



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE FERRAMENTAS DE
METAL DURO E CERMET NO TORNEAMENTO DO
AÇO ABNT 1045

GUILHERME SOUZA ALEIXO

Belo Horizonte

2020

GUILHERME SOUZA ALEIXO

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE FERRAMENTAS DE
METAL DURO E CERMET NO TORNEAMENTO DO
AÇO ABNT 1045**

Defesa apresentada ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia de Produção da Universidade
Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à
obtenção do título de Mestre em Engenharia de
Produção

Área de concentração; Processo de Fabricação e
Materiais

Orientador: Prof. Dr. Paulo Eustáquio de Faria

Belo Horizonte

2020

Aleixo, Guilherme Souza.

A366a

Avaliação do desempenho de ferramentas de metal duro e cermet no torneamento do aço ABNT 1045 [recurso eletrônico] / Guilherme Souza Aleixo. - 2020.

1 recurso online (162 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Paulo Eustáquio de Faria.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Anexos: f.133-162.

Bibliografia: f.132-140.

1. Engenharia de produção - Teses. 2. Aspereza de superfície - Teses. 3. Desgaste mecânico – Teses. 4. Usinagem – Teses. I. Faria, Paulo Eustáquio de. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 658.5(043)

Ficha catalográfica elaborada pela Bibliotecária Letícia Alves Vieira - CRB-6/2337

Biblioteca Prof. Mário Werneck - Escola de Engenharia da UFMG



Universidade Federal de Minas Gerais
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção

Av. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha - 31.270-901 - Belo Horizonte – MG

Tel.: +55 31 31 3409-4881

www.pos.dep.ufmg.br Email: ppgep@dep.ufmg.br

**Avaliação do desempenho de ferramentas de metal duro e cermet
no torneamento do aço ABNT 1045**

GUILHERME SOUZA ALEIXO

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, como requisito para obtenção do grau de Mestre em ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, área de concentração PESQUISA OPERACIONAL E INTERVENÇÃO EM SISTEMAS SOCIOTÉCNICOS, linha de pesquisa Processos de Fabricação e Materiais. Aprovada em 29 de outubro de 2020, pela banca constituída pelos membros:

Prof(a). Paulo Eustáquio de Faria – Orientador Universidade Federal de Minas Gerais

Prof(a). Alexandre Mendes Abrao Universidade Federal de Minas Gerais

Prof(a). Marcelo Araújo Câmara Universidade Federal de Minas Gerais

Prof(a). Frederico de Castro Magalhães Universidade Federal de Minas Gerais

Belo Horizonte, 09 de novembro de 2020.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO



FOLHA DE APROVAÇÃO

**Avaliação do Desempenho de Ferramentas de Metal Duro e Cermet no
Torneamento do Aço ABNT1045**

GUILHERME SOUZA ALEIXO

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, como requisito para obtenção do grau de Mestre em ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, área de concentração PESQUISA OPERACIONAL E INTERVENÇÃO EM SISTEMAS SOCIOTÉCNICOS, linha de pesquisa Processos de Fabricação e Materiais.

Aprovada em 29 de outubro de 2020, pela banca constituída pelos membros:

Prof(a). Paulo Eustáquio de Faria – Orientador
Universidade Federal de Minas Gerais

Prof(a). Alexandre Mendes Abrao
Universidade Federal de Minas Gerais

Prof(a). Marcelo Araújo Câmara
Universidade Federal de Minas Gerais

Prof(a). Frederico de Castro Magalhães
Universidade Federal de Minas Gerais

Belo Horizonte, 09 de novembro de 2020.

“Pouco conhecimento faz com que as pessoas se sintam orgulhosas. Muito conhecimento, com que se sintam humildes.” Leonardo da Vinci

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Andrea Aparecida Souza e Fernando Luiz Aleixo, por todo amor e dedicação.

À minha namorada Alice, por ser companheira de todas as horas, sempre confiando e incentivando minha busca por mais essa conquista.

Minha gratidão aos meus orientadores, professor Dr. Paulo Eustáquio de Faria e professor Dr. Alexandre Mendes Abrão, excelentes mestres, pelo carinho, amizade, apoio e grande competência em transmitir os conhecimentos necessários à minha formação acadêmica.

Ao meu amigo Pedro Henrique Alves Martins, pela amizade, recepção e condução de meus primeiros passos na instituição.

Aos professores e funcionários da UFMG, em especial ao Programa de Engenharia de Produção e Colegiado de Pós-Graduação por me propiciarem essa formação.

À FAPEMIG, pela concessão de bolsa de estudos.

Aos professores, Dr. Marcelo Araújo Câmara e Paulo Cetlin pelo apoio, atenção e ensinamentos na fase de elaboração desta dissertação.

A técnica Edilene por todas as imagens do MEV. e EDS. e os ensinamentos sobre microscopia e interpretação das imagens.

Aos amigos e colegas dessa jornada especialmente Patrícia, Pedro, Vinicius, Bruna, Michele, Augusto, Sher, Ana, Natalia e Diogo pela companhia constante, amizade e cooperação.

A todos que contribuíram direta e indiretamente para a conclusão deste trabalho, o meu eterno e carinhoso agradecimento.

Meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

A usinagem por torneamento é uma das operações mais utilizadas na indústria metal-mecânica, garantindo elevados padrões de acabamento e tolerâncias apertadas. Neste sentido, a máquina-ferramenta, os parâmetros de corte assim como a ferramenta utilizada, são elementos chave para obtenção de padrões ótimos de produção. O objetivo desta dissertação é estudar o efeito da variação dos parâmetros de entrada com a velocidade de corte (200, 250 e 300 m/min), o avanço (0,1 e 0,2 mm/rev), o material da ferramenta de corte (metal duro e cermet) e a geometria do quebra-cavaco, sobre os parâmetros de saída (rugosidade, forma do cavaco, grau de recalque e desgaste da ferramenta) na operação de torneamento a seco do aço ABNT 1045. Os resultados demonstraram que, em relação à rugosidade, o avanço mostrou-se como o único parâmetro influente na análise estatística. Percebe-se, porém, que a geometria do quebra-cavaco também apresentou influência, pois o comportamento da rugosidade para as ferramentas com quebra-cavaco para acabamento (FP) foram similares. No que se refere à forma dos cavacos, as análises revelaram que o nível mais elevado de avanço gerou cavacos com as maiores espessuras e que o material da ferramenta se mostrou influente sobre a forma do cavaco. O grau de recalque diminuiu em função do aumento da velocidade de corte e avanço. Finalmente, pode-se observar que o mecanismo de desgaste predominante foi adesão e a ferramenta que apresentou melhor desempenho foi a de metal duro com quebra cavaco FP.

Palavras Chaves: torneamento; formas e tipos de cavaco; rugosidade; desgaste da ferramenta; material da ferramenta de corte.

ABSTRACT

The turning machining is one of the most used operations in the metal-mechanical industry, ensuring high standard patterns of finish and tight margin of tolerability. In this sense, a machine tool, the cutting parameters, as well as the tool used, are key elements for the application of optimal production standards. The aim of this dissertation is to study the effect of the variation of the input parameters cutting speed (200, 250 e 300 m/min), feed (0,1 e 0,2 mm/rev), tool material (carbide and cermet) and chip break geometry on the output parameters (machined surface roughness, chip shape, chip thickness ratio and tool wear) in dry turning of AISI 1045 steel. The results indicated that as far as the surface roughness is concerned, feed is the only significant factor, however, chip breaker geometry also has influence, since the roughness behavior for the finishing chip breaker (FP) was similar. Regarding chip shape, the highest level of feed generated chips with the highest thickness and that the tool material was influential on the chip shape. The chip thickness ratio decreased as the cutting speed and feed increased. Finally, it can be seen that the predominant wear mechanism was adhesion and the tool with the best performance was the cemented carbide with FP chip breaker. It was not possible to establish a relationship between roughness maximum flank wear.

Key words: turning; forms and types of chips; roughness; tool wear; cutting tool material.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Grandezas do processo de usinagem por torneamento	27
Figura 2.2 - Partes construtivas da ferramenta de corte	28
Figura 2.3 - Indicação para aplicação de materiais de ferramentas de corte	31
Figura 2.4 - Microestrutura de metal duro convencional e cermet.....	34
Figura 2.5 - Formas de cavacos de usinagem dos metais.....	41
Figura 2.6 - Geometria dos quebra-cavacos	43
Figura 2.7 - Corte ortogonal	45
Figura 2.8 - Corte ortogonal e variáveis envolvidas.....	46
Figura 2.9 - Diagrama da cunha cortante	47
Figura 2.10 - Áreas de desgaste em ferramentas de corte	54
Figura 2.11 - Parâmetros de desgaste das ferramentas de corte	55
Figura 2.12 - Distribuição dos mecanismos de desgaste de ferramentas de corte em função da temperatura	59
Figura 2.13 - Abrasão a dois (a) e três corpos (b)	61
Figura 3.1 - Fluxograma do procedimento experimental	71
Figura 3.2 - Metalografia do aço ABNT 1045 (ampliação de 400 vezes).....	73
Figura 3.3 - Suporte e insertos.....	73
Figura 3.4 - Características das ferramentas de metal duro empregadas.....	75
Figura 3.5 - Durômetro	76

Figura 3.5 - Cortadora	76
Figura 3.6 - Lixadeira	77
Figura 3.7 - Microscópio	78
Figura 3.8 - Torno CNC ROMI modelo Centur	79
Figura 3.9 - Microscópio	80
Figura 3.10 - Microscópio eletrônico de varredura	81
Figura 3.11 - Rugosímetro.....	82
Figura 3.12 - Desenho esquemático	84
Figura 3.13 - Cavaco embutido	85
Figura 3.14 - Pontos equidistantes da circunferência do corpo de prova	86
Figura 3.15 - Montagem do sistema para medição da rugosidade	87
Figura 4.1 - Identificação das superfícies da ferramenta.....	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Comparação das propriedades físicas do cermet (TiC) com o metal duro (WC).....	34
Tabela 3.1 - Composição química dos corpos de prova.....	72
Tabela 3.2 - Descrição dos insertos.....	74
Tabela 3.3 - Combinação dos ângulos entre suporte e geometria dos insertos.....	74
Tabela 3.4 - Parâmetros utilizados no torneamento.....	83
Tabela 4.1 - ANOVA para a rugosidade inicial e final.....	113

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 2.1 - Influência da velocidade de corte avanço e tipo de quebra-cavaco sobre a força de avanço	42
Gráfico 2.2 - Influência do avanço no grau de recalque.....	49
Gráfico 2.3 - Influência do avanço na velocidade de saída do cavaco.....	49
Gráfico 2.4 - Força de corte em função da espessura do material (crescente)	50
Gráfico 2.5 - Força de corte em função da espessura do material (decrecente)	51
Gráfico 4.1 - Grau de recalque para avanço de 0,1 mm/rev	95
Gráfico 4.2 - Grau de recalque para avanço de 0,2 mm/rev	96
Gráfico 4.3 - Desgaste em função do tempo para ferramenta NX 2525 (FP)	106
Gráfico 4.4 - Desgaste em função do tempo para ferramenta MC 6025 (FP).....	107
Gráfico 4.5 - Desgaste em função do tempo para ferramenta MC 6025 (LP).....	107
Gráfico 4.6 - Influência do quebra-cavaco, velocidade de corte e avanço sobre o desgaste da ferramenta MC 6025	108
Gráfico 4.7 - Influência do quebra-cavaco, velocidade de corte e avanço sobre o desgaste da ferramenta NX 2525	109
Gráfico 4.8 - Relação do desgaste da ferramenta NX2525 FP sobre a rugosidade (R_a)	110
Gráfico 4.9 - Relação do desgaste da ferramenta MC6025 FP sobre a rugosidade (R_a)	111
Gráfico 4.10 - Relação do desgaste da ferramenta MC6025 (LP) sobre a rugosidade (R_a)	111

Gráfico 4.11 - Análise de resíduos para a rugosidade inicial	114
Gráfico 4.12 - Análise de resíduos para a rugosidade final.....	115
Gráfico 4.13 - Efeito principal para a rugosidade inicial R_a	116
Gráfico 4.14 - Efeito principal para a rugosidade inicial R_z	117
Gráfico 4.15 - Efeito principal para a rugosidade inicial R_t	117
Gráfico 4.16 - Efeito principal para a rugosidade final R_a	118
Gráfico 4.17 - Efeito principal para a rugosidade final R_z	118
Gráfico 4.18 - Efeito principal para a rugosidade final R_t	119
Gráfico 4.19 - Aumento percentual das rugosidades em função do aumento do avanço de 0,1 para 0,2mm/ver.....	120
Gráfico 4.20 - Influência do tempo de corte sobre a rugosidade (R_a) para a ferramenta NX 2525 (FP)	121
Gráfico 4.21 - Influência do tempo de corte sobre a rugosidade (R_a) para a ferramenta MC 6025 (FP).....	121
Gráfico 4.22 - Influência do tempo de corte sobre a rugosidade (R_a) para a ferramenta MC 6025 (LP).....	122
Gráfico 4.23 - Influência do tempo de corte sobre a rugosidade (R_z) para a ferramenta NX 2525 (FP)	123
Gráfico 4.24 - Influência do tempo de corte sobre a rugosidade (R_z) para a ferramenta MC 6025 (FP).....	124
Gráfico 4.25 - Influência do tempo de corte sobre a rugosidade (R_z) para a ferramenta MC 6025 (LP).....	124
Gráfico 4.26 - Influência do tempo de corte sobre a rugosidade (R_t) para a ferramenta NX 2525 (FP)	125

Gráfico 4.27 - Influência do tempo de corte sobre a rugosidade (R_t) para a ferramenta MC 6025 (FP).....	126
Gráfico 4.28 - Influência do tempo de corte sobre a rugosidade (R_t) para a ferramenta MC 6025 (LP).....	126
Gráfico 4.29 - Influência das ferramentas sob R_a para avanço de 0,1 mm/rev	127
Gráfico 4.30 - Influência das ferramentas sob R_a para o avanço 0,2 mm/rev	128

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 - Imagem dos cavacos coletados ($V_c = 250$ m/min e $a_p = 1,5$ mm).....	44
Quadro 4.1 - Imagem dos cavacos coletados para a ferramenta NX 2525 (FP) e $a_p = 1,0$ mm.....	88
Quadro 4.2 - Imagem dos cavacos coletados para a ferramenta MC 6025 (FP) e $a_p = 1,0$ mm.....	89
Quadro 4.3 - Imagem dos cavacos coletados para a ferramenta MC 6025 (LP) e $a_p = 1,0$ mm.....	90
Quadro 4.4 - Seção longitudinal dos cavacos produzidos pela ferramenta NX 2525 FP	93
Quadro 4.5 - Seção longitudinal dos cavacos produzidos pela ferramenta MC 6025 FP	93
Quadro 4.6 - Seção longitudinal dos cavacos produzidos pela ferramenta MC 6025 LP	94
Quadro 4.7 - Imagens da superfície principal de folga da ferramenta NX 2525 (FP)...	98
Quadro 4.8 - MEV da ferramenta NX 2525 (FP) ampliação (60x).....	99
Quadro 4.9 - Imagens do mapa de elementos da ferramenta NX 2525 (FP) ampliação (60x)	99
Quadro 4.10 - Imagens da superfície principal de folga da ferramenta MC 6025 (FP)	101
Quadro 4.11 - MEV da ferramenta MC 6025 (FP) ampliação (60x)	102
Quadro 4.12 - Imagens do mapa de elementos da ferramenta MC 6025 (FP) ampliação (60x)	102
Quadro 4.13 - Imagens da superfície de saída da ferramenta MC 6025 (LP)	103

Quadro 4.14 - MEV da ferramenta MC 6025 (LP) ampliação (60x)	104
Quadro 4.15 - Imagens do mapa de elementos da ferramenta MC 6025 (LP) ampliação (60x)	105

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANOVA	Análise de variância (<i>Analysis of variance</i>)
CNC	Controle numérico computadorizado
CVD	Deposição química de vapor (<i>Chemical vapour deposition</i>)
DOE	Planejamento Experimental (<i>Design of Experiments</i>)
EDS	Espectroscopia de Energia Dispersiva (<i>Energy dispersive spectroscopy</i>)
HB	Dureza Brinell
HRC	Dureza Rockwell C
Ks	Pressão específica de corte
KT	Profundidade de cratera
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura

LISTA DE ELEMENTOS E COMPOSTOS QUÍMICOS

Al	Alumínio
Al₂O₃	Óxido de alumínio (alumina)
As	Arsênio
C	Carbono
Ca	Cálcio
Co	Cobalto
Cr	Cromo
Fe	Ferro
Mo	Molibdênio
N	Nitrogênio
Ni	Níquel
Nb	Nióbio
NbC	Carboneto de nióbio
P	Fósforo
Pb	Chumbo
S	Enxofre
Sb	Antimônio
Si	Silício
Si₃N₄	Nitreto de silício
SiC	Carboneto de silício
Sn	Estanho
TaC	Carboneto de tântalo
Ti	Titânio
TiAlN	Nitreto de titânio alumínio
TiC	Carboneto de titânio
TiCN	Carbonitreto de titânio
TiN	Nitreto de titânio
W	Tungstênio
WC	Carboneto de tungstênio

LETRAS LATINAS E GREGAS

Letras latinas

Aα	Superfície principal de folga
A'α	Superfície secundária de folga
a_p	Profundidade de usinagem
b	Largura de corte
β	Ângulo de cunha da ferramenta
f	Avanço
F_c	Força de corte
F_f	Força de avanço
F_p	Força de profundidade
F_u	Força resultante de usinagem
P_s	Plano de corte da ferramenta
P_t	Plano de trabalho
VB_{Bmáx}	Desgaste de flanco máximo
V_c	Velocidade de corte
χ_r	Ângulo de posição da ferramenta
χ'_r	Ângulo de posição secundária
λ_o	Ângulo de folga
λ_s	Ângulo de inclinação da ferramenta
γ_o	Ângulo de saída da ferramenta
α_o	Ângulo de folga da ferramenta
ϵ_r	Ângulo de ponta da ferramenta

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO	22
1.1 - OBJETIVO GERAL	25
1.2 - OBJETIVO ESPECÍFICO	25
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	26
2.1 - TORNEAMENTO	26
2.2 - MATERIAIS PARA FERRAMENTA DE CORTE	30
2.2.1 - <i>Metal duro</i>	32
2.2.2 - <i>Cermet</i>	32
2.2.3 - <i>Revestimentos</i>	35
2.3 - FORMAÇÃO DE CAVACO	39
2.4.1 - <i>Grau de recalque</i>	44
2.5 - DESGASTE DA FERRAMENTA	52
2.5.1 - <i>Desgaste de flanco</i>	54
2.5.2 - <i>Desgaste de cratera</i>	57
2.5.3 - <i>Desgaste de entalhe</i>	57
2.6 - MECANISMOS DE DESGASTE.....	58
2.6.1 - <i>Abrasão</i>	60
2.6.2 - <i>Adesão</i>	62
2.6.3 - <i>Difusão</i>	63
2.6.4 - <i>Oxidação</i>	64
2.7 – RUGOSIDADE.....	66
3 - METODOLOGIA	71
3.1 - MATERIAIS.....	72
3.2 – EQUIPAMENTOS.....	75
3.3 – MÉTODOS.....	82
3.2.1 - <i>Tratamento térmico dos corpos de prova</i>	82
3.2.2 - <i>Realização dos ensaios</i>	83
3.2.3 - <i>Coleta e medição da metalografia do aço</i>	83

3.2.4 - Coleta e medição da espessura e metalografia dos cavacos.....	84
3.2.5 - Coleta de dados de desgaste da ferramenta de corte	85
3.2.6 - Medição da Rugosidade.....	86
3.2.7 - Aplicação do método estatístico e análise dos resultados para rugosidade	87
4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO	88
4.1 - ANÁLISE DOS CAVACOS	88
4.2 - DESGASTE DOS INSERTOS.....	97
4.3 - RUGOSIDADE	113
5 - CONCLUSÕES	129
6 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	131
REFERÊNCIAS.....	132
ANEXO	141
APÊNDICE A - INTRODUÇÃO AO PLANEJAMENTO FATORIAL	141
APÊNDICE B – ANÁLISE QUÍMICA DO AÇO ABNT 1045- CERTIFICADO SENAI	143
APÊNDICE C - TABELA COM DADOS DA RUGOSIDADE.....	146
APÊNDICE D - ANÁLISE DE VARIÂNCIA.....	147
<i>D.1 - Rugosidade inicial (Ra) (Material da Ferramenta de corte x Velocidade de corte x Avanço).....</i>	<i>147</i>
<i>D.2 - Rugosidade inicial (Rz) (Material da Ferramenta de corte x Velocidade de corte x Avanço).....</i>	<i>152</i>
<i>D.3 - Rugosidade inicial (Rt) (Material da Ferramenta de corte x Velocidade de corte x Avanço).....</i>	<i>154</i>
<i>D.4 - Rugosidade final (Ra) (Material da Ferramenta de corte x Velocidade de corte x Avanço).....</i>	<i>156</i>
<i>D.5 - Rugosidade final (Rz) ((Material da Ferramenta de corte x Velocidade de corte x Avanço).....</i>	<i>158</i>
<i>D.6 - Rugosidade final (Rt) ((Material da Ferramenta de corte x Velocidade de corte x Avanço).....</i>	<i>160</i>

1 - INTRODUÇÃO

Até meados do século XVIII, o principal material utilizado para a produção de peças, em engenharia, era madeira, a qual era usinada com ferramentas de aço-carbono. A indústria de máquinas e ferramentas com aço só veio a surgir após a Revolução Industrial na Inglaterra, permitindo a usinagem de diversos materiais metálicos (OWEN e BOWEN,1969). Novos e mais resistentes materiais foram desenvolvidos, impulsionando o desenvolvimento de aços-liga como ferramenta de corte (MCGEOUGH, 1998).

Entre o século 1760-1860 viu o estabelecimento de empresas dedicadas à produção dessas máquinas. Maudslay, Whitworth e Eli Whitney, entre muitos outros grandes engenheiros, geraram, em componentes metálicos, as superfícies cilíndricas e planas, roscas, ranhuras, fendas e furos das muitas formas exigidas pelas indústrias em desenvolvimento. O torno, a plaina, a fresadoras, a furadeira e serras, todos desenvolvidos em máquinas rígidas capazes de produzir, nas mãos de bons artesãos, um grande número de peças muito precisas que nunca antes haviam sido possíveis (TRENT, 1984).

Os materiais utilizados na fabricação de máquinas a vapor, a princípio do século XIX, eram o ferro fundido, o latão e o bronze, facilmente usinados com as ferramentas de aço-carbono temperado disponíveis na época (TRENT, 1991). Neste sentido novas técnicas para alteração das propriedades foram apresentadas, tais como tratamentos térmicos (recozimento, normalização, austêmpera e revenimento) junto com a adição de outros elementos químicos (Co, Ni, C, Cr, V e Si). Naquele momento, decidia-se a partir de um conjunto relativamente limitado de materiais disponíveis, aquele que era o mais adequado para a uma dada aplicação em virtude das suas características e de sua facilidade de trabalho (CALLISTER, 2009).

Tal mudança promoveu inovação tecnológica e desenvolvimento de novos materiais para ferramentas de corte, tornando possível encontrar desde um material para ferramenta de corte com aplicação geral em uma vasta gama de operações com desempenho satisfatório em todas elas, até um material específico, que apresentasse um

resultado ótimo somente em uma determinada operação, com parâmetros de corte bem estabelecidos para um tipo de material e operação (KLOCKE,2011).

De maneira geral, pode-se afirmar que, uma ferramenta de corte para usinagem é capaz de cortar um material porque apresenta maior dureza e geometria mais aguda em relação à peça; entretanto, nem todo material com alta dureza é adequado para ser uma ferramenta de corte. Dependendo do tipo de operação, a temperatura na interface cavaco-ferramenta pode ultrapassar 1000 °C, o que pode levar ao desgaste prematuro da ferramenta. Então, cada vez mais se procuram materiais de ferramentas que possam atingir alta temperatura com dureza suficiente para suportar as tensões de corte (DINIZ *et al.*, 2006).

Ferraresi (1970) define como processo de usinagem aquelas operações que, ao conferir à peça a forma, ou as dimensões ou o acabamento, ou ainda uma combinação qualquer desses três itens, produzem cavaco. Segundo a norma DIN 8580, esse conceito aplica-se a todos os processos de fabricação onde ocorre a remoção de material sob a forma de cavaco.

Uma das operações de usinagem mais utilizadas é o torneamento, destinado à geração de superfícies de revolução com auxílio de ferramentas monocortantes. Para tanto, a peça gira em torno do eixo principal de rotação da máquina e a ferramenta se desloca simultaneamente segundo uma trajetória coplanar com o referido eixo (FERRARESI, 1970).

Para executar a operação de torneamento, a seleção do material para ferramenta de corte mais apropriado é, sem dúvida, uma das mais importantes tarefas e que deve ser muito bem definida no processo de usinagem. Desta forma, Diniz *et al.* (2006) afirma que para a seleção do material da ferramenta, uma série de fatores deve ser ponderada, dentre as quais merecem destaque: material a ser usinado, condição da máquina operatriz, forma e dimensões da ferramenta e custo do material da ferramenta.

O material de ferramenta ideal deveria ter a dureza do diamante natural, a tenacidade do aço rápido e a inércia química da alumina, tal material, porém, não existe. Neste sentido Machado *et al.* (2015) considera que nem sempre o melhor material é o que garante uma vida mais longa à ferramenta de corte. Às vezes, a confiabilidade e a

previsibilidade de desempenho são mais importantes e isso é tanto mais relevante quanto maior for o custo do material da peça. No processo de seleção da ferramenta é importante que o engenheiro entenda o tipo de dano que a ferramenta sofrerá (avaria, deformação plástica ou desgaste) e os mecanismos envolvidos para ser capaz de recomendar a ferramenta de corte mais apropriada para cada situação.

Por outro lado, pode-se afirmar que o processo de usinagem envolve diversas variáveis dependentes (tipo do cavaco, força e potência de usinagem, temperatura na região de corte, vibrações, falhas na ferramenta de corte e acabamento da superfície usinada) e independentes (material e geometria da peça, material e geometria da ferramenta, parâmetros de corte, meios lubri-refrigerantes e máquina-ferramenta), resultando em um fenômeno complexo. A interação entre as variáveis pode levar ao surgimento de agentes que aceleram os mecanismos de desgaste da ferramenta e, conseqüentemente, reduzem a sua vida e prejudicam a qualidade superficial da peça, provocando variações dimensionais muitas vezes não aceitáveis (REIS, 2017).

Portanto há necessidade de estudar a influência das variáveis dependentes e independentes no processo de usinagem é fundamental para se atingir os níveis desejados de tolerância dimensional da peça e menor desgaste da ferramenta, garantindo assim, maior produtividade a um menor custo.

1.1 - Objetivo geral

O objetivo desta dissertação é avaliar o desempenho de ferramentas de metal duro e de cermet na operação de torneamento a seco do aço ABNT 1045. Para tanto, serão avaliados os efeitos da variação dos parâmetros de entrada (velocidade de corte, avanço, material da ferramenta de corte (metal duro e cermet) e geometria do quebra-cavaco), sobre os parâmetros de saída (rugosidade, forma do cavaco, grau de recalque e desgaste da ferramenta).

1.2 - Objetivo específico

Os objetivos específicos deste estudo são:

- compreender a influência da velocidade de corte, o avanço e o material da ferramenta (metal duro e cermet) sobre a rugosidade da peça.
- compreender a influência da velocidade de corte, avanço, o material da ferramenta (metal duro e cermet) e a geometria do quebra-cavaco sobre a formação do cavaco e grau de recalque.
- compreender a influência da velocidade de corte, o avanço e o material da ferramenta (metal duro e cermet) sobre o desgaste da ferramenta de corte;
- estabelecer relações entre desgaste, rugosidade e espessura do cavaco buscando compreender o comportamento da operação de torneamento do aço ABNT 1045.
- identificar as condições de corte e material da ferramenta que propiciaram melhor desempenho com relação à rugosidade e ao desgaste no torneamento do aço ABNT 1045.

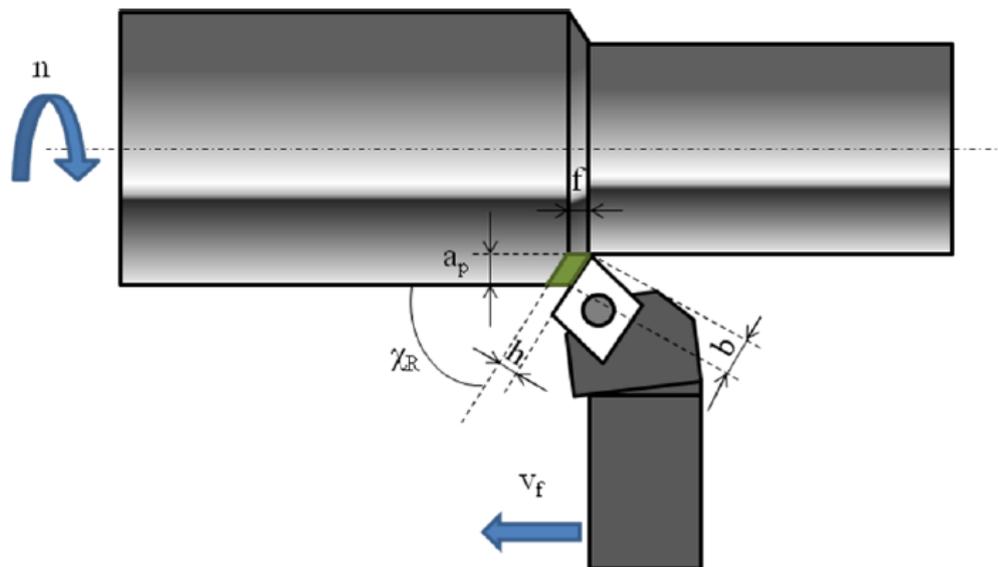
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta seção, contextualiza inicialmente as características da operação de torneamento. Na sequência, são retratados os materiais para ferramentas de corte e revestimentos em relação as suas características e possibilidades de aplicação, enfatizando o metal duro e o cermet no que diz respeito às definições, classificações, propriedades e desempenho de corte. Em seguida, são apresentadas as definições para formação do cavaco e grau de recalque e os tipos de desgastes que ocorrem nas ferramentas durante a operação de desbaste e os possíveis mecanismos de desgaste predominantes durante este processo. Por último as definições dos diferentes tipos de rugosidade e as variáveis de entrada que apresentam influência sobre a rugosidade.

2.1 - Torneamento

Segundo Trent (1984), o torneamento é a operação mais comumente empregada em trabalhos de corte de metal. O material a ser cortado é fixado ao mandril de um torno rotacionado, enquanto a ferramenta, presa firmemente em um porta-ferramenta, move-se em um plano que, idealmente, contém o eixo de rotação da peça. Esse conjunto se movimenta com avanço constante ao longo da geratriz da peça, removendo uma camada de metal para formar um cilindro ou uma superfície de formato mais complexo (TRENT & WRIGHT, 2000). Na Figura 2.1 tem-se algumas grandezas influentes da operação de torneamento (X_r , V_f , f , a_p , b), observadas no plano de referência da ferramenta.

Figura 2.1 - Grandezas do processo de usinagem por torneamento



Fonte: Silva (2012)

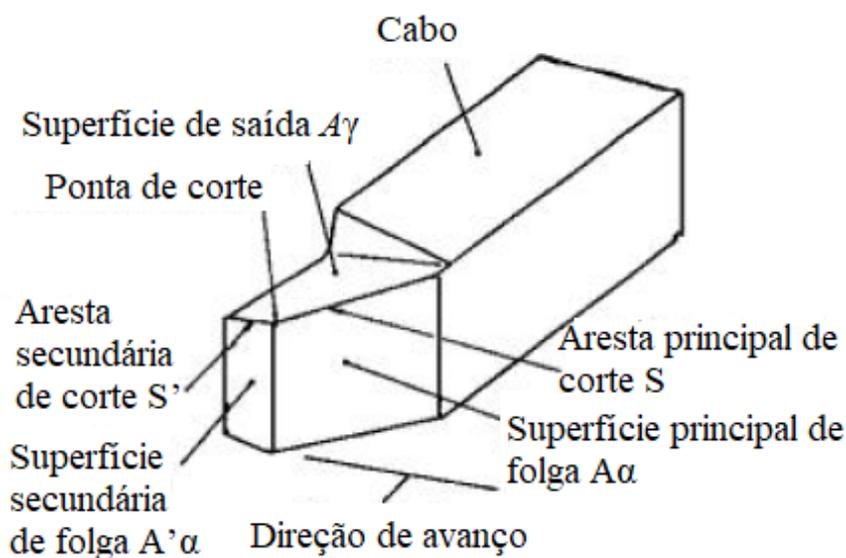
A largura de corte (b) é a largura calculada da seção transversal de corte a ser retirada, medida na superfície em usinagem principal e segundo à direção de corte. A espessura (h) é a espessura calculada da seção transversal de corte a ser retirada e medida, normalmente, à superfície em usinagem principal e segundo a direção perpendicular à direção de corte (MACHADO *et al.*, 2015).

Segundo Machado *et al.* (2015), o ângulo de posição da aresta principal de corte (χ_r) é formado pelos planos de corte da ferramenta (P_s) e admitido de trabalho (P_f). É sempre positivo e situa-se sempre fora da cunha cortante, de forma, que o seu vértice indica a ponta de corte, no qual este ângulo indica a posição da aresta de corte. Segundo Shaw (1986), dentre os parâmetros de corte, a velocidade de corte (V_c) é a taxa na qual a superfície não cortada da peça passa pela aresta de corte da ferramenta, expressa normalmente em m/min. O avanço (f) é a distância percorrida pela ferramenta por revolução da peça, e a profundidade de usinagem (a_p) é a espessura ou profundidade de penetração da ferramenta medida perpendicularmente ao plano de trabalho, que é definido pelas direções de avanço e da velocidade de corte da ferramenta. A partir desses três parâmetros, é possível determinar a taxa de remoção do material. (Equação 2.1), parâmetro usado para medição da eficiência da operação.

$$Q = V_c \cdot f \cdot a_p \quad (\text{mm}^3/\text{min}) \quad (2.1)$$

Elementos geométricos constituintes de uma ferramenta de corte, apresentados na Figura 2.2 é um dos fatores de maior influência no torneamento. Segundo Nascimento e Abrão (2000), através das variações da geometria de corte e os parâmetros de corte consegue-se calcular as forças de corte e conseqüentemente o desgaste da ferramenta que é crucial para avaliar a vida da ferramenta.

Figura 2.2 - Partes construtivas da ferramenta de corte



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

Conforme a norma NBR 6163 a ferramenta de corte para torneamento é composta de:

- **Cunha de corte:** formada pelas superfícies principal de folga e de saída da ferramenta. Através do movimento relativo entre a peça e a ferramenta, formam-se os cavacos sobre a cunha de corte.
- **Superfície de saída $A\gamma$:** é a superfície da cunha de corte sobre a qual o cavaco se desliza.
- **Superfícies de folga:** é a superfície da cunha de corte, que determina a folga entre a ferramenta e a superfície em usinagem. Distinguem-se a superfície principal de folga ($A\alpha$) e a superfície secundária de folga ($A'\alpha$).

- **Arestas de corte:** são as arestas da cunha de corte formada pelas superfícies de saída e de folga. Deve-se distinguir a aresta principal de corte (S) e a aresta secundária de corte (S’):
- **Aresta principal de corte S:** é a aresta de corte cuja cunha de corte, observada no plano de trabalho, e para um ângulo da direção de avanço $\phi = 90^{\circ}$, indica a direção de avanço.
- **Aresta secundária de corte S’:** é a aresta de corte cuja cunha de corte, observada no plano de trabalho, e para o ângulo da direção de avanço $\phi = 90^{\circ}$, indica a direção contrária a direção de avanço.
- **Ponta de corte:** parte da cunha de corte onde se encontram as arestas principal e secundária de corte.
- **Ponto de corte escolhido:** ponto destinado à determinação das superfícies e ângulos da cunha de corte, ou seja, as definições se referem a um ponto da ferramenta, dito ponto de corte escolhido ou “Ponto de Referência” (MACHADO e DA SILVA, 1999).

Estes elementos constitutivos da ferramenta, dão origem as propriedades geométricas mais importantes de uma ferramenta de corte (cunha cortante). Os ângulos da cunha cortante (posição, ponta, inclinação, folga e saída), os quais apresentam diversas funções e são importantes pois influenciam diretamente no processo, logo, deve ser estabelecido cuidadosamente cada valor (MACHADO *et al.*, 2015).

O ângulo de posição tem a função de distribuir as tensões de corte favoravelmente no início e no fim do corte e influenciar na direção de saída do cavaco. O ângulo de ponta tem por função assegurar a resistência da ponta da ferramenta e sua capacidade de dissipar calor. O ângulo de inclinação negativo, por sua vez, deve controlar a direção de saída do cavaco, proteger a aresta da ferramenta contra impactos e, quando positivo, atenuar vibrações. O ângulo de folga evita atrito entre a peça e a superfície de folga da ferramenta. O ângulo de saída influencia decisivamente na força e na potência de corte, uma vez que quanto maior o ângulo, menor será o trabalho de

dobramento e o de encruamento do material do cavaco; logo, o acabamento da peça e a temperatura de corte também serão afetados (MACHADO *et al.*, 2015).

Um dos elementos que mais influenciam na geometria de uma ferramenta de corte é a presença e forma do quebra-cavaco. O quebra-cavaco tem grande importância na distribuição de temperatura na ferramenta e na peça, desenvolvendo sua função de quebrar o cavaco e alterar as forças de corte do processo. Outro fator importante é a forma de saída do quebra-cavaco, que determina um dos componentes da força de corte, principalmente devido à área de contato cavaco-ferramenta (NASCIMENTO E ABRÃO, 2000).

