200 peças (20 metros de comprimento usinado). Análises de EDS foram feitas nas regiões 1, 2, 3 e 4 indicadas da Figura 4.19 e os resultados apresentados na Tabela 4.4.

A região 1 da superfície de folga, mais distante da aresta de corte, está o revestimento preservado, aparecendo predominantemente, em maior quantidade, o Titânio (Ti) com 52,2%, Nitrogênio (N) 13,1%, Carbono (C) 6,7%, Oxigênio (O) 10,8% e o Alumínio (Al) 6,2%, elementos que compõem os revestimentos da ferramenta, Nitreto de Titânio, Alumina e Carbonitreto de Titânio. Nas regiões 2, 3 e 4 os resultados de EDS evidenciam a presença de elementos da peça com maior intensidade, comprovando aderência na superfície de folga da ferramenta. Em nenhuma dessas regiões analisadas o substrato da ferramenta foi revelado, sem a presença de cobalto e tungstênio, elementos maiores constituintes.

De um modo geral, o mecanismo de desgaste predominante na superfície de folga do inserto *Prime Turning* é a adesão, sem evidências claras da presença de abrasão e difusão, como detectados no inserto WNMG. Estes resultados são indicativos de menores temperaturas atingidas e melhores condições de usinagem com estes insertos.

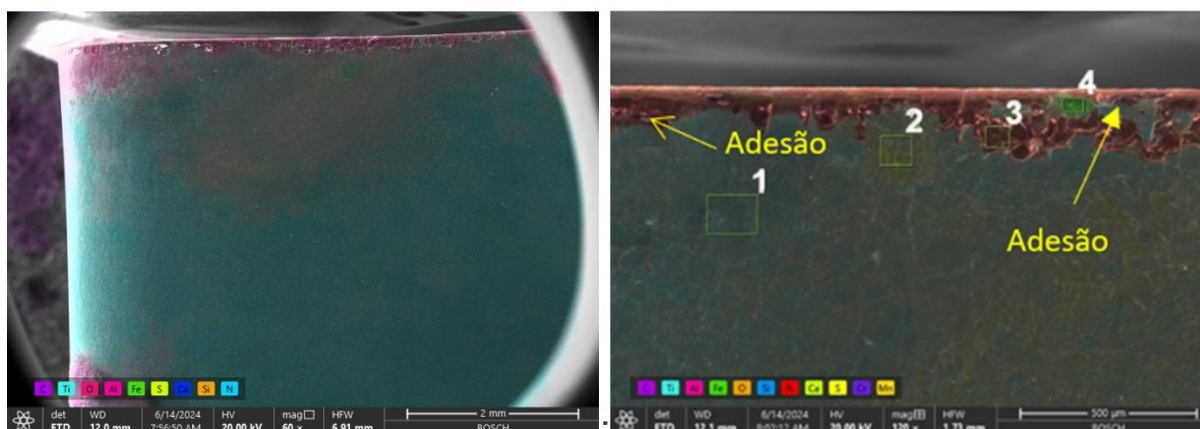


Figura 4.19 - Superfície de folga do inserto *Prime Turning* após 200pçs usinadas

Fonte: O autor (2019).

Tabela 4.4 - Resultados das análises de EDS para o inserto *Prime Turning*

Elemento	Weight Percent (Wt %)												
	C	N	O	Al	Si	Ti	Fe	Cr	Co	Mn	W	S	Ca
Região 1	6,7	13,1	10,8	6,2	0,3	52,2	7,3	-	-	-	-	2,3	1,1
Região 2	5,0	4,5	33,5	1,9	0,5	30,4	19,9	1,5	-	0,9	-	1,2	0,7
Região 3	8,6	-	28,9	36,3	0,2	11,0	11,5	0,4	-	-	-	2,2	0,9
Região 4	10,4	-	34,2	0,5	0,4	26,2	23,8	1,0	-	0,9	-	-	-

Fonte: O autor (2024).

4.1.9 Avaliação das forças de usinagem

Foram realizados os ensaios de análise das componentes da força de usinagem para os eixos X (força passiva, F_p), Y (força de avanço, F_f) e Z (força de corte, F_c) e os resultados da média dos valores força de usinagem encontrada para cada experimento realizados com os comparativos apresentados nas Figuras 4.20, 4.21 e 4.23.

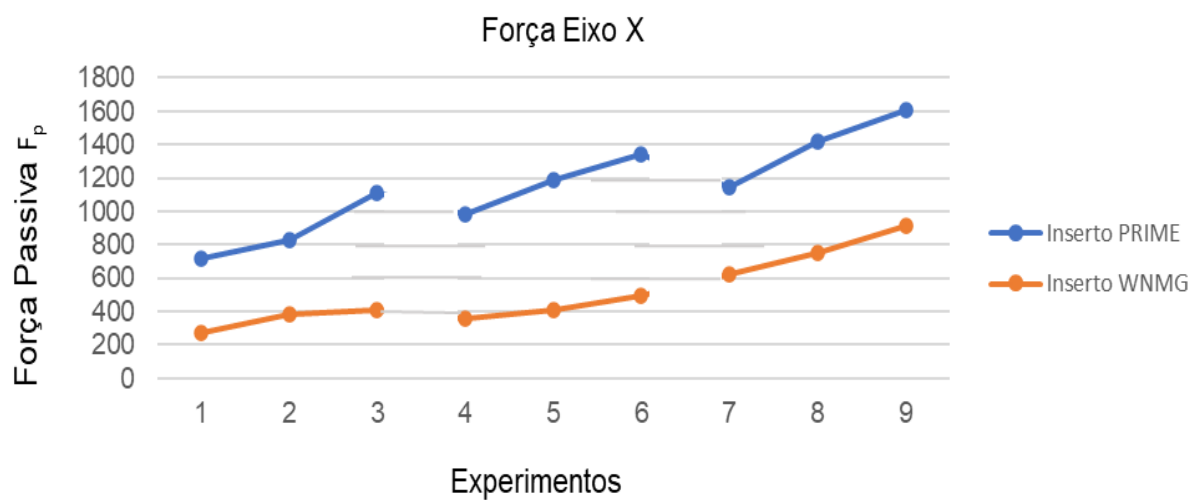


Figura 4.20 - Comparativo força eixo “X” - Força Passiva

Fonte: O autor (2024).

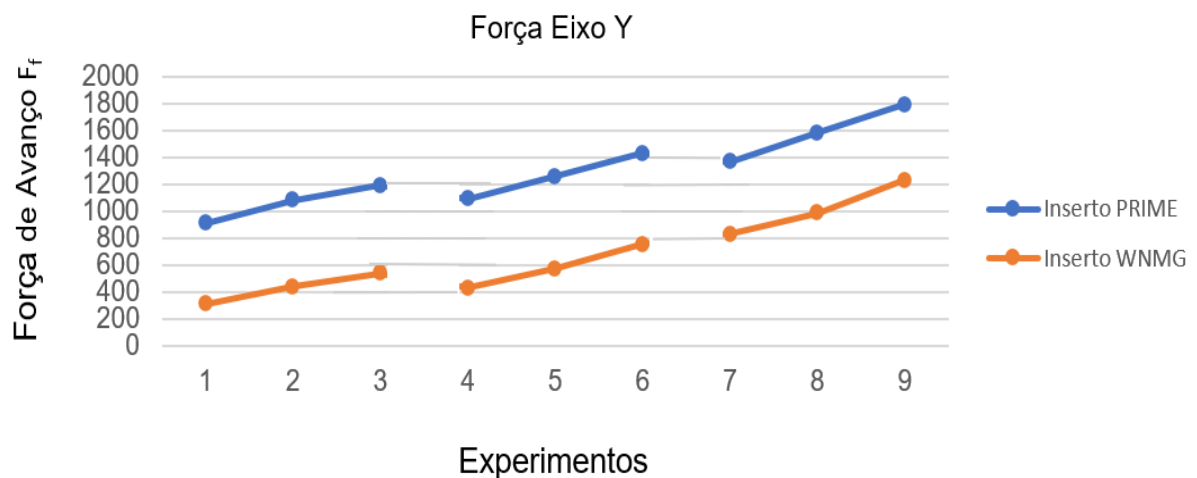


Figura 4.21 - Comparativo força eixo “Y” - Força de Avanço

Fonte: O autor (2024).