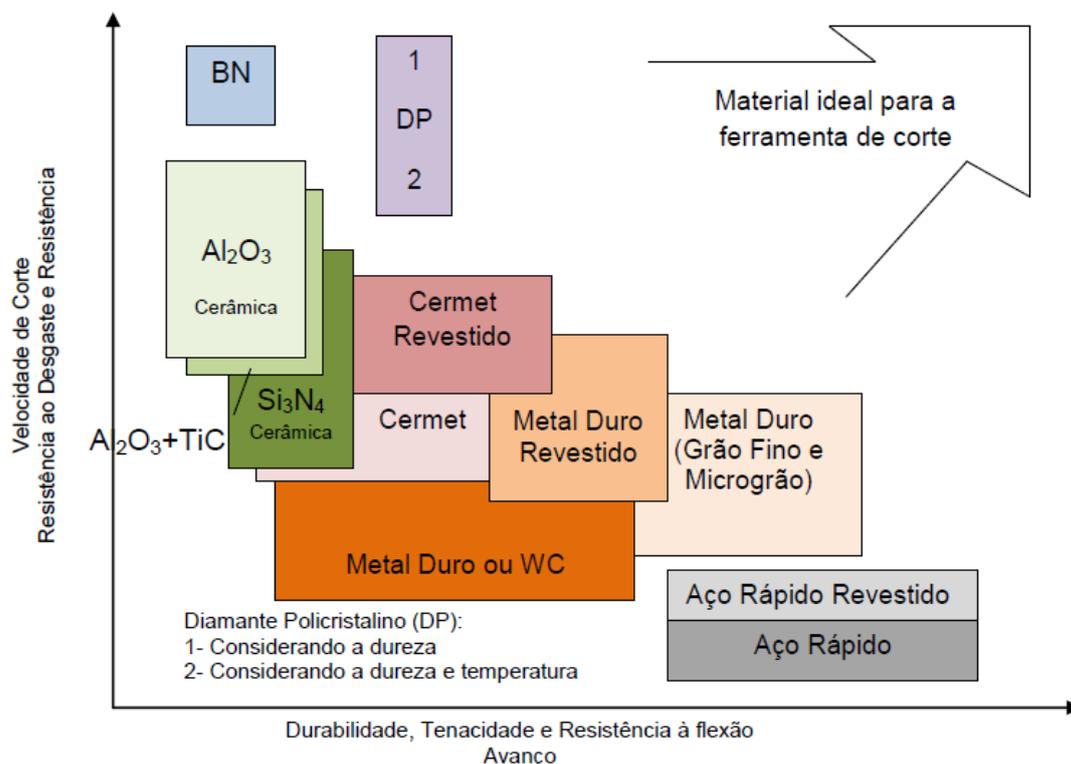
2.2 - Materiais para ferramenta de corte

Segundo Stemmer (2005), Diniz *et al.* (2006) e Machado *et al.* (2015), as principais propriedades que um material de ferramenta deve apresentar são alta dureza; alta tenacidade; resistência ao desgaste; à compressão; ao choque térmico; e ao cisalhamento; boas propriedades mecânicas e térmicas a altas temperaturas e boa inércia química. De acordo com Klocke (2011), os materiais para ferramentas de corte devem ter as seguintes propriedades: dureza e resistência à compressão, resistência à flexão e à tenacidade, resistência ao cisalhamento, fortes ligações atômicas, resistência à alta temperatura, resistência à oxidação, pequena propensão à difusão e à aderência, resistência à abrasão e comportamento de desgaste reprodutível. Percebe-se que a ferramenta de cermet é superior à de metal duro nessas propriedades porque apresenta uma inércia química superior, maior dureza e maior temperatura de oxidação, e esses fatores influenciam em uma maior resistência ao desgaste.

Os materiais para ferramentas de corte devem ser escolhidos de modo a garantir eficiência na operação, aumento de vida da ferramenta e melhoria da operação como um todo. É de fundamental importância a escolha do material adequado para que o processo de usinagem atenda aos requisitos de qualidade da peça final (SILVEIRA, 2017).

Para atender as exigências e as demandas de mercado, existem diversos materiais com propriedades e características específicas que são empregadas na fabricação de ferramentas de corte para a usinagem em geral, conforme apresenta a Figura 2.3.

Figura 2.3 - Indicação para aplicação de materiais de ferramentas de corte



Fonte: adaptado de Klocke (2011)

Os seguintes materiais são, usualmente, empregados na fabricação de ferramentas de corte: aço carbono; aços rápidos; ligas fundidas; metais duros; cerâmicas; diamante e nitreto de boro cúbico (CBN). Apesar dessa grande variedade de matérias para ferramentas de corte existentes, será detalhado apenas o grupo dos metais duros e cermet embasado nos autores FERRARESI (1970), MACHADO *et al.* (2015) e Klocke (2011).

2.2.1 - Metal duro

O metal duro constitui um dos mais importantes grupos de materiais para ferramentas de corte existente. Foi criado na Alemanha a partir da metalurgia do pó, no qual envolve o processo de sinterização dos pós WC e do Co, em faixas de temperaturas entre 1300 e 1500° C. As primeiras pastilhas de metal duro foram produzidas em 1923, utilizando-se uma mistura de carboneto de tungstênio e cobalto (WC-Co), e foram, por um longo tempo, o tipo dominante (SANDVIKEN, 1994).

O metal duro se caracteriza por apresentar elevada dureza e resistência ao desgaste, constituindo-se de grãos de carboneto de tungstênio (WC), com dimensões micrométricas, envolvidos por um elemento metálico ligante, em geral o cobalto (Co). Posteriormente foram adicionados TiC, TaC, NbC para amenizar o problema de craterização das ferramentas no corte de aços. Admite revestimentos, o que melhora ainda mais o desempenho desse material, e possui indicações para utilização na usinagem de quase todos os materiais conhecidos (MACHADO *et al.*, 2015).

O desempenho do metal duro como ferramenta de usinagem é fortemente dependente da composição química e da microestrutura, além de que suas propriedades também estão relacionadas com o tamanho de grão e da quantidade de aglomerante (SANTHANAM *et al.*, 1998).

2.2.2 - Cermet

Os cermets são materiais compósitos cerâmica-metal nos quais um determinado carboneto, de elevada dureza, é envolvido em uma matriz de um metal que exerce a função aglutinadora das partículas (CALLISTER, 2009).

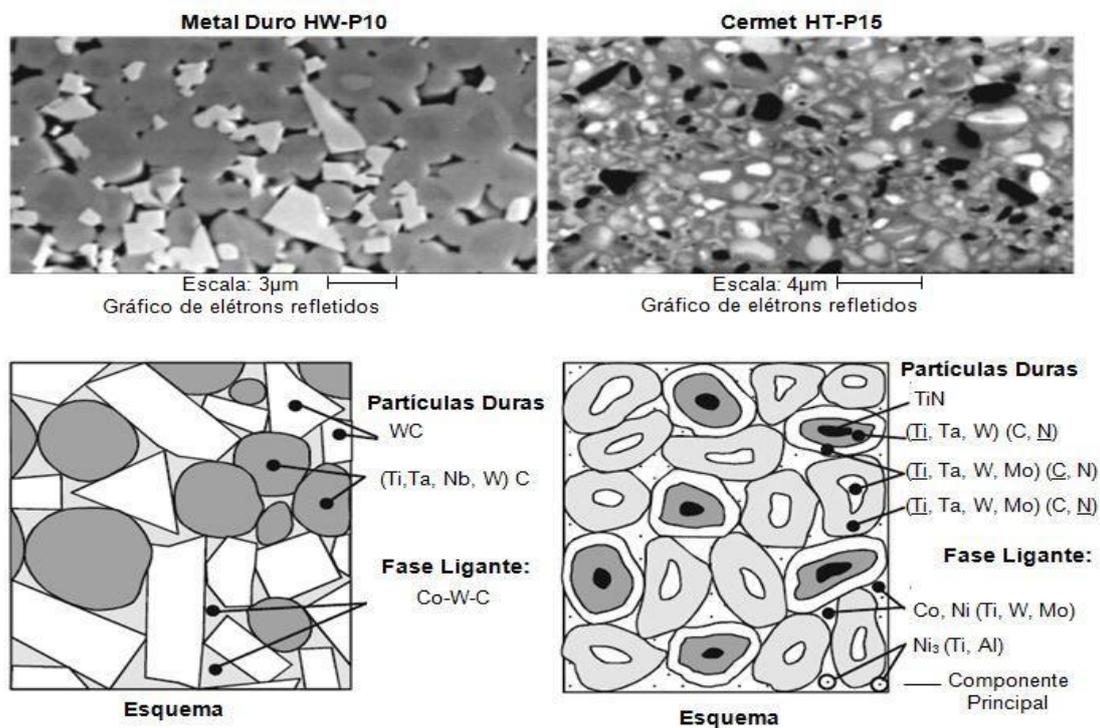
Klocke (2011) afirma que o termo “*cemented carbide*” refere-se ao convencional metal duro com base em carboneto de tungstênio, bem como os cermets baseados em carbonitreto de titânio. Essa definição está de acordo com a classificação da norma ISO 513 (1993), que organiza a notação e a aplicação de materiais para

ferramenta de corte em quatro grandes grupos: carbonetos, cerâmica, nitreto de boro e diamante.

Cermets também são produtos da metalurgia do pó constituídos por partículas cerâmicas ligadas a um metal. O componente cerâmico do cermet proporciona alta dureza a quente e resistência à oxidação, enquanto a fase metálica aprimora ductilidade e resistência ao choque térmico. A união dos componentes cerâmicos com metais, um processo complexo, depende em grande medida da solubilidade, da molhabilidade e das relações de fase dos materiais selecionados (ASM, 1995).

Os cermets podem ser definidos como compostos de fase cerâmica e fase metálica numa microestrutura heterogênea. Segundo Sandvik Coromant (2016) caracteriza o cermet como um metal duro com partículas duras à base de titânio. Inicialmente, eles eram compostos de TiC e níquel. No entanto, cermets modernos não contêm níquel e possuem uma estrutura projetada de partículas-núcleo de carbonitreto de titânio Ti (C, N), uma segunda fase dura de titânio, nióbio e tungstênio (Ti, Nb, W) (C, N) e um ligante de cobalto rico em tungstênio. Ti (C, N) agrega resistência ao desgaste à classe, a segunda fase dura aumenta a resistência à deformação plástica, e a quantidade de cobalto controla a tenacidade. A Figura 2.4 ilustra, de forma comparativa, metal duro e cermet em termos de sua microestrutura e partículas constituintes e a Tabela 2.1 apresenta a comparação entre as propriedades do cermet e do metal duro.

Figura 2.4 - Microestrutura de metal duro convencional e cermet



Fonte: adaptado de Klocke (2011).

Tabela 2.1 - Comparação das propriedades físicas do cermet (TiC) com o metal duro (WC)

Propriedades Físicas	Cermet	Metal Duro
Dureza (HV)	3200	2100
Energia livre de formação (kcal/g- atm 1000° C)	-35	-10
Solubilidade no ferro (wt % a 1250° C)	0,5	7
Temperatura de oxidação (° C)	1100	700
Condutividade térmica (cal/cm s ° C)	0,052	0,42
Coefficiente de dilatação térmica (10-6/° C)	7,2	5,2
Coefficiente de choque térmico*	1,9	27,1

Fonte: Machado *et al.* (2015)

Como os cermetes têm baixa condutividade térmica e elevado coeficiente de expansão volumétrica, as elevadas temperaturas geradas na interface ferramenta-cavaco, associados à expansão de material nessa região prejudica o desempenho do processo de usinagem (MACHADO e DA SILVA, 1999). Esses fatores fazem com que o cermet tenha um baixo coeficiente de resistência a choques térmicos comparado ao metal duro, como apresentado na Tabela 2.1.

No processo de corte, as deformações e o atrito nas superfícies da ferramenta promovem uma grande quantidade de calor na interface ferramenta-peça, elevando a temperatura e diminuindo a dureza do material constituinte da cunha de corte. Preservar as características de dureza em valores os mais próximos possíveis aos iniciais são importantes, pois a dureza de um material cortante deve ser maior que a do outro a ser cortado (MICHELETTI, 1980). Percebe-se que as ferramentas de cermetes apresentam maior dureza com relação as de metal duro.

2.2.3 - Revestimentos

Na maioria das vezes na usinagem dos metais, os materiais das ferramentas são submetidos a condições severas, como alta temperatura, deformação plástica, atrito e elevadas tensões localizadas, provocando fadiga mecânica e térmica. Portanto, as características exigidas dos revestimentos aplicados nas ferramentas são: alta dureza, baixa condutividade térmica, boa tenacidade, capacidade de restringir a aderência do metal usinado sobre a ferramenta, difusão mínima e baixo coeficiente de atrito na temperatura de trabalho (Aguiar, 2012).

Historicamente, a aplicação de revestimentos tem provado ser um meio eficaz para lidar com as exigências encontradas na usinagem. Os revestimentos oferecem uma melhor resistência ao desgaste da ferramenta e uma redução do custo com ferramenta em muitas aplicações de usinagem. Os materiais de revestimento resistentes ao desgaste frequentemente utilizados nas ferramentas de corte são compostos refratários binários ou ternários, tais como TiN , Ti(C, N) e Al₂O₃, que muitas vezes são aplicados como

camadas múltiplas e com o objetivo de promover um aumento significativo na vida da ferramenta (*Jiang et. al., 2006*).

Holmberg e Matthews (2009) afirmam que as propriedades requeridas pelo substrato e pelo revestimento envolvem a resistência do material e atributos térmicos, os quais são determinados pela sua composição e microestrutura, bem como pela porosidade e homogeneidade do material. Na interface entre eles, a aderência e a resistência ao cisalhamento da junção são importantes. Na superfície do revestimento, a reatividade química e a rugosidade devem ser consideradas em adição à tensão de cisalhamento.

Ao final da década de 1960, passou-se a depositar uma fina camada de carboneto de titânio (TiC) da ordem de alguns micrometros sobre um substrato de metal duro (WC-Co), resultando em um aumento da velocidade de corte e da vida da ferramenta. Nesse período, foram experimentados vários materiais como recobrimento, com resultados extremamente satisfatórios. Hoje, os mais aplicados são o nitreto de titânio (TiN), o óxido de alumínio (Al_2O_3), o carboneto de titânio (TiC) e o carbonitreto de titânio (TiCN), sendo que a espessura da camada não deve ultrapassar 5 μm , pois camadas mais espessas não melhoram o desempenho da ferramenta (MARCONDES, 1990).

As primeiras aplicações do revestimento em PVD (deposição física a vapor) na indústria foi em ferramentas de conformação a frio (TIN), e desse ponto em diante muitos outros revestimentos têm sido usados como os TiCN, AlTiN, CrN. Amorim (2002) ressalta a importância do revestimento tribológico com alta dureza, resistência à abrasão e inércia química sobre um substrato tenaz e que apresente alguma dureza.

O processo de deposição CVD (deposição química de vapor), na maioria das aplicações, é utilizado para a produção dos revestimentos TiC, TiN, TiCN e Al_2O_3 , enquanto o processo PVD (deposição física a vapor) é utilizado para o TiAlN. Essa diferença de aplicação ocorre pela distinção das faixas de deposição do revestimento no substrato. Enquanto o CVD, dividido em dois grupos, pode ser aplicado em altas temperaturas (HT-CVD) que vão de 900 a 1100° C ou médias temperaturas (MT-CVD) que vão de 750 a 900°C, o PVD está restrito a uma faixa que vai de 300 a 600° C (PRENGEL, 1998).

Os revestimentos de TiN são largamente empregados industrialmente para melhoria de propriedades mecânicas e vida de ferramentas de corte, matrizes e componentes mecânicos. Uma das mais importantes características destes revestimentos é a resistência da adesão entre a camada de revestimento e o substrato que é necessária para suportar vários tipos de carga como: cíclicas, mecânicas, térmicas e etc (AGUIAR, 2012).

Revestimentos de TiN obtidos por deposição física de vapor (PVD) em baixas temperaturas resultam em notável resistência ao desgaste em corte contínuo de aços não ligados e ligados. Baixas temperaturas de deposição também podem ser obtidas usando deposição química de vapor assistida por plasma (RICHTER *et. al.*, 1996).

A durabilidade do revestimento de TiN depende não somente das propriedades mecânicas do revestimento tais como sua dureza, adesão e resistência ao desgaste, mas também da sua resistência à oxidação. Dentre os vários revestimentos duros, TiN e TiC são os revestimentos cerâmicos mais utilizados em ferramentas de corte em função da elevada dureza, resistência ao desgaste, baixo coeficiente de atrito, resistência a alta temperatura e estabilidade química (AGUIAR, 2012).

A aplicação dos revestimentos de TiC e TiN pelo processo de deposição física à vapor (PVD) e deposição química à vapor (CVD) em ferramentas de aço reduz o desgaste em até seis vezes. Testes de desgaste realizados em aço D3 revestido com TiN apresentaram um desgaste de 4 a 24% do desgaste do mesmo aço sem revestimento dependendo da condição inicial de rugosidade. O aumento da resistência ao desgaste na vida da ferramenta revestida com TiN pode ser esperado quando a rugosidade é menor que a espessura do revestimento. É sabido que o desempenho dos revestimentos sob condições de desgaste é muito dependente da dureza e da qualidade do revestimento depositado no substrato (PIERSO, 1996; JEYACHANDRAN, 2007 apud DAUDT, 2012).

O revestimento de TiCN aumenta a produtividade das ferramentas de corte porque permite maiores avanços e velocidades de corte mais elevadas quando comparado com ferramentas sem revestimento e ferramentas revestidas com TiN (SU *et al.*, 1998). Nos últimos anos, a nova geração de carbonitreto de titânio (TiCN) vem despontando entre as várias alternativas para revestimento. Algumas propriedades

básicas deste revestimento, tais como morfologia, estrutura e composição, são resultantes de uma solução sólida de nitreto de titânio e carboneto de titânio. Dessa forma, esse revestimento incorpora as vantagens e as características dos dois revestimentos. O revestimento de TiCN, em comparação com o TiN apresenta melhor resistência à abrasão e melhor propriedade antiadesiva. A comparação do desempenho dos dois revestimentos mostra que em ensaios de desgaste a resistência ao desgaste do TiCN é de três a quatro vezes superior ao TiN. Para diversos outros materiais de contra peça utilizados em testes de desgaste, o coeficiente de atrito do TiCN é menor que o do TiN (BERTONCELLO *et al.*, 1992). A resistência superior ao desgaste pode ser atribuída à sua alta microdureza e densa morfologia (SU, 1998).

O TiAlN é um excelente candidato a aplicações de alto desempenho por apresentar alta razão resistência/peso e excelente resistência à corrosão, mesmo em altíssimas temperaturas (BOYER, 1996). Entretanto, apresenta baixa condutividade térmica, promovendo altíssimos gradientes de temperatura na interface cavaco-ferramenta durante a usinagem (SHAW, 1986). Além disso, apresentam elevada afinidade química com diversos elementos, podendo aderir sobre a superfície de saída da ferramenta durante a usinagem e gerar desgaste por difusão (MACHADO *et al.*, 2015).

Moreira (2016) observou que os valores da força de corte para os insertos sem e com revestimento (Ti, Al) N + TiN foram maiores, comparados ao inserto revestido com Ti (C, N) -Al₂O₃-TiN. A explicação para este fenômeno se deve ao fato de que durante os testes observou-se maior quantidade de material aderido à aresta de corte dos insertos revestidos com (Ti, Al) N + TiN e sem revestimento, o que altera a geometria da aresta de corte e interfere no valor da força de corte. Observou-se que este fenômeno foi menos intenso com insertos revestidos com Ti (C, N) + Al₂O₃ + TiN. O aumento do avanço contribui para o aumento da força de corte, por promover o aumento da quantidade de material a ser removido pela ferramenta. O comportamento dos insertos foi o mesmo, ou seja, o inserto revestido com Ti (C, N) + Al₂O₃ + TiN apresentou menores valores de força de corte.

Segundo Bressan *et al.* (2000), afirma-se que ocorre uma melhora significativa na resistência ao desgaste de um aço rápido ou metal duro tratado superficialmente com

filmes de TiAlN ou TiCN em comparação com o mesmo material sem tratamento. O revestimento TiAlN mostrou ter resistência ao desgaste superior ao TiCN.

2.3 - Formação de Cavaco

A base para um melhor entendimento de todos os processos de usinagem está no estudo científico da formação de cavacos. Esse estudo tem proporcionado grandes avanços nos processos de usinagem e contribuído para o aperfeiçoamento das arestas de corte, com quebra-cavacos cada vez mais eficientes, além de novos e mais eficazes materiais para ferramentas e a possibilidade de usinar os mais variados tipos de materiais (MACHADO *et al.*, 2015).

Segundo Suarez (2008), um dos fenômenos mais interessantes na usinagem dos metais é a formação do cavaco. Quando dois corpos com grande diferença de dureza, no caso a ferramenta e a peça, encontram-se em contato e deslocam-se em movimento relativo, o material de menor dureza experimenta em maior proporção, uma série de fenômenos mecânicos, que o levam a se deformar plasticamente, até um ponto de máxima tensão, no qual na presença excessiva de defeitos promove ruptura, dando origem ao cavaco.

A formação do cavaco é influenciada por diversos fatores ligados à usinagem, como o desgaste da ferramenta, os esforços de corte, o calor gerado na usinagem, a penetração do fluido de corte, dentre outros. Estão ainda relacionados com o processo de formação do cavaco aspectos econômicos e de qualidade da peça, segurança do operador, utilização adequada da máquina-ferramenta, etc. (DINIZ *et al.*, 2012).

A classificação dos tipos de cavacos propostas pelos pesquisadores se divide em três tipos de grupo (Wright, 2000 e Machado *et al.*, 2015): tipo contínuo, segmentado e descontínuo.

O cavaco contínuo forma-se na usinagem de materiais dúcteis e homogêneos, com pequeno e médio avanço, não havendo interferência devido a vibrações externas

ou à variação das condições de atrito na superfície de saída da ferramenta (FERRARESI, 1970).

O cavaco contínuo ocorre principalmente na usinagem de metais dúcteis (como aços de baixa liga), sob pequenos e médios avanços, com altas velocidades de corte e elevados ângulos de saída da ferramenta. É formado quando o material é recalçado ao chegar na aresta de corte, sem que, no entanto, ocorra o rompimento deste, deslizando então, pela superfície de saída da ferramenta (AMORIM, 2002).

O cavaco descontínuo em geral, surge em consequência da formação de um fluxo de elementos de cavacos quebrados em pedaços durante a usinagem de materiais frágeis, uma vez que não são capazes de suportar grandes deformações sem fraturar. Entretanto, baixas velocidades de corte, ângulo de saída pequeno e elevados avanços também podem produzir cavacos descontínuos em matérias com baixa ductibilidade (MACHADO *et al.*, 2015).

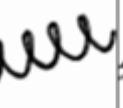
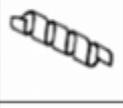
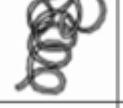
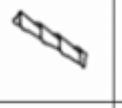
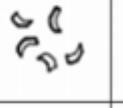
Os cavacos segmentados são caracterizados por grandes deformações continuadas em estreitas bandas entre segmentos com pouca ou quase nenhuma deformação nos seus interiores. Tal fenômeno pode ser entendido como a diminuição na resistência mecânica do material por causa do aumento da temperatura (provocado pelas deformações plásticas locais nas bandas de cisalhamento) iguala, ou excede, o aumento da resistência mecânica causado pelo endurecimento a frio (MACHADO *et al.*, 2015). Com isso, a instabilidade termoplástica durante a formação do cavaco segmentado promove a redução do escoamento do material devido à redução de dureza gerada pelo aumento da temperatura (SHAW, 1986).

No cavaco segmentado segundo Suarez (2008) o cisalhamento para formar o cavaco começa num plano particular, quando as tensões impostas pelo movimento da ferramenta contra a peça excedem o limite de escoamento do material da peça. A energia associada com esta deformação é convertida imediatamente em calor. Se o material apresenta baixa condutividade térmica, este calor fica retido nessa região de deformação, diminuindo sua resistência ao cisalhamento localmente. Com isso, as deformações continuam no mesmo plano, ao invés de mudarem para o plano adjacente, menos aquecido. Com o prosseguimento da deformação, existe uma rotação no plano de cisalhamento, que começa a se afastar da ponta da ferramenta e se movimenta sobre

a superfície de saída. Essa rotação contínua prevalece até que o aumento da força, devido a essa rotação, exceda a força necessária para deformar plasticamente o material mais frio em outro plano mais favorável. Como resultado, ocorre um processo chamado de “cisalhamento termoplástico catastrófico” ou “cisalhamento adiabático”, levando a formação de um processo cíclico de produção de segmentos de cavacos, caracterizando, assim uma forma de serra dentada.

Quanto a sua forma, os cavacos podem ter a seguinte classificação: em fita, helicoidais, em espiral, em lascas ou pedaços (MACHADO *et al.*, 2015). A norma ISO 3685 (1993) faz uma classificação mais detalhada das formas dos cavacos de acordo com a Figura 2.5.

Figura 2.5 - Formas de cavacos de usinagem dos metais

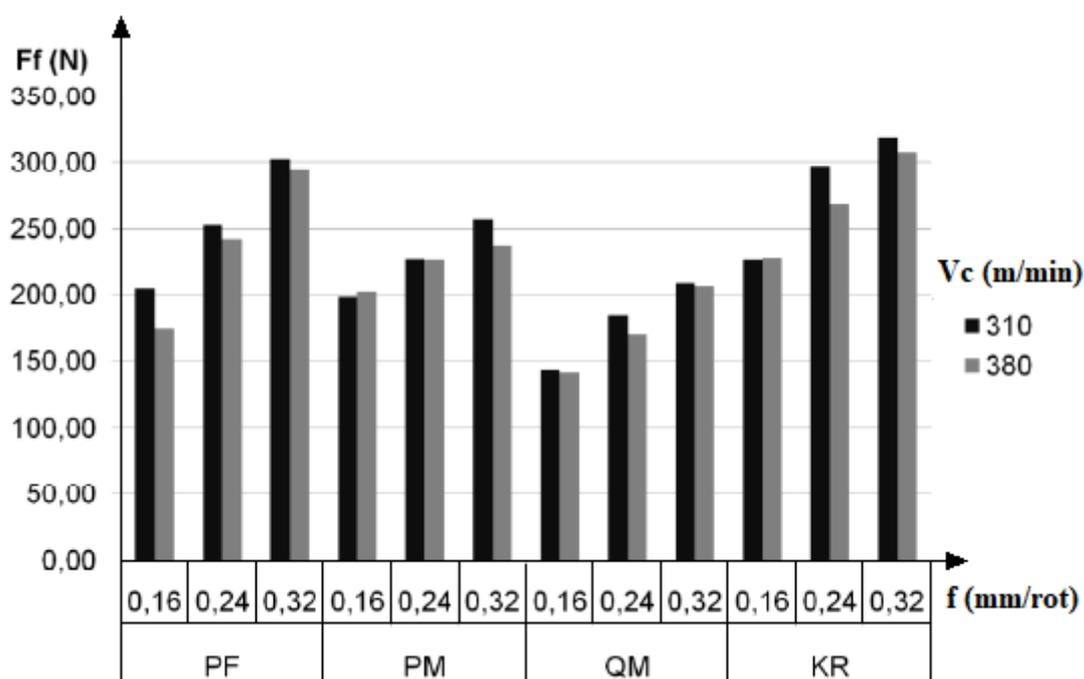
1- Cavaco em fita	2- Cavaco tubular	3- Cavaco espiral	4- Cavaco hel. tipo aruela	5- Cavaco hel. cônico	6- Cavaco em arco	7- Cavaco fragmentado	8- Cavaco tipo agulha
							
1-1- Longo	2-1- Longo	3-1- Plano	4-1- Longo	5-1- Longo	6-1- Conect.		
							
1-2- Curto	2-2- Curto	3-2- Cônico	4-2- Curto	5-2-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

Fonte: ISO 3685 (1993)

Segundo Pereira (2011), que estudou a variação do tipo de quebra-cavaco no torneamento do aço ABNT 1045 com ferramentas de metal duro, percebeu que o tipo de quebra-cavaco, a velocidade de corte e o avanço influenciam diretamente na força de corte e conseqüentemente na formação do cavaco. O aumento da velocidade de corte reduziu a força de corte devido à redução do atrito entre interface ferramenta-peça. Em

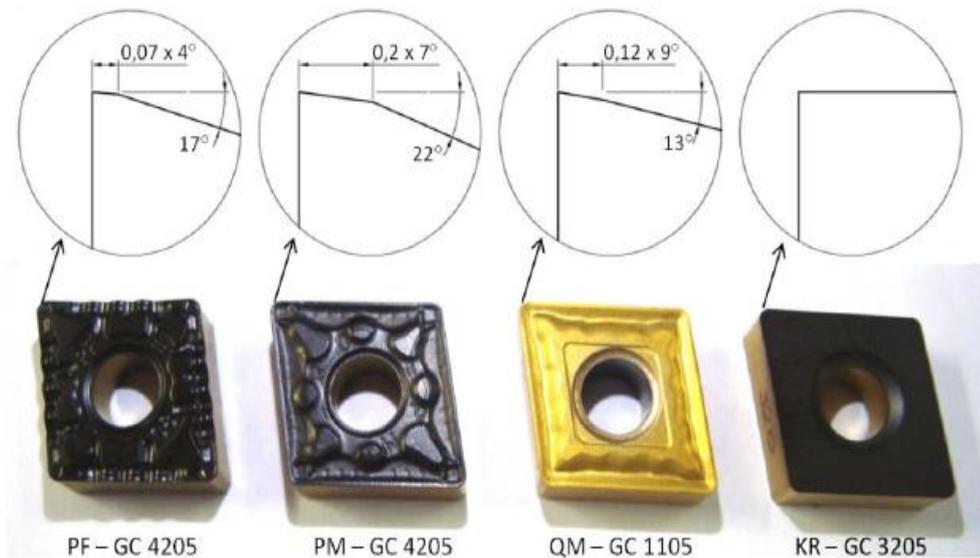
decorrência da redução da força de corte, alinhada ao aumento de temperatura na interface ferramenta-peça, o material se tornou mais dúctil na sua parte superficial. Logo, a capacidade de absorver energia para cisalhar o material aumentou, promovendo a formação de cavacos mais contínuos (PEREIRA, 2011). O Gráfico 2.3 demonstra a influência da velocidade de corte avanço e tipo de quebra-cavaco sobre a força de corte. A Figura 2.6 serve de suporte para compreensão do Gráfico 2.3, no qual apresenta o perfil geométrico dos quebra-cavacos utilizados nos ensaios.

Gráfico 2.1 - Influência da velocidade de corte avanço e tipo de quebra-cavaco sobre a força de avanço



Fonte: Pereira (2011)

Figura 2.6 - Geometria dos quebra-cavacos



Fonte: Pereira (2011)

O aumento do avanço, promove maior atrito na interface cavaco-ferramenta e consequentemente aumento das forças de corte. O aumento dessas forças junto ao quebra-cavaco com maior ângulo de inclinação tem a tendência de promover a formação de cavacos mais descontínuos pois facilitam a quebra do material (PEREIRA, 2011).

O mesmo fenômeno foi relatado por Reis (2017), ou seja, o avanço influenciou na forma dos cavacos. De maneira geral, o aumento de f , associado ao aumento de a_p , levou a alteração da forma do cavaco, iniciando na forma de fita, passando pelo tipo helicoidal, até chegar no cavaco em arco e fragmentado. Isso pode ser observado no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 - Imagem dos cavacos coletados ($V_c = 250$ m/min e $a_p = 1,5$ mm)

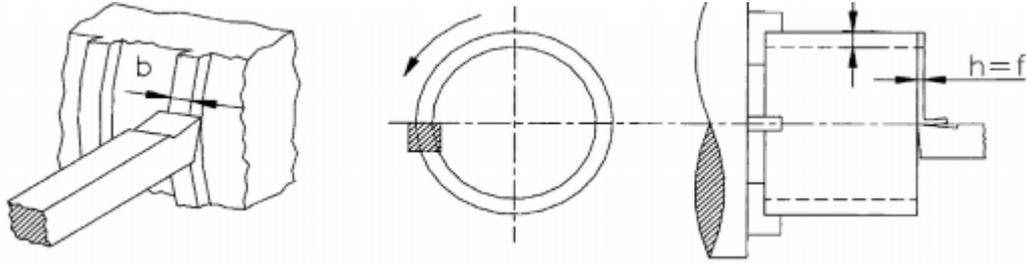
	<i>Cermet LP</i>	<i>Cermet MP</i>	<i>Metal Duro LP</i>	<i>Metal Duro MP</i>
$f = 0,16$ mm/rev	$h' = 0,50 \pm 0,05$ mm 	$h' = 0,39 \pm 0,05$ mm 	$h' = 0,43 \pm 0,05$ mm 	$h' = 0,44 \pm 0,05$ mm 
$f = 0,40$ mm/rev	$h' = 1,36 \pm 0,05$ mm 	$h' = 1,11 \pm 0,05$ mm 	$h' = 1,31 \pm 0,05$ mm 	$h' = 1,16 \pm 0,05$ mm 

Fonte: Reis (2017)

2.4.1 - Grau de recalque

Para iniciar o estudo com relação ao grau de recalque no processo de usinagem, é necessário considerar algumas simplificações. Assim, a forma mais simplificada de um processo de usinagem é uma cunha cortante se movimentando à determinada profundidade num material homogêneo e isotrópico. Esta simplificação é conhecida como corte ortogonal conforme Figura 2.7.

Figura 2.7 - Corte ortogonal



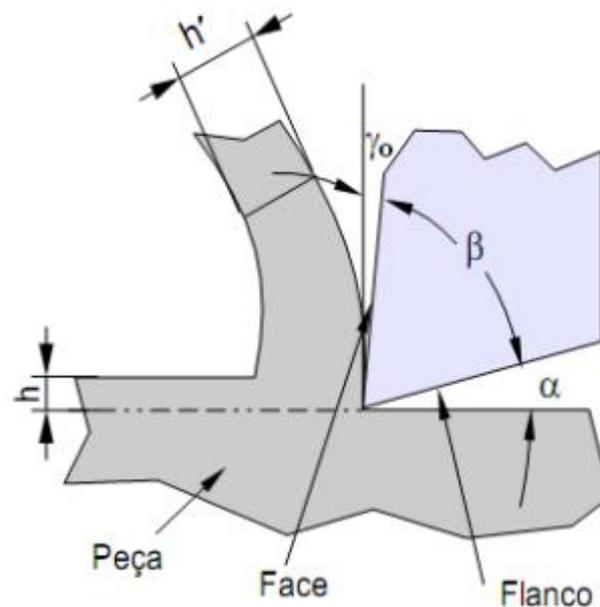
Fonte: Ferraresi (1970)

Onde:

 b = Largura do corte f = Avanço h = Espessura de corte

Segundo Machado e Silva (1999), no corte ortogonal, a aresta de corte é uma reta normal à direção de corte e à direção de avanço, de maneira que a formação do cavaco pode ser considerada um fenômeno bidimensional e que ocorre em um plano normal à aresta cortante, ou seja, o plano de trabalho. A Figura 2.8 ilustra o corte ortogonal, e as principais variáveis envolvidas.

Figura 2.8 - Corte ortogonal e variáveis envolvidas



Fonte: Machado e Silva (1999)

Onde:

α = ângulo de folga

β = ângulo de cunha

γ_0 = ângulo de saída

h = espessura de corte

h' = espessura do cavaco

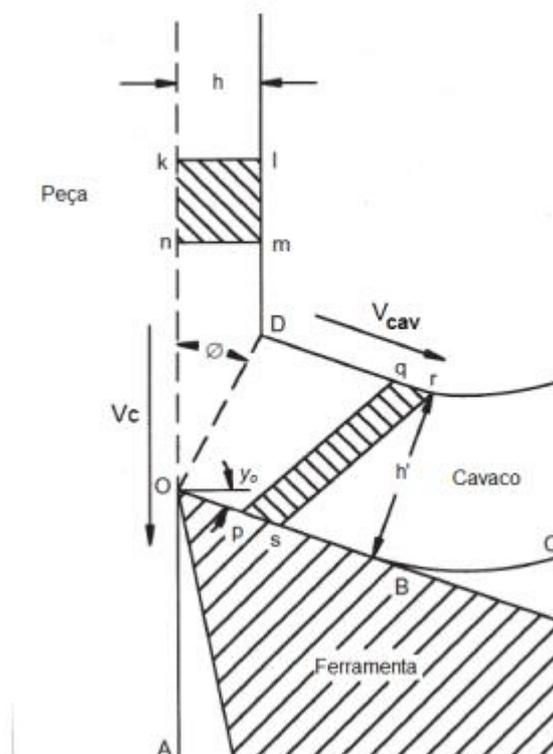
De acordo com Machado e Silva (1999) algumas outras simplificações são admitidas, as quais permitem um tratamento matemático do corte ortogonal e podem ser estendidas a outras operações de usinagem além do torneamento:

- Os cavacos são contínuos, sem formação de aresta postiça de corte (APC).
- Não há contato entre a superfície de folga da ferramenta e a superfície usinada.

- A espessura de corte (h), equivalente ao avanço (f), é suficientemente pequena em relação à largura de corte (b).
- A largura da aresta de corte é maior que a largura de corte (b).
- A largura de corte (b) e a largura do cavaco (b') são idênticas.
- A aresta de corte é idealmente afiada e perpendicular ao plano de trabalho.

A Figura 2.9 demonstra um volume de metal representado pela seção “klmn” movendo-se em direção à cunha cortante, segundo o modelo de corte ortogonal.

Figura 2.9 - Diagrama da cunha cortante



Fonte: Trent e Wright (2000)

Ao passar pelas etapas anteriormente descritas para a formação do cavaco, a zona de cisalhamento primária é representada pelo segmento OD (Figura 2.9). Após deformar-se plasticamente, a seção “klmn” se transforma na seção “pqrs”, que entra em contato com a superfície de saída da ferramenta. Essa região de contato é representada

pelo segmento OB da mesma figura, denominada zona de cisalhamento secundário (MACHADO; SILVA, 1999).

Do exposto conclui-se que o fenômeno da formação do cavaco, nas condições normais de trabalho com ferramenta de metal duro ou de aço rápido é um fenômeno periódico, inclusive a formação do cavaco contínuo (FERRARESI, 1970).

Com isso, de acordo com Machado e Silva (2004) pode se observar experimentalmente que a espessura do cavaco, h' , é maior que a espessura do material a ser removido, h , e o comprimento de cavaco correspondente é, por conseguinte mais curto. O grau de recalque, R_c , é definido pela relação:

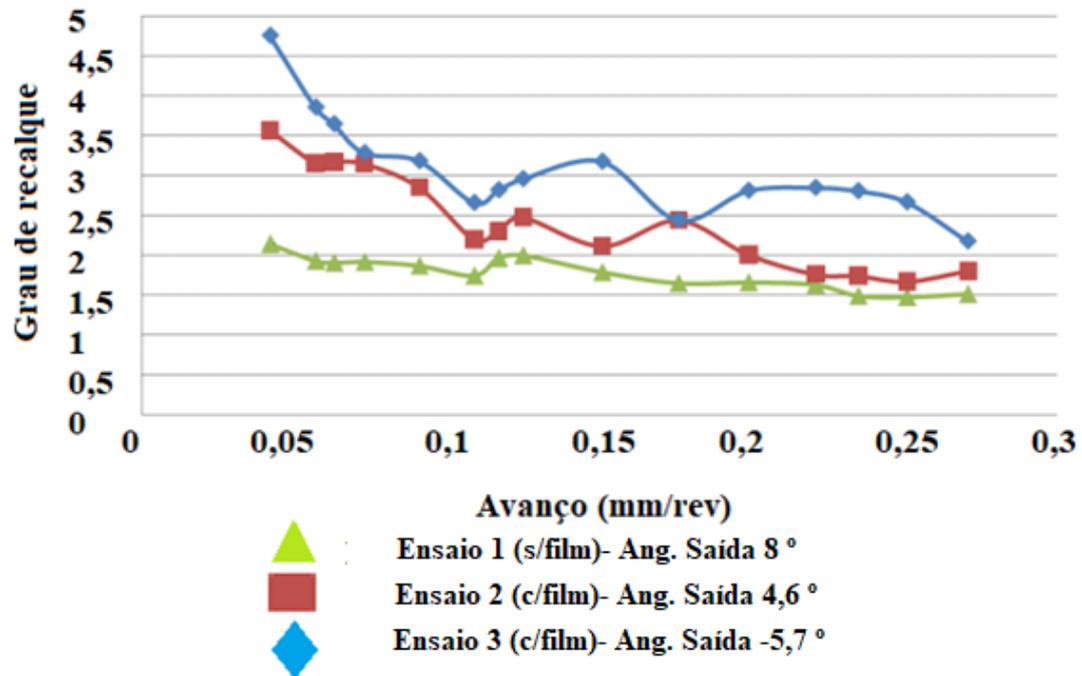
$$R_c = \frac{h'}{h} \quad (2.2)$$

O ângulo de cisalhamento pode ser determinado pela medição direta da espessura do cavaco, h' assim:

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{\cos \gamma_o}{R_c - \operatorname{SEN} \gamma_o} \quad (2.3)$$

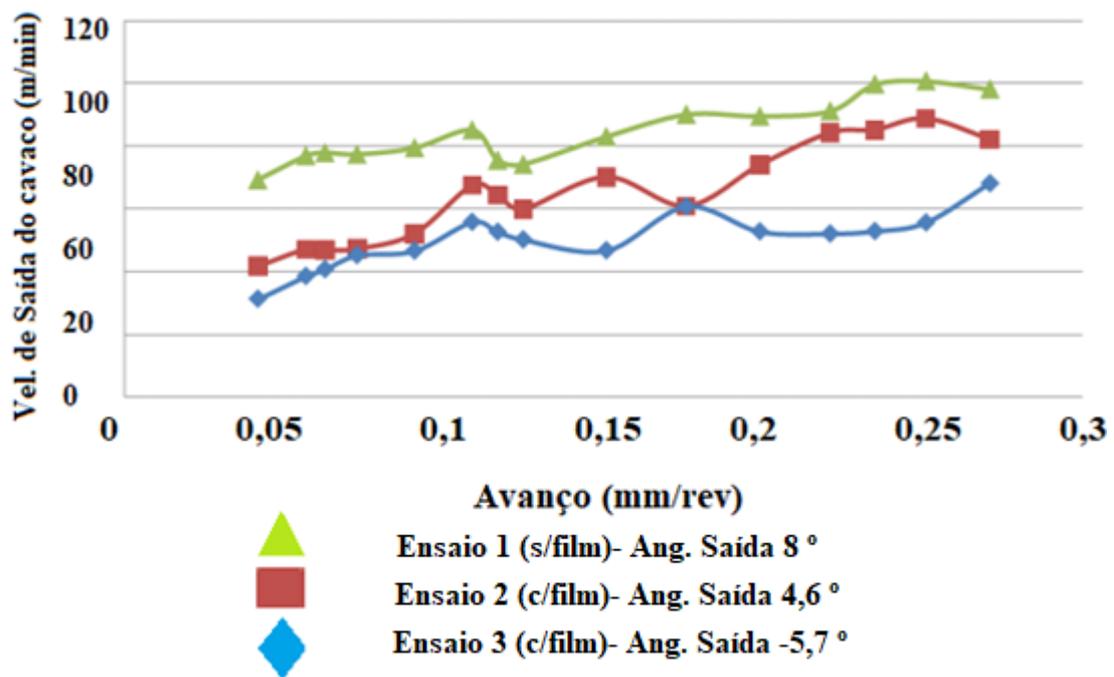
Por meio dos estudos de Novais e Souza (2009) sobre o torneamento do alumínio com a variação do avanço entre 0,04 a 0,271 é possível perceber que o cavaco sofre menor deformação por cisalhamento na zona primária, ou seja, tem grau de recalque menor à medida que aumentamos o ângulo de saída da ferramenta, e essa diminuição da deformação também ocorre quando é aumentado o avanço da ferramenta. Os Gráficos 2.2 e 2.3 demonstram as relações do avanço com relação a grau de recalque e velocidade de saída do cavaco.

Gráfico 2.2 - Influência do avanço no grau de recalque



Fonte: NOVAIS e SOUZA (2009)

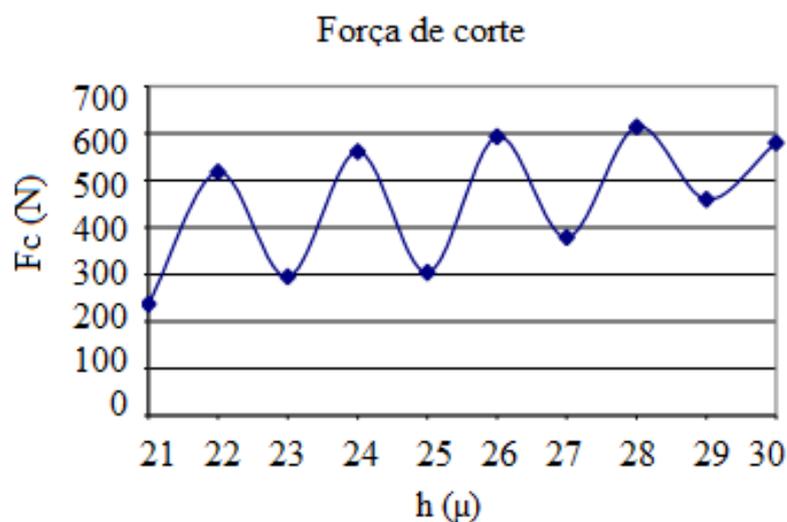
Gráfico 2.3 - Influência do avanço na velocidade de saída do cavaco



Fonte: NOVAIS e SOUZA (2009)

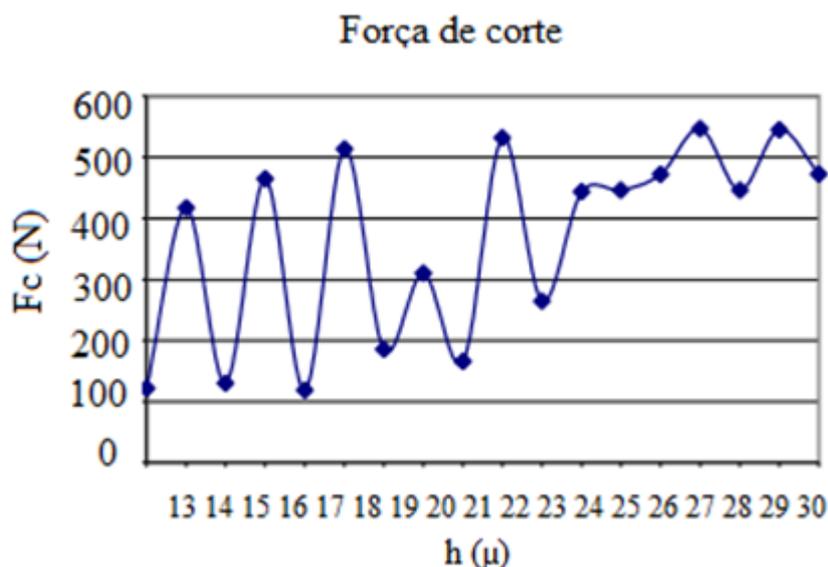
No trabalho de SILVA *et al.* (2011) sobre o torneamento aço ABNT 1045 com ferramentas de aço rápido com a variação da velocidade de corte e avanço permitiram estabelecer algumas relações entre a força de corte e a espessura do cavaco (Gráficos 2.4 e 2.5). A possível explicação está no término da linearidade das curvas e suas diferenças com relação à espessura do material. Nota-se que esse fenômeno não é constante para ambos os testes com o mesmo material. A temperatura obtida na zona de fluxo e a alta taxa de tensão pode ter afetado o comportamento do material durante o corte, e não existem meios de testar o material sob tais condições pois seu comportamento fundamental é desconhecido.

Gráfico 2.4 - Força de corte em função da espessura do material (crescente)



Fonte: Adaptado de SILVA *et al.* (2011)

Gráfico 2.5 - Força de corte em função da espessura do material (decrecente)



Fonte: Adaptado de SILVA *et al.* (2011)

Portanto, a variação de forças após o fim da linearidade da curva, pode ter ocorrido devido às propriedades estruturais do material como, por exemplo, tamanho dos grãos ou influenciadas pelo sistema máquina-ferramenta. No entanto, para afirmações mais precisas haveria a necessidade de se fazer uma micrografia tanto da superfície gerada após a usinagem quanto do cavaco. Outra hipótese que não pode ser descartada é a influência do raio de ponta, que pode ter sido alterado durante o processo de torneamento devido ao desgaste da ferramenta (SILVA *et al.*, 2011).

Nos estudos de Iqbal *et al.* (2008) do aço ABNT 1045 com a ferramenta triangular de metal duro não revestida da (classe, Sandvik TCMW16T304 grau 5015) sem quebra-cavaco, com variação da velocidade de corte (198, 399, 628 e 879 m/min), observou-se que o aumento da velocidade de corte reduz o comprimento de contato na interface ferramenta-peça, consequentemente reduz o atrito por fricção. Logo, a taxa de compressão do cavaco diminui em função do aumento da velocidade de corte, influenciando diretamente na redução do grau de recalque.

Com relação aos estudos de Fátima e Mativenga (2015), para avaliar as forças de corte, foram realizados testes de corte ortogonais com aço SAE 4140 simples aço carbono em forma de tubo com espessura de parede de 2,5 mm, com ferramenta de corte

estruturada e com variação da velocidade de corte (100, 198 e 394 m / min). A aplicação da estruturação da superfície em ambos os rastos e da aresta de flanco de uma ferramenta de corte resultou em coeficiente de atrito reduzido eficiente na interface do cavaco-ferramenta. Este coeficiente de atrito depende da força de atrito e da força normal agindo sobre a área de uma interface de cavaco-ferramenta. Além disso, valores mais baixos da taxa de compressão indicam menos carga de cavaco, significando menos força de fricção necessária para cisalhar o material do cavaco, isso resulta, na redução do grau de recalque.

Por fim, no torneamento do aço inoxidável ABNT 304 com ferramentas de metal duro com variação da velocidade de corte (125, 130, 150, 160 e 170 m/min) e variação do desgaste de flanco (0,1 , 0,2 , 0,3 , 0,4 e 0,5 mm) percebeu-se que o maior grau de recalque encontrado equivale ao teste com desgaste de flanco 0,5 mm, pois aumenta as deformações na zona primária de cisalhamento, e isso influencia no aumento do grau de recalque (SILVA *et al.*, 2007) .

2.5 - Desgaste da ferramenta

Desgaste é definido, segundo Hutchings (1992), como sendo a destruição de uma ou de ambas as superfícies que compõem o sistema tribológico, geralmente envolvendo perda progressiva de material.

O estudo de como evolui a deterioração da ferramenta para cada uma das possíveis condições de corte, na busca da determinação do mecanismo responsável, estabelece condições básicas para a aplicação dos materiais existentes e orienta as pesquisas para os novos materiais (BLAU; 1997).

O desgaste e a possível avaria nas ferramentas de corte resultam de forças e tensões envolvidas no corte com remoção de cavaco e, à medida que o processo de usinagem se desenvolve, a temperatura eleva na região de contato peça/ferramenta, e isso altera as características dos materiais envolvidos. O desgaste e a avaria são consequências indesejáveis que obrigam a interrupções periódicas da produção para a

reafileção ou substituição da ferramenta, aumentando o custo do processo (RODRIGUES, 2005).

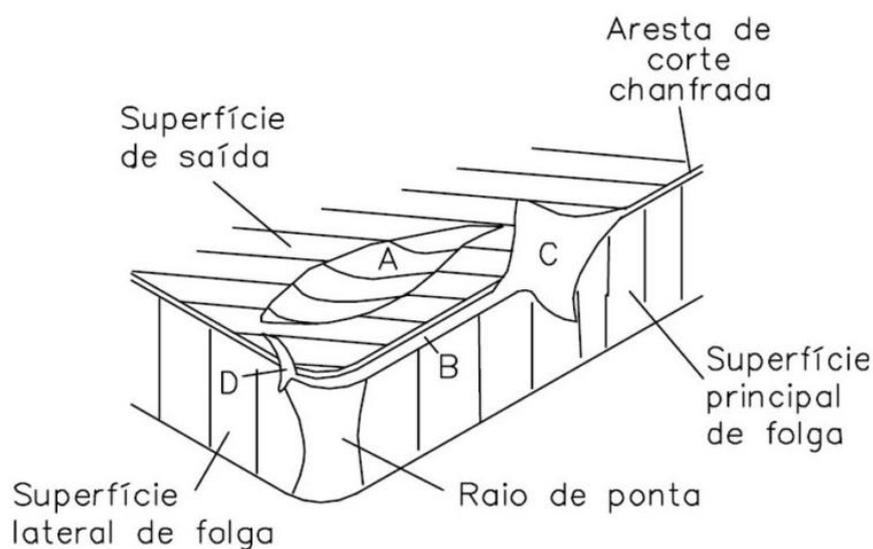
Segundo Machado *et al.* (2015), podem se distinguir três fenômenos pelos quais uma ferramenta de corte perde sua eficiência na usinagem: avaria, desgaste e deformação plástica. Apesar de alguns autores, como Trent & Wright (2000), considerarem a deformação plástica como um mecanismo de desgaste, esses três fenômenos causam mudança na geometria de corte. Os dois primeiros, geralmente, produzem perda de material, enquanto o último promove somente seu deslocamento.

Deformação plástica, segundo Callister (2009), corresponde à quebra de ligações com átomos vizinhos originais seguida da formação de novas ligações com novos vizinhos, uma vez que grande número de átomos e moléculas se move em relação uns aos outros; com a remoção dos esforços externos, eles não retornam às suas posições originais.

As principais formas de desgaste de uma ferramenta de corte são: desgaste de cratera, desgaste de flanco e desgaste de entalhe, conforme (ISO 3685, 1993). Diversos mecanismos de desgaste agem simultaneamente, de forma que tanto sua causa quanto seu efeito dificilmente podem ser distinguidos entre si. Dependendo da natureza do material usinado e das condições de usinagem, predominará um ou outro mecanismo sobre os demais. O conhecimento do mecanismo de desgaste é de grande interesse, pois permite uma seleção criteriosa de ferramenta mais indicada e das condições mais apropriadas de usinagem (SOUZA, 2004).

Podem ser identificadas três formas de desgaste na Figura 2.10, que são desgaste de cratera (região A), desgaste de entalhe (regiões C e D) e desgaste de flanco (região B).

Figura 2.10 - Áreas de desgaste em ferramentas de corte



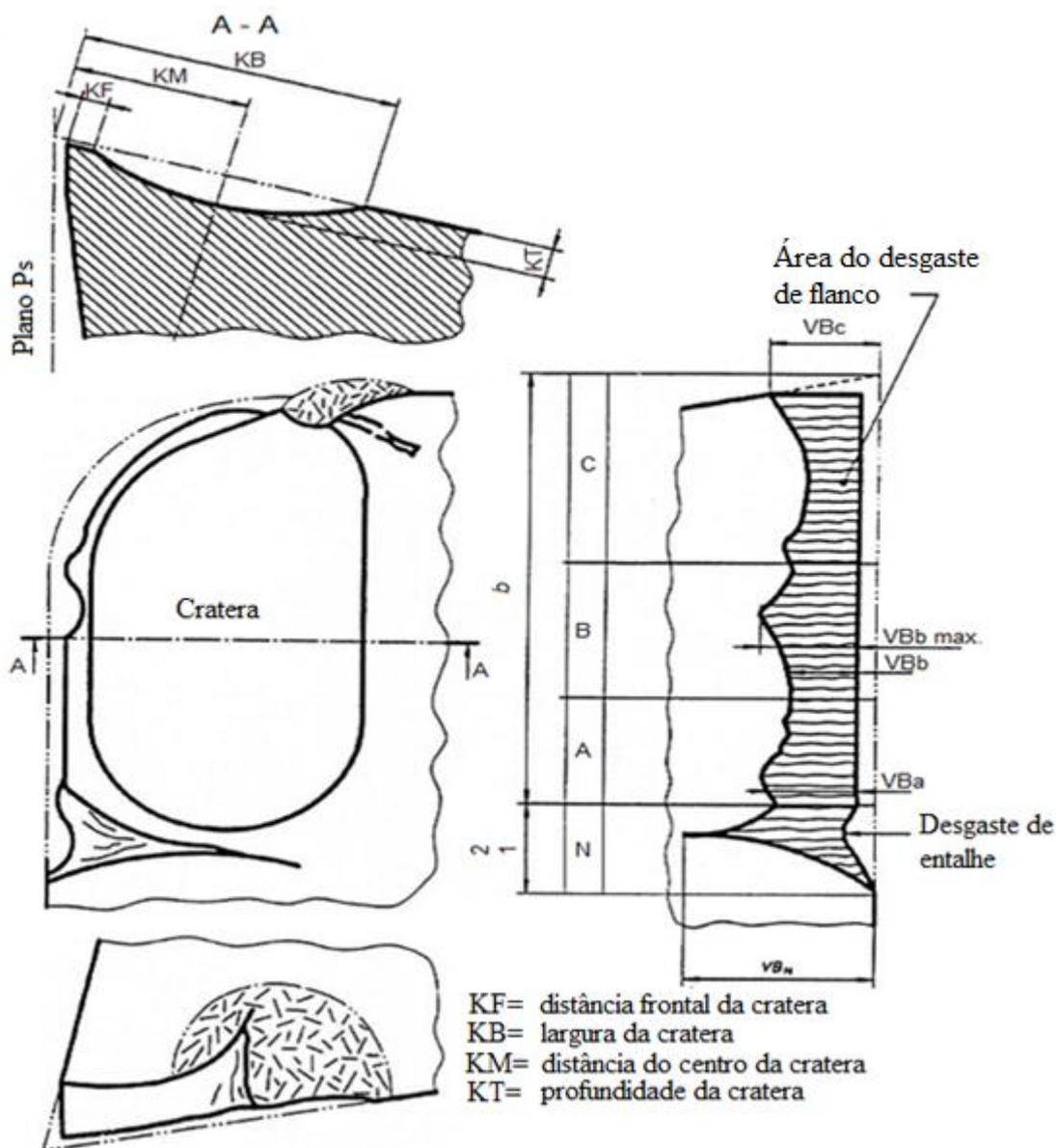
Fonte: Adaptado de Dearley e Trent (1982)

A evolução do desgaste, determina o fim de vida do uso da ferramenta. Isto ocorre quando o desgaste atinge proporções tão elevadas que não é mais possível produzir peças dentro de padrões de tolerância e acabamento desejados (CHILDS *et al.*, 2001).

2.5.1 - Desgaste de flanco

Sua ocorrência se dá em praticamente todas as operações de usinagem, sendo o critério mais adotado para o fim de vida das ferramentas de corte. A especificação dos parâmetros é apresentada pela norma ISO 3685 (1993) como VB_B (desgaste de flanco médio) e $VB_{Bmáx}$ (desgaste de flanco máximo), conforme a Figura 2.11.

Figura 2.11 - Parâmetros de desgaste das ferramentas de corte



Fonte: Adaptado da ISO 3685, 1993)

González *et al.* (2011), realizaram os ensaios de torneamento de um aço médio carbono ABNT 1045 com dureza de 150 brinell (HB), variando a velocidade de corte (400, 500 600 m/min), e mantendo, avanço e profundidade de usinagem constantes em 0,1 mm/rev e 0,5 mm, respectivamente. Foram submetidos três insertos aos ensaios: cermet não revestido, metal duro com revestimento triplo (TiN, Al₂O₃ e Ti (N, C)) e metal duro com revestimento duplo (Ti (C, N) e Al₂O₃) com espessuras de 15 e 10 μm, respectivamente. Observou-se que a ferramenta de metal duro com tripla camada de revestimento obteve o melhor desempenho sob altas velocidades de corte, e isso ocorreu

devido às propriedades químicas e físicas do inserto quando a temperatura de corte se tornou influente no processo, pois o Al_2O_3 além de aumentar a inércia química do material, aumentou a dureza e resistência ao desgaste. Além disso, a camada de TiN foi crucial para aumentar a resistência a abrasão e melhorar a propriedade adesiva. As ferramentas de cermet e metal duro com duplo revestimento apresentaram desgaste intenso para a velocidade de corte intermediária (500 m/min) e falha catastrófica para a velocidade de corte alta (600 m/min), por não apresentar o revestimento de TiN, que é crucial para aumentar a resistência ao desgaste em altas temperaturas de corte.

Com relação aos estudos de Fátima e Mativenga (2015), para avaliar as forças de corte, foram realizados testes de corte ortogonais com aço SAE 4140 simples aço carbono em forma de tubo com espessura de parede de 2,5 mm, com ferramenta de corte estruturada e com variação da velocidade de corte (100, 198 e 394 m / min) . Percebeu-se que o aumento da velocidade corte influenciou no aumento da temperatura na interface ferramenta-peça devido ao estreitamento do plano de cisalhamento próximo à aresta de corte, como consequência, acelera os mecanismos de desgaste. A soma desses fatores, influenciam no aumento do desgaste de flanco da ferramenta.

No torneamento do aço ABNT 1045 quando avaliadas ferramentas de metal duro com geometrias de corte distintas, percebeu-se que, independente do material da ferramenta e do tipo de quebra-cavaco, o aumento do desgaste de flanco provoca o crescimento da rugosidade (NASCIMENTO E ABRÃO, 2000).

Por fim, no torneamento do aço ABNT 1045 com ferramentas de metal duro sem revestimento, e com revestimento foram analisadas o desgaste com a variação da $V_c = (10, 100, 300 \text{ m/min})$. Percebeu-se que a $V_c = 100 \text{ m/min}$ representa a condição mais crítica no que concerne ao desgaste e formação de aresta postiça de corte. Todas as três condições de ferramenta sofreram maiores danos quanto à forma e ao aspecto superficial nessa velocidade. A velocidade de 300 m/min apresentou desgastes de flanco da ferramenta intermediários e a velocidade de 10m/min apresentou os menores desgastes de flanco da ferramenta, ambas para as três condições de ferramenta (BEZERRA E MACHADO, 2008).

2.5.2 - Desgaste de cratera

Desgaste de cratera é o desgaste da superfície de saída da ferramenta. Ele aparece principalmente devido às altas tensões de contato e altas temperaturas na interface cavaco-ferramenta. Na presença de APC o desgaste de cratera é insignificante comparado ao desgaste frontal. A profundidade de cratera (KT) é máxima a uma distância substancial da aresta de corte e a curvatura da cratera corresponde ao raio de curvatura do cavaco. Quando a cratera cresce, ela interceptará o desgaste frontal, causando a quebra da aresta cortante (DINIZ, 1989).

O desgaste de cratera ocorre devido às altas temperaturas geradas durante a usinagem e à afinidade química entre a ferramenta e o material da peça, no qual, a superfície de saída é submetida a altos níveis de tensão e temperatura. A localização do desgaste de cratera coincide, com a região de maior temperatura na superfície de saída da ferramenta, conforme Figura 2.11. Normalmente, a difusão é o principal mecanismo, podendo ocorrer também abrasão e adesão (CHILDS *et al.*, 2001).

2.5.3 - Desgaste de entalhe

O desgaste de entalhe ocorre na superfície principal de folga e também na superfície secundária de folga e em alguns casos pode invadir a superfície de saída conforme Figura 2.11. No caso da superfície principal de folga, a localização é especificamente onde se inicia o contato entre a aresta principal de corte e a peça, na altura da largura de corte. No caso da superfície secundária de folga, a localização é onde termina o contato entre a aresta lateral de corte e a peça usinada (ASM, 1995).

Segundo Lima (2012), o desgaste ocorre quando o material da peça usinada tem sua superfície encruada previamente pelo corte ou por efeito de alguma variação de temperatura. Sua localização sobre as arestas principal e lateral de corte ocorre no ponto onde prevalece uma condição de escorregamento, agravada pelo efeito do meio envolvente, na maioria dos casos o ar ou o fluido de corte.

O material da peça desenvolve o entalhe da ferramenta, produzindo um sulco em forma de V, na altura da profundidade de corte da aresta principal e/ou na extremidade da profundidade de corte, na aresta secundária de corte. Entalhes mais profundos e melhor caracterizados podem ser observados quando da usinagem de ligas resistentes ao calor e com tendência a encruagem, como é o caso das superligas a base de níquel (MACHADO *et al.*, 2015).

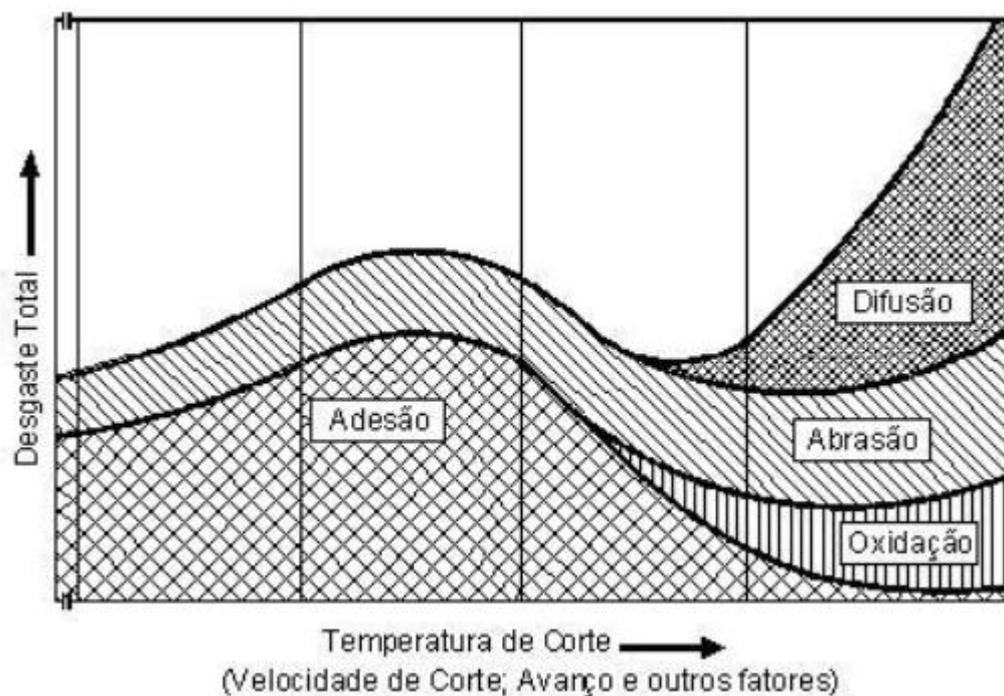
2.6 - Mecanismos de desgaste

O desgaste da ferramenta de corte é resultado de um conjunto de fenômenos físicos, químicos e termomecânicos. Em função da ação simultânea de mecanismos de desgaste básicos (adesão, abrasão, difusão, oxidação etc.) com influência predominante de um ou mais deles em diferentes situações, a identificação do mecanismo dominante está longe de ser simples e algumas interpretações podem estar sujeitas a controvérsias. Essas interpretações podem ser altamente subjetivas mesmo quando baseadas na avaliação de condições de corte, velocidades relativas, temperatura e tensões de contato desenvolvidas, e outros parâmetros específicos do processo (ASTAKHOV, 2007).

Dependendo do par de materiais envolvidos na usinagem ou da variação das condições de corte, o estado de tensões e o gradiente de temperatura nas superfícies de contato da ferramenta com o material de trabalho se alteram, determinando qual ou quais mecanismos de desgaste são atuantes (WILLIAMS, 1996).

O trabalho de Stachowiak e Batchlor (2001), adota-se a abrasão, a difusão, a oxidação, a fadiga e a adesão como nomenclatura para os mecanismos responsáveis pelos desgastes nas superfícies de saída e de folga das ferramentas. Segundo Trent & Wright (2000); Dearnley e Trent (1982); Lim e Ting (1995), normalmente há uma interação entre alguns mecanismos de desgaste no processo de corte, podendo haver predominância de um sobre os outros. A Figura 2.12 apresenta os mecanismos de desgaste de ferramentas de corte em função da temperatura.

Figura 2.12 - Distribuição dos mecanismos de desgaste de ferramentas de corte em função da temperatura



Fonte: Viereggs apud König e Klocke (1997)

Na Figura 2.12, observa-se que sob baixas temperaturas predominam os mecanismos de adesão e abrasão, com maior influência do primeiro. Mas à medida que a temperatura se eleva, surgem novos mecanismos, como é caso da difusão e da oxidação. O mecanismo de difusão é o que mais predomina em temperaturas elevadas, crescendo em escala exponencial, afetando sobremaneira o desgaste da ferramenta. Essa figura, porém, não considera a deformação plástica, que também predomina em temperaturas elevadas (KONIG e KLOCKE, 1997).

Segundo Matosinhos *et al.* (2002), analisou-se o desempenho de ferramentas de metal duro e cermet no torneamento do aço ABNT 1045, variando os parâmetros de $V_c = (300, 350, 400)$ m/min com $f = 0,04$ mm/rot e $V_c = (200, 250, 300)$ com $f = 0,08$ mm/rot. Com relação ao desgaste, a ferramenta de metal duro apresentou melhor desempenho do que o cermet para um avanço de 0,04 mm/rot. Quando o avanço foi alterado para 0,08 mm/rev, as duas ferramentas apresentaram comportamento similar. Esse fato pode ser atribuído ao tratamento térmico aplicado para a elevação da dureza

da peça e pela quantidade de TiC presente na ferramenta de metal duro. Além disso, a duplicação do valor do avanço de 0,04 para 0,08 mm/rev contribuiu para uma redução acentuada da vida útil das duas ferramentas, reduzindo o tempo efetivo de corte de 29 para 8 min. Essa redução da vida útil das ferramentas, pode ser devido ao fato de que, o aumento do avanço propicia um aumento do calor gerado e, conseqüentemente, acelera os mecanismos de desgaste.

2.6.1 - Abrasão

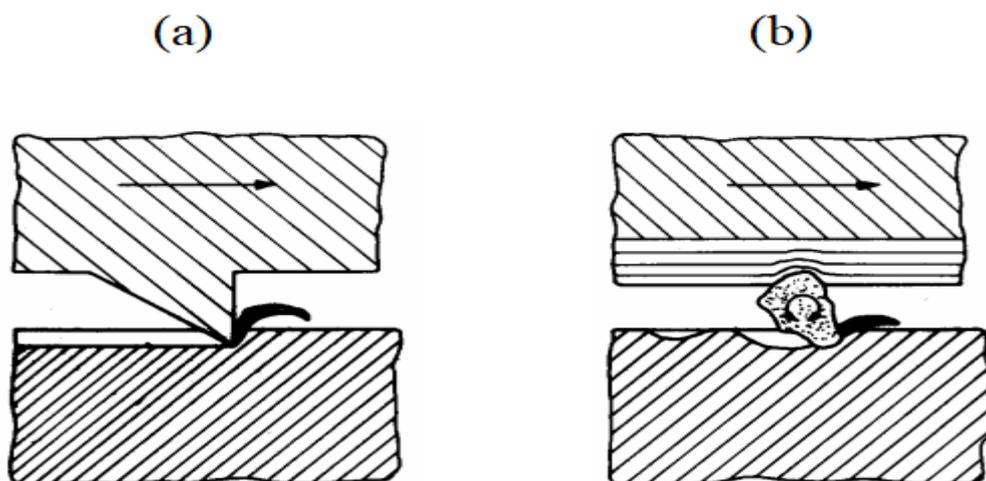
Abrasão é o arrancamento de partículas de material em função do escorregamento sob alta pressão e temperatura entre a peça e a ferramenta. Tal forma de desgaste aumenta com o número de inclusões e partículas duras no aço (ex.: carbonetos e óxidos). A presença de alumínio no aço, formando partículas duras e abrasivas de Al_2O_3 , é especialmente nociva. A resistência à abrasão depende da dureza do material da ferramenta. O aumento da velocidade de corte resulta num aumento considerável do desgaste, em virtude do efeito de impacto e da redução da resistência da ferramenta à abrasão em temperaturas de trabalho mais altas. (STEMMER, 1924).

Segundo Machado e Silva (1999), a perda de material que ocorre por microsulcamento, microcorte e microlascamento produzidos pela abrasão das partículas de elevada dureza relativa, que tanto podem ser componentes do material das peças usinadas, tais como os carbonetos e carbonitretos, como das próprias ferramentas. É um tipo de desgaste importante na usinagem com ferramentas de aço-rápido, ferramentas revestidas e ferramentas cerâmicas.

Segundo Rodrigues (2005), a estabilidade dos grãos nas áreas de contato entre as superfícies de deslizamento determina a natureza do desgaste abrasivo. Composto de dois modos básicos de desgaste abrasivo, no qual são apresentados como mecanismo de desgaste por abrasão a dois corpos e a três corpos. O desgaste por abrasão a dois corpos, conforme ilustra a Figura 2.13-A, é aquele no qual as partículas ou as asperezas duras encontram-se rigidamente presas no material de trabalho, e ao deslizar sobre as superfícies da ferramenta de corte promove o seu sulcamento (SUNDARARAJAN,

1987). Na abrasão a três corpos, Figura 2.13-B, os grãos rolam livres ao deslizar sobre a superfície, uma vez que eles não estão rigidamente presos (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2001).

Figura 2.13 - Abrasão a dois (a) e três corpos (b)



Fonte: Bayer (2007)

No torneamento do aço fundido nodular com as ferramentas de cerâmica de $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}(w)$, sem revestimento e com revestimentos mono e multicamadas obtidos pelos processos PVD e CVD respectivamente. Com relação a velocidade de corte, o avanço e a profundidade de corte se mantiveram constantes, respectivamente (250 m/min, 0,2 mm/rot e 2,0 mm). Doré (2007) identificou que o principal mecanismo de desgaste que atua na aresta principal de corte é a abrasão, e com a progressão do tempo de corte, o material aderido juntamente com o atrito na interface peça-ferramenta vai removendo parte do substrato da ferramenta, tornando-a vulnerável à ação da abrasão e às solicitações térmicas. Isso ocorre porque com a elevação da temperatura, o material da peça caldeia e se adere sobre o substrato da ferramenta de corte (DORÉ, 2007).

Da Silva (2013) estudou a resistência ao desgaste abrasivo de ferramenta revestida micro estruturada ($\text{TiCN-Al}_2\text{O}_3\text{-TiN}$) e ferramenta não estruturada. Para comparação do mecanismo de desgaste, realizou-se o teste de micro abrasão no torneamento. Observou-se que a ferramenta sem revestimento ocorreu um aumento pronunciado da taxa de desgaste do inserto quando colocado em teste de micro

abrasão. No entanto, com o teste de torneamento, com inserto revestido a ferramenta obteve uma vida útil maior da ferramenta.

Nos estudos de Souza e Schroeter (2007), realizou ensaios de torneamentos do aço ABNT 1040 com dureza média de 156 HB com ferramentas de metal duro revestida. Analisou-se as variáveis velocidade de corte (180, 240, 290 e 350 m/min), avanço (0,15, 0,22 e 0,3 mm/rev) e profundidade de corte (1,0 e 1,5 mm), percebeu-se que a o aumento do avanço, proporciona aumento das forças de corte e conseqüentemente, acelera os mecanismos de desgaste. Além disso, através de estudos estatísticos, a variável velocidade de corte é a mais influente com relação ao desgaste abrasivo.