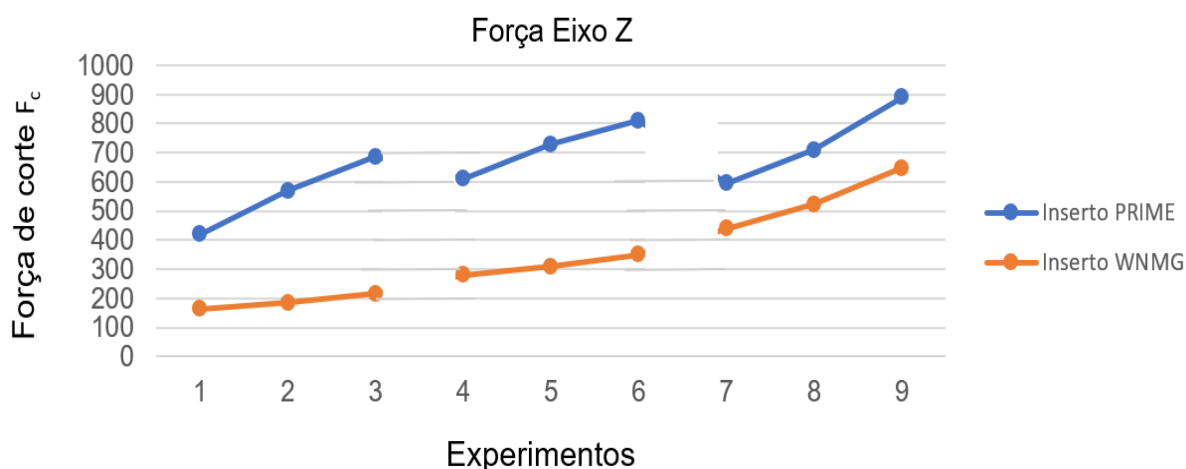


Figura 4.22 - Comparativo força eixo “Z” - Força de Corte

Fonte: O autor (2024).

Nestes experimentos observa-se que as componentes de força de usinagem são maiores com o inserto *Prime Turning*. Isto foi devido ao menor ângulo de posição “ χ_r ” com maior largura de corte “ b ” e maior área de contato cavaco-ferramenta.

Outra observação importante é que, para todas as componentes de força de usinagem, o aumento do avanço (f) e da profundidade de corte (a_p) aumentaram as forças, quando usinando com os dois insertos. Esses resultados são coerentes com a literatura, onde a maior área da seção de corte ($a_p \times f$) vai exigir maiores esforços para vencer o atrito entre a peça-ferramenta-cavaco (MACHADO *et al.*, 2015). O efeito do avanço é mais evidente quando se utilizou a maior profundidade de corte (a_p) = 0,7mm (experimentos 7, 8 e 9).

Interessante observar que nas condições de corte testadas, a força de avanço (f) é a maior componente de força de usinagem, superando a força de corte (f_c), em todas as condições realizadas, consequência das condições de corte, onde altos avanços são utilizados.

4.1.10 Avaliação da temperatura de corte

Na Figura 4.23 são apresentados os resultados da máxima temperatura encontrada no termopar inserido em ambos os insertos de metal duro utilizados nos experimentos. Trata-se das médias de temperaturas máximas encontradas nos três

experimentos desenvolvidos em cada condição de corte (três repetições). Nota-se que o inserto WNMG apresentou temperaturas mais elevadas que o inserto *Prime Turning*, para todas as condições de corte testadas. Os valores de temperaturas são relativamente baixos, mas justificados pela posição de medição, isto é, afastados a 1 mm da aresta de corte. Sabe-se que o gradiente de temperatura no interior dos insertos é muito alto, podendo variar centenas de graus em distancias menores que 0,5 mm, no interior das ferramentas de corte (TRENT & WRIGHT, 2000; MACHADO *et al.*, 2015).

Observa-se também que o incremento da profundidade de corte (a_p) aumenta a temperatura para os insertos “WNMG” e “*Prime Turning*”. O comportamento do avanço foi com tendência a aumentar a temperatura quando se aumenta esta variável nas profundidades de corte (a_p) menor (0,3mm) e maior (0,7mm). Na profundidade de corte (a_p) intermediária (0,5mm) ocorreu o inverso, isto é, tendeu a diminuir a temperatura com o aumento do avanço (f), para ambos os insertos. Possível explicação para este comportamento, é que para esta combinação de parâmetros, o aumento do avanço (f), apesar de tender a aumentar a geração de calor, há também maior dissipação de calor pelo aumento da área de contato cavaco-ferramenta-peça, com balanço favorável para maior dissipação. Este mesmo comportamento do balanço geração/dissipação não foi favorável para a dissipação nas profundidades de corte (a_p) menor e maior.

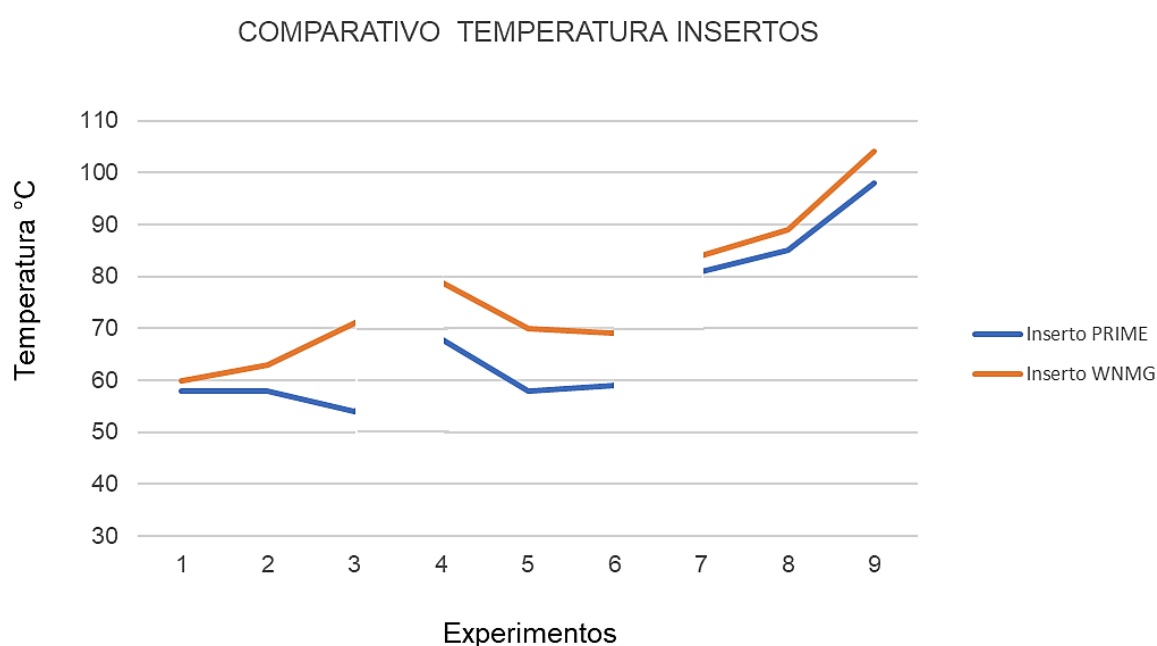


Figura 4.23 - Comparativo de temperatura na usinagem

Fonte: O autor (2024).

4.2 AVALIAÇÃO DA GEOMETRIA DOS INSERTOS SEM QUEBRA CAVACO

Para estudar a influência exclusiva da geometria, foram utilizados os insertos que tiveram superfície de saída retificados, isto é, lisas, com os parâmetros de corte do experimento intermediário para o inserto WNMG 5W e inserto *Prime Turning* 5P conforme parâmetros de corte especificados na Tabela 3.8. Utilizando esses dois insertos, a avaliação da usinagem foi realizada com filmagem utilizando uma câmera de alta velocidade e de alta resolução. Os resultados da usinagem com os insertos WNMG e *Prime Turning* retificados (face lisa) são apresentados na Figura 4.24.

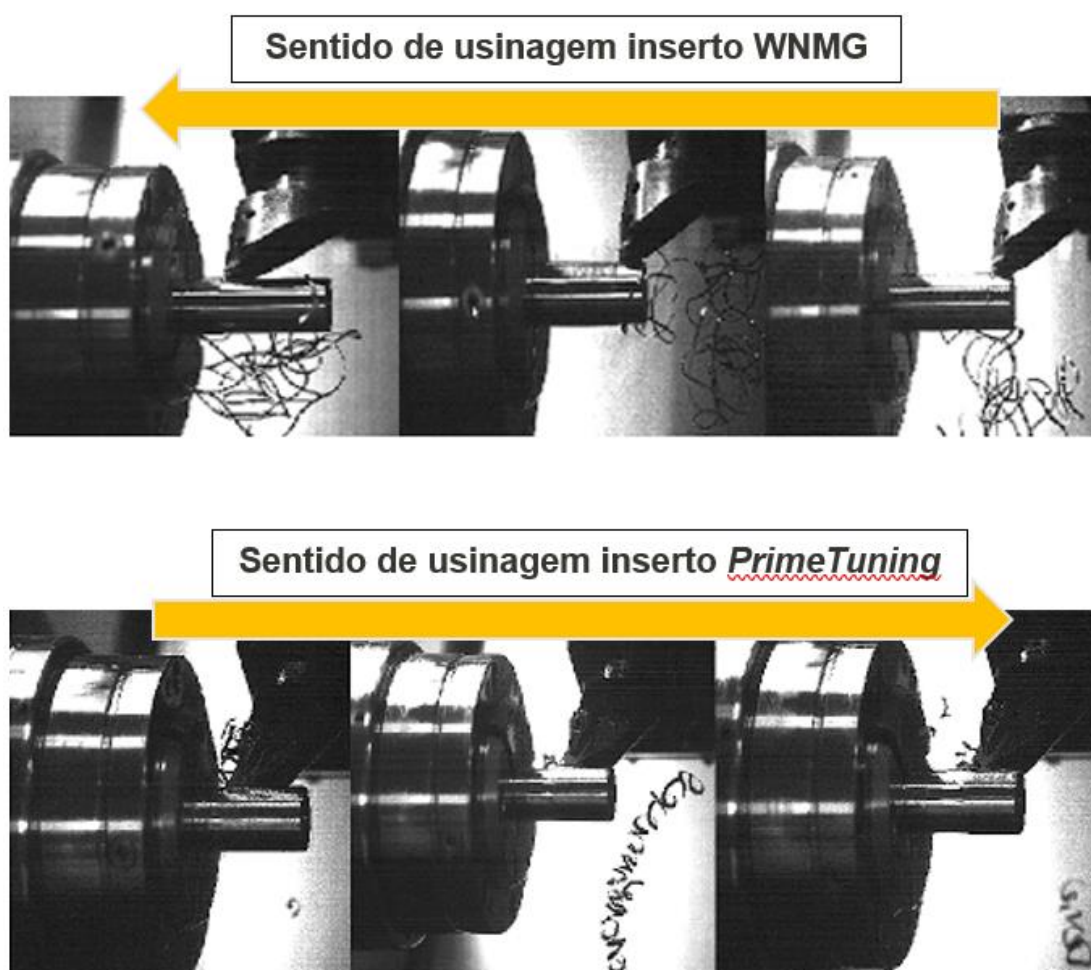


Figura 4.24 - Estágios do processo de usinagem com insertos face plana

Fonte: O autor (2024).

Constata-se que o cavaco gerado para o inserto WNMG retrabalhado foi do tipo contínuo em forma de fita longa, e não houve a ruptura do cavaco durante todo o percurso da usinagem, se enrolando e criando um emaranhado ao redor da peça.

Com o inserto *Prime Turning* retrabalhado o sentido de usinagem é oposto, com menor ângulo de posição " χ_r ". Com esta ferramenta observa-se que os cavacos formados foram contínuos, sendo a maioria da forma helicoidal curta.

Com esta análise constatou-se uma formação de cavaco diferente entre os dois insertos, onde o formato losangular do inserto *Prime Turning* promove maior capacidade de curvatura do cavaco, culminando em maior capacidade de controle do cavaco que a geometria W.

Podem-se considerar com esta análise dos insertos de face plana sem geometria de quebra cavaco a seguinte condição:

A deformação imposta ao cavaco com o inserto *Prime Turning* foi superior ao inserto WNMG, devido o ângulo de posição " χ_r " menor, 25°.

No caso do inserto WNMG, este caso prático com ângulos de posição " χ_r " maior com 95° mostra a necessidade de se tomar medidas adicionais para aumentar a espessura do cavaco (h'), necessitando ajustar os parâmetros de corte e geometria de quebra cavacos dos insertos para promover uma deformação suficiente, com a finalidade de obter a fratura periódica do cavaco. Os cavacos, que já sofreram deformações intensas nos planos de cisalhamentos primário e secundário durante a sua formação, necessitam de uma determinada deformação crítica para se fraturarem, após deixarem a superfície de saída da ferramenta (MACHADO *et al.*, 2015).

4.3 AVALIAÇÃO DA PEÇA USINADA

4.3.1 Caracterização da rugosidade da superfície usinada

A medição rugosidade (R_z) foi realizada a cada 25 peças produzidas, na usinagem das 200 peças de cada experimento para realizar o comparativo. O acabamento superficial com o inserto WNMG mostrou-se um pouco melhor, quando comparado com inserto *Prime Turning* conforme resultados apresentados na Figura 4.25. Estes resultados estão relacionados diretamente com os esforços de usinagem encontrados, onde os insertos WNMG apresentaram menores componentes de força de usinagem que os insertos *Prime Turning* exercem, em função da maior largura de

corte, sugerindo cuidados adicionais com relação a fixação da peça. A profundidade de corte (a_p) teve menor influência que o avanço na rugosidade da peça, mas com tendência a aumentar a rugosidade com seu aumento. O efeito do avanço (f) é mais nitidamente observado, onde o maior avanço apresenta maior rugosidade. Estes resultados são todos coerentes com a literatura, principalmente com relação ao avanço (MACHADO *et al.*, 2015), onde maior área de seção de corte tende a aumentar os esforços de usinagem, aumentando a vibração do sistema e piorando o acabamento. Para o avanço (f), este parâmetro é ligado diretamente com a rugosidade, pois ele é responsável pelo perfil periódico de rugosidade e juntamente com o raio de ponta da ferramenta determinam a rugosidade teórica da superfície usinada. No apêndice 1 são apresentados a avaliação visual (Figuras 7.1 e 7.2) e no apêndice 2 a análise estatística ANOVA com um fator para a rugosidade (Figuras 8.1, 8.2 e 8.3).