2.6.2 - Adesão

O desgaste por adesão ocorre quando uma superfície desliza sobre outra e está relacionado ao contato e à interação entre as asperezas de duas superfícies. Nessas situações, geram-se forças de atração nos pontos de contato das asperezas, que podem ser de caráter covalente, iônico, metálico ou pelas forças de Van der Waals. Como a área de contato nas asperezas é muito pequena, desenvolvem-se localmente altas pressões de contato que provocam deformação plástica, adesão e, conseqüentemente, a formação de junções localizadas (HUTCHINGS, 1992).

O mecanismo de adesão (aderência e arrastamento), segundo Trent & Wright (2000), tende a ocorrer quando duas superfícies metálicas são colocadas em contato e sujeitas a uma pressão normal, formando-se entre elas um extrato metálico (mistura de dois materiais) causando a aderência. O extrato possui uma elevada resistência, a tal ponto que na tentativa de separação das superfícies aderidas, ocorre a ruptura em um dos materiais na superfície de contato. Dessa forma, partículas da superfície de um material neste caso, na ferramenta são arrancadas e levadas pelo fluxo plástico, e na peça ou cavaco ocorre deformações plásticas até ocorrer o cisalhamento.

O atrito ocorre, geralmente, a baixas velocidades de corte, nas quais o fluxo de material sobre a superfície de saída da ferramenta se torna irregular. A aresta postiça de corte pode aparecer, e na sua presença o processo tem natureza menos contínua,

principalmente se ela for instável. Sob tais condições, fragmentos microscópios são arrancados da superfície da ferramenta e arrastados juntos ao fluxo material adjacente à interface (MACHADO *et al.*, 2015).

No torneamento do aço inoxidável com ferramentas de metal duro com triplo revestimento (TiN, Al₂O₃ e Ti (N, C)) e revestimento de (TiAlN), com velocidade corte (80, 110 m/min) e avanço (0,25 e 0,4 mm/rot), percebeu-se que para ambas as ferramentas os mecanismos de desgaste que prevaleceram foram o de abrasão e adesão. Na baixa velocidade de corte e alto avanço proporcionam abrasão mecânica entre cavaco-ferramenta e, conseqüentemente, com a remoção da camada de revestimento, acelera-se a exposição do substrato e com isso, o mecanismo de desgaste por adesão torna-se predominante a partir desse ponto. As ferramentas com triplo revestimento apresentaram melhores resultados em termos de produtividade (AGUIAR *et al.*, 2017).

2.6.3 - Difusão

Segundo Diniz *et al.* (2006), esse mecanismo está relacionado com transferência de átomos de um material para outro e depende da temperatura e da solubilidade entre os elementos que se encontram na zona de cisalhamento secundário. Embora a velocidade relativa entre a interface peça-ferramenta e entre a ferramenta-cavaco faça com que o tempo de contato entre estes materiais seja muito pequeno, a chamada zona de interface cavaco-ferramenta propicia com que o mecanismo de difusão seja significativo sobre desgaste de cratera. Como exemplo, pode-se citar a usinagem de ligas ferrosas com diamante, no qual, a partir de 600 °C a afinidade entre o carbono contido no diamante e no ferro do cavaco acelera o desgaste de forma expressiva.

A difusão ocorre em temperaturas mais elevadas, em que as moléculas adquirem certa mobilidade. Nas ferramentas de metal duro, podem ocorrer os seguintes fenômenos em temperaturas na faixa de 700 a 1300°C, na usinagem de peças de aço:

- difusão do ferro na fase de cobalto no aço, com formação de uma camada de cristais mistos.
- difusão do carbono, que é retirado dos carbonetos duros e imigra para o aço.

- o aumento da temperatura, que gera tensões na estrutura de carbonetos do metal duro. Como o cobalto tem um coeficiente de expansão térmica cerca de quatro vezes maior do que a estrutura de carbonetos, o aumento da temperatura provoca a expulsão sob alta pressão do cobalto e a geração de tensões no interior do metal duro. (STEMMER, 1993)

O mecanismo de desgaste difusivo em ferramentas de metal duro durante a usinagem de aços pode ser entendido da seguinte forma: o carbono se satura na fase cobalto com apenas 0,7%. O ferro tem solubilidade total no cobalto. Assim, em temperaturas da ordem de 1000 °C, o ferro do aço tende a se difundir para a fase do cobalto da ferramenta, fragilizando-a e aumentando a solubilidade de carbono para 2,1%. Essa maior solubilidade do carbono na fase ferro-cobalto promove dissociação de carbonetos de tungstênio, formando um carboneto complexo do tipo $(FeW)_{23}C_6$ e liberando carbono. Esse carboneto complexo de ferro e o tungstênio têm uma resistência à abrasão muito menor que o carboneto de tungstênio original, fragilizando, portanto, a ferramenta de corte (MACHADO *et al.*, 2015).

Altas temperaturas e pressões causam o aumento da movimentação dos átomos, acelerando a transferência de elementos da superfície da ferramenta para o cavaco, produzindo um desgaste nesta região de contato. A ferramenta está sujeita à máxima temperatura na superfície de saída a uma pequena distância da aresta de corte, facilitando a ocorrência do desgaste em cratera, onde o mecanismo dominante é frequentemente por difusão (KRAMER; SUH, 1980).

2.6.4 - Oxidação

Segundo Blau (1994), a oxidação é considerada um desgaste moderado e ocorre quando o metal abaixo da camada de óxido da superfície possui baixa dureza ou está sob ação de uma alta carga de contato, ocorrendo deformação plástica. As asperidades da superfície com maior dureza irão penetrar através da camada de óxido, ocasionando atrito entre duas superfícies metálicas, que dependendo do sistema e do material pode ser abrasão ou adesão.

O desgaste por oxidação pode ocorrer quando os corpos em contato são submetidos a altas temperaturas e na presença de elementos oxidantes (SANDVIKEN; 1994). O desgaste por oxidação pode ocorrer quando os corpos em contato são submetidos a altas temperaturas e na presença de elementos oxidantes (SANDVIKEN; 1994).

A oxidação, como ocorre no aquecimento de peças a altas temperaturas com a formação de camadas, pode ser causa de desgaste. A oxidação em baixas temperaturas é normalmente evitada por camadas protetoras de material oxidado. Metais duros iniciam a formação de camadas em temperaturas usuais de usinagem (700 a 800 °C) (STEMMER, 1993).

Alguns materiais, como tungstênio e cobalto, formam filmes de óxidos porosos durante o corte e estes, devido ao atrito, logo são arrancados e geram desgaste. Diniz *et al.* (2006) citam que o desgaste gerado pela oxidação tende a se formar nas extremidades do contato cavaco-ferramenta devido ao excesso de ar nesta região, sendo uma das explicações para o desgaste de entalhe.

No torneamento do aço fundido foram analisadas três ferramentas (Metal duro, Cerâmica e CBN) com os respectivos revestimentos (Al_2O_3 , TiC e TiN), velocidade de corte (120, 160 e 200 m/min) e (200, 280 e 400 m/min), mantendo-se constantes profundidade de corte e avanço ($a_p = 1,2$ mm, $f = 0,3$ mm/rot). Observou-se nos 10 minutos iniciais o desgaste por abrasão na superfície principal de corte e em sequência o desgaste por craterização, que acabou por remover parte da aresta. Também foi possível identificar a oxidação como mecanismo de desgaste predominantemente na superfície de saída. Além disso, identificou-se que a ferramenta de metal duro apresentou melhor desempenho devido à sua tenacidade. Essa propriedade promove maior capacidade de absorção de energia da vibração do conjunto máquina-ferramenta, possibilitando melhor rendimento quando trabalhada com os parâmetros mais críticos (OLIVEIRA, 2007).

2.7 – Rugosidade

A rugosidade é formada por marcas deixadas pela ferramenta que atuou sobre a superfície da peça, encontrando-se superposta ao perfil de ondulação. Essas marcas aparecem quando a máquina ferramenta está usinando um material com uma ferramenta de corte (NOVASKI, 1994).

A rugosidade de uma superfície é composta por irregularidade finas ou de erros microgeométricos resultantes da ação inerentes ao processo de corte (marcas de avanço, aresta postiça de corte, desgaste de ferramenta etc.). Em muitos casos, a rugosidade é utilizada como parâmetro de saída para controlar o processo de usinagem (MACHADO *et al.*, 2015).

A rugosidade de uma peça usinada é formada por sulcos e marcas resultantes do contato da ferramenta com o material de trabalho. Diversos fatores influenciam os valores dessa rugosidade, desde a geometria da ferramenta, os parâmetros de corte, as características do material a ser usinado, até os fatores relativos à construção e à instalação do equipamento em uso no processo (RODRIGUES, 2005). Métodos estatísticos aplicados ao resultado da medição da rugosidade de uma superfície podem identificar as contribuições relativas de cada um desses parâmetros (MACHADO *et al.*, 2015). A tabela 2.2 apresenta as definições de rugosidade (R_a e R_z e R_t).

Tabela 2.2 Definição das rugosidades (R_a e R_z e R_t)

Rugosidade	Definição	Ilustração
R_a - Desvio médio aritmético	Definido como a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento, dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, dentro do percurso de medição (l_m).	
R_z - Altura máxima do perfil	Definido como maior valor das rugosidades parciais que se apresenta no percurso de medição (l_e).	
R_t - Altura máxima do perfil	Definido como a soma da maior altura de pico e da maior profundidade de vale do perfil no comprimento de avaliação (l_t).	
Ilustração complementar dos tipos de comprimento medidos na rugosidade		
		<p> l_e= Comprimento de amostragem l_m= Comprimento de medição l_t= Comprimento de avaliação </p>

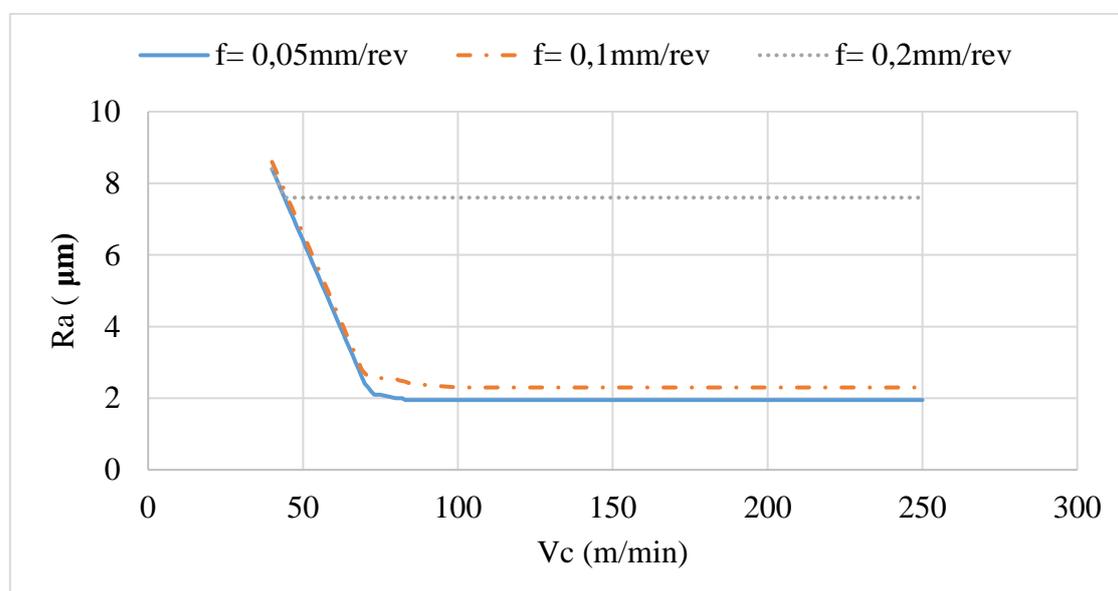
Fonte: Machado *et al.* (2015)

Em relação ao efeito dos parâmetros de corte sobre a rugosidade, o avanço é o mais influente, uma vez que a distância entre picos e vales tende a aumentar com o aumento do avanço em uma proporção quadrática (FERRARESI, 1970). Percebe-se também que o raio de ponta da ferramenta é inversamente proporcional à rugosidade (MACHADO *et al.*, 2015).

O atrito entre a superfície de folga da ferramenta e a superfície usinada provoca aumento da deformação elastoplástica da peça e o desgaste da ferramenta, o que também prejudica o acabamento superficial da peça (DINIZ, 1989).

Pode-se observar que o Gráfico 2.8 mostra valores de R_a em função da velocidade de corte para diferentes valores de avanço. O acabamento melhora rapidamente com o aumento da velocidade de corte até um ponto em que se estabiliza. A velocidade de corte na qual o acabamento se estabiliza, aumenta quando o avanço diminui, o que indica que a melhoria do acabamento em baixas velocidades de corte é devida principalmente à perda da aresta postiça de corte (APC), que é um fenômeno dependente da temperatura. Quando se diminui o avanço, precisa-se aumentar a velocidade de corte para atingir-se uma mesma temperatura (SHAW, 1986).

Gráfico 2.8 - Rugosidade média (R_a) em função velocidade de corte (V_c)



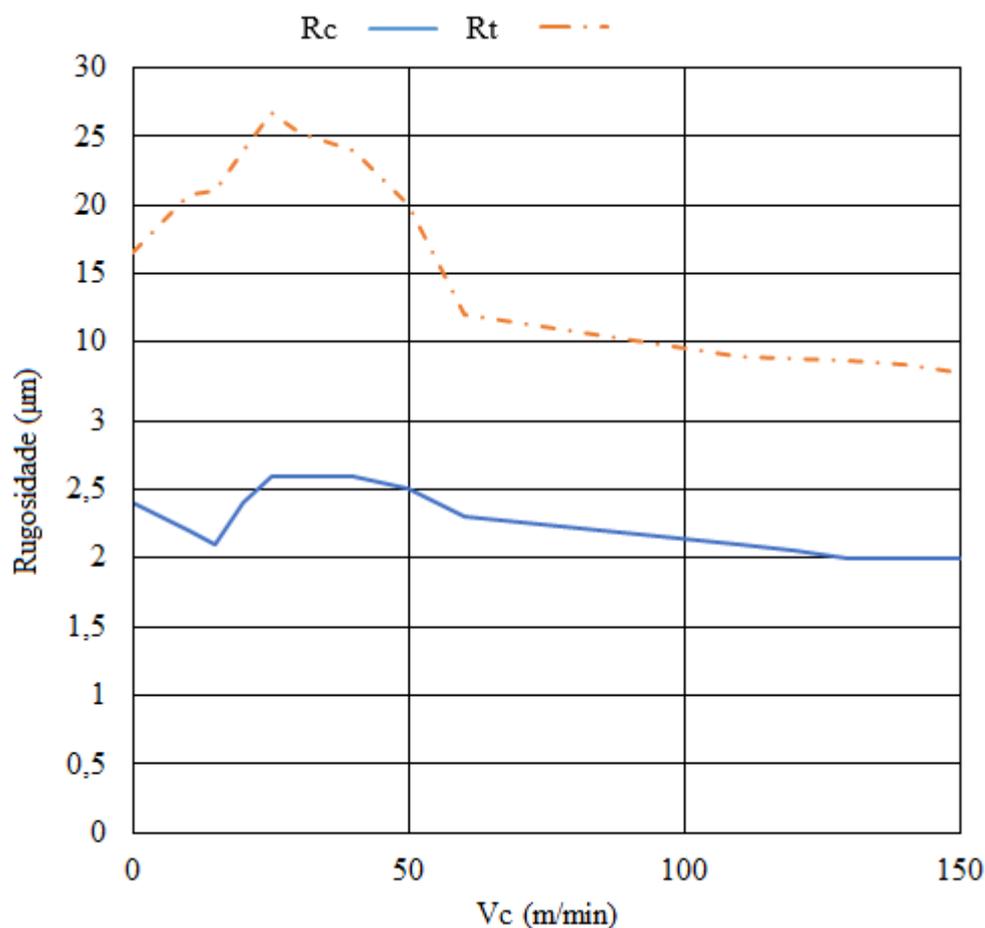
Fonte: Adaptado de Shaw (1986)

Os valores de rugosidade obtidos na usinagem sob condições de corte determinadas, variam com uma considerável dispersão devido a fatores tais como a rigidez e a estabilidade do sistema máquina-ferramenta-dispositivo-peça; fatores associados a aresta postiça de corte e fluxo lateral de cavaco e variação das propriedades da ferramenta e do material da peça (METROPOULOS, 1974).

No trabalho de (MICHELETTI, 1980), o grau de recalque (R_c) e a altura máxima do perfil no comprimento de avaliação (R_t) em função da velocidade de corte tem o mesmo comportamento com relação ao crescimento de R_t e R_c ; em particular, R_t é máximo onde R_c é máximo, isto é, onde as deformações plásticas são máximas. Esse

resultado demonstra que a rugosidade superficial é também dependente das deformações plásticas do cavaco, conforme Gráfico 2.9:

Gráfico 2.9 - Grau de recalque (R_c) e rugosidade máxima (R_t) em função da velocidade de corte



Fonte: adaptado de Micheletti (1980)

No torneamento do aço AISI 8640 com ferramentas de corte convencional (*standard*) e alisadora (*wiper*), percebeu-se que, com o aumento do avanço ocorreu um aumento das rugosidades (R_a e R_t) (DEVERAS, 2016). O mesmo ocorreu no estudo de Campos *et al.* (2011), no torneamento do aço ABNT 52100, no qual, apenas o avanço foi influente quando avaliado as rugosidades R_a , R_z e R_t , com inserto de cerâmica mista ($Al_2O_3 + TiC$) recoberta com nitreto de titânio (TiN).

Nos estudo Biasibetti *et al.* (2018), através do técnica de planejamento de experimentos DOE analisou-se a influência das variáveis (avanço, velocidade de corte,

raio de ponta, ângulo de saída) sobre a rugosidade (R_a) no torneamento do aço ABNT 1045, e percebeu que, o avanço e raio de ponta apresentam a maior influência na rugosidade. Além disso, identificou-se que, o aumento da velocidade de corte obteve os menores valores de rugosidade (R_a), ou seja, um acabamento mais refinado.

Semelhante ao estudo de Biasibetti, no torneamento do aço ANBT 1020 analisou a influência das variáveis (avanço, velocidade de corte) sobre a rugosidade (R_a), e percebeu que, o avanço apresentou influência sobre a rugosidade (R_a), mas a velocidade de corte foi o parâmetro que apresentou maior influência sobre a rugosidade (R_a). Logo, para obtenção de uma boa qualidade superficial é necessária uma combinação de parâmetros ideais e não a modificação de um só parâmetro (COLACO, 2014).

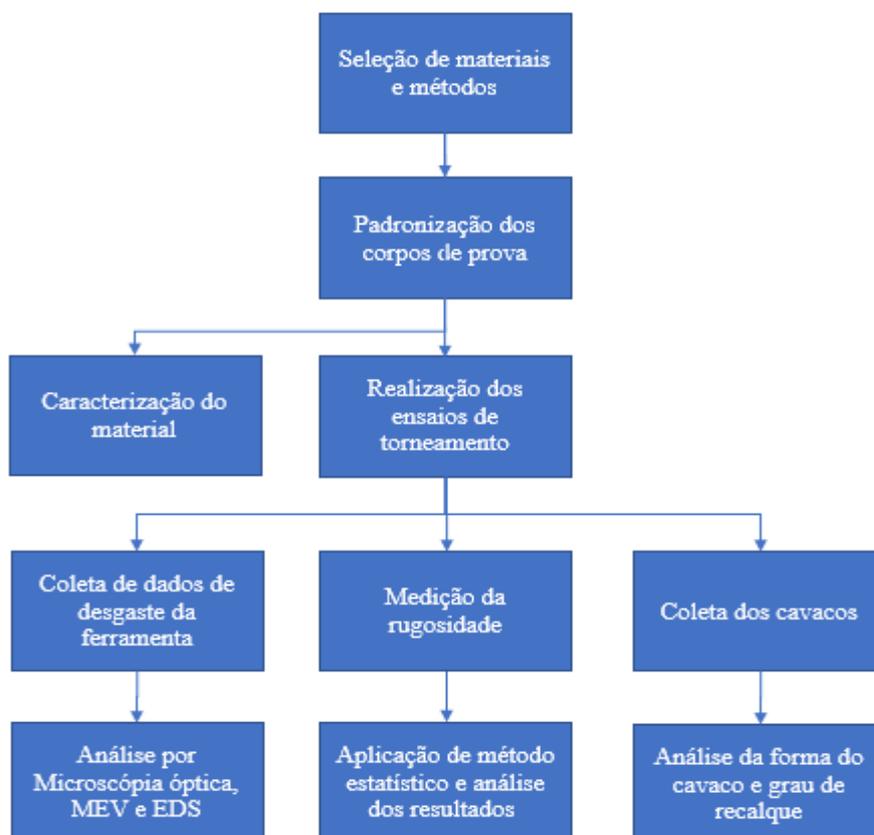
Por fim, nos estudos Matosinhos *et al.* (2002), no torneamento de um aço ABNT 1045, analisou a influência das variáveis avanço (0,04 e 0,08 mm/rev) e velocidade de corte (150 e 400 m/min) sobre a rugosidade (R_a) com ferramentas de metal duro e cermet. O cermet produziu melhor qualidade da superfície da peça para todas as condições testadas, principalmente pela combinação entre velocidades de corte mais altas e valores de avanço mais baixos. A duplicação do avanço promoveu alteração significativa na rugosidade das superfícies da peça para as duas ferramentas, sendo que para o metal duro essa alteração foi mais perceptível.

3 - METODOLOGIA

Neste capítulo, apresentam-se todos os equipamentos e materiais utilizados, assim como o planejamento experimental e os procedimentos adotados ao longo do trabalho. Esses detalhes são importantes para facilitar a compreensão dos métodos utilizados e possibilitar uma correta aplicação das técnicas empregadas, seja em meio acadêmico ou industrial, e ainda garantir a confiança dos resultados obtidos.

Os experimentos foram conduzidos conforme o fluxograma apresentado na Figura 3.1. Os testes de torneamento, medição do cavaco, rugosidade e desgaste de flanco foram realizados no Laboratório de Usinagem e Automação do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais. As análises de MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura) e EDS (Espectroscopia de Energia Dispersiva) foram realizados no laboratório de Engenharia de materiais da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.

Figura 3.1 - Fluxograma do procedimento experimental



Fonte: o autor (2019)

3.1 - Materiais

Neste item, serão apresentados os materiais, os equipamentos e os instrumentos utilizados para medição das variáveis estudadas neste trabalho.

O aço ABNT 1045 foi selecionado para confecção dos corpos de prova. A média de seis medições indicou uma dureza de $207 \pm 0,8$ HB. A análise de composição química do material está descrita na Tabela 3.1 e o certificado encontra-se no apêndice B:

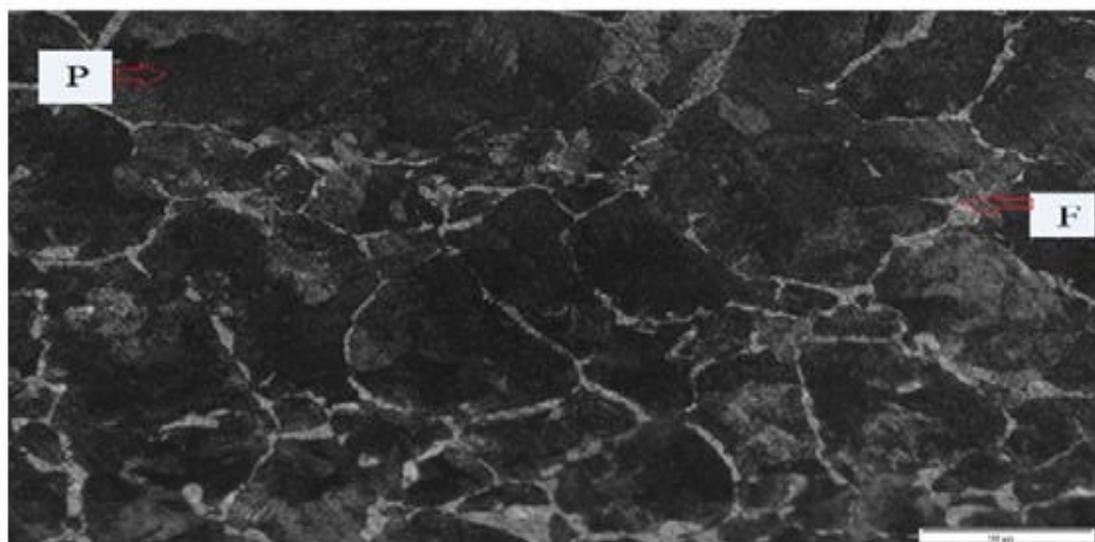
Tabela 3.1 - Composição química dos corpos de prova

Elementos	Concentração percentual (%)
Carbono (C)	0,4660
Silício (Si)	0,2119
Manganês (Mn)	0,7619
Fósforo (P)	0,0185
Enxofre (S)	0,0222
Cromo (Cr)	0,0604
Molibdênio (Mo)	0,0153
Níquel (Ni)	0,0209
Alumínio (Al)	0,0436
Cobalto (Co)	0,0041
Cobre (Cu)	0,0054
Chumbo (Pb)	0,0015
Estanho (Sn)	0,0009
Arsênio (As)	0,0059
Cálcio (Ca)	0,0007
Antimônio (Sb)	0,0036
Nitrogênio (N)	0,0102
Ferro (Fe)	98,3276

Fonte: Laboratório SENAI/FIEMG

A Figura 3.2 apresenta a microestrutura do aço ABNT 1045. As partes claras correspondentes à estrutura ferrítica (F), enquanto as escuras, correspondem à perlítica (P).

Figura 3.2 - Metalografia do aço ABNT 1045 (ampliação de 400 vezes)



Fonte: o autor (2019)

A operação de usinagem escolhida para realização desse experimento foi o torneamento cilíndrico externo. Um suporte com geometria DCLN2020K12 foi utilizado juntamente com os insertos conforme Figura 3.3.

Figura 3.3 - Suporte e insertos



Fonte: o autor (2019)

A Tabela 3.2 apresenta as características dos insertos e os parâmetros de corte recomendados pelo fabricante MITSUBISHI.

Tabela 3.2 - Descrição dos insertos

Material da ferramenta de corte	Geometria do Quebra-Cavaco	Geometria	Descrição	Intervalos recomendados para os Parâmetros de Corte do material da ferramenta
Cermet NX2525	FP	CNMG120408-FP	-	Vc: 225- 325 m/min; f: 0,04-0,20 mm/rev; ap: 0,2- 0,90 mm;
Metal duro MC6025	FP	CNMG120408-FP	Revestimento de TiCN-Al ₂ O ₃ -Ti composto pelo processo CVD	Vc: 185- 295 m/min; f: 0,04-0,20 mm/rev; ap: 0,2- 0,90 mm;
Metal duro MC6025	LP	CNMG120408-LP	Revestimento de TiCN-Al ₂ O ₃ -Ti composto pelo processo CVD	Vc: 185- 295 m/min; f: 0,06-0,25 mm/rev; ap: 0,2- 1,00 mm;

Fonte: adaptado de Mitsubishi (2018)

Essa combinação entre suporte e geometria dos insertos resultam nos seguintes ângulos conforme tabela 3.3:

Tabela 3.3 - Combinação dos ângulos entre suporte e geometria dos insertos

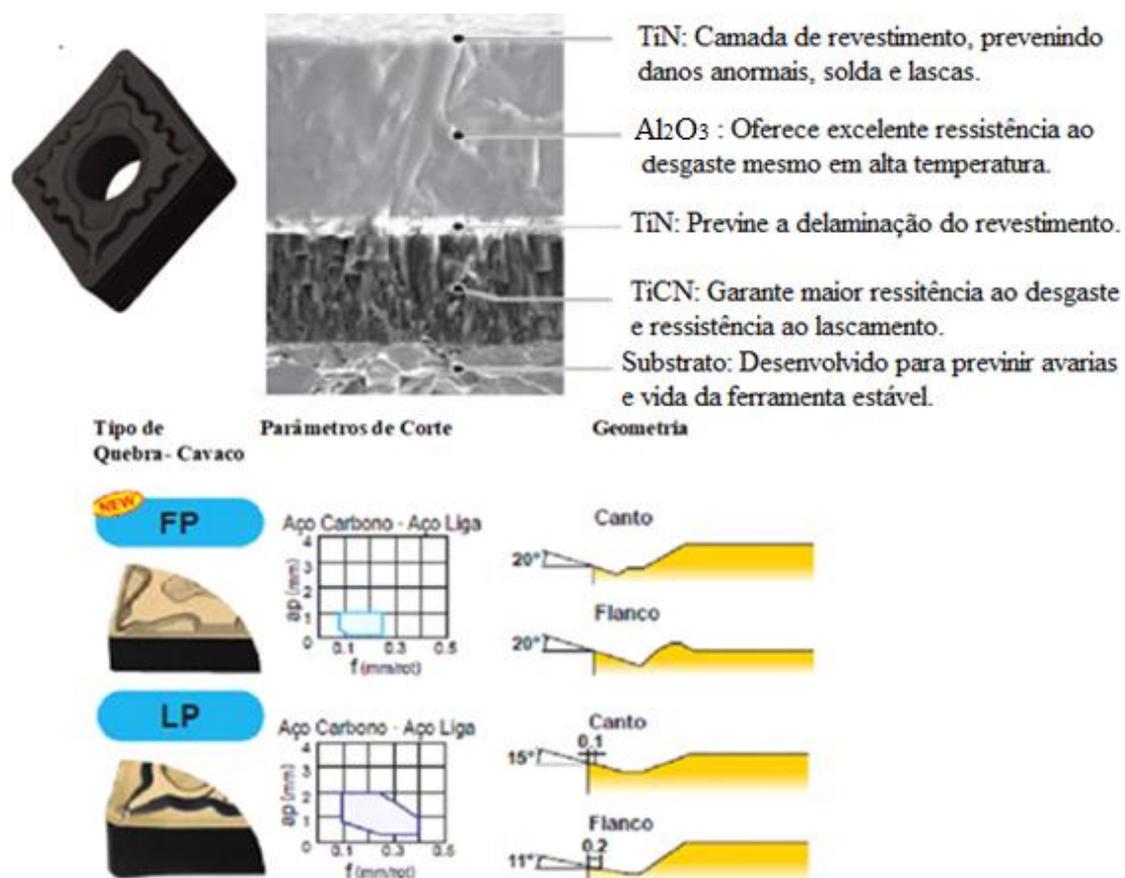
Ângulo	Simbologia	Unidade (Graus °)
Posição	χ_r	95
Posição secundária	χ'_r	5
Ponta da ferramenta	ϵ_r	80
Folga	α_o	5
Cunha	β_o	90
Saída	γ_o	-5

Fonte: o autor (2019)

A Figura 3.4 detalha o revestimento e o substrato das ferramentas de metal duro e indica as duas geometrias de quebra-cavacos possíveis: LP (usinagem leve) e FP (usinagem acabamento). Para cada geometria de quebra-cavaco, estão descritos os

parâmetros de corte avanço (f) e profundidade de usinagem (a_p) recomendados pelo fabricante em função do material da peça e do grau do quebra-cavaco. A ferramenta de cermet não apresenta revestimento e sua geometria de quebra-cavaco é FP.

Figura 3.4 - Características das ferramentas de metal duro empregadas



Fonte: adaptado de Mitsubishi (2018)

3.2 – Equipamentos

A análise de dureza do material foi feita por meio de um durômetro STARRETT, modelo DUH-W201S conforme Figura 3.5.

Figura 3.5 - Durômetro



Fonte: o autor (2019)

Cortou-se o aço com uma cortadora AROTEC modelo S3120-H2 conforme Figura 3.6.

Figura 3.5 - Cortadora



Fonte: o autor (2019)

Posteriormente ao corte, lixou-se a peça e os cavacos com uma lixadeira AROTEC, modelo AROPOL-VV e AROTEC, modelo PLO2 ETD conforme Figura 3.6.

Figura 3.6 - Lixadeira



Fonte: o autor (2019)

A análise metalográfica do material da peça e dos cavacos foram realizadas no microscópio óptico CX31RTSF, modelo OLYMPUS conforme Figura 3.7.

Figura 3.7 - Microscópio



Fonte: o autor (2019)

Os ensaios de torneamento no aço ABNT 1045 foram realizados em um torno CNC ROMI, modelo Centur 30S (5,5 kW de potência e rotação máxima de 3500 rpm). A Figura 3.8 apresenta a máquina descrita.

Figura 3.8 - Torno CNC ROMI modelo Centur



Fonte: o autor (2019)

Para o acompanhamento do desgaste de flanco das ferramentas ao longo dos ensaios, foi utilizado um microscópio OLYMPUS SZ61 (ampliação máxima de 4,5 vezes) conforme a Figura 3.9.

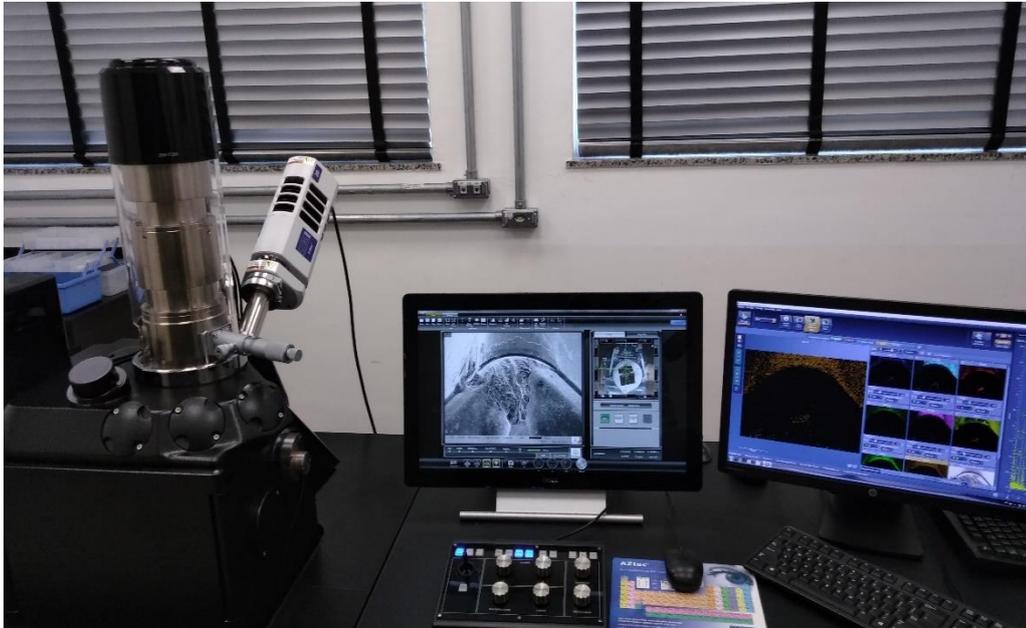
Figura 3.9 - Microscópio



Fonte: o autor (2019)

Para a identificação dos possíveis mecanismos de desgaste, inicialmente as amostras foram inseridas numa solução de etanol PA, em um equipamento ultrassônico Limp Sonic, modelo LS-1, 3D3/X, por 30 minutos, para a limpeza. Posteriormente a isso, foi utilizado o microscópio JSM-IT300 conforme Figura 3.10.

Figura 3.10 - Microscópio eletrônico de varredura



Fonte: o autor (2019)

Para medição da rugosidade foi utilizado o rugosímetro portátil Surtronic 25 conforme Figura 3.11.

Figura 3.11 - Rugosímetro



Fonte: o autor (2019).

3.3 – Métodos

Neste tópico será abordada toda a metodologia necessária para a padronização dos corpos de prova, as variáveis selecionadas durante os ensaios de torneamento e a coleta de dados como: rugosidade da peça, metalografia, grau de recalque do cavaco e desgaste de flanco máximo.

3.2.1 - Tratamento térmico dos corpos de prova

Após a definição do material, os corpos de prova foram tratados termicamente pelo processo de recozimento com a finalidade de homogeneizá-los. O recozimento foi realizado em temperatura de patamar de 850°C durante três horas, após isso, o aço foi mantido no forno até o seu resfriamento a temperatura ambiente. Realizou-se a análise da dureza do material por meio de um durômetro STARRETT. Durante os ensaios utilizou-se uma esfera de 1,587 mm de diâmetro e carga de 980,7 N e foi feita uma média de seis medições respectivamente com o desvio padrão.

3.2.2 - Realização dos ensaios

Os parâmetros de corte para os ensaios de torneamento foram selecionados em intervalos próximos ao recomendado pelo fabricante Mitsubishi. A Tabela 3.4 apresenta os valores propostos para estudo deste trabalho. Foi utilizado um planejamento fatorial completo que resulta em 18 (3x3x2) ensaios, sem réplicas. O Apêndice A apresenta os conceitos básicos sob o planejamento de experimentos e sua importância para garantir confiabilidade aos resultados encontrados.