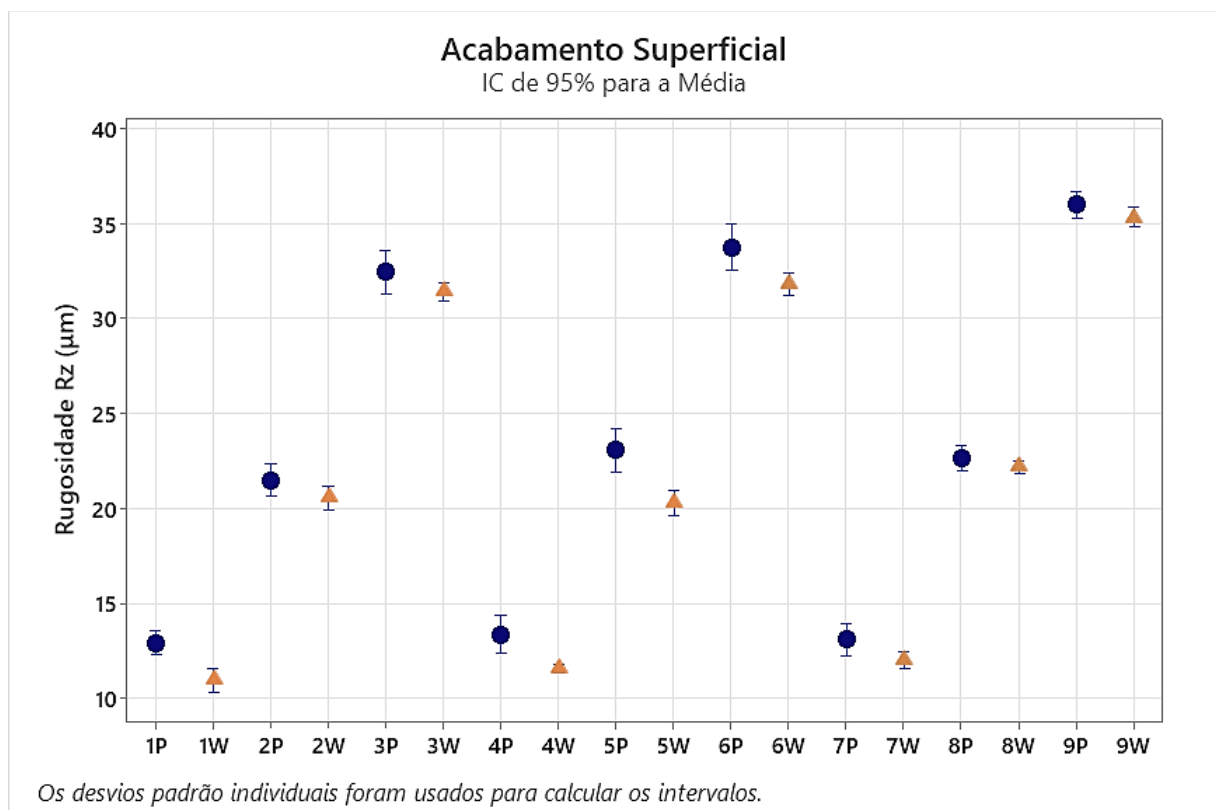


Figura 4.25 - Comparativo acabamento superficial

Fonte: O autor (2024).

4.3.2 Avaliação da circularidade

Os resultados dos desvios de circularidade foram medidos a cada 25 peças, das 200 peças usinadas para cada experimento, sendo a medição realizada a 50mm da face (meio da peça) do corpo de prova, conforme apresentados na Figura 4.26.

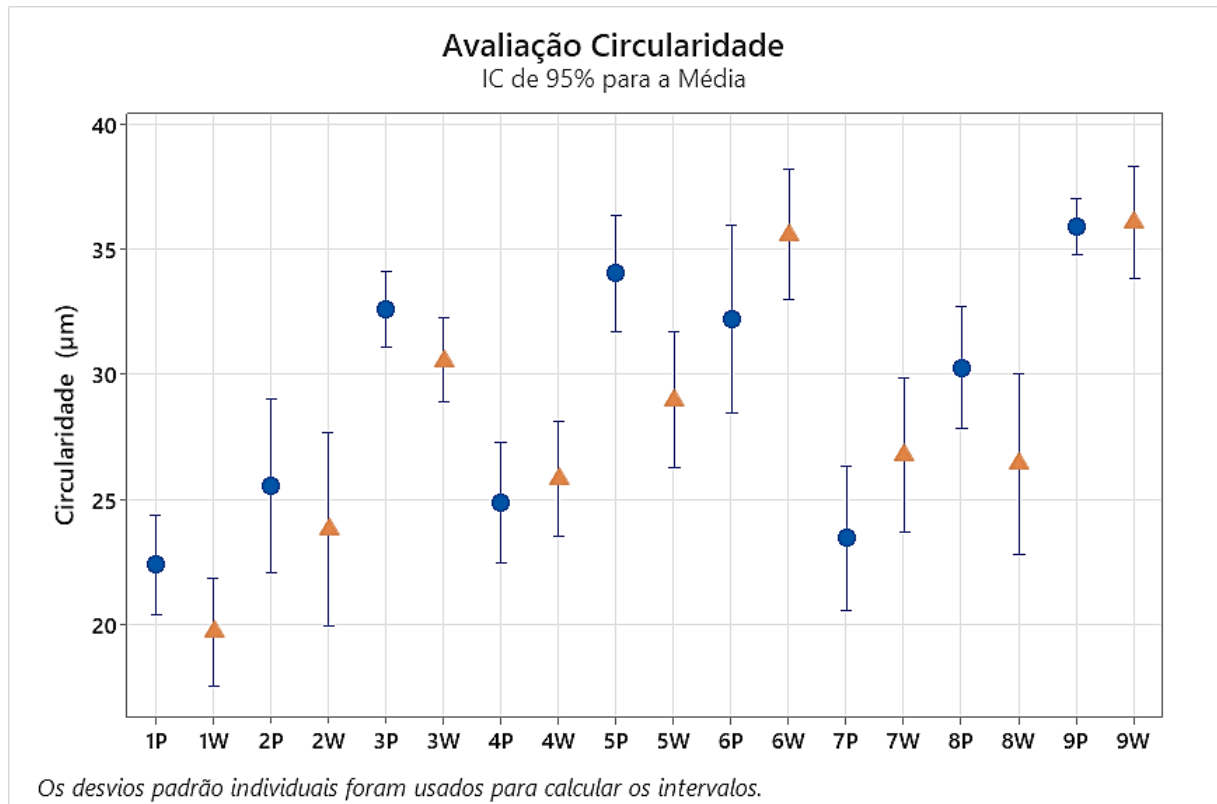


Figura 4.26 - Desvios de circularidade das peças usinadas com os dois insertos

Fonte: O autor (2024)

Observa-se, os menores valores de circularidade foram encontrados para os experimentos 1W, 2W, 3W, 4P, 5W, 6P, 7P, 8W e 9P, isto significa que a ferramenta WNMG apresentou um menor erro de circularidade que a *Prime Turning* em 5 das 9 condições testadas, conforme análise estatística com a avaliação ANOVA apresentada no apêndice 2 (Figuras 8.4, 8.5 e 8.6), pode-se evidenciar estes resultados. Novamente, as justificativas possíveis para esses resultados são as menores forças de usinagem obtidas com este inserto.

4.4 RESUMO DOS EXPERIMENTOS

Na Tabela 4.5 são abordados os pontos relevantes dos resultados obtidos nos ensaios, destacando os experimentos com melhor desempenho, considerando a comparação entre os insertos nas mesmas condições de corte testadas, indicando o percentual de “melhor” desempenho da ferramenta WNMG ou *Prime Turning*.