Tabela 3.4 - Parâmetros utilizados no torneamento

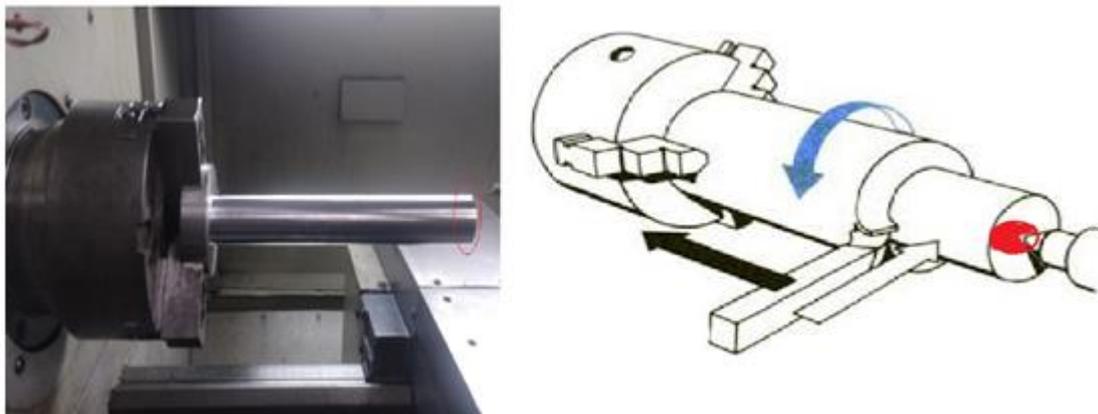
Material da ferramenta de corte	Geometria do quebra-cavaco	Velocidade de corte V_c (m/min)			Avanço f (mm/rev)		Profundidade de corte a_p (mm)
		200	250	300	0,1	0,2	
Cermet NX2525	FP	200	250	300	0,1	0,2	1
Metal duro MC6025	LP	200	250	300	0,1	0,2	1
Metal duro MC6025	FP	200	250	300	0,1	0,2	1

Fonte: o autor (2019)

3.2.3 - Coleta e medição da metalografia do aço

Conforme mostra a Figura 3.12, o desenho esquemático identifica o local onde foi realizado a análise metalográfica.

Figura 3.12 - Desenho esquemático

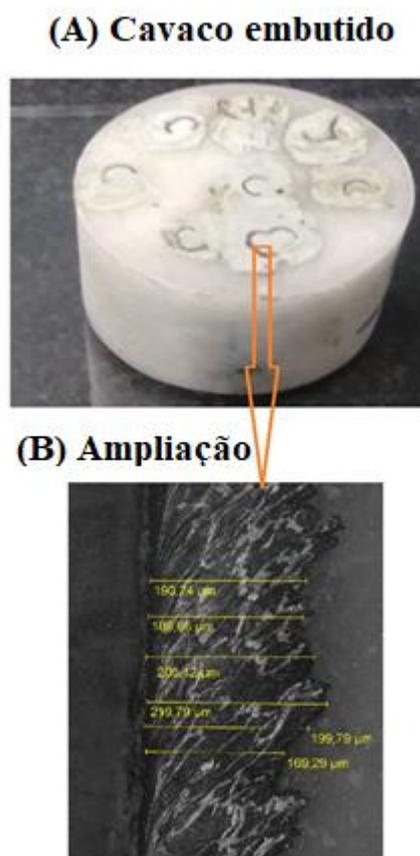


A peça foi embutida, lixada com a lixa (80, 120, 220, 400, 600 e 1200) mesh e, posteriormente polidas com pasta de alumina ($3\ \mu\text{m}$) e com pasta de diamante ($1\ \mu\text{m}$) até que sua superfície se tornasse uniforme para ser atacado quimicamente com nital 3% durante 26 segundos. Posteriormente a isso, através do microscópio óptico conectado ao computador e com a interface do programa LCmicro, foi possível obter a microestrutura.

3.2.4 - Coleta e medição da espessura e metalografia dos cavacos

As amostras dos cavacos foram coletadas ao final de cada teste e as imagens foram obtidas para cada teste. Para cada teste, os cavacos foram embutidos, lixados com a lixa (80, 120, 220, 400, 600 e 1200) mesh e, posteriormente polidas com pasta de alumina ($3\ \mu\text{m}$) e com pasta de diamante ($1\ \mu\text{m}$) até que sua superfície se tornasse uniforme para ser atacado quimicamente com nital 3% durante 26 segundos. Posteriormente a isso, através do microscópio óptico conectado ao computador e com a interface do programa LCmicro, foi possível obter a microestrutura e a espessura do cavaco (h'). Foram feitas seis medições do cavaco, calculando-se o valor médio respectivamente com seu desvio padrão para cada amostra. A Figura 3.13-A apresenta o embutimento dos cavacos respectivamente com Figura 3.13-B demonstrando a ampliação e medição da espessura do cavaco.

Figura 3.13 - Cavaco embutido



Fonte: o autor (2019)

3.2.5 - Coleta de dados de desgaste da ferramenta de corte

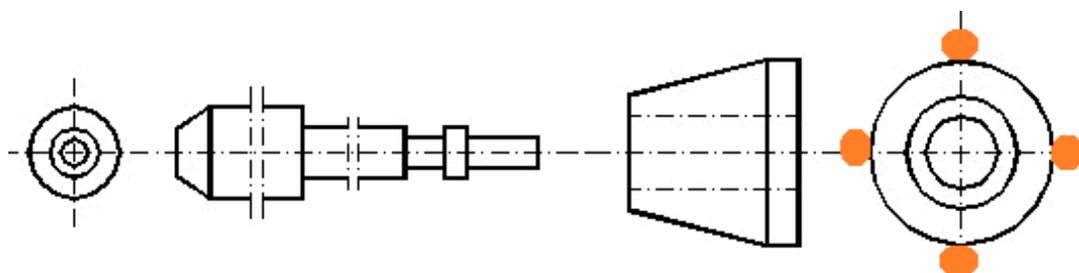
O desgaste dos insertos foi monitorado durante os testes e foi utilizado um critério de vida $VB_{Bmáx}=0,5$ mm ou 15 minutos de corte.

Para identificar os possíveis mecanismos de desgaste, os insertos foram analisados através do microscópio eletrônico de varredura (MEV) e espectroscopia de energia dispersiva (EDS.).

3.2.6 - Medição da Rugosidade

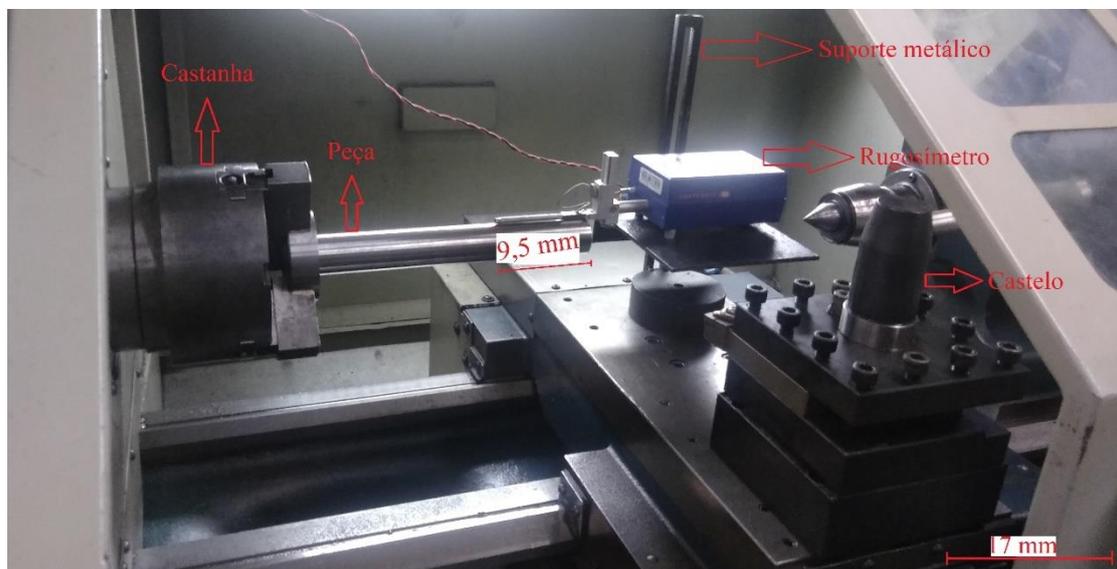
Após cada conjunto de testes realizados, os valores do desvio aritmético médio (R_a), da altura máxima do perfil (R_z) e da altura total do perfil (R_t) foram coletados com o rugosímetro, empregando-se um comprimento de amostragem de 2,5 mm e comprimento de avaliação de 12,5 mm (recomendados para os valores de R_a entre 2 e 10 μm) e um comprimento de amostragem de 0,8 mm, e um comprimento de avaliação de 4 mm (para os valores de R_a entre 0,1 e 2 μm). Os valores recomendados para os comprimentos de amostragem e de avaliação estão de acordo com a norma ISO 4288, *apud* MACHADO *et al.* (2015). A medição de rugosidade ocorreu em quatro pontos equidistantes da circunferência do corpo de prova e o valor médio foi calculado conforme desenho esquemático da Figura 3.14. A fim de ajustar o equipamento, o rugosímetro foi verificado com um padrão antes da medição. Os dados obtidos para estes parâmetros encontram-se no Apêndice C.

Figura 3.14 - Pontos equidistantes da circunferência do corpo de prova



. A Figura 3.15 apresenta com detalhes a montagem do sistema e especifica o local no qual foi realizado a medição da rugosidade.

Figura 3.15 - Montagem do sistema para medição da rugosidade



Fonte: o autor (2019)

3.2.7 - Aplicação do método estatístico e análise dos resultados para rugosidade

Todas as análises estatísticas para esta etapa foram feitas no *software* MINITAB versão 17. A fim de validar os resultados da análise de variância (ANOVA), analisaram-se os resíduos, além dos efeitos principais e das interações para todas as combinações descritas no Apêndice C. Ao final da coleta, os dados foram organizados em tabelas utilizando o *software* Microsoft Excel, versão 2016.

4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados de todos os ensaios realizados neste trabalho serão apresentados na seguinte ordem: Análise dos cavacos, desgaste da ferramenta de corte e rugosidade da superfície torneada. Na análise estatística, considerou-se um intervalo de confiança de 95% ($\alpha = 0,05$) para os 18 testes.

4.1 - Análise dos cavacos

Os Quadros 4.1 a 4.3 apresentam as imagens das formas de cavacos produzidas pelo torneamento do aço para os testes com diferentes materiais de ferramenta, velocidade de corte e avanço conforme a classificação estabelecida pela norma ISO 3685 *apud* Machado *et al.* (2015). O Quadro 4.1 apresentam as formas de cavaco encontradas através do torneamento da ferramenta NX 2525 (FP).

Quadro 4.1 - Imagem dos cavacos coletados para a ferramenta NX 2525 (FP) e

$$a_p = 1,0 \text{ mm}$$

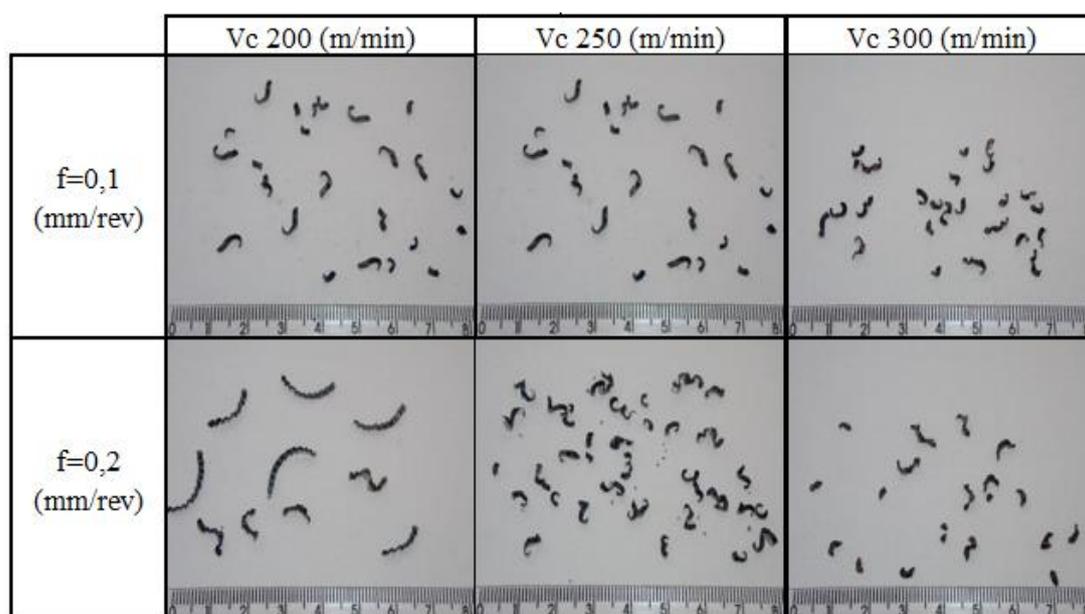


Fonte: o autor (2019)

As imagens do Quadro 4.1 indicam que, com o aumento do avanço, os cavacos produzidos pela ferramenta NX 2525 (FP) apresentaram a tendência a se tornarem arco solto, com exceção do teste com $V_c = 250$ m/min, no qual o cavaco passou de arco solto a helicoidal tipo arruela longo. Para o aumento da velocidade de corte, o cavaco apresentou uma tendência a se tornar arco conectado quando se utilizou o $f = 0,1$ mm/rev e arco solto para o $f = 0,2$ mm/rev.

O Quadro 4.2 apresentam as formas de cavaco encontradas através do torneamento da ferramenta MC 6025 (FP).

Quadro 4.2 - Imagem dos cavacos coletados para a ferramenta MC 6025 (FP)
e $a_p = 1,0$ mm

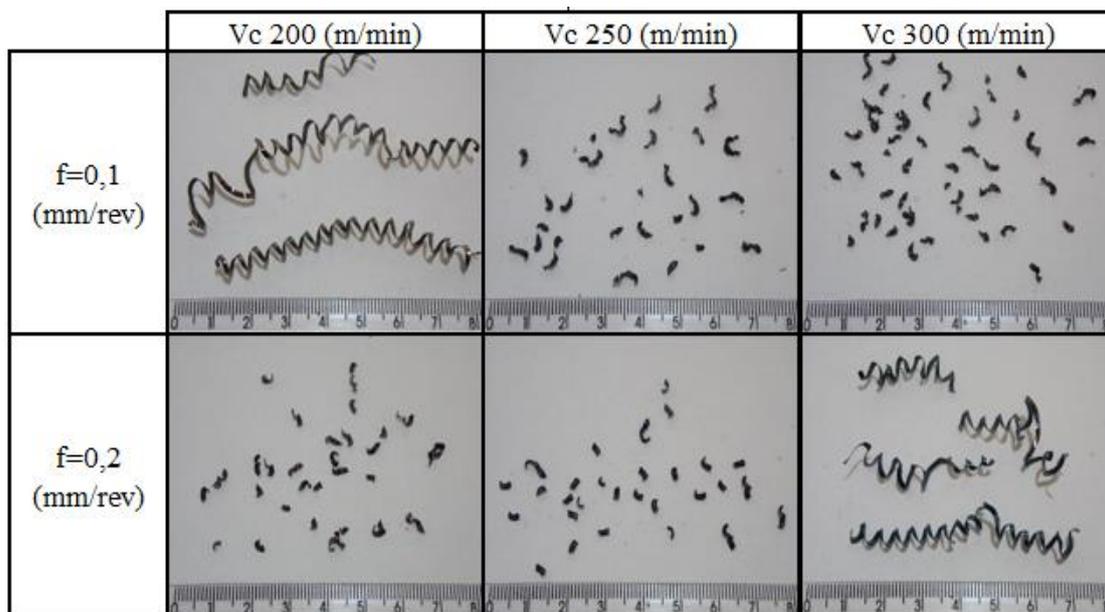


Fonte: o autor (2019)

As imagens do Quadro 4.2 indicam que, com o aumento do avanço, os cavacos produzidos pela ferramenta MC 6025 (FP) apresentaram a tendência a se tornarem arco solto, com exceção do teste com $V_c = 200$ m/min, no qual o cavaco passou de arco solto a arco conectado. Para o aumento da velocidade de corte, o cavaco apresentou uma tendência a se tornar arco solto.

O Quadro 4.3 apresentam as formas de cavaco encontradas através do torneamento da ferramenta MC 6025 (LP).

Quadro 4.3 - Imagem dos cavacos coletados para a ferramenta MC 6025 (LP)
e $a_p = 1,0$ mm



Fonte: o autor (2019)

As imagens do Quadro 4.3 indicam que, com o aumento do avanço, os cavacos produzidos pela ferramenta MC 6025 (LP) apresentaram a tendência a se tornarem arco solto com exceção do teste com $V_c = 300$ m/min, no qual o cavaco passou de arco solto a helicoidal tipo arruela longo. Para o aumento da velocidade de corte, o cavaco apresentou uma tendência a se tornar arco solto quando se utilizou o $f = 0,1$ mm/rev e helicoidal tipo arruela longo para o $f = 0,2$ mm/rev.

Todos os testes, que produziram cavacos mais longos devido ao aumento da avanço podem ser explicados pelos estudos de Silva *et al.* (2011), no qual o aumento do avanço, proporcionou crescimento das forças de corte e, conseqüentemente, ocorreu o aumento da temperatura na zona primária de cisalhamento. Em decorrência desses fatores, promove a redução da dureza na parte superficial do material, proporcionando a formação de cavacos mais longos.

Pode-se observar nos Quadros 4.1 a 4.3 que o avanço e velocidade corte influenciaram na forma dos cavacos. Entretanto, existem exceções com relação ao aumento do avanço para os testes com a ferramenta NX 2525 FP com a $V_c = 200$ m/min, MC 6025 FP com as $V_c = 250$ m/min e $V_c = 300$ m/min e a MC 6025 LP com $V_c = 250$ m/min, em que o cavaco se manteve como arco solto.

O comportamento do cavaco foi idêntico para as ferramentas MC 6025 FP e LP para $V_c = 250$ m/min e $f = 0,1$ mm/rev, o qual se manteve como arco solto. Isso pode ser explicado pela o aumento do avanço, proporcionou crescimento das forças de corte e em decorrência disso, promoveu a formação de cavacos mais espessos. Além disso, tem a influência do quebra-cavaco que contribuiu de maneira eficiente para a quebra do cavaco. A soma desses fatores promove a formação de cavacos mais quebradiços, facilitando sua quebra, portanto promovendo a formação de cavacos mais curtos.

No que se refere aos parâmetros de corte, em geral, um aumento na velocidade de corte, uma redução no avanço ou um aumento no ângulo de saída tendem a produzir cavacos em fitas ou contínuos (SMITH, 1989). Isso acontece com a ferramenta MC 6025 LP para $V_c = 200$ m/min e $f = 0,1$ mm/rev, em que a forma do cavaco é helicoidal tipo arruela longo e quando utilizou-se o $f = 0,2$ mm/rev, alterou-se para arco solto.

O comportamento para as ferramentas NX 2525 FP com $V_c = 250$ m/min, e a ferramenta MC 6025 LP com $V_c = 300$ m/min são similares. O aumento do avanço para $0,2$ mm/rev, gerou a formação de cavacos mais contínuos.

Para a ferramenta NX 2525 FP com $V_c = 300$ m/min, o fator mais influente também foi o avanço. A explicação está relacionada à redução do tempo de usinagem que, por conseguinte, leva à redução do coeficiente de atrito. Isso gera cavacos mais curtos, pois a velocidade de corte alta e o coeficiente de atrito baixo aumentam a espessura do cavaco, proporcionando uma maior rigidez, ou seja, torna-o mais quebradiço.

Em relação à geometria de quebra-cavaco, o tipo LP para o inserto de metal duro quando utilizado $f = 0,2$ mm/rev apresenta a forma de cavaco como arco solto, com exceção para $V_c = 300$ m/min em que a forma do cavaco se alterou para helicoidal tipo arruela longo. Essa exceção, pode estar associada ao quebra-cavaco LP, desenvolvido

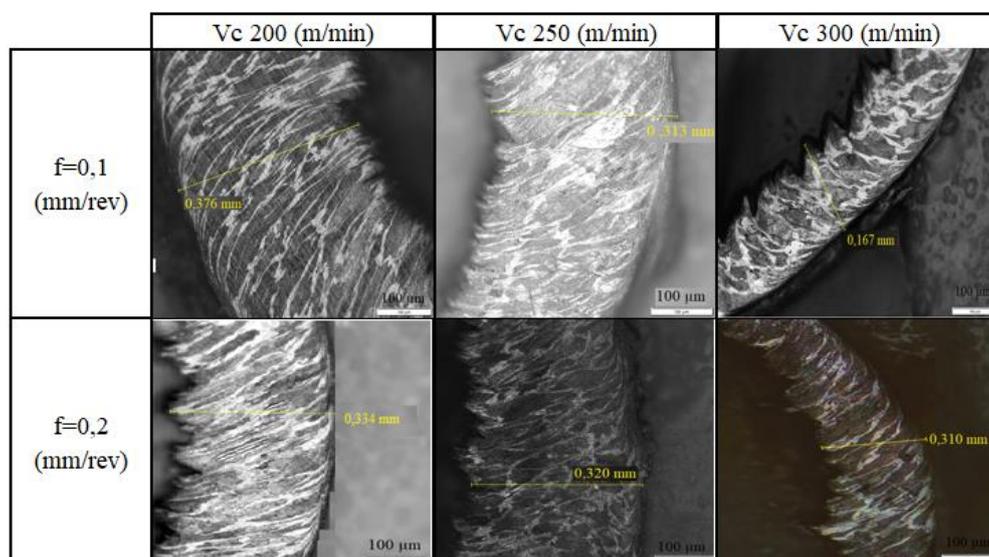
para operações de usinagem leve, apresenta uma maior superfície de contato com o cavaco, como pode ser observado na vista transversal descrita na Figura 3.4 e Tabela 3.2. Essa característica, associada à baixa condutividade térmica do material da ferramenta, permitiu que grande parte do calor gerado entre o cavaco e a superfície da ferramenta fosse transferida para o cavaco, promovendo a formação de cavacos mais longos.

Quando utilizado o $f=0,1$ mm/rev, promove a formação de espessura menor do cavaco, e isso contribui para a formação de cavacos mais contínuos e emaranhados pois, aumenta o fluxo de calor na interface ferramenta-peça, com isso, o cavaco fica mais firme e mais flexível, logo dificulta na sua quebra. Entretanto a geometria do cavaco apresentou-se de forma eficiente pois promoveu a formação de cavacos mais curtos mesmo com avanço menor, ou seja, o quebra-cavaco foi a variável mais influente para o $f=0,1$ mm/rev.

Entretanto nos estudos de Reis *et al.* (2019), no qual foram analisadas as ferramentas de metal duro e cermet no torneamento do aço ABNT 4340. Com relação a análise da forma do cavaco, foi identificado que as ferramentas que possuem maior superfície de contato associado a baixa condutividade térmica do material da ferramenta, permitiu que grande parte do calor gerado entre o cavaco e a superfície da ferramenta seja transferida para o cavaco. Logo, menor avanço, forma menores espessuras de cavaco, conseqüentemente, contribui para a formação de cavacos mais longos.

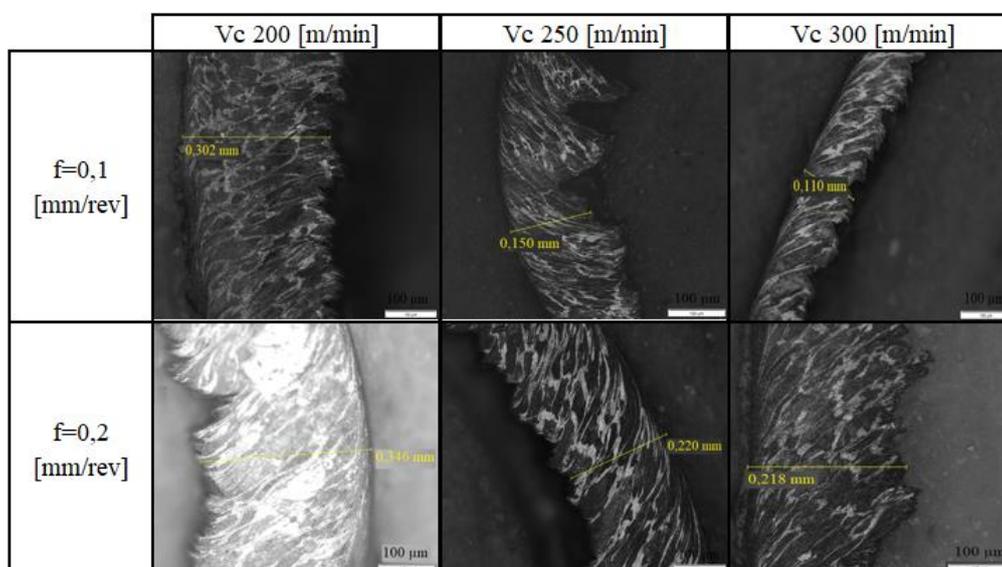
Os Quadros 4.4 a 4.6 apresentam a seção longitudinal dos cavacos obtidas por microscopia ótica para os testes com diferentes materiais de ferramenta, velocidade de corte e avanço.

Quadro 4.4 - Seção longitudinal dos cavacos produzidos pela ferramenta NX 2525 FP



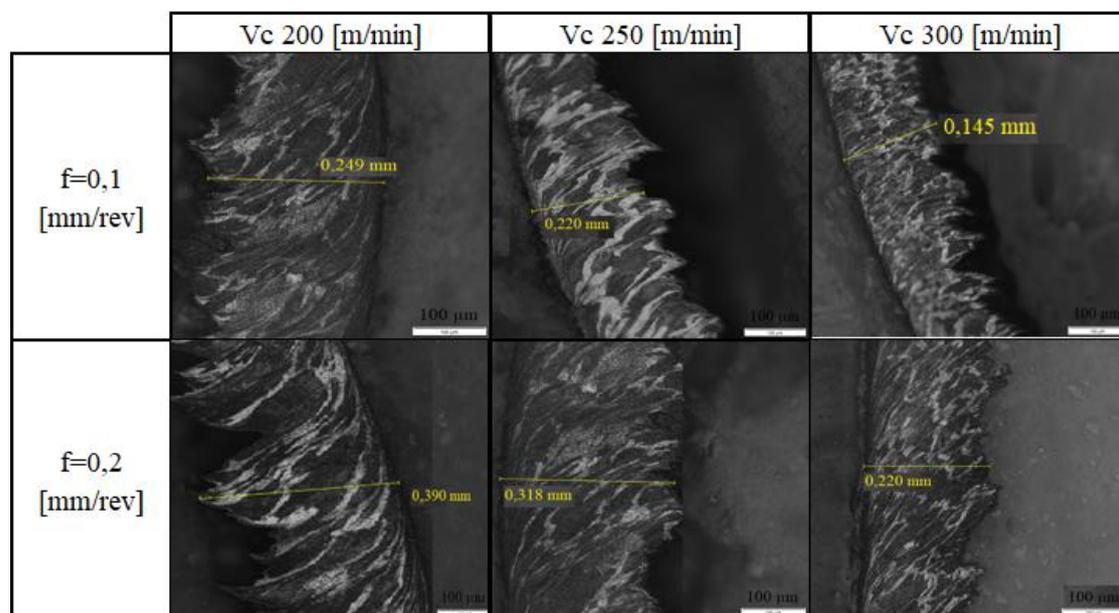
Fonte: o autor (2019)

Quadro 4.5 - Seção longitudinal dos cavacos produzidos pela ferramenta MC 6025 FP



Fonte: o autor (2019)

Quadro 4.6 - Seção longitudinal dos cavacos produzidos pela ferramenta MC 6025 LP

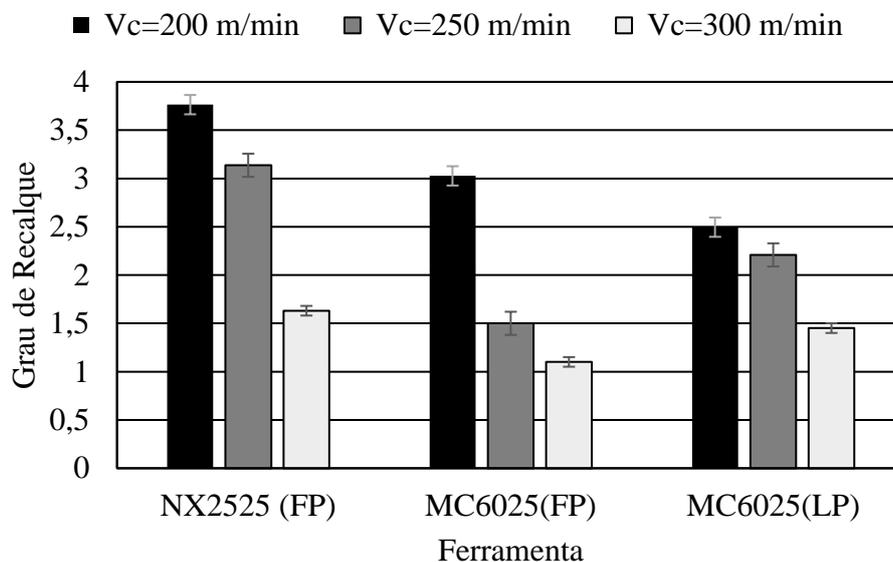


Fonte: o autor (2019)

Os Quadros 4.4 a 4.6 sugerem que a temperatura em todos os 18 testes não chegou ao ponto de promover transformações de fase.

O Gráfico 4.1 apresenta o grau de recalque das ferramentas com o avanço de 0,1 mm/rev.

Gráfico 4.1 - Grau de recalque para avanço de 0,1 mm/rev



Fonte: o autor (2019)

O Gráfico 4.1 demonstra que a ferramenta NX 2525 (FP) apresenta valores do grau de recalque superiores quando comparados à MC 6025 (FP) e MC6025 (LP). Esse fato ocorreu devido ao desgaste acelerado que ocorreu na NX 2525 (FP), pois a ferramenta não apresentava revestimento. Logo, atingiu-se o desgaste máximo de flanco de 0,5 mm na sua aresta principal de corte, em tempo inferior aos 15 minutos de corte, conforme o programado. Conseqüentemente, modificou-se o raio de cunha da ferramenta tornando-o mais arredondado, resultando em maiores valores do grau de recalque.

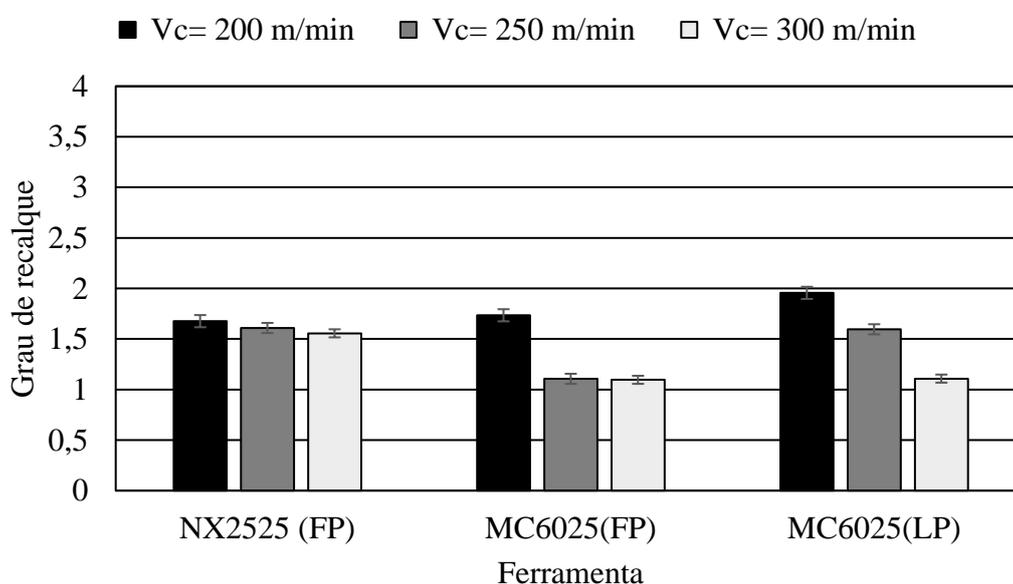
O mesmo ocorreu nos estudos de Silva *et al*, (2007), em que o mais grau de recalque ocorreu quando o desgaste de flanco foi maior. Isso pode ser comprovado devido ao aumento das deformações na zona primária de cisalhamento.

Quando comparadas às ferramentas MC 6025 (FP) e MC6025 (LP), percebe-se que a ferramenta MC 6025 (FP) produziu menor grau de recalque que a MC 6025 (LP) nos testes com $V_c = 250$ e 300 m/min. Isso, corrobora o estudo de Reis (2017), no qual o tipo de quebra-cavaco com maior ângulo de inclinação de saída promove a quebra do cavaco com mais facilidade e, por conseqüência, contribui para a redução do grau de recalque.

Com relação ao aumento da velocidade de corte percebe-se redução do grau de recalque para as três ferramentas. Isso pode ser explicado conforme os estudos Iqbal *et al.* (2008), em que aumento da velocidade de corte reduz o comprimento de contato na interface ferramenta-peça, consequentemente reduz o atrito por fricção. Logo, a taxa de compressão do cavaco diminui em função do aumento da velocidade de corte, influenciando diretamente na redução do grau de recalque.

O Gráfico 4.2 apresenta o grau de recalque das ferramentas com o avanço de 0,2 mm/rev.

Gráfico 4.2 - Grau de recalque para avanço de 0,2 mm/rev



Fonte: o autor (2019)

O Gráfico 4.2 apresenta que a ferramenta NX 2525 FP e MC 6025 FP, é possível perceber que o aumento da velocidade de corte não influenciou no grau de recalque com $f = 0,2$ mm/rev. Já com relação a ferramenta MC 6025 LP percebe-se que o aumento da velocidade de corte, reduz o grau de recalque.

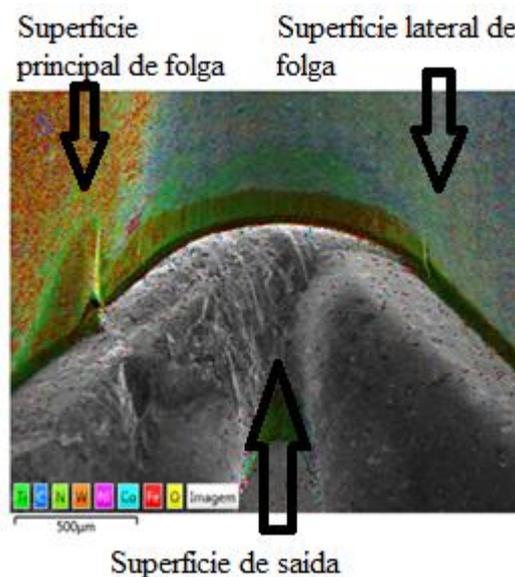
Além disso, demonstra que a espessura do cavaco apresenta valores superiores em relação aos obtidos para $f = 0,1$ mm/rev, independentemente do material da ferramenta de corte e do tipo de quebra-cavaco e velocidade de corte. Isso é explicado por NOVAIS e SOUZA (2009), os quais afirmam que o aumento do avanço reduz a

deformação por cisalhamento na zona primária, e conseqüentemente, diminui o grau de recalque pois afetará diretamente na velocidade de saída do cavaco. Logo, com as relações trigonométricas previamente definidas, o aumento do avanço, acelera a velocidade de saída do cavaco e como resultado reduz o grau de recalque.

4.2 - Desgaste dos insertos

A progressão do desgaste é influenciada principalmente pela velocidade de corte, depois pelo avanço e, por último, pela profundidade de usinagem (FERRARESI, 1970; SHAW, 1986). A Figura 4.1 identifica as superfícies da ferramenta.

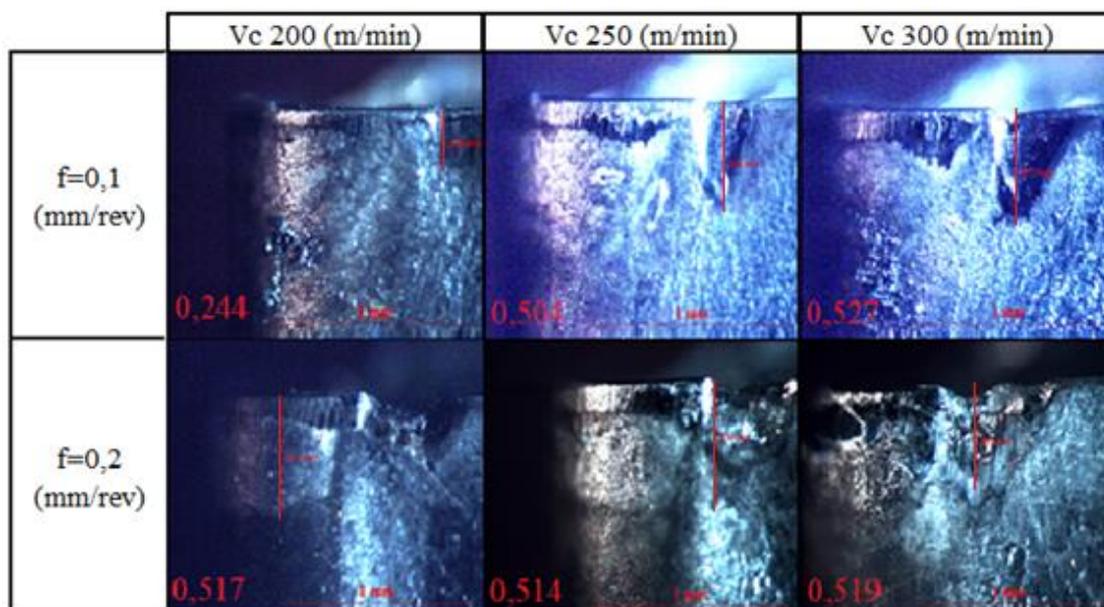
Figura 4.1 - Identificação das superfícies da ferramenta



Fonte: o autor (2019)

Os Quadros 4.7 a 4.9 apresentam imagens da ferramenta NX 2525 (FP) para os testes com diferentes velocidades de corte e avanço com microscópio ótico, MEV e EDS respectivamente. O Quadro 4.7 apresenta o desgaste de flanco na superfície principal de folga.

Quadro 4.7 - Imagens da superfície principal de folga da ferramenta NX 2525 (FP)



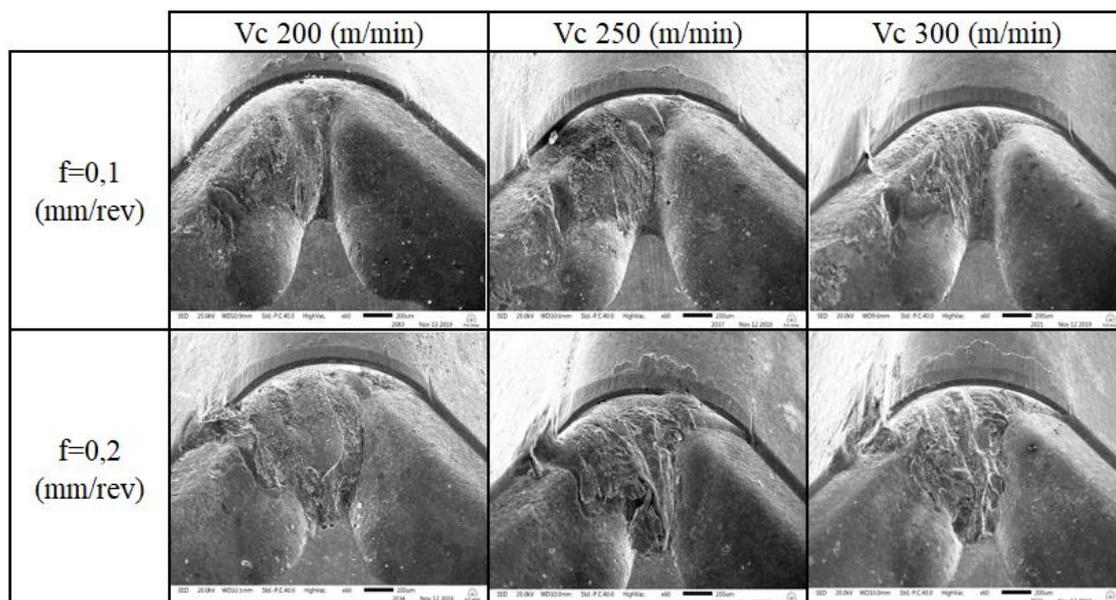
Fonte: o autor (2019)

O Quadro 4.7 demonstra que o desgaste de franco da superfície principal de folga da ferramenta NX 2525 (FP) e com indícios de desgaste de entalhe de menor intensidade. O lascamento da ferramenta ocorre em dois pontos da aresta principal de corte para todos testes realizados com exceção para o teste com $V_c = 200$ m/min e $f = 0,1$ mm/rev.

Percebe-se também que o aumento da velocidade de corte e avanço, aumentou a quantidade de material aderido na aresta principal de corte e isso pode ser evidenciado pelos Quadros 4.7 a 4.9.

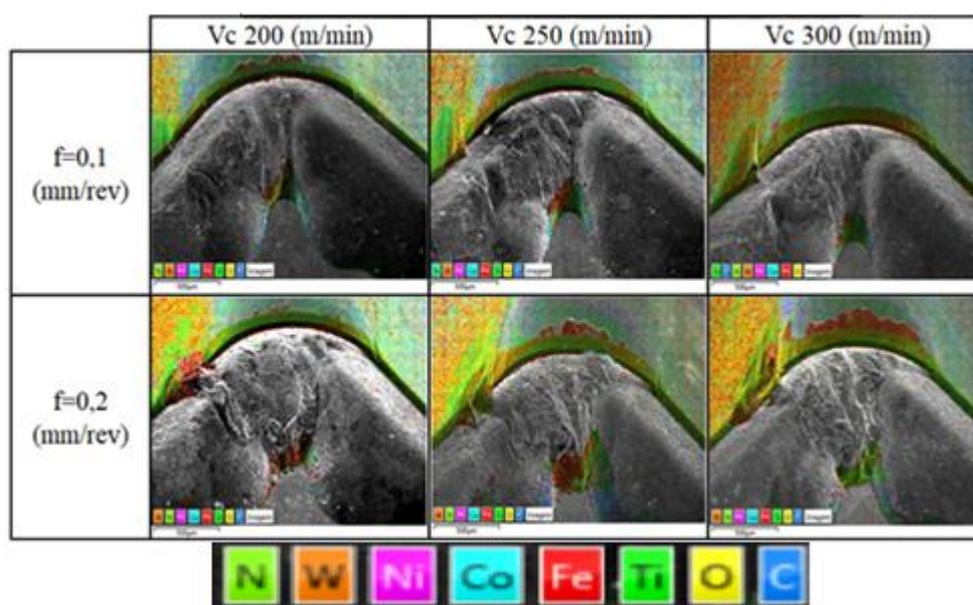
O Quadro 4.8 apresenta as imagens obtidas por MEV da superfície principal de folga, superfície de saída e superfície lateral de folga. Para complementar o Quadro 4.8 foi gerado o Quadro 4.9 do mapa de elementos do inserto para possível identificação dos mecanismos de desgaste que ocorreram durante o processo de torneamento.

Quadro 4.8 - MEV da ferramenta NX 2525 (FP) ampliação (60x)



Fonte: o autor (2019)

Quadro 4.9 - Imagens do mapa de elementos da ferramenta NX 2525 (FP) ampliação (60x)



Fonte: o autor (2019)

Através do Quadro 4.9 é possível a identificação de ferro na superfície principal de folga, superfície secundária e superfície de saída em todos os testes. Todos os testes

apresentam a identificação de grande quantidade de titânio e tungstênio nas três superfícies logo, ocorreu a perda destes elementos.

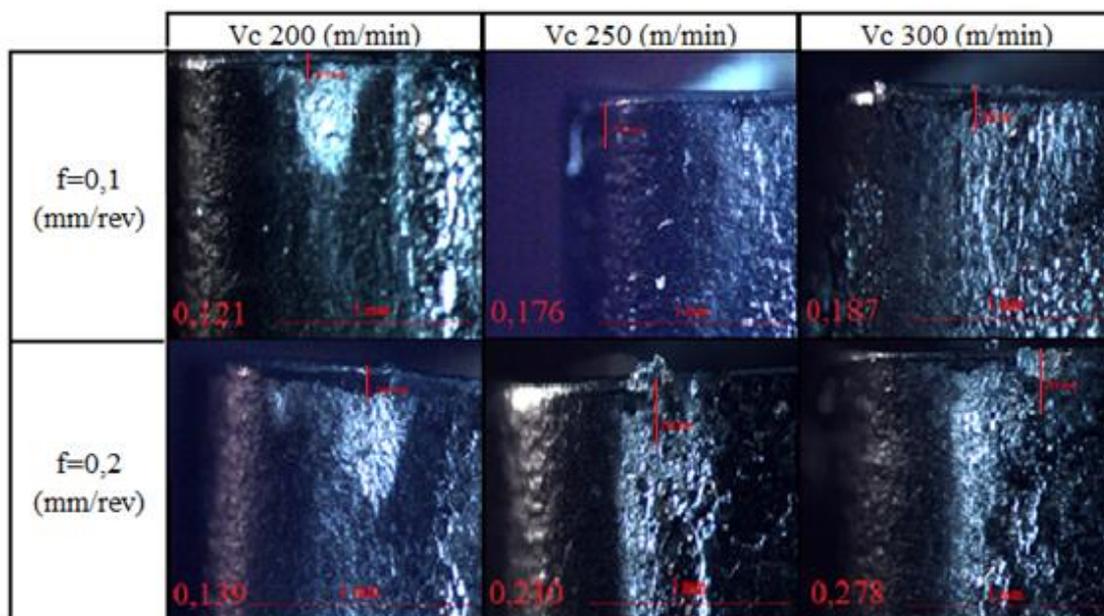
Os testes com $V_c = 200$ m/min apresentam algumas similaridades, como pouca quantidade de ferro foi identificada, portanto, o provável mecanismo de desgaste predominante foi o de abrasão. Isso pode ser explicado por Doré (2007), o qual demonstra que no desgaste por abrasão, com a progressão do tempo de corte, o material aderido juntamente com o atrito na interface peça-ferramenta vai removendo parte do substrato da ferramenta, tornando-a vulnerável à ação da abrasão e às solicitações térmicas.

Os testes com $V_c = 250$ m/min apresentam algumas similaridades como alta presença de ferro nas três superfícies, junto a isso percebe-se através do Quadro 4.7 ocorreu desgaste de franco de grande intensidade, evidenciando que o provável mecanismo de desgaste foi a adesão, pois os testes com a ferramenta NX 2525 (FP) provavelmente não foram atingidas altas temperaturas devido ao pouco tempo de corte. Em baixas temperaturas, apenas os mecanismos de adesão e abrasão estão presentes e a adesão é predominante, enquanto em temperaturas elevadas, a adesão perde lugar para os novos mecanismos de difusão e oxidação (MACHADO, 2015). Ademais, apresenta grande perda de material de cobalto e níquel na aresta principal de corte, ou seja, demonstrando a tendência que os materiais mais dúcteis tendem a se soltar primeiramente diante dos materiais mais duros, como titânio e tungstênio.

Os testes com $V_c = 300$ m/min apresentam algumas similaridades, como alta presença de ferro na aresta principal de corte. Além disso, apresenta grande perda de material de níquel e cobalto e uma perda considerável de tungstênio na aresta principal de corte e superfície de saída. Logo, o provável mecanismo de desgaste predominante na aresta principal de corte foi a adesão, entretanto, na superfície de saída, o provável mecanismo de desgaste predominante foi oxidação; tal fato corrobora os estudos de Oliveira (2007), que apresenta parâmetros similares.

Os Quadros 4.10 a 4.12 apresentam imagens da Ferramenta MC 6025 (FP) para os testes com diferentes velocidades de corte e avanço com microscópio ótico, MEV e EDS respectivamente. O Quadro 4.10 apresenta o desgaste de flanco na superfície principal de folga.

Quadro 4.10 - Imagens da superfície principal de folga da ferramenta MC 6025 (FP)



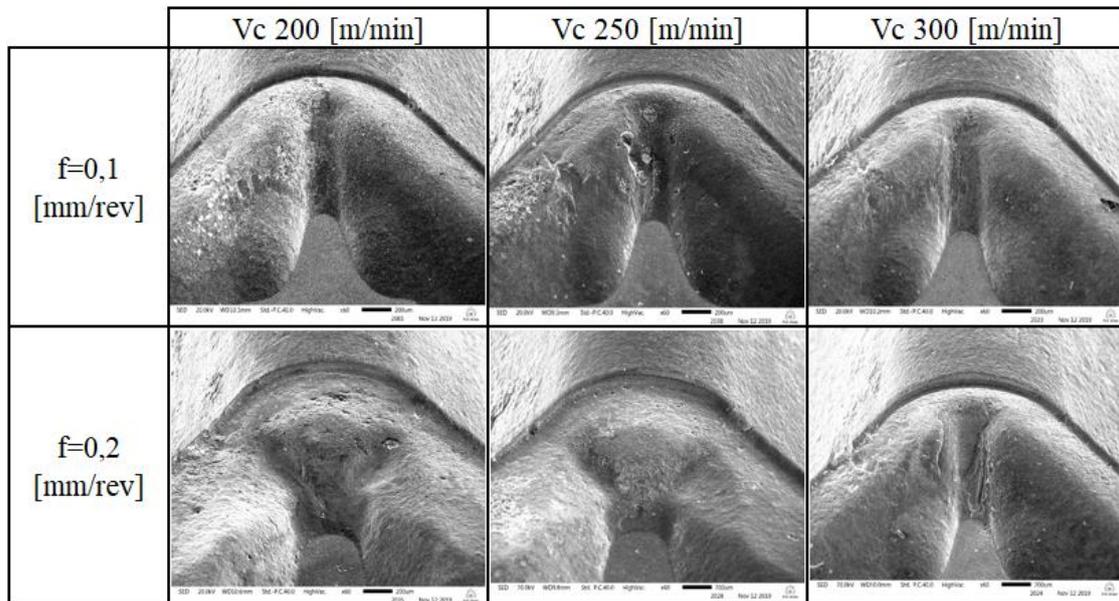
Fonte: o autor (2019)

O Quadro 4.10 demonstra que o desgaste de franco da superfície principal de folga da ferramenta MC 6025 (FP). Não ocorreu lascamento ou trinca em nenhum dos testes.

Percebe-se também que o aumento da velocidade de corte e avanço, aumentou a quantidade de material aderido na aresta principal de corte e isso pode ser evidenciado pelos Quadros 4.10 a 4.12.

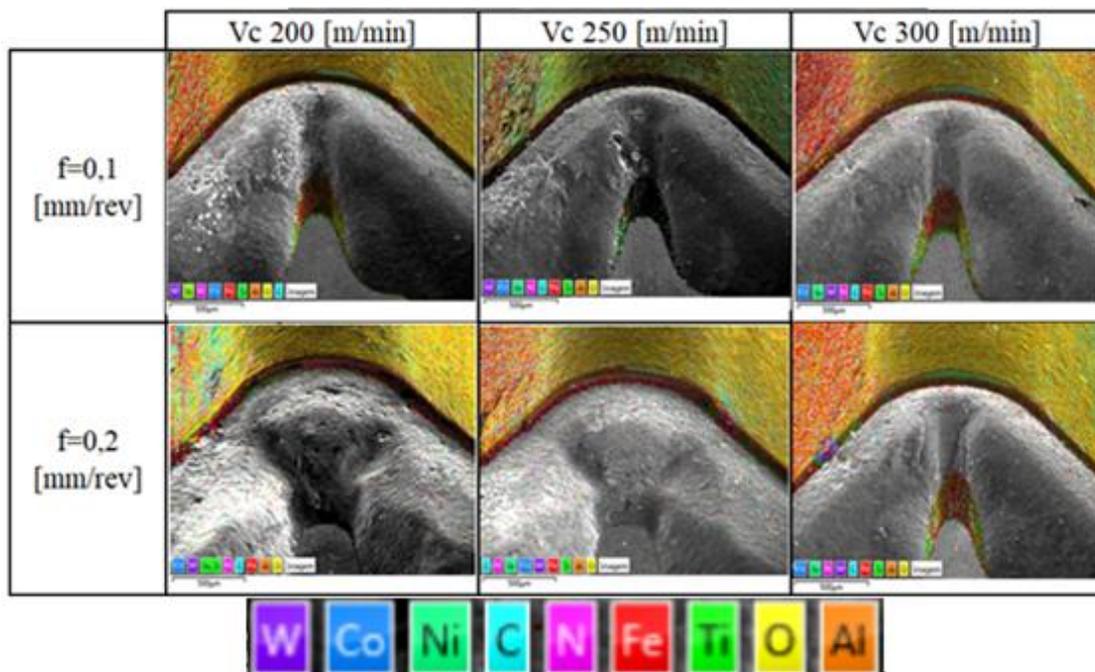
O Quadro 4.11 apresenta as imagens obtidas MEV da superfície principal de folga, superfície de saída e superfície lateral de folga. Para complementar o Quadro 4.11 foi gerado o Quadro 4.12 do mapa de elementos do inserto para possível identificação dos mecanismos de desgaste.

Quadro 4.11 - MEV da ferramenta MC 6025 (FP) ampliação (60x)



Fonte: o autor (2019)

Quadro 4.12 - Imagens do mapa de elementos da ferramenta MC 6025 (FP) ampliação (60x)



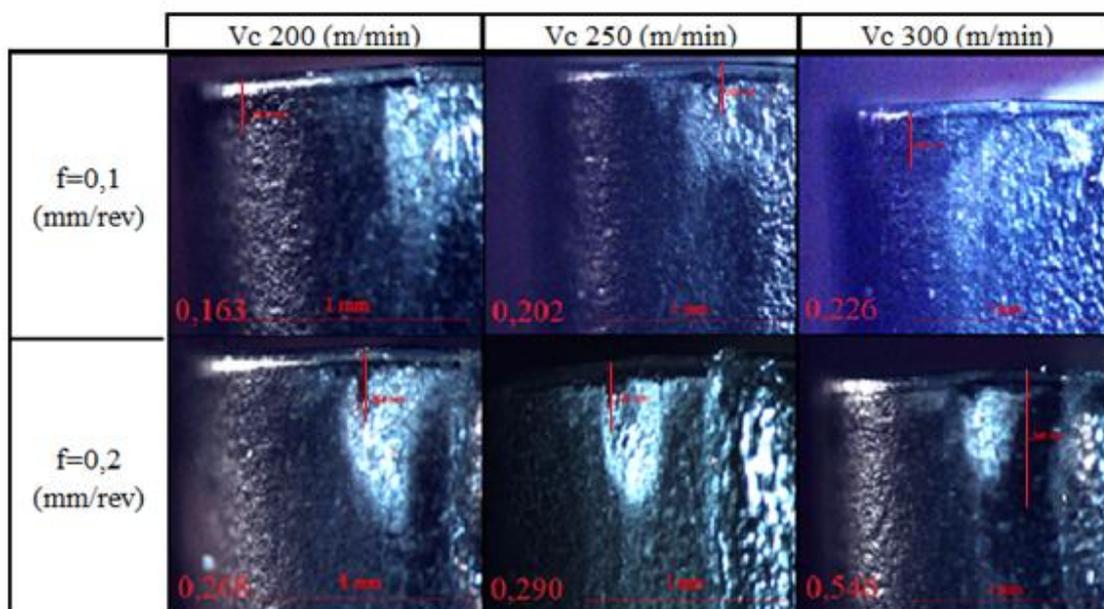
Fonte: o autor (2019)

Através dos Quadros 4.11 e 4.12 é possível a identificação de ferro na superfície principal de folga em todos os testes. Todos os testes apresentam a identificação de grande quantidade de titânio e tungstênio nas três superfícies. Logo, a perda desses elementos foi muito pequena.

Segundo Machado *et al.* (2015), em ferramentas de metal duro que possuem quantidades muito grandes de carboneto de tungstênio (WC) em sua composição, o desgaste abrasivo é pouco influente no que diz respeito à degradação da ferramenta. Além disso, a ferramenta apresenta TiNC no seu revestimento e segundo Da Silva (2013) esse revestimento aumenta o desgaste abrasivo. A soma desses fatores evidencia que o provável mecanismo de desgaste predominante para todos os testes com a ferramenta MC 6025 FP é de adesão.

Os Quadros 4.13 a 4.15 apresentam imagens da Ferramenta MC 6025 (LP) para os testes com diferentes velocidades de corte e avanço com microscópio ótico, MEV e EDS respectivamente. O Quadro 4.13 apresenta o desgaste de flanco na superfície principal de folga.

Quadro 4.13 - Imagens da superfície de saída da ferramenta MC 6025 (LP)



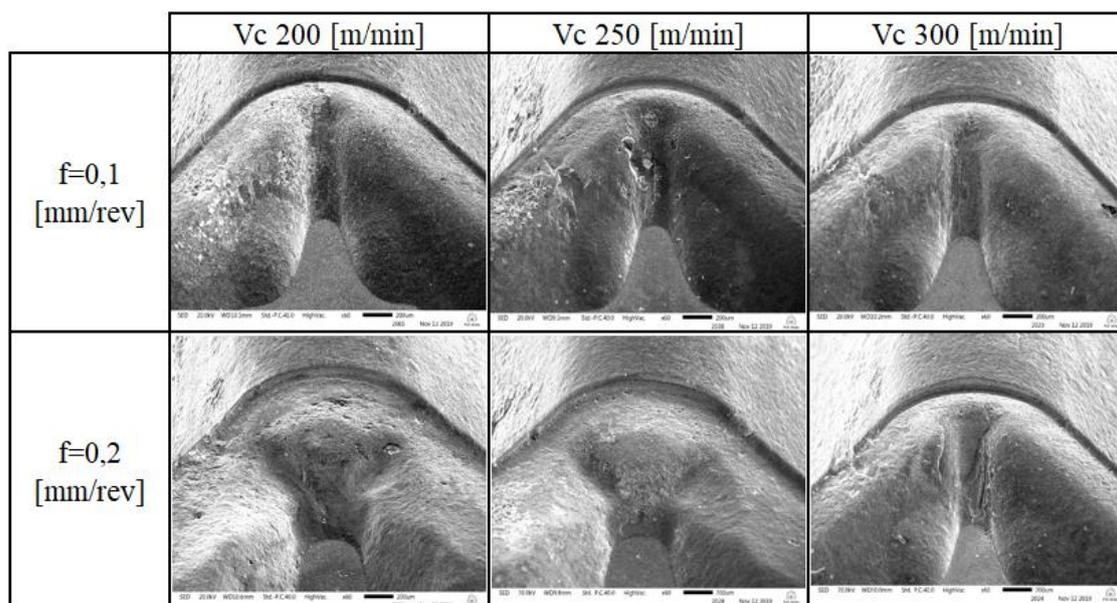
Fonte: o autor (2019)

O Quadro 4.13 demonstra que o desgaste de franco da superfície principal de folga da ferramenta MC 6025 (LP). Não ocorreu lascamento ou trinca em nenhum dos testes.

Percebe-se também que o aumento da velocidade de corte e avanço, aumentou a quantidade de material aderido na aresta principal de corte e isso pode ser evidenciado pelos Quadros 4.13 a 4.15.

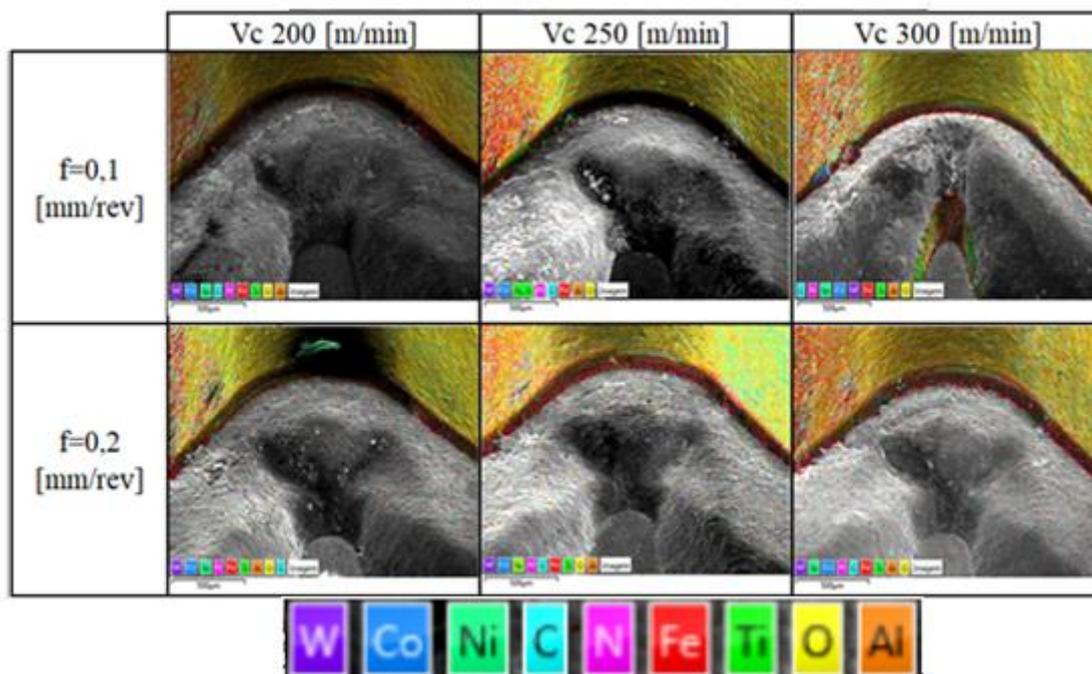
O Quadro 4.14 apresenta as imagens obtidas por MEV da superfície principal de folga, superfície de saída e superfície lateral de folga. Para complementar o Quadro 4.14 foi gerado o Quadro 4.15 do mapa de elementos do inserto para possível identificação dos mecanismos de desgaste.

Quadro 4.14 - MEV da ferramenta MC 6025 (LP) ampliação (60x)



Fonte: o autor (2019)

Quadro 4.15 - Imagens do mapa de elementos da ferramenta MC 6025 (LP) ampliação (60x)



Fonte: o autor (2019)

O provável mecanismo de desgaste predominante da ferramenta MC 6025 (LP) é similar a ferramenta MC 6025 (LP), pois o material da ferramenta e revestimento são os mesmos e os resultados encontrados para o desgaste são similares; logo, a adesão prevaleceu sobre os demais mecanismos de desgaste.

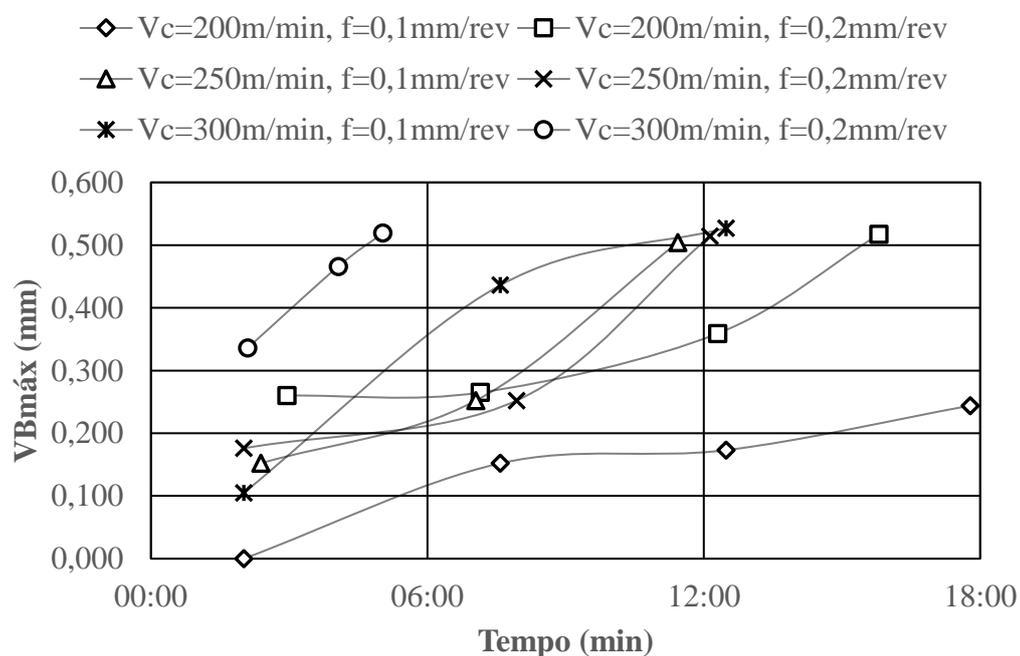
Por meio dos Quadros 4.7, 4.10 e 4.13 e Gráficos 4.6 a 4.7, é possível perceber que apenas a ferramenta NX2525 (FP) sofreu lascamento na aresta principal de corte em todos os testes antes dos 15 minutos de tempo usinado e atingiu o limite de desgaste ($VB_{Bmáx}$). Com exceção para o teste com a $V_c = 200$ m/min e $f = 0,1$ mm/rev, no qual atingiu os 15 minutos de tempo usinado e não atingiu o limite de desgaste ($VB_{Bmáx}$).

Nos demais testes consegue-se identificar o desgaste de flanco máximo atingido após 15 minutos de tempo usinado. A ferramenta MC6025 (FP) em todos os testes não ultrapassou o $VB_{Bmáx} = 0,300$ mm e isso realça como o revestimento foi crucial para o aumento da resistência ao desgaste acrescido de uma geometria de quebra cavaco FP. A ferramenta MC 6025 (LP) também obteve boa resistência ao desgaste e não ultrapassou

$VB_{Bm\acute{a}x} = 0,300$ mm, com exceção apenas para o teste com os parâmetros mais críticos ($V_c = 300$ m/min e $f = 0,2$ mm/rev), o qual atingiu o limite de desgaste ($VB_{Bm\acute{a}x} = 0,500$ mm). Isso demonstra que a velocidade de corte, a geometria do quebra-cavaco, o revestimento do inserto e o avanço influenciam no desgaste.

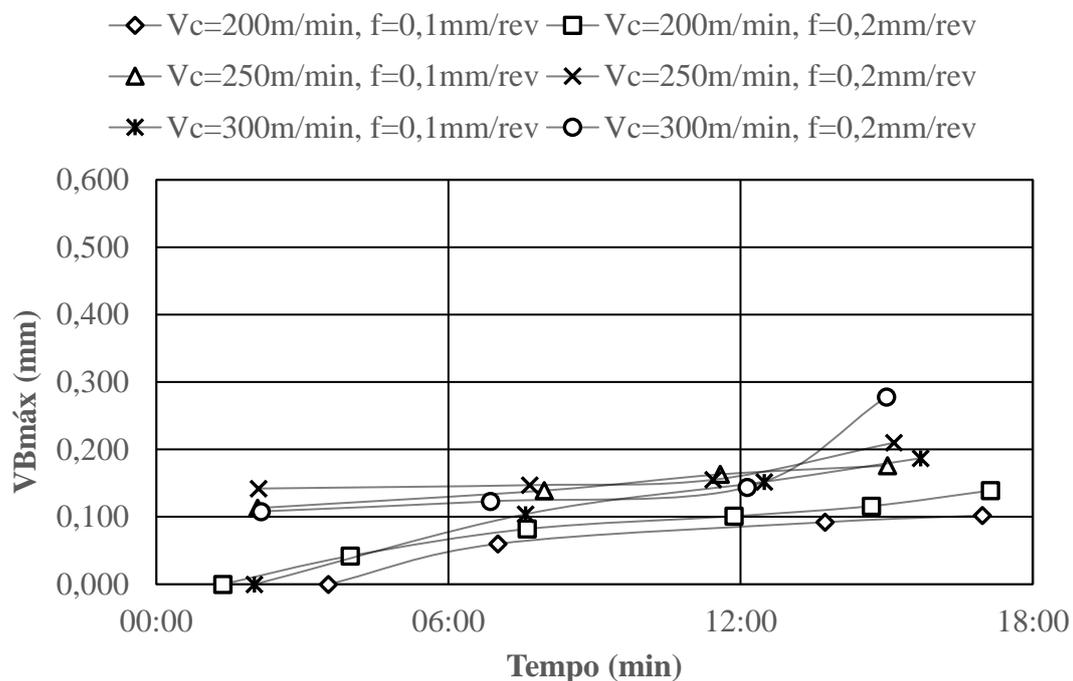
Os gráficos 4.3 a 4.5 apresentam o desgaste das ferramentas em função do tempo.

Gráfico 4.3 - Desgaste em função do tempo para ferramenta NX 2525 (FP)



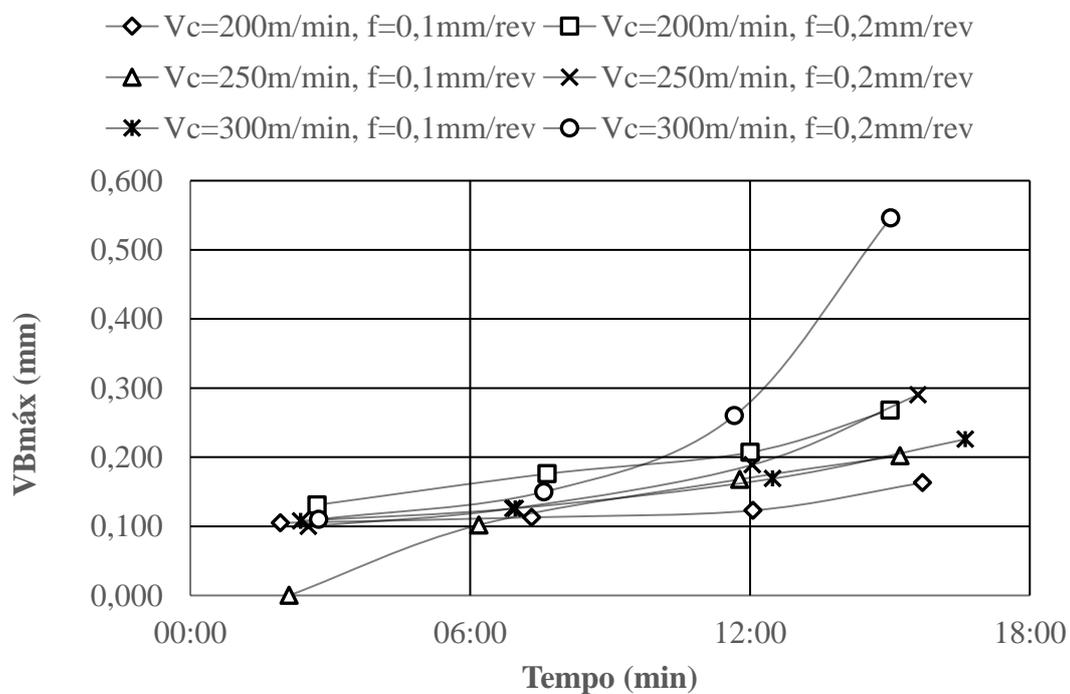
Fonte: o autor (2019)

Gráfico 4.4 - Desgaste em função do tempo para ferramenta MC 6025 (FP)



Fonte: o autor (2019)

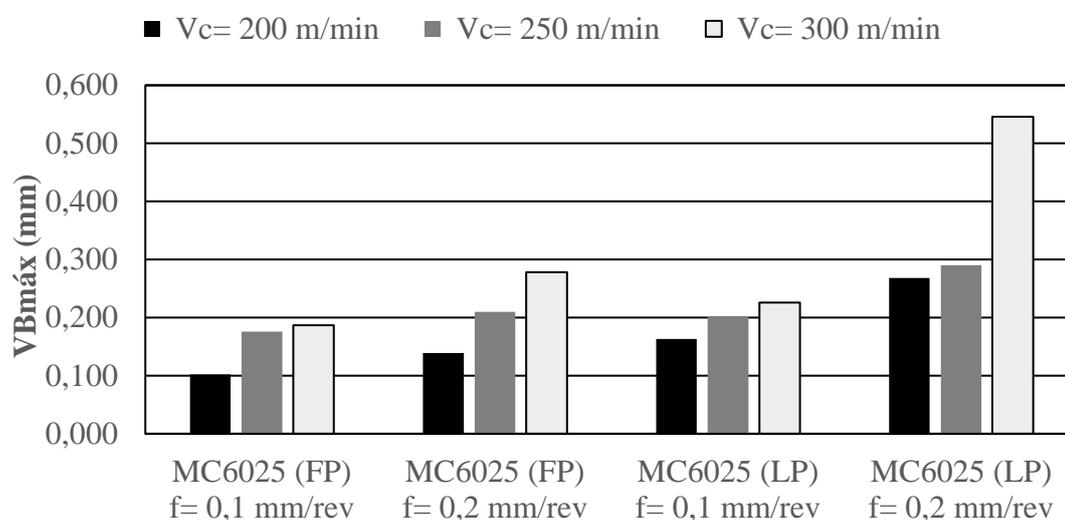
Gráfico 4.5 - Desgaste em função do tempo para ferramenta MC 6025 (LP)



Fonte: o autor (2019)

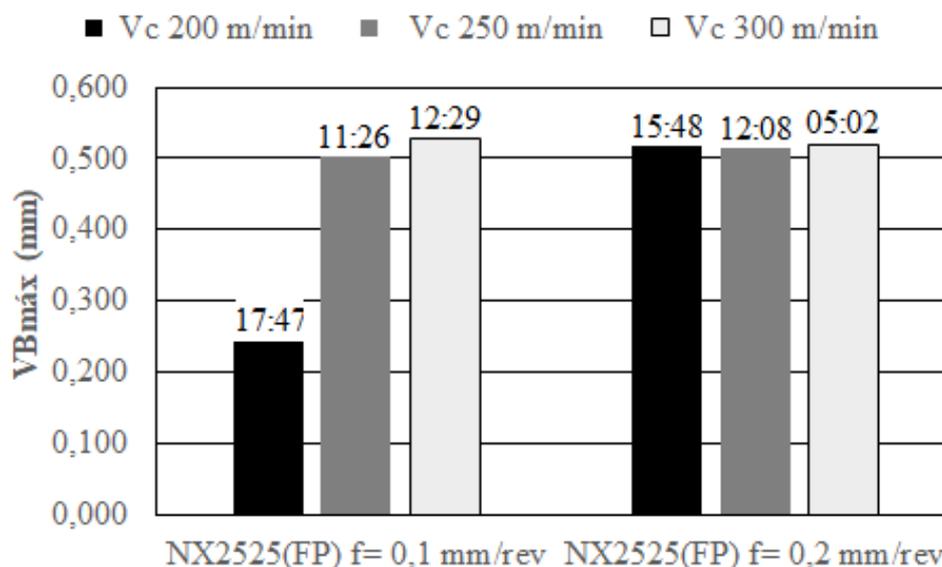
Conforme mostram os Gráficos 4.3 a 4.5, o desgaste aumentou em função do tempo, o mesmo ocorre em Amorim (2002) e Doré (2007), porém para compreender melhor o grau de influência da velocidade de corte e material da ferramenta e avanço, foi gerado o Gráfico 4.6. No entanto, a ferramenta NX2525 não pode ser incluída pois atingiu o desgaste máximo antes dos 15 minutos de corte, logo, foi gerado o Gráfico 4.7.