Tabela 4.5 - Resumo geral dos experimentos com indicação do percentual de desempenho entre os insertos

Tipos de Experimento	Melhor desempenho		Pior desempenho		% de aumento
	Experimento	Valor	Experimento	Valor	
Tipo do cavaco	1P a 9P	Fragmentado	1W a 9W	Fita	N.A.
Fator de empacotamento	8P	7,46	8W	112	1401
Espessura mínima do cavaco	1P	98µm	1W	233µm	137
Espessura máxima do cavaco	6P	289µm	6W	471µm	63
Largura do cavaco	7P	2961µm	7W	1123µm	163
Grau de recalque	9P	0,22µm	9W	0,71µm	222
Acabamento da peça Rz	1W	8,96µ	1P	10,82µm	20
Circularidade da peça	1W	15,82µm	1P	17,89µm	13
Força passiva - Eixo X	1W	270N	1P	720N	166
Força de avanço - Eixo Y	1W	310N	1P	910N	193
Força de corte - Eixo Z	1W	163N	1P	420N	157
Temperatura mínima	3P	54°C	3W	71°C	31
Temperatura máxima	9P	98°C	9W	104°C	6
Desgaste mínimo de flanco	1P	102µm	1W	112µm	10
Desgaste máximo de flanco	9P	270µm	9W	491µm	82
Desgaste máximo de cratera	1P	11µm	1W	18µm	63
Desgaste mínimo de cratera	9P	57 µm	9W	120µm	110

Fonte: O autor (2024).

Com relação aos tipos de cavacos gerados, nos experimentos com os insertos *Prime Turning* apresentaram excelentes resultados, com os cavacos mais fragmentados em formas de lascas ou helicoidais curtos gerados na usinagem, ocupando menor espaço, e um fator de empacotamento 1401% menor, no comparativo dos experimentos dos insertos WNMG 8W e *Prime Turning* 8P.

As forças de usinagem foram superiores para os insertos *Prime Turning* em comparação aos WNMG de 166% no eixo “X”, 193% eixo “Y” e 157% no eixo “Z”, mostrando maior exigência de força no momento da usinagem.

O inserto WNMG apresentou maiores temperaturas no comparativo sendo 31% para a máxima encontrada e de 6% para mínima, o que não representa uma redução considerável na remoção de material, em função do menor ângulo de posição “ χ_r ” para os insertos *Prime Turning* com cavacos mais finos e de maior largura.

Os maiores desgastes de flanco foram predominantes para os insertos WNMG nos experimentos realizados, maiores 10% para o desgaste mínimo e 82% para o desgaste máximo e o desgaste de cratera 63% e 110% respectivamente. Estes resultados indicam um melhor desempenho dos insertos *Prime Turning* no processo de torneamento do aço SAE 4144, com consequentes ganhos de performance e valores de desgaste de flanco menores em 82%, proporcionando ganhos de produtividade devido o inserto *Prime Turning* suportar maiores avanços de corte, mantendo o processo de usinagem estável na linha de produção sem a necessidade de intervenções por parte do operador.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

Após os ensaios de usinagem com os insertos *Prime Turning* e WNMG, seguindo a metodologia experimental adotada e os parâmetros considerados, as seguintes conclusões puderam ser tiradas:

Os cavacos predominantes com os insertos *Prime Turning*, na maioria dos experimentos, foram da classe contínua ou parcialmente contínua, na forma de lascas ou helicoidal curto, não ocorrendo o acúmulo de cavacos no interior da máquina com uma consequente redução do seu volume, mantendo a produção contínua durante os experimentos, sem a necessidade de paradas ou intervenções para a retirada dos cavacos. No caso do inserto ISO WNMG, o cavaco predominante foi da classe contínuo em forma de fita, normalmente longa, com paradas constantes no processo de usinagem para remoção dos cavacos acumulados no interior da máquina.

Na avaliação do acabamento superficial, o inserto WNMG se apresentou melhores resultados, considerando o parâmetro Rz, em aproximadamente 10% melhor quando comparados com o inserto *Prime Turning*.

Conforme evidenciado, o inserto *Prime Turning* imprime maiores esforços de corte, sugerindo a utilização de um contra-ponto e um furo de centro na peça usinada, proporcionando uma maior rigidez na fixação de peça em comprimentos maiores que os utilizados nos experimentos, acima de 3 L/D, afim de evitar vibrações durante a usinagem.

Na medição da temperatura de corte foram evidenciadas diferenças com um aumento para o inserto WNMG na ordem de 6% a 31%, proveniente do aumento da largura e diminuição da espessura do cavaco para o inserto *Prime Turning*, sugerindo uma melhor avaliação para este entendimento.

Todos os 9 experimentos realizados, apresentaram um resultado de cavaco favorável para os insertos *Prime Turning*, inclusive nos testes com insertos retrabalhados de face plana. A deformação do cavaco com uma maior curvatura aconteceu para os insertos com o ângulo de posição " χ_r " menor de 25°, justificando uma melhor condição para a fratura do cavaco e redução dos cavacos longos em forma de fita.

Os insertos *Prime Turning* do tipo "B" utilizados nos experimentos, revelaram um excelente desempenho, o que possibilita maiores avanços de corte em

comparação com torneamento convencional com insertos WNMG. Este aspecto provoca a formação de um cavaco mais fino e largo, o que resulta na distribuição da carga mecânica e da carga térmica por uma área maior da aresta da ferramenta, com menor tensão na ponta da ferramenta e consequente ganho de performance.

A escolha desta ferramenta no caso em estudo, tem um impacto para fluidez do processo, eliminando paradas frequentes para limpeza de máquinas, redução de manutenção por problemas de cavacos longos, redução dos riscos operacionais envolvidos durante o processo de fabricação, beneficiando o transporte e reciclagem do cavaco gerado no processo de usinagem.

De acordo com os resultados obtidos, o “ângulo de posição χ_r ” deve ser levado em conta para usinagem do aço SAE 4144 que obteve o melhor desempenho com os insertos *Prime Turning* de acordo com os ensaios e resultados obtidos.

CAPÍTULO 6

SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Para um melhor aprofundamento dos temas abordados neste trabalho podemos sugerir:

- Avaliar a condição da tecnologia *Prime Turning* para relação do L/D (comprimento por diâmetro) acima de 3 vezes, com a finalidade de comprovar os efeitos no processo de usinagem e o alto esforço de corte encontrado nos experimentos;
- Comparar os efeitos das Tecnologias *Prime “A”* e *Prime “B”* e suas aplicações;
- Fazer um comparativo do torneamento multidirecional com o segundo lado da aresta de corte, que pode ser utilizado em operações de acabamento;
- Variar geometria de quebra cavaco das classes disponíveis dos inserts *Prime Turning*, para avaliação e comparativo de desempenho;
- Fazer uma exploração majorando as condições de corte com o inserto *Prime Turning*, na tentativa de se determinar um limite com desempenho aceitável e com investigação mais detalhada;
- Fazer análise de custo da aplicação do inserto *Prime Turning*;
- Estudo da tecnologia *Prime Turning* em operações de torneamento interno.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALONSO, Thaise *et al.* **Análise experimental do efeito das condições de corte no microfresamento do aço ferramenta AISI H13.** 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/37082>. Acesso em: dez. 2023.

ARAUJO, Anna Carla; CAMPOS, Fábio de Oliveira; MOUGO, Adriane Lopes. **Usinagem para engenharia:** um curso de mecânica do corte, 2020. Disponível em: <https://hal.science/hal-02985451>. Acesso em: fev. 2024.

AMORIM, H. J. DE. **Estudo da relação entre velocidade de corte, desgaste de ferramenta, rugosidade e forças de usinagem em torneamento com ferramenta de metal duro.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2002. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/3791>. Acesso em: dez. 2023.

BARCELOS, Maurício Belchor, *et al.* **Avaliação da vida da ferramenta e mecanismos de desgaste no torneamento convencional e de alto avanço da zona termicamente afetada pelo corte térmico prévio no aço ABNT NBR 6655 grau LN 280.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Maria, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/29296>. Acesso em: out. 2023.

BOOTHROYD, Geoffrey; KNIGHT, Winston A., **Fundamentals of Machining and Machine Tools**, ed.2, 1989, University of Rhode Island, ed.1 MARCEL DEKKER.

BORTOLOTTO, Felipe Carneiro. **Análise da influência dos parâmetros do processo de eletroerosão por penetração sobre o tempo de processo e qualidade superficial da peça.** 2019. Trabalho de Conclusão de Curso, Engenharia Mecânica, Universidade de Caxias do Sul. Disponível em: <https://repositorio.ucs.br/xmlui/handle/11338/5820>. Acesso em: nov. 2023.

CAITANO, T. L. **Furação de aço SAE 4144M com brocas helicoidais de metal duro preparadas com diferentes processos de polimento.** Dissertação (Mestrado) – Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, 2019. Acesso em jan. 2024.

COELHO, Reginaldo T.; SILVA, Eraldo Janonne da. **Materiais para ferramenta de corte em usinagem.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, 2018. Disponível em: <https://encurtador.com.br/xDT15>. Acesso em: fev. 2024.

CRUZ, Alexsandro Santos da. **Características e propriedades dos materiais de ferramentas de corte empregadas nos processos de usinagem.** Trabalho de Conclusão de Curso, Engenharia Mecânica, Universidade Estadual do Maranhão,

2018. Disponível em: <https://repositorio.uema.br/handle/123456789/1188>. Acesso em: fev. 2024.

DALLA CORTE, Natan Felipe Severo. **Análise da influência na força de corte devido à variação do ângulo de inclinação da ferramenta para usinagem com insertos romboidais**. Trabalho de Conclusão de Curso, Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2019. Disponível em: <https://encurtador.com.br/iUYZ7>. Acesso em: jun. 2024.

DIEHL, Glausner Henrique. **Estudo da influência dos parâmetros de corte e da lubrificrefrigeração no acabamento superficial e formação de cavacos na usinagem do aço inoxidável AISI 304**. Trabalho de Conclusão de Curso, Engenharia Mecânica, Universidade do Vale do Taquari, 2023. Disponível em: <https://univates.br>. Acesso em: abr. 2024.

Diniz, Anselmo E.; MARCONDES, Francisco C.; COPPINI, Nivaldo L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 5. Ed. São Paulo: Artliber Editora Ltda 2006.

DUARTE, Jorge Dayvison Celestino *et al.* **Estudo sobre o torneamento de aços inoxidáveis**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade federal de Minas Gerais, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br>. Acesso em: jan. 2024.

DURAN, Matheus Nunes *et al.* **Fresamento frontal de acabamento do AISI 316 em amostras com diferentes percentuais de elementos de liga**. 10º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação São Carlos SP– Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2019. Disponível em: <https://encurtador.com.br/koqHN>. Acesso em: dez. 2023.

FERNANDES, Paulo Fernando dos Santos. **Análise Experimental das Forças de Usinagem em Torneamento de Aço Inoxidável Super Duplex**. Trabalho de Conclusão de Curso, Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <https://encurtador.com.br/jJSZ0>. Acesso em: set. 2023.

FERRARESI, Dino. **Fundamentos da usinagem dos metais**. Editora blucher, 2018.

FERREIRA, Paulo Vicente de Almeida *et al.* **Influência das variáveis de usinagem na formação do cavaco no processo de torneamento dos aços ABNT 1020 e 1045**. Brazilian Journal of Development, v. 8, n. 7, p. 51637-51645, 2022.

FIDÉLIS, Pedro Henrique; PAGOTTO, Carlos Renato; BORATTO, Tales Humberto de Aquino. **Análise do efeito dos parâmetros de corte na rugosidade no torneamento do AL6351-T6 através de planejamento de experimentos**. 11º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação 24 a 26 de maio de 2021, Curitiba, PR, Brasil <https://encurtador.com.br/CORV9>. Acesso em: fev. 2024.

FRANÇA, Pedro Henrique Pires *et al.* **Estudo da temperatura em ferramentas de usinagem com canais de refrigeração internos no torneamento do ferro**

fundido cinzento. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/32428>. Acesso em: fev. 2024.

GAMBARATO, Renato Luiz *et al.* **Definição de processos em ensaios de usinagem para a verificação de acabamento superficial.** Tekhne e Logos, v. 11, n. 1, 2020, p. 83-96.

ISO 3685, **Tool-life testing with single point turning tools**, 2nd Edition, 1993, p. 54.

KLOCKE, Fritz. **Manufacturing Process 1 – Cutting RWTH**, Editora Springer, 2011, p. 471.

KOMANDURI, R., “**Advanced Ceramic Tool Materials for Machining**”, *Int. J of Refractory Materials & Hard Metals*, p. 125-132, 1989.

LACERDA, Rafael Segantin. **Definição automática do fim de vida da ferramenta no processo de fresamento em desbaste pesado em ambiente produtivo.** Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2022. Disponível em: <https://repositorio.unicamp.br/acervo/detalhe/1238522>. Acesso em: fev. 2024.

LEE, Y. M.; YANG, S. H.; CHANG, S. I. **Assessment of chip-breaking characteristics using new chip-breaking index.** *Journal of Materials Processing Technology*. v. 173, p. 166-171, 2006.

LOPES, Matheus Moreira. **Influência da geometria da ferramenta de corte na usinagem de aço Sae 1020.** Trabalho de Conclusão de Curso, Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/38075>. Acesso em: mar. 2024

MACHADO, A. R. *et al.* **Teoria da usinagem dos materiais.** Editora Blucher, 2015.

MACHADO, A. R. **Condições da interface cavaco/ferramenta. Parte I: generalidades.** XI COBEM, 11-13 dez. 1991, p. 381-384.

MARQUES, Neilson Amaral. **Estudo do controle de cavacos nos processos de usinagem.** Trabalho de Conclusão de Curso, Engenharia Mecânica, Universidade Estadual do Maranhão, 2018. Disponível em: <https://repositorio.uema.br>. Acesso em: ago. 2023.

NAVES, Vitor Tomaz Guimarães; SILVA, Marcio Bacci da. **Estudo da influência da aplicação de fluido de corte à alta pressão durante o fresamento do aço ABNT 1045.** *Brazilian Journal of Development*, v. 7, n. 10, p. 97523-97529, 2021.

OLIVEIRA, Carlos Henrique de *et al.* **Análise da rugosidade Ra no fresamento de topo do aço inoxidável duplex uns s32205 utilizando planejamento de**

experimentos. 10º Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção. 2019. Disponível em: <https://encurtador.com.br/htyHN>. Acesso em: set. 2023.

POLLI, Milton Luiz; CARDOSO, Marlon José. **Effects of process parameters and drill point geometry in deep drilling of SAE 4144M under MQL.** Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2018, vol. 40, p. 1-9.

RAMOS JUNIOR, Carlos Eduardo et al. **Otimização da manufatura de compósitos utilizando as ferramentas da engenharia da produção.** GeSec: Revista de Gestao e Secretariado, v. 14, n. 6, 2023. Disponível em: <https://ojs.revistagesec.org.br/secretariado/article/view/2257>. Acesso em: jan.2023

REHFELDT, Alan; ROCHA, João Marcos Silva da; MAEDA, Kevin Takeshi. **Análise de recuperação de cavaco de usinagem para reciclagem.** Trabalho de Conclusão de Curso, Engenharia Mecânica, Universidade Positivo, 2021. Disponível em: <https://repositorio.up.edu.br/jspui/handle/123456789/3492>. Acesso em: dez. 2023.

REIS, Bárbara Cristina Mendanha *et al.* **Influência do material da ferramenta de corte sobre a usinabilidade do aço ABNT 4340 no torneamento.** Matéria (Rio de Janeiro), v. 24, 2019. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/3NHFgDJdyXnWV4vP8y3xzWg/>. Acesso em: fev. 2024.