Gráfico 4.6 - Influência do quebra-cavaco, velocidade de corte e avanço sobre o desgaste da ferramenta MC 6025



Fonte: o autor (2019)

Gráfico 4.7 - Influência do quebra-cavaco, velocidade de corte e avanço sobre o desgaste da ferramenta NX 2525



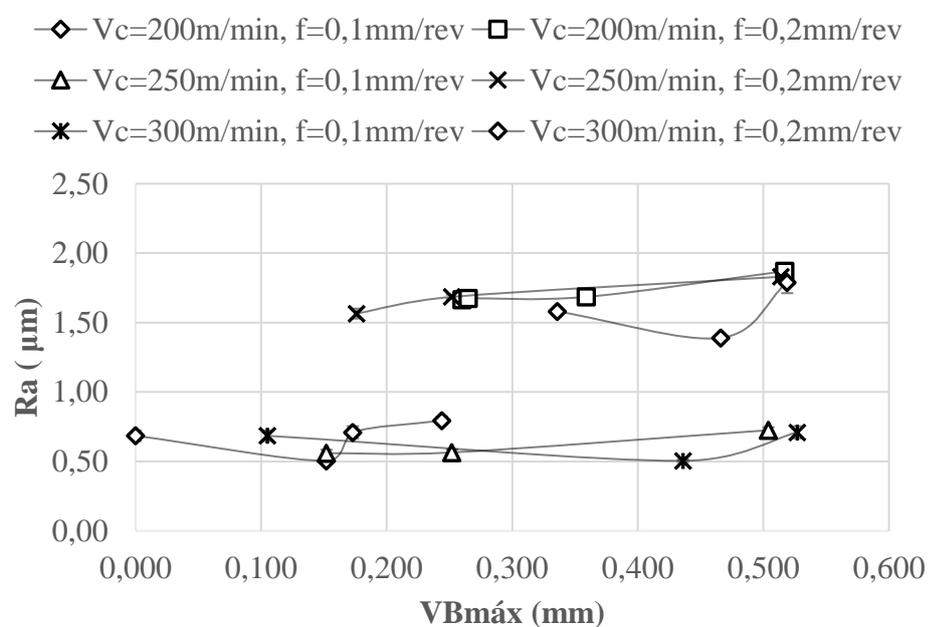
Fonte: o autor (2019)

A velocidade de corte apresentou influência significativa sobre o desgaste nas três ferramentas de corte. O Gráfico 4.6 enfatiza que o aumento da velocidade de corte provoca um aumento no desgaste das ferramentas de metal duro. Isso pode ser explicado através de Reis (2017), no torneamento do aço ABNT 4340 empregando ferramentas de metal duro e cerâmica, no qual identificou que o aumento da velocidade de corte aumentou a temperatura de corte. Logo, esse aumento faz com que acelere os mecanismos de desgaste, reduzindo a vida útil da ferramenta. Esse resultado está de acordo com a literatura (MACHADO et al., 2015; TRENT; WRIGHT, 2000), onde há a maior geração de calor é produzida na maior velocidade de corte, conseqüentemente, acelera os mecanismos de desgaste e diminui a vida das ferramentas.

O avanço também apresenta influência sobre o desgaste das ferramentas MC 6025 (FP e LP) quando comparado ao aumento do $f = 0,1$ mm/rev para o $f = 0,2$ mm/rev. O Gráfico 4.7, realça que o aumento do avanço foi significativo para influenciar no aumento do desgaste das 3 ferramentas. Esses resultados foram encontrados em Souza e Schroeter (2007), através do torneamento do aço ABNT 1040 identificou que o aumento do avanço proporcionou maiores forças de corte, e, devido ao aumento dessas forças, ocorre um aceleração do desgaste nas ferramentas.

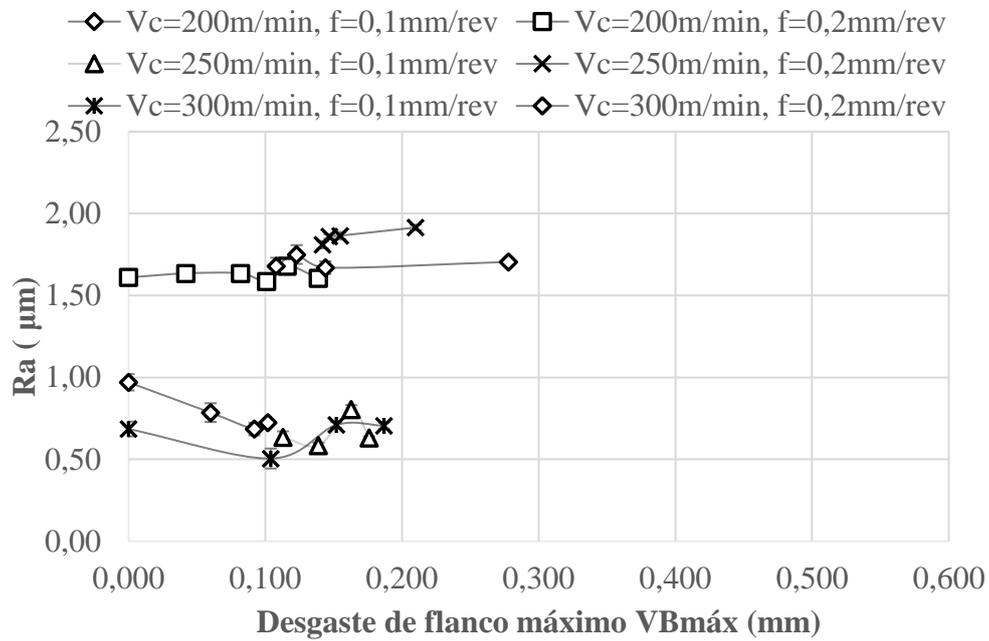
A ferramenta que apresentou melhor desempenho foi a MC 6025 (FP), pois em nenhum dos testes atingiu o limite de desgaste estabelecido. A ferramenta MC 6025 (LP) também apresentou bom desempenho na usinabilidade do aço ABNT 1045, entretanto, quando estabelecidos os parâmetros mais críticos ($V_c= 300$ m/min e $f= 0,2$ mm/rev), a ferramenta atingiu o limite de desgaste. O pior desempenho foi a ferramenta NX 2525 (FP), que atingiu o limite de desgaste em todos os testes, com exceção para $V_c= 200$ m/min e $f= 0,1$ mm/rev, os quais não atingiram o limite de desgaste. Os Gráficos 4.8 a 4.10 estabelecem a relação da rugosidade (R_a) com o $VB_{Bmáx}$.

Gráfico 4.8 - Relação do desgaste da ferramenta NX2525 FP sobre a rugosidade (R_a)



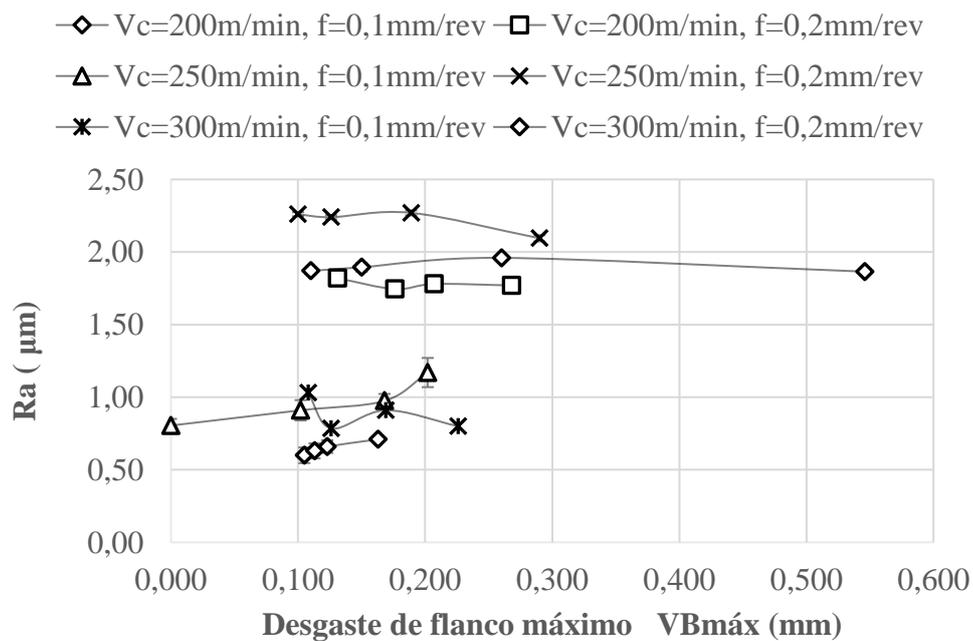
Fonte: o autor (2019)

Gráfico 4.9 - Relação do desgaste da ferramenta MC6025 FP sobre a rugosidade (R_a)



Fonte: o autor (2019)

Gráfico 4.10 - Relação do desgaste da ferramenta MC6025 (LP) sobre a rugosidade (R_a)



Fonte: o autor (2019)

A rugosidade se manteve praticamente constante em função do desgaste de flanco, pois para as três ferramentas quando analisadas a rugosidade com $f=0,1$ mm/rev não ultrapassou os limites de 0,50 a 1,25 μm e com $f=0,2$ mm/rev não ultrapassou os limites 1,75 a 2,25 μm . O mesmo ocorre Amorim (2002) no torneamento do aço ABNT 1045 empregando ferramentas de metal duro, percebeu-se que a rugosidade se mantinha constante em função do desgaste até atingir um $VB_{Bm\acute{a}x}$ de aproximadamente 0,5 mm, demonstrando que essas variáveis são independentes enquanto não alterasse o raio de ponta da ferramenta ou a formação de aresta postiça de corte.

Esse comportamento da rugosidade (R_a) em função do $VB_{Bm\acute{a}x}$ pode, portanto, ser associado a um estudo da relação entre R_z , R_a e VB que pode ser encontrada em (Metropoulos, 1974), onde se determinou que o desgaste de flanco não é suficiente para modelagem da curva de rugosidade, exigindo também o conhecimento do desgaste de entalhe.

Trabalhos anteriores (SANDVIKEN, 1994 e FERRARESI, 1970) afirmaram que o crescimento do desgaste na superfície de folga da ferramenta de corte tem influência direta sobre aumento da rugosidade superficial da peça usinada. SHAW (1986), também verificou esse comportamento em seus experimentos, mas observou em alguns dos testes a ocorrência de reduções nos valores da rugosidade superficial.

Não foi possível traçar o gráfico de vida para as ferramentas, uma vez que não se pôde estabelecer um critério como referência devido aos resultados obtidos. O critério $VB_{Bm\acute{a}x}=0,500$ mm não foi atingido nos testes com a ferramenta MC 6025 (FP) e MC 6025 (LP). A ferramenta NX 2525 (FP) atingiu o $VB_{Bm\acute{a}x}$, porém no teste com $V_c=200$ m/min e $f=0,1$ mm não atingiu o $VB_{Bm\acute{a}x}=0,500$ mm. Assim, não foi possível estabelecer um critério, impossibilitando a criação da curva de vida da ferramenta.

É importante salientar que essas curvas apresentam uma dispersão muito grande, segundo Diniz (1989), dificultando o seu uso prático para a determinação do momento de troca. Sistemas de monitorização e determinação automática do momento de troca da ferramenta devem, portanto, basear suas conclusões na análise de dados individuais para cada ferramenta e condição de operação no instante do torneamento.

4.3 - Rugosidade

Considera-se como rugosidade inicial o valor obtido após o primeiro passo da ferramenta e rugosidade final, aquele obtido após atingir 15 minutos de corte ou atingir $VB_{Bm\acute{a}x} = 0,5$ mm. A Tabela 4.1 resume os p-valores dos principais efeitos (velocidade de corte, avanço e material da ferramenta) sobre o desvio médio quadrático (R_a), altura total do perfil (R_t) e altura máxima do perfil (R_z) iniciais e finais.

Os resultados completos da ANOVA estão detalhados no Apêndice B.

Tabela 4.1 - ANOVA para a rugosidade inicial e final

Fonte	Inicial			Final		
	R_a	R_z	R_t	R_a	R_z	R_t
	P-valor					
Modelo	0	0,005	0,041	0	0,002	0,11
Linear	0	0,005	0,041	0	0,002	0,11
Ferramenta	0,072	0,143	0,093	0,047	0,258	0,673
Velocidade de corte (m/min)	0,942	0,418	0,665	0,091	0,079	0,355
Avanço (mm/rev)	0	0	0,008	0	0	0,013

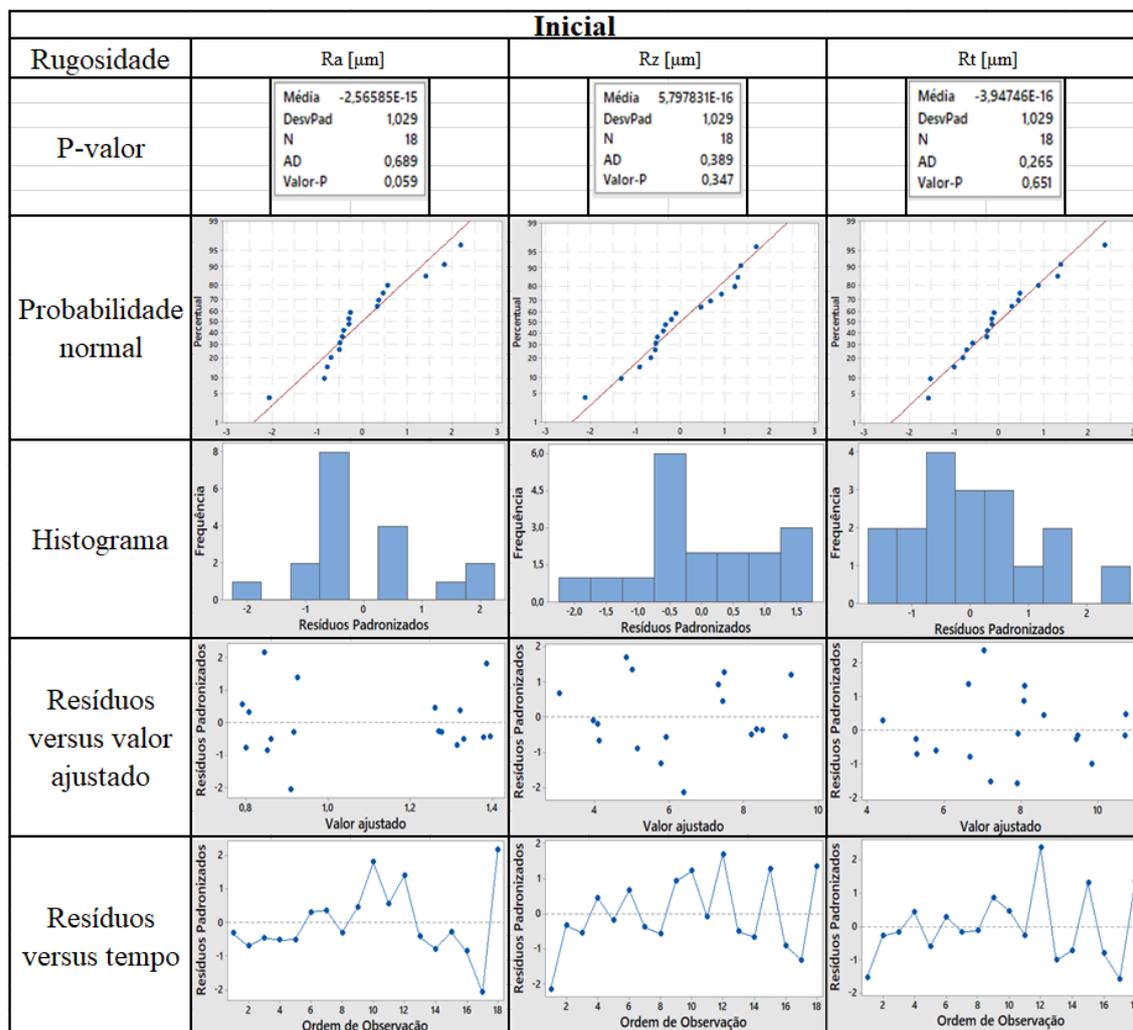
Fonte: o autor (2019)

Foi necessário realizar uma transformada de Box-Cox para garantir uma distribuição normal para o R_a inicial, porque o p-valor de referência da probabilidade normal foi maior que 0,05. Os demais testes atingiram todos os padrões para garantir que o modelo fosse adequado e validado sem a necessidade de transformação de dados.

O critério para determinar se a variável apresentou influência significativa é obter um p-valor menor que 0,05. A Tabela 4.1 demonstra que, em todos os testes, o avanço apresentou influência significativa sobre a rugosidade. As variáveis velocidade de corte e material da ferramenta de corte não apresentaram nenhuma influência significativa sobre a rugosidade, com exceção para R_a final, em que o material da ferramenta apresentou influência significativa sobre a rugosidade.

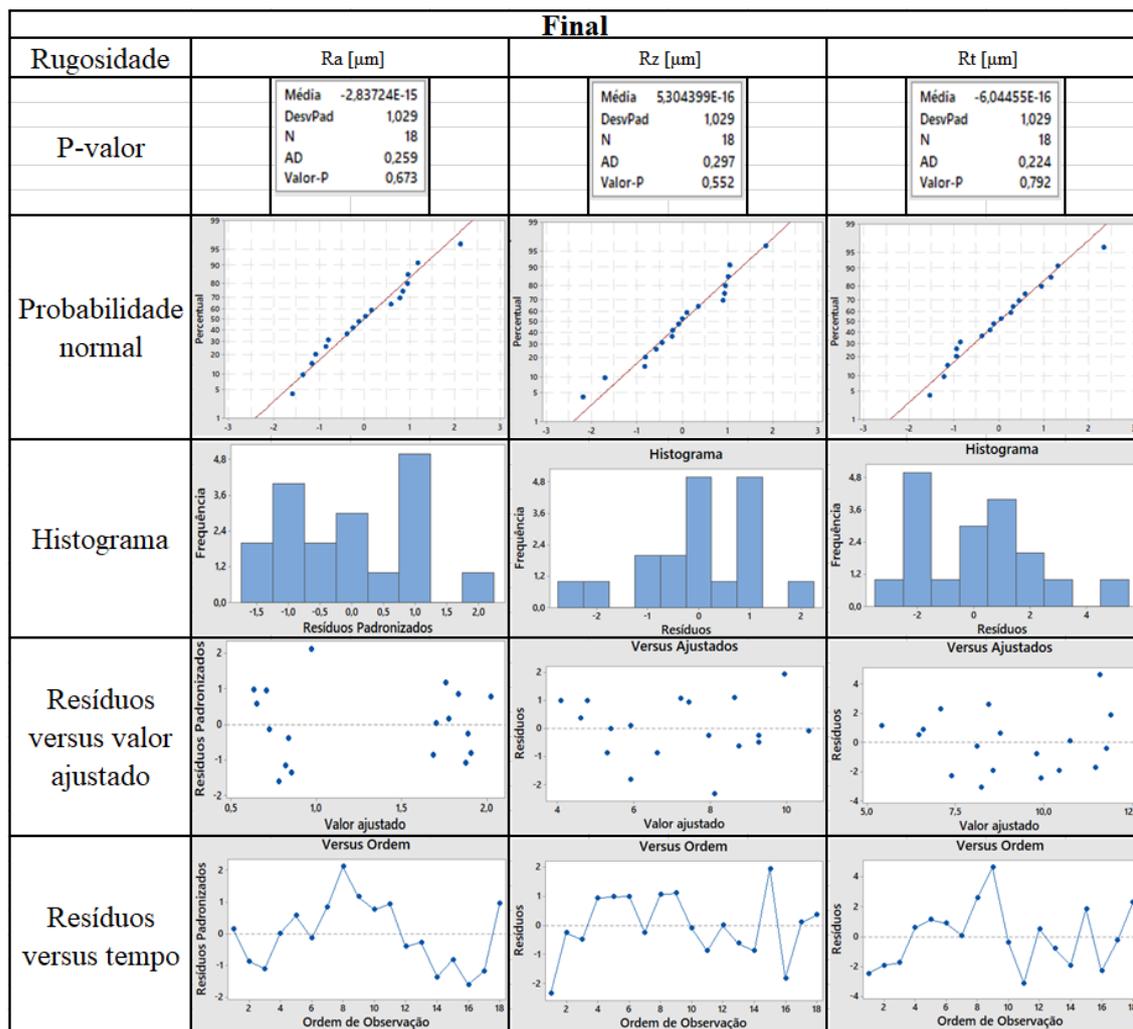
Os gráficos de probabilidade normal, histograma, resíduos versus valor ajustado e resíduos versus tempo encontram-se nos Gráficos 4.11 e 4.12 para verificação e validação do modelo.

Gráfico 4.11 - Análise de resíduos para a rugosidade inicial



Fonte: o autor (2019)

Gráfico 4.12 - Análise de resíduos para a rugosidade final

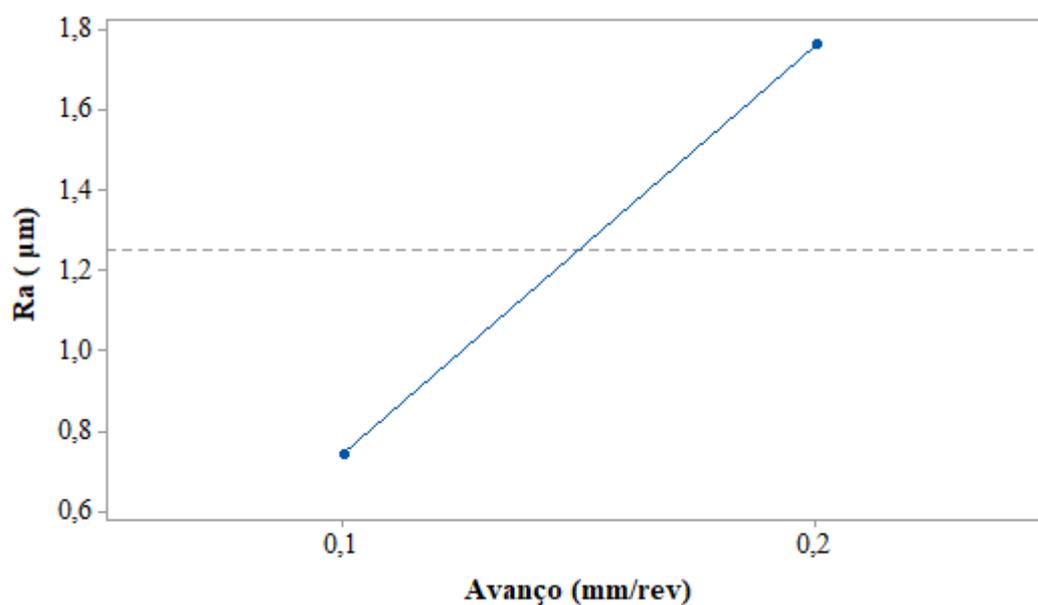


Fonte: o autor (2019)

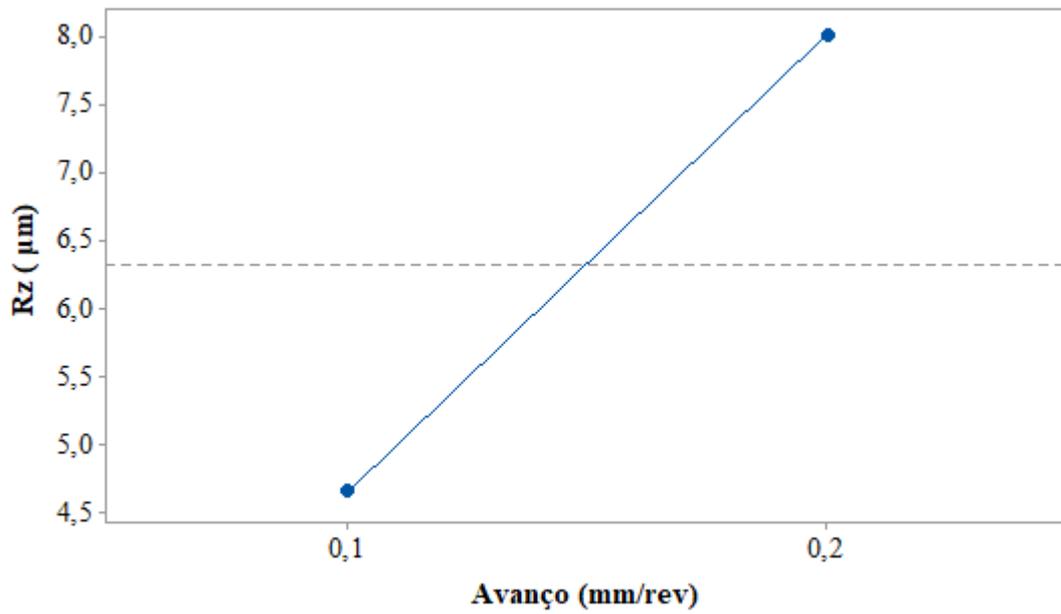
Barros Neto, Scarminio e Bruns (2010) afirmam que o exame dos resíduos é fundamental para avaliar a qualidade e o grau do ajuste do modelo. Os Gráficos 4.11 e 4.12 apresentam os resíduos dos dados do material da ferramenta, da velocidade corte e do avanço para as rugosidades iniciais e finais (R_a , R_z e R_t). O gráfico da probabilidade normal mostra que os resíduos estão próximos a uma reta e, por sua vez, o histograma indica que os resíduos seguem uma distribuição normal. O gráfico de resíduo em função do valor ajustado demonstra que os resíduos não seguem uma tendência de acordo com o valor ajustado, ou seja, a variância dos resíduos é constante. Por fim, vale ressaltar que o gráfico de resíduos em função do tempo revela que os resíduos são independentes no tempo.

Os Gráficos 4.13 a 4.18 evidenciam que todos os valores de rugosidade tiveram o avanço como único efeito significativo, exceto o R_a final, no qual a ferramenta de corte também apresentou efeito significativo. Assim, infere-se que nem a mudança no material da ferramenta de corte e a velocidade de corte são suficientes para influenciar significativamente os valores de R_a , R_z e R_t . Tal fato corrobora com os estudos de Campos *et al.* (2011), no qual, apenas o avanço foi influente quando avaliado o inserto de cerâmica mista ($Al_2O_3 + TiC$) recoberta com nitreto de titânio (TiN) no torneamento do aço ABNT 52100.

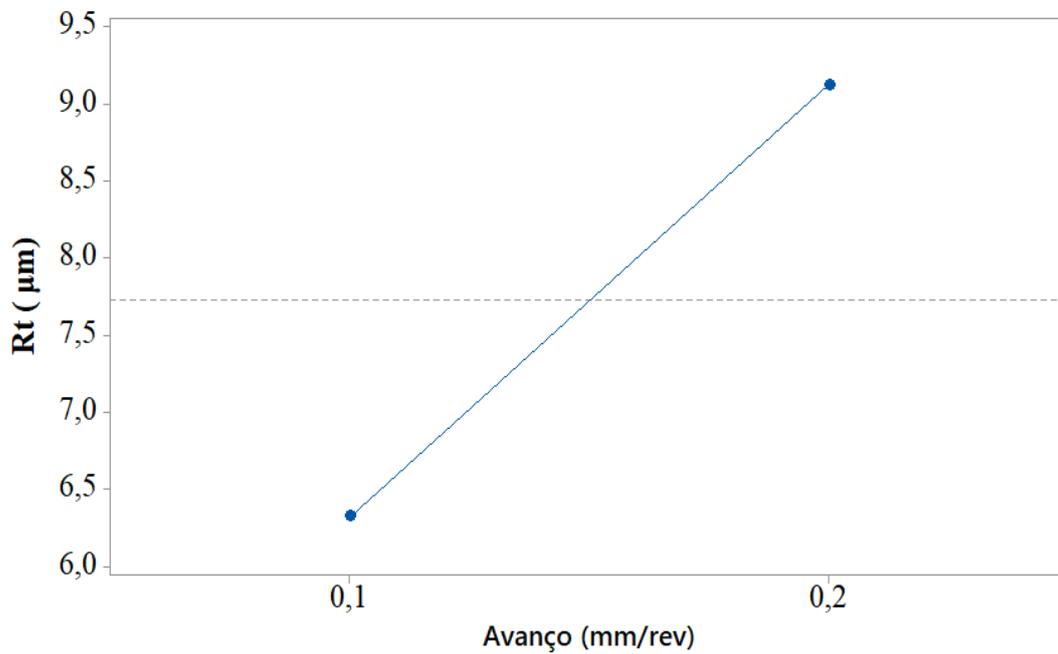
Gráfico 4.13 - Efeito principal para a rugosidade inicial R_a



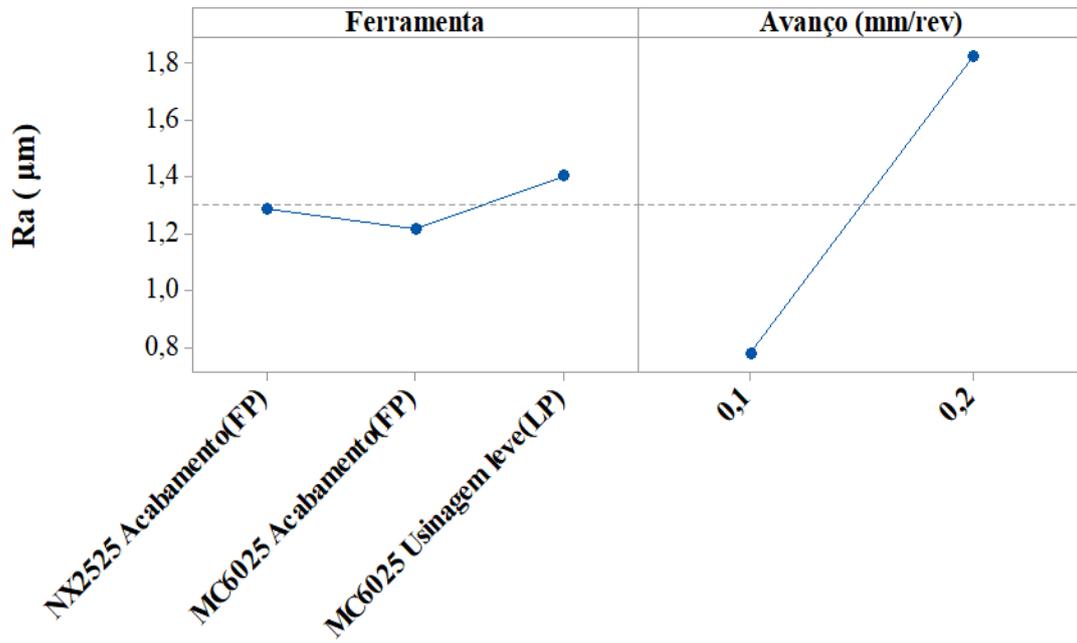
Fonte: o autor (2019)

Gráfico 4.14 - Efeito principal para a rugosidade inicial R_z 

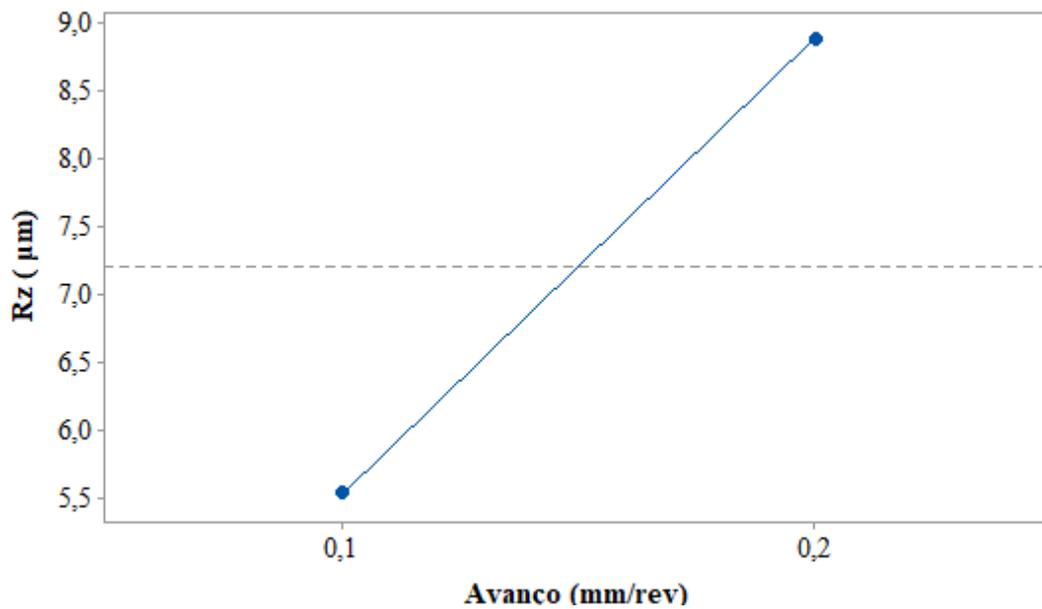
Fonte: o autor (2019)

Gráfico 4.15 - Efeito principal para a rugosidade inicial R_t 

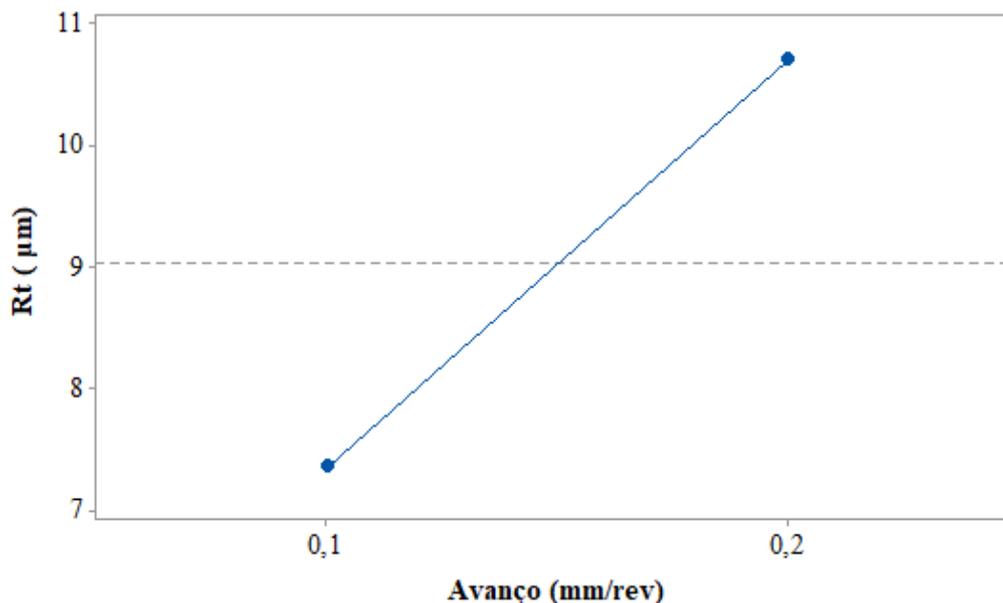
Fonte: o autor (2019)

Gráfico 4.16 - Efeito principal para a rugosidade final R_a 

Fonte: o autor (2019)

Gráfico 4.17 - Efeito principal para a rugosidade final R_z 

Fonte: o autor (2019)

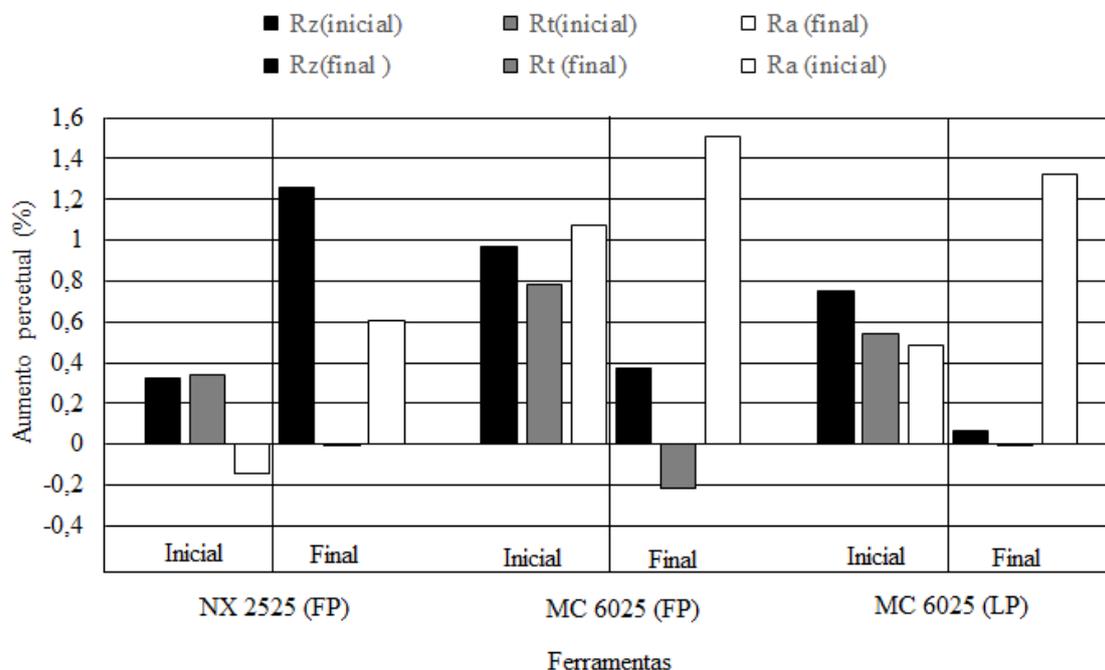
Gráfico 4.18 - Efeito principal para a rugosidade final R_t 

Fonte: o autor (2019)

Em relação ao avanço, nota-se que a mudança de nível afeta consideravelmente a média de R_a , R_z e R_t . A duplicação do avanço levou a um comportamento similar das ferramentas NX 2525 (FP) e MC 6025 (FP), nas quais ocorrerem um aumento das rugosidades R_a , R_z e R_t iniciais e R_a e R_z finais. Para a ferramenta MC 6025 (LP), ocorreu o aumento em R_a , R_z e R_t iniciais e R_z final, o que corrobora com a afirmação de Machado *et al.* (2015) de que, dentre as condições de corte, o avanço mostra-se como o parâmetro mais influente, uma vez que a altura média dos vales das marcas de avanço tende a aumentar em proporção quadrática ao avanço. Esses dados podem ser comprovados na Tabela 4.1.

Com relação ao R_t final nas três ferramentas e o R_a final da ferramenta MC 6025 LP, ocorreu redução da rugosidade. Shaw (1986) chama a atenção ao demonstrar que no torneamento do aço AISI 1045 com ferramenta de metal duro, o melhor acabamento não ocorreu sob o menor valor de avanço (0,05 mm/rev), mas no valor de $f=0,1$ mm/rev. O autor explica esse fato por meio da energia de corte por unidade de volume e da pressão específica, que aumentam rapidamente quando o avanço é menor que 0,1 mm/rev; consequentemente, causa maior fluxo lateral. Esses dados podem ser comprovados no Gráfico 4.19.