REIS, Otávio Ribeiro; RIBEIRO, Rodrigo Barbosa; SOUZA, Wallisson Amauri Chaves. **Solicitações Mecânicas e Variações Térmicas provenientes do Processo de Usinagem.** Artigo Científico (Engenharia Mecânica), 2021. Disponível em: <https://repositorio.animaeducacao.com.br/handle/ANIMA/19687>. Acesso em: mar. 2023.

RUBEL, Alexandre Freitas *et al.* **Comparação entre ferramentas intercambiáveis de metal duro no corte do aço com ênfase na geometria da ferramenta.** Pesquisa e Inovação, v. 3, n. 1, 2021. Disponível em: <https://revista.camporeal.edu.br>. Acesso em: dez. 2023.

RUSSI, Felipe Schell; SANTOS Roik DOS, Igor; BLÖDORN, Rodrigo. **Avaliação do desempenho de ferramentas de metal-duro no fresamento de desbaste do aço vp atlas.** 11º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação 24 a 26 de maio de 2021, Curitiba, PR, Brasil. Disponível em: <https://encurtador.com.br/KXZ14>. Acesso em: 15 de set. 2023

SANDVIK, Coromant. **Insertos coroturn prime para torneamento.** 2023. Disponível em: <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/tools/turning-tools/external-turning-tools/coroturn-prime>. Acesso em: jun. 2024.

SEIXAS, Emerson da Silva *et al.* **Influência dos sistemas de lubri-refrigeração MQL e MQL-criogênico no processo de roscamento do aço inoxidável AISI 304L.** Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2022. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/30147>. Acesso em: set. 2023

SILVA, Luan Donizette de Oliveira et al. **Um estudo bibliográfico de materiais para ferramenta de corte em usinagem**. Trabalho de Conclusão de Curso, Engenharia Mecânica, Universidade de Taubaté, 2019. Disponível em: <http://repositorio.unitau.br/jspui/handle/20.500.11874/4515>. Acesso em: fev. 2024.

SILVA, Matheus Schultz Câmara; CECHIN, Rodrigo Lutz. **Análise de produtividade no torneamento externo de desbaste no aço AISI 8630M**. Trabalho de Conclusão de Curso, Engenharia Mecânica, Centro Federal de Educação Tecnológica do Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <https://encurtador.com.br/qrA38>. Acesso em: mar. 2024.

STEMMER, Caspar E. **Ferramentas de Corte** 1. 2 ed., Florianópolis: Editora da UFSC, 2008, p. 314.

TRENT, Edward M.; WRIGHT, Paul, **Metal Cutting** 4th Edition, Butterworth-Heinemann, London, 2000.

VALADARES, Robert; COSTA, Matheus; BARBOSA, Wiver. **O desempenho de ferramentas de corte reafiadas e revestidas com o objetivo de melhorar a sua performance**: Trabalho de Conclusão de Curso, Engenharia Mecânica, Repositório Universitário Ânima, 2023. Disponível em: <https://repositorio.animaeducacao.com.br/handle/ANIMA/35141>. Acesso em: jan. 2023.

VIEIRA, L. P. **Influência da geometria e textura da ferramenta de aço rápido no microtorneamento do alumínio AA1100**. 2018. 136 f. Trabalho de Conclusão de Curso, Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/22466>. Acesso em: fev. 2024.

APÊNDICE 1 – FOTOS ACABAMENTO SUPERFICIAL

Comparativo das peças produzidas em cada experimento, permitindo uma análise visual do acabamento.



Figura 7.1 - Vista da superfície da peça usinada com o inserto ISO WNMG

Fonte: O autor (2024).

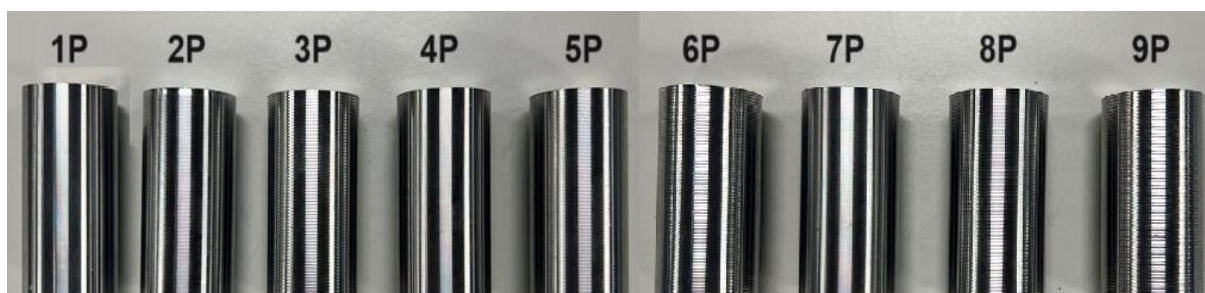


Figura 7.2 - Vista da superfície da peça usinada com o inserto *Prime Turning*

Fonte: O autor (2024)

APÊNDICE 2 – RESULTADOS ESTATÍSTICOS

ANOVA com um fator – Rugosidade dos experimentos 1P, 1W, 2P, 2W, 3P, 3W

Avanço (f) = 0,3mm/rot - 0,5mm/rot - 0,7mm/rot

Profundidade de corte (ap) = 0,3mm – Velocidade de corte vc = 200m/min

Método

Hipótese nula Todas as médias são iguais
Hipótese alternativa Nem todas as médias são iguais
Nível de significância $\alpha = 0,05$

Assumiu-se igualdade de variâncias para a análise

Informações dos Fatores

Fator	Níveis	Valores
Fator	6	1P; 1W; 2P; 2W; 3P; 3W

Análise de Variância

	Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Fator	5	6036,7	1207,34	640,29	0,000	
Erro	84	158,4	1,89			
Total	89	6195,1				

Sumário do Modelo

	S	R2	R2(aj)	R2(pred)
	1,37317	97,44%	97,29%	97,06%

Médias

Fator	N	Média	DesvPad	IC de 95%
1P	15	12,952	1,155	(12,247; 13,657)
1W	15	10,966	1,135	(10,261; 11,671)
2P	15	21,483	1,522	(20,778; 22,188)
2W	15	20,559	1,162	(19,854; 21,264)
3P	15	32,423	2,063	(31,718; 33,128)
3W	15	31,415	0,876	(30,710; 32,120)

DesvPad Combinado = 1,37317

Comparações Emparelhadas de Tukey

Informações de Agrupamento Usando Método de Tukey e 95% de Confiança

Fator	N	Média	Agrupamento
3P	15	32,423	A
3W	15	31,415	A
2P	15	21,483	B
2W	15	20,559	B
1P	15	12,952	C
1W	15	10,966	D

Médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.

Figura 8.1 - Estatística (ANOVA) - Rugosidade dos experimentos 1, 2 e 3

Fonte: O autor (2024)

ANOVA com um fator – Rugosidade dos experimentos 4P, 4W, 5P, 5W, 6P, 6W

Avanço (f) = 0,3mm/rot - 0,5mm/rot - 0,7mm/rot

Profundidade de corte (a_p) = 0,5mm – Velocidade de corte v_c = 200m/min

Método

Hipótese nula Todas as médias são iguais
 Hipótese alternativa Nem todas as médias são iguais
 Nível de significância $\alpha = 0,05$

Assumiu-se igualdade de variâncias para a análise

Informações dos Fatores

Fator Níveis Valores

Fator 6 4P; 4W; 5P; 5W; 6P; 6W

Análise de Variância

Fonte GL SQ (Aj.) QM (Aj.) Valor F Valor-P

Fator	5	6300,1	1260,02	508,89	0,000
Erro	84	208,0	2,48		
Total	89	6508,1			

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
1,57354	96,80%	96,61%	96,33%

Médias

Fator N Média DesvPad IC de 95%

4P	15	13,395	1,831 (12,587; 14,203)
4W	15	11,586	0,441 (10,778; 12,394)
5P	15	23,059	2,020 (22,251; 23,867)
5W	15	20,265	1,209 (19,457; 21,073)
6P	15	33,742	2,168 (32,934; 34,550)
6W	15	31,802	1,032 (30,994; 32,610)

DesvPad Combinado = 1,57354

Comparações Emparelhadas de Tukey

Informações de Agrupamento Usando Método de Tukey e 95% de Confiança

Fator N Média Agrupamento

6P	15	33,742	A
6W	15	31,802	B
5P	15	23,059	C
5W	15	20,265	D
4P	15	13,395	E
4W	15	11,586	F

Médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.

Figura 8.2 - Estatística (ANOVA) - Rugosidade dos experimentos 4, 5 e 6

Fonte: O autor (2024)

ANOVA com um fator – Rugosidade dos experimentos 7P, 7W, 8P, 8W, 9P, 9W

Avanço (f) = 0,3mm/rot - 0,5mm/rot - 0,7mm/rot

Profundidade de corte (ap) = 0,7mm – Velocidade de corte vc = 200m/min

Método

Hipótese nula Todas as médias são iguais
Hipótese alternativa Nem todas as médias são iguais
Nível de significância $\alpha = 0,05$

Assumiu-se igualdade de variâncias para a análise

Informações dos Fatores

Fator	Níveis	Valores
Fator	6	7P; 7W; 8P; 8W; 9P; 9W

Análise de Variância

	Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Fator	5	8050,59	1610,12	1355,12	0,000	
Erro	84	99,81	1,19			
Total	89	8150,39				

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
1,09003	98,78%	98,70%	98,59%

Médias

Fator	N	Média	DesvPad	IC de 95%
7P	15	13,124	1,524	(12,564; 13,684)
7W	15	12,027	0,777	(11,467; 12,586)
8P	15	22,658	1,196	(22,098; 23,218)
8W	15	22,194	0,615	(21,634; 22,754)
9P	15	35,968	1,250	(35,408; 36,528)
9W	15	35,313	0,911	(34,754; 35,873)

DesvPad Combinado = 1,09003

Comparações Emparelhadas de Tukey

Informações de Agrupamento Usando Método de Tukey e 95% de Confiança

Fator	N	Média	Agrupamento
9P	15	35,968	A
9W	15	35,313	A
8P	15	22,658	B
8W	15	22,194	B
7P	15	13,124	C
7W	15	12,027	C

Médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.

Figura 8.3 - Estatística (ANOVA) - Rugosidade dos experimentos 7, 8 e 9

Fonte: O autor (2024)

ANOVA com um fator – Circularidade dos experimentos 1P, 1W, 2P, 2W, 3P, 3W

Avanço (f) = 0,3mm/rot - 0,5mm/rot - 0,7mm/rot

Profundidade de corte (ap) = 0,3mm – Velocidade de corte vc = 200m/min

Método

Hipótese nula Todas as médias são iguais
Hipótese alternativa Nem todas as médias são iguais
Nível de significância $\alpha = 0,05$

Assumiu-se igualdade de variâncias para a análise

Informações dos Fatores

Fator Níveis Valores	
Fator	6 1P; 1W; 2P; 2W; 3P; 3W

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Fator	5	1096,8	219,36	19,04	0,000
Erro	48	553,0	11,52		
Total	53	1649,8			

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
3,39416	66,48%	62,99%	57,58%

Médias

Fator	N	Média	DesvPad	IC de 95%
1P	9	22,402	2,576	(20,127; 24,677)
1W	9	19,706	2,820	(17,431; 21,980)
2P	9	25,57	4,52	(23,30; 27,85)
2W	9	23,80	5,03	(21,53; 26,07)
3P	9	32,611	1,986	(30,336; 34,886)
3W	9	30,569	2,184	(28,294; 32,844)

DesvPad Combinado = 3,39416

Comparações Emparelhadas de Tukey

Informações de Agrupamento Usando Método de Tukey e 95% de Confiança

Fator	N	Média	Agrupamento
3P	9	32,611	A
3W	9	30,569	A
2P	9	25,57	B
2W	9	23,80	B C
1P	9	22,402	B C
1W	9	19,706	C

Médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.

Figura 8.4 - Estatística (ANOVA) - Circularidade dos experimentos 1, 2 e 3.

Fonte: O autor (2024)

ANOVA com um fator – Circularidade dos experimentos 4P, 4W, 5P, 5W, 6P, 6W

Avanço (f) = 0,3mm/rot - 0,5mm/rot - 0,7mm/rot

Profundidade de corte (a_p) = 0,5mm – Velocidade de corte v_c = 200m/min

Método

Hipótese nula Todas as médias são iguais
Hipótese alternativa Nem todas as médias são iguais
Nível de significância $\alpha = 0,05$

Assumiu-se igualdade de variâncias para a análise

Informações dos Fatores

Fator	Níveis	Valores
Fator	6	4P; 4W; 5P; 5W; 6P; 6W

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Fator	5	869,8	173,96	13,81	0,000
Erro	48	604,8	12,60		
Total	53	1474,6			

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
3,54972	58,98%	54,71%	48,09%

Médias

Fator	N	Média	DesvPad	IC de 95%
4P	9	24,88	3,13	(22,50; 27,26)
4W	9	25,85	3,00	(23,47; 28,22)
5P	9	34,05	3,03	(31,67; 36,43)
5W	9	28,99	3,51	(26,61; 31,36)
6P	9	32,21	4,88	(29,83; 34,59)
6W	9	35,59	3,39	(33,21; 37,97)

DesvPad Combinado = 3,54972

Comparações Emparelhadas de Tukey

Informações de Agrupamento Usando Método de Tukey e 95% de Confiança

Fator	N	Média	Agrupamento
6W	9	35,59	A
5P	9	34,05	A
6P	9	32,21	A B
5W	9	28,99	B C
4W	9	25,85	C
4P	9	24,88	C

Médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.

Figura 8.5 - Estatística (ANOVA) - Circularidade dos experimentos 4, 5 e 6.

Fonte: O autor (2024)

ANOVA com um fator – Circularidade dos experimentos 7P, 7W, 8P, 8W, 9P, 9W

Avanço (f) = 0,3mm/rot - 0,5mm/rot - 0,7mm/rot

Profundidade de corte (ap) = 0,7mm – Velocidade de corte vc = 200m/min

Método

Hipótese nula Todas as médias são iguais
Hipótese alternativa Nem todas as médias são iguais
Nível de significância $\alpha = 0,05$

Assumiu-se igualdade de variâncias para a análise

Informações dos Fatores

Fator	Níveis	Valores
Fator	6	7P; 7W; 8P; 8W; 9P; 9W

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Fator	5	1238,6	247,72	20,53	0,000
Erro	48	579,2	12,07		
Total	53	1817,8			

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
3,47375	68,14%	64,82%	59,67%

Médias

Fator	N	Média	DesvPad	IC de 95%
7P	9	23,46	3,73	(21,13; 25,78)
7W	9	26,79	4,00	(24,46; 29,11)
8P	9	30,28	3,14	(27,95; 32,61)
8W	9	26,44	4,69	(24,11; 28,76)
9P	9	35,902	1,450	(33,574; 38,230)
9W	9	36,086	2,932	(33,757; 38,414)

DesvPad Combinado = 3,47375

Comparações Emparelhadas de Tukey

Informações de Agrupamento Usando Método de Tukey e 95% de Confiança

Fator	N	Média	Agrupamento
9W	9	36,086	A
9P	9	35,902	A
8P	9	30,28	B
7W	9	26,79	B C
8W	9	26,44	B C
7P	9	23,46	C

Médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.

Figura 8.6 - Estatística (ANOVA) - Circularidade dos experimentos 7, 8 e 9

Fonte: O autor (2024)