Gráfico 4.19 - Aumento percentual das rugosidades em função do aumento do avanço de 0,1 para 0,2mm/ver

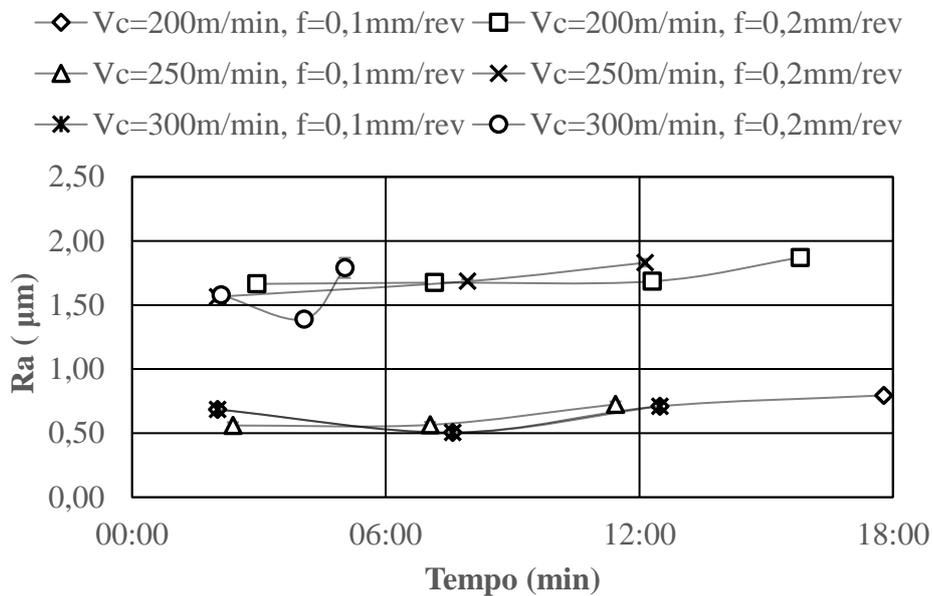


Fonte: o autor (2019)

O Gráfico 4.19 apresenta o aumento percentual médio da rugosidade, considerando como 100% o avanço de 0,1 mm/rev. Logo, esse percentual significa o aumento ou redução da rugosidade em relação ao aumento do avanço de 0,1 mm/rev para 0,2 mm/rev. Percebe-se que para as três ferramentas, as rugosidades (R_a , R_z e R_t) iniciais aumentaram. Já para a rugosidade final, as ferramentas NX2525 (FP) e MC6025 (LP) apresentam comportamentos similares, nos quais o R_a e o R_z aumentam e o R_t diminui. A ferramenta MC 6025 (LP) apresenta comportamento distinto das demais, pois ocorre redução de R_a e R_t e aumento de R_z .

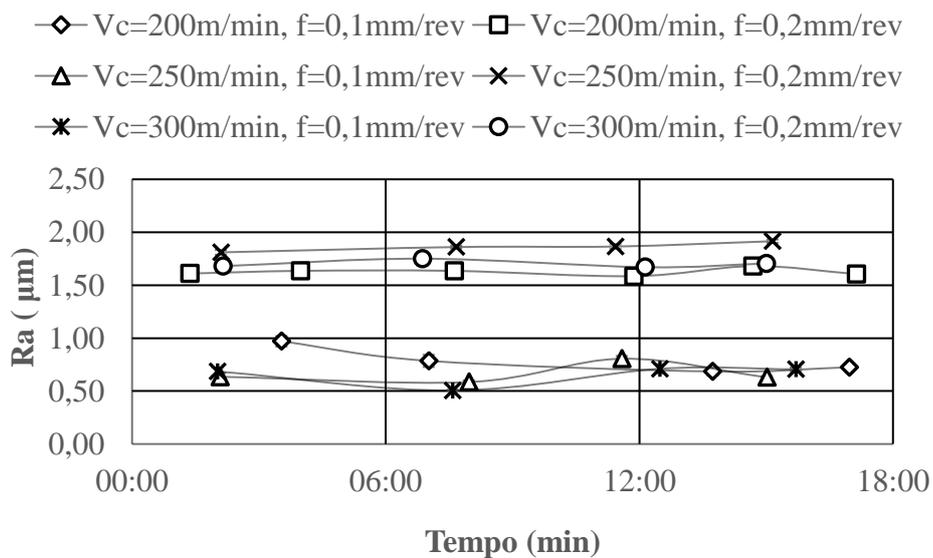
Os Gráficos 4.20 a 4.122 estabelecem a evolução da rugosidade (R_a) em função do tempo de corte para as ferramentas NX2525 (FP), MC6025 (FP) e MC6025 (LP) e realça a influência do avanço sobre a rugosidade.

Gráfico 4.20 - Influência do tempo de corte sobre a rugosidade (R_a) para a ferramenta NX 2525 (FP)



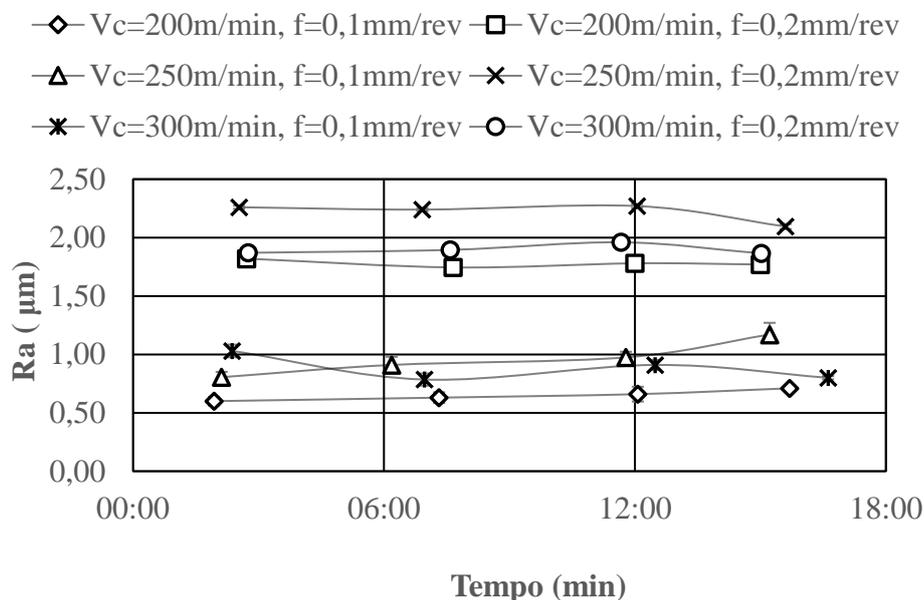
Fonte: o autor (2019)

Gráfico 4.21 - Influência do tempo de corte sobre a rugosidade (R_a) para a ferramenta MC 6025 (FP)



Fonte: o autor (2019)

Gráfico 4.22 - Influência do tempo de corte sobre a rugosidade (R_a) para a ferramenta MC 6025 (LP)



Fonte: o autor (2019)

Os Gráficos 4.20 a 4.22 confirmam a influência do avanço sobre a rugosidade (R_a), pois ao duplicar o avanço, percebe-se um aumento quadrático da rugosidade. Essa relação é apresentada na Equação 4.1 segundo (MACHADO *et al.*, 2015):

$$R_a = f^2 / 18 \sqrt{3} r_\epsilon \quad 4.1$$

Onde f é avanço e r_ϵ é o raio de ponta da ferramenta.

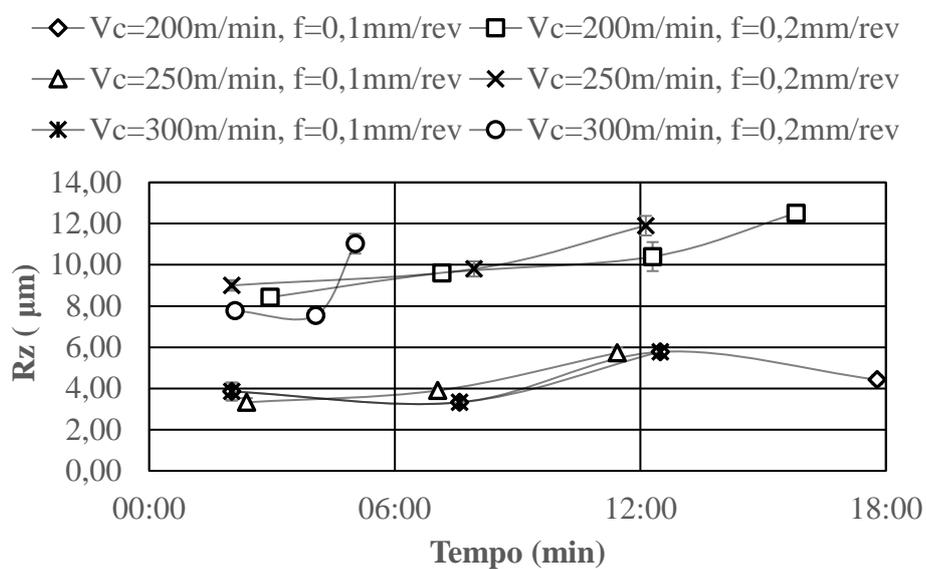
A rugosidade (R_a) se manteve praticamente constante em função do tempo para as três ferramentas, logo, o desgaste não foi o suficiente para influenciar na rugosidade (R_a) da ferramenta.

O valor teórico de R_a encontrado para o $f=0,1$ e $0,2$ mm/rev para um $r_\epsilon=0,8$ mm são respectivamente $0,4$ e $1,6$ μm . Os resultados estão próximos ao resultado real encontrado, pois, em média, o R_a encontrado para $f=0,1$ mm/rev para as ferramentas NX 2525 (FP), MC 6025 (FP) e MC 6025 (LP) foram respectivamente $0,6$, $0,6$ e $0,8$ μm . Para o $f=0,2$ mm/rev foram respectivamente $1,6$, $1,6$ e $1,8$ μm . Essa pequena

diferença entre o real e o teórico é devido à variabilidade do processo, e isso, enfatiza que os testes feitos apresentam alta confiabilidade aos resultados encontrados para Ra.

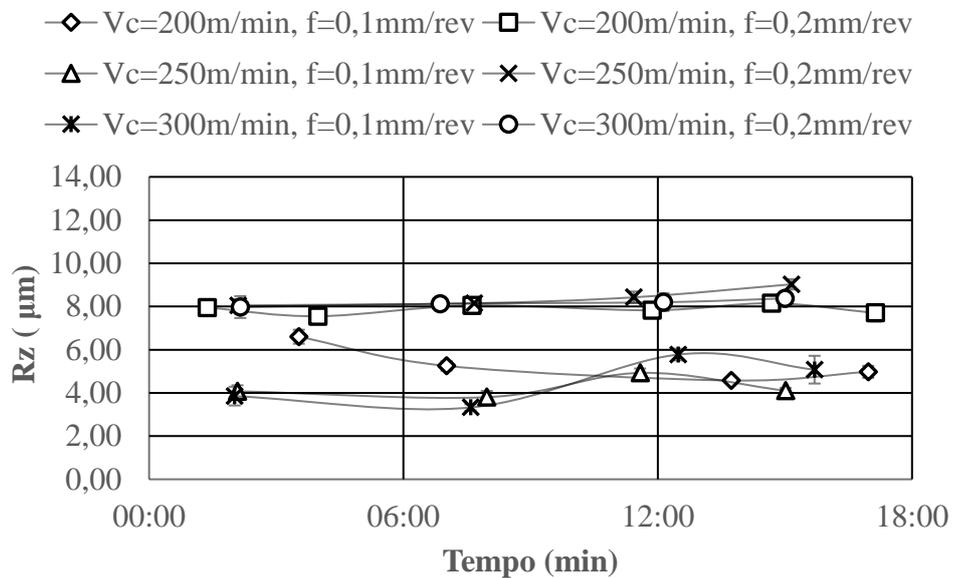
Os Gráficos 4.23 a 4.25 estabelecem a evolução da rugosidade (R_z) em função do tempo para as ferramentas NX2525 (FP), MC6025 (FP) e MC6025 (LP) e realçam a influência do avanço sobre a rugosidade.

Gráfico 4.23 - Influência do tempo de corte sobre a rugosidade (R_z) para a ferramenta NX 2525 (FP)



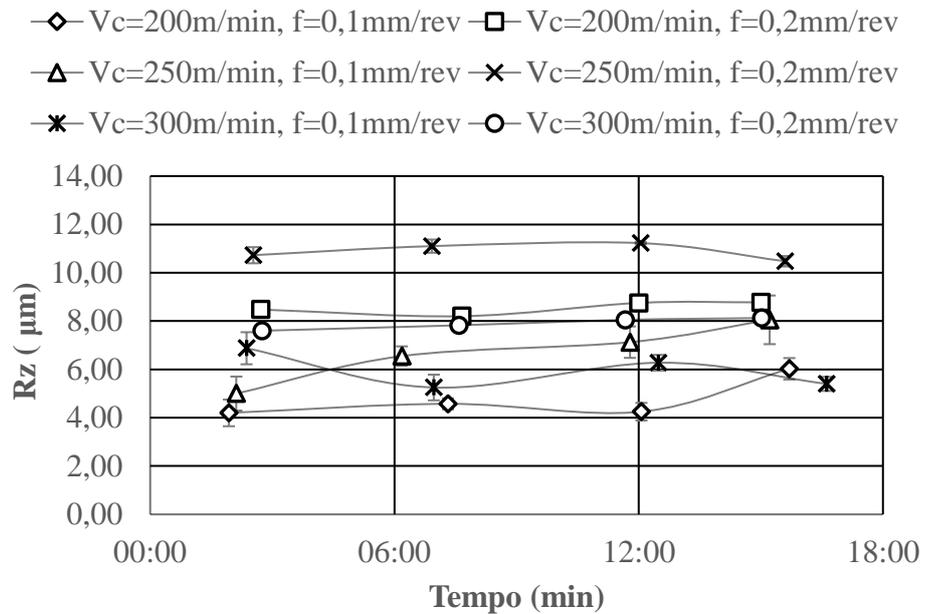
Fonte: o autor (2019)

Gráfico 4.24 - Influência do tempo de corte sobre a rugosidade (R_z) para a ferramenta MC 6025 (FP)



Fonte: o autor (2019)

Gráfico 4.25 - Influência do tempo de corte sobre a rugosidade (R_z) para a ferramenta MC 6025 (LP)

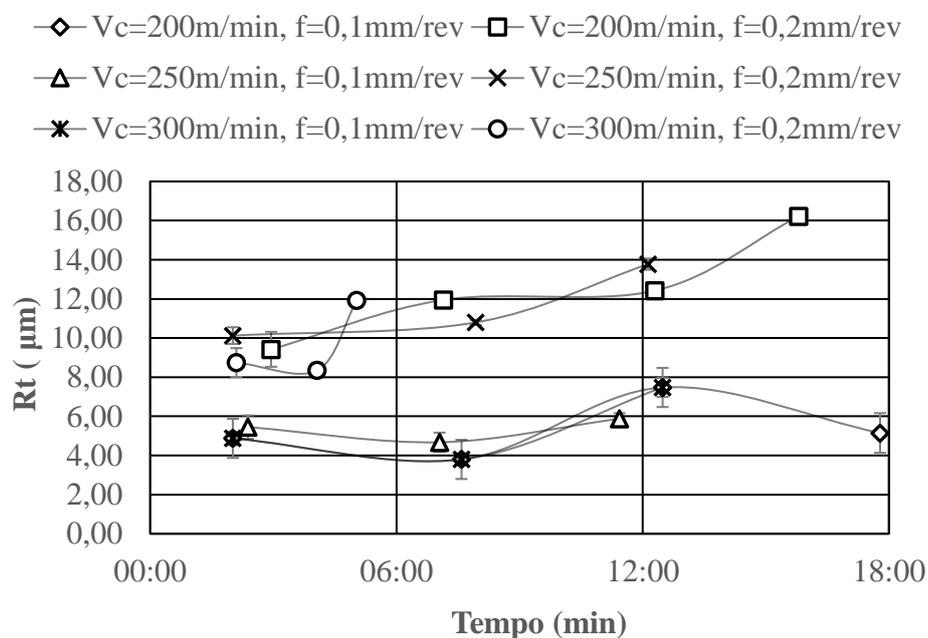


Fonte: o autor (2019)

O Gráfico 4.23 a 4.25 confirma a influência do avanço sobre a rugosidade, pois, ao duplicar o avanço, percebe-se um aumento da rugosidade (R_z). Percebe-se que a rugosidade se manteve praticamente constante em função do tempo. Portanto, o desgaste não foi o suficiente para influenciar na rugosidade (R_z) da ferramenta.

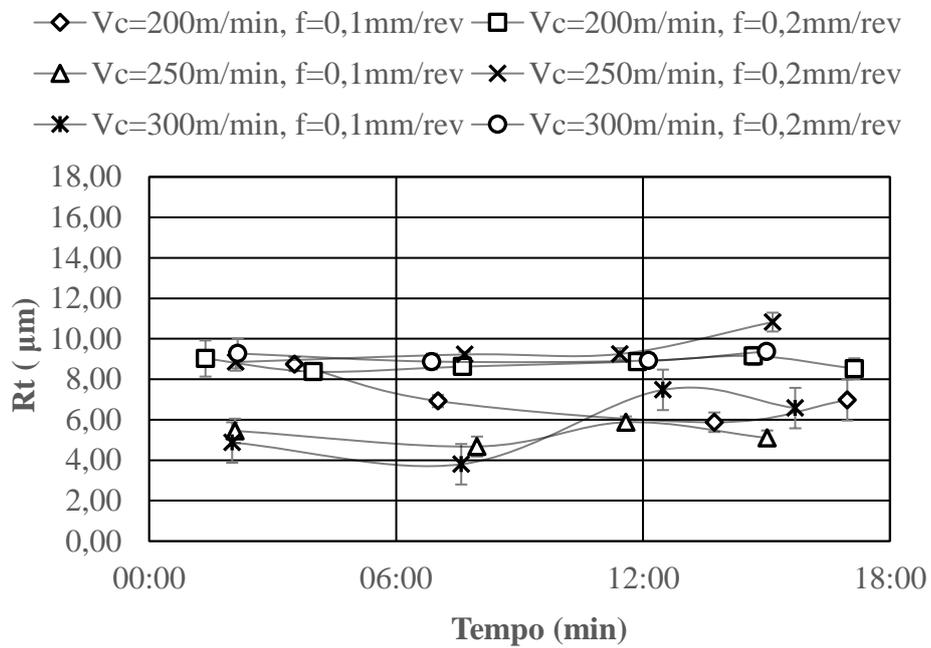
Os Gráficos 4.26 a 4.28 estabelecem a relação entre rugosidade (R_t) em função do tempo para as três ferramentas e realçam a influência do avanço sobre a rugosidade.

Gráfico 4.26 - Influência do tempo de corte sobre a rugosidade (R_t) para a ferramenta NX 2525 (FP)



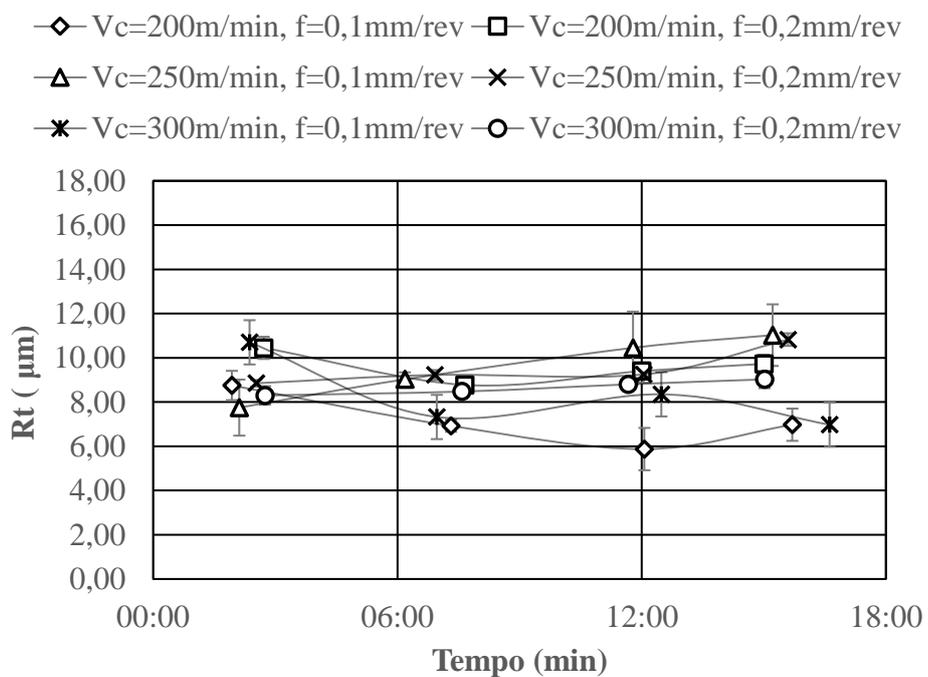
Fonte: o autor (2019)

Gráfico 4.27 - Influência do tempo de corte sobre a rugosidade (R_t) para a ferramenta MC 6025 (FP)



Fonte: o autor (2019)

Gráfico 4.28 - Influência do tempo de corte sobre a rugosidade (R_t) para a ferramenta MC 6025 (LP)

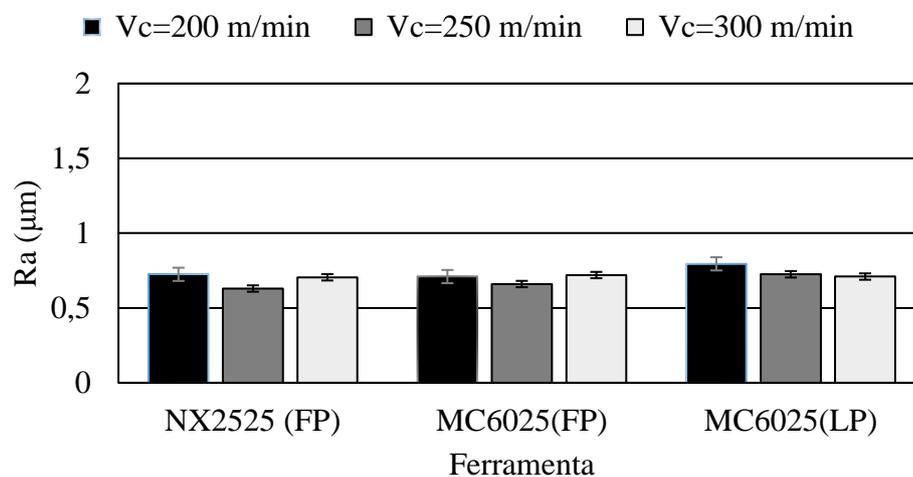


Fonte: o autor (2019)

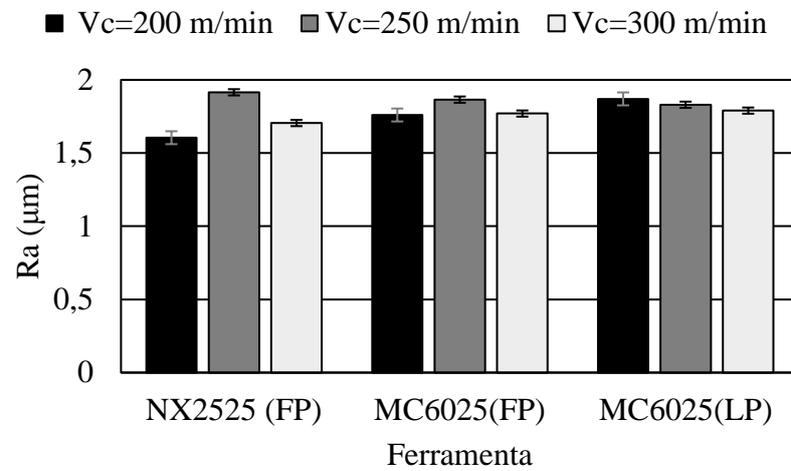
Os Gráficos 4.26 a 4.28 apresentam comportamentos similares, uma vez que comprovam a influência do avanço com relação à rugosidade, pois, ao duplicar o avanço, percebe-se um aumento da rugosidade (R_t). O mesmo ocorre nos estudos de Deveras (2016) e Campos (2011), no qual o aumento do avanço foi a única variável influente no crescimento da rugosidade (R_t).

Os Gráficos 4.29 e 4.30 apresentam a influência do material da ferramenta sobre a rugosidade (R_a).

Gráfico 4.29 - Influência das ferramentas sob R_a para avanço de 0,1 mm/rev



Fonte: o autor (2019)

Gráfico 4.30 - Influência das ferramentas sob R_a para o avanço 0,2 mm/rev

Fonte: o autor (2019)

Os Gráficos 4.29 e 4.30 demonstram que o material da ferramenta não apresentou influência significativa sobre o R_a , porquanto as variações ocorridas nos gráficos não ultrapassam a margem de 0,5 μm .

5 - CONCLUSÕES

Após a realização dos testes de torneamento do aço ABNT 1045 utilizando-se ferramentas de corte de metal duro e de cermet e diferentes parâmetros de corte, pode-se concluir:

Em relação à forma do cavaco:

- Não foi possível definir um padrão de comportamento da forma do cavaco da ferramenta com quebra cavaco LP, uma vez que este apresentou formas variadas em aproximadamente todos os testes;
- Ao se comparar espessura do cavaco e o avanço, percebeu-se que quanto menor o avanço, maior o grau de recalque e fragmentação do cavaco, independentemente do material da ferramenta de corte, do tipo de quebra-cavaco e velocidade de corte;
- O grau de recalque diminui em função do aumento da velocidade de corte e avanço.

Em relação ao desgaste da ferramenta de corte:

- A ferramenta NX2525 (FP) sofreu lascamento na aresta principal de corte em todos os testes, exceto para $V_c = 200$ m/min e $f = 0,1$ mm/rev. Nos demais testes, identificou-se o desgaste de flanco máximo atingido após aproximadamente 15 minutos de tempo usinagem, não ocorrendo nenhum tipo de avaria significativa (quebra, lascamento ou trinca);
 - Para a ferramenta MC 6025 (LP), observou-se a ocorrência de desgaste de flanco máximo inferior a 0,300 mm, exceto no teste com $V_c = 300$ m/min e $f = 0,2$ mm/rev, no qual o $VB_{b\text{máx}}$ atingiu o critério de fim de vida;
 - A ferramenta MC 6025 (FP) apresentou menor desgaste com as variações da velocidade de corte e do avanço;
 - O possível mecanismo de desgaste predominante nos testes, identificado na superfície principal de folga, foi a adesão.

Em relação à rugosidade da superfície torneada:

- Somente o avanço mostrou-se como parâmetro de influência para a superfície torneada do aço ABNT 1045. Exceção para o teste do R_a final, no qual a ferramenta também apresentou influência;
- A forma do quebra-cavaco apresentou influência significativa sobre comportamento da rugosidade porque as ferramentas com quebra-cavaco FP apresentaram menor rugosidade R_a quando comparada com a ferramenta de quebra-cavaco LP;
- O comportamento da rugosidade (R_a , R_z e R_t) é influenciado pelo aumento do avanço, pois em todos os casos ocorreu aumento da rugosidade;
- A ferramenta MC 6025 (FP) apresentou os melhores resultados quando comparados os valores de rugosidades (R_a , R_z e R_t) com $R_a < 2$, $R_z < 10$ e $R_t < 11,5 \mu\text{m}$.

6 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os resultados apresentados neste estudo representam uma investigação limitada à análise de alguns parâmetros pré-selecionados, podendo ser futuramente suplementados, sobretudo no que concerne à metodologia de trabalho. Para isso, é proposto:

A ferramenta de cermet sem revestimento apresentou pior desempenho, porém seria necessário avaliar a mesma ferramenta com cobertura PVD das classes VP25N e AP25N do fabricante Mitsubishi, por apresentar resistência a fratura superior a ferramenta NX 2525, com os mesmos parâmetros de entrada.

Medir a temperatura do cavaco para identificar a grau de influência da temperatura sobre a formação do cavaco, rugosidade e desgaste de flanco máximo da ferramenta.

Coletar dados de força de corte de forma direta, com um dinamômetro, para que seja possível obter individualmente as forças de avanço, radial e axial, além da análise da variação da força de corte em função da velocidade de corte, avanço e profundidade de usinagem. Desta forma, será possível obter uma análise estatística mais completa quando da comparação dos parâmetros de corte e material da ferramenta de corte em relação à força de corte.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, H.C.G. et al. **Estudo do desgaste das ferramentas de metal duro no torneamento do aço inoxidável superduplex**. Revista máquinas e metais, p. 64-91, 2017.

AGUIAR, H.C.G. **Contribuição ao estudo do torneamento do aço inoxidável superduplex empregando ferramentas de metal duro com revestimentos**. Dissertação (Mestrado em engenharia Mecânica), Campinas: Universidade Estadual de Campinas, p. 21-45, 2012.

AMORIM, H. J. **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 Mecânica), Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p. 43-58, 2002.

ASM HANDBOOK. **Machining**. Nova York: ASM Internation, p. 1029, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 172:2000 **Critérios de classificação dos aços**. Rio de Janeiro, p. 5-9, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6361:1984 **Chapas e tiras de aço inoxidável acabamentos de superfície**. Rio de Janeiro, p. 4-23, 1984.

ASTAKHOV, V. P. **Tribology of Metal Cutting**. Elsevier Science, p. 392, 2007.

BARROS NETO, B. D.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos**. 4 ed. Porto Alegre: Bookman, p. 17-79, 2010.

BAYER R.G. **Mechanical Wear Fundamentals and Testing**. Revised and Expanded 2 ed. Nova York: Dekker, p. 102- 114, 2007.

BERTONCELLO, R.; et. al. **Film characterization TiN, TiC and Ti (C, N) and its relationship to tribological behavior**. Surface and Interface Analysis, v. 18, n. 7, p. 525-531, 1992.

BEZERRA D.C. E MACHADO I.F. **Avaliação da usinabilidade em torneamento do aço ABNT 1045, para diferentes velocidades de corte e ferramentas.** Universidade de São Paulo, p. 3-10, 2008.

BLAU, P. J. **Fifty years of research on the wear of metals.** Tribology International, v. 30, p. 321-331, 1997.

BIASIBETTI, R.S. *et al.* **Análise da rugosidade superficial de barra de aços SAE 1045 após torneamento.** Revista matéria, V. 24, N. 01, p. 6-13, 2018.

BOYER, R.R. **“An Overview on the Use of Titanium in the Aerospace Industry”**, Materials Science and Engineering, p. 657, 1996.

BRESSAN *et al.* **Desempenho tribológico dos intermetálicos TiAlN e TiCN e micro mecanismos de desgaste abrasivo.** 14º Congresso brasileiro de engenharia e ciência dos materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, p. 3-8, 2000.

BRUNS, R.E. SCARMINIO, I.S. & BARROS NETO, B. **Statistical design - Chemometrics.** Elsevier, Amsterdam, p. 423, 2006.

CALADO, V. & MONTGOMERY, D.C. **Planejamento de experimentos usando o estatística.** E-papers, Rio de Janeiro, p. 260, 2003.

CALLISTER JR, W. D; RETHWISCH, D.G; **Materials science and engineering: an introduction.** 8th ed. United States of America, Wiley, p. 1000, 2009.

CAMPOS P.H.S; PAIVA A.P.; FERREIRA J.R.; BALESTRASSI P.P. **Modelagem da rugosidade (RA, RT) no torneamento duro com cerâmica mista alisadora utilizando projetos de experimentos (DOE).** 31º Congresso brasileiro de engenharia de produção. Belo Horizonte, MG, p. 2-7, 2011.

CHILDS, T.; MAEKAWA, K.; OBIKAWA, T. & YAMANE, Y. **Metal machining – Theory and applications.** Arnold, London, p. 416, 2001.

COLACO G.A. **Análise da influência dos parâmetros de usinagem sobre a rugosidade no torneamento cilíndrico externo em corte a seco e com abundância de fluido de corte.** 34º Congresso brasileiro de engenharia de produção., Curitiba, 2014.

DA SILVA W.M., SUAREZ M.P., MACHADO A.R e COSTA H.L. **Effect of laser surface modification on the micro-abrasive wear resistance of coated cemented carbide tools.** *ScienceDirect*, p. 1-11, 2013.

DAUDT, N.F. et al. **Titanium nitride films deposition on glass surface on cathodic cage plasma deposition.** 3º Congresso de Engenharia Mecânica, Natal, p. 5-9, 2011.

DEARLEY, P.A. & TRENT, E.M. **Wear mechanisms of coated carbides tools.** *Metal Technology*. Volume 9, p. 106 - 139, 1982.

DEVERAS, A.M. **Estudo da rugosidade superficial no torneamento do aço AISI 8640 com ferramentas alisadora e convencional.** Revista técnico científica do Crea-PR, p. 3 – 11, 2017.

DIN 8580, **Manufacturing processes – Terms and definitions, division.** Deutsches Institut Fur Normung, p. 8- 33, 2003.

DINIZ, A.E. **A rugosidade superficial da peça em Processos de Torneamento: Critério de fim de vida e fatores de influência.** Tese (doutorado em engenharia), Campinas: Universidade Federal de Campinas, p. 29, 1989.

DINIZ, A.E.; VIELLA, R.C.; **Surface Roughness: Turning of AISI 1045 steel with uncoated carbide.** Revista brasileira de Ciências Mecânicas, VXI, n2, p. 171-182, 1989.

DINIZ, A.E; MARCONDES, F.C; COPPINI, N.L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais.5.** ed. São Paulo: Artliber, p. 254, 2006.

DORÉ, C. et. Al. **Avaliação do desempenho de ferramentas de cerâmicas $Al_2O_3+Y_2O_3+NBC$ na usinagem do ferro fundido vermicular.** Congresso brasileiro de fabricação, p. 1-7, 2007.

FÁTIMA A. E MATIVENGA P.T. **A comparative study on cutting performance of rake-flank face structured cutting tool in orthogonal cutting of AISI/SAE 4140.** Springer-Verlag London, p. 1-11, 2015.

FERRARESI, D. **Usinagem dos Metais**. São Paulo: Blucher, p. 189-372, 1970.

GONZÁLEZ, L.W.H. *et.al.* **Estudio del desgaste del flanco de carburos recubiertos y cermet durante el torneado de alta velocidad en seco del acero AISI 1045**. Revista de Metalurgia, v. 47, n.3, p. 262-276, 2011.

HOLMBERG, K. MATTHEWS, A. **Coatings Tribology: properties, mechanisms, techniques and applications in surface engineering**. 2. Ed. Great Britain: Elsevier, p. 21-105, 2009.

HUTCHINGS, I. M. **Tribology: friction and wear of engineering materials**. Ed. Edward Arnold: London, p. 270-280, 1992.

IQBAL S.A. *et al.* **A comparative study of the tool–chip contact length in turning of two engineering alloys for a wide range of cutting speeds**. Springer-Verlag London Limited, p. 1-11, 2008.

ISO Standard 3685. **Tool life testing with single – point turning tools**. 2.ed., 1993.
KLOCKE.F. **Manufacturing Processes 1: Cutting**. RWTH Ed. Alemanha: Springer, v. 102, p. 303-311, 1980.

JEYACHANDRAN, Y.L., NARAYANDASS, As K, MANGALARAJ, D., AREVA, S., MIELKCZARSKI, J.A. **Properties of titanium nitride films prepared by direct current magnetron sputtering**. Materials Science Engineering, p. 128, 2007.

KLOCKE.F. **Manufacturing Processes 1: Cutting**. RWTH Ed. Alemanha: Springer, 2011.

KONIG, W.; KLOCKE, F. **Fertigungsverfahren - Drehen, fräsen und bohren**. Springer, Berlin, p. 471, 1997.

KRAMER, B. M., SUH, N. P. **Tool wear by solution: A quantitative understanding**. Journal of manufacturing science and engineering, New York, v. 102, p.264, 1980.

LIMA F.F. **Estudo do desgaste de ferramenta de metal duro e cerâmicas no torneamento do inonel 751 e inonel 718**. Tese (Doutorado em engenharia mecânica). Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, p. 46-86, 2012.

MACHADO, A. R. e da SILVA, M. B. **Apostila de Usinagem dos Metais**. 4ª ed. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, p. 224, 1999.

MACHADO, A.R. *et al.* **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 3ª.ed. São Paulo: Blucher, p- 12- 189, 2015.

MARCONDES, F.C. **A história do metal duro**. São Paulo: Sandvik Coromant, p. 13-50, 1990.

MATOSINHOS C.C.C. *et al.* **Torneamento do aço ABNT 1045 com ferramentas de metal duro e cermet**. 2º Congresso internacional de engenharia mecânica, João Pessoa, p. 3 -10, 2002.

McGEOUGH, J. A. **Advanced Methods of Machining**. Londres: Chapman and Hall, p. 34-62, 1998.

METROPOULOS, P.G., **Statistical Basis for Surface Roughness Assesment in Oblique Finish Turning of Stell Components**. Int. Journal Prod. Research. London, p 345-360, 1974.

MICHELETTI, G.F. **Mecanizado por arranque de Viruta**. Barcelona, Blume, p. 334, 1980.

MITSUBISHI. **Mitsubishi Materials**, 2018-2019. Disponível em : http://www.mitsubishicarbide.com/application/files/5915/8277/8714/catalog_c009z_full.pdf. Acesso em: 22 agos.2018.

MONTGOMERY, D.C. **Design and analysis of experiments**. 5 th Edition. John Wiley, New York, p. 700, 2001.

MOREIRA, M, C., **Usinabilidade do aço inoxidável supermartensítico durante o serramento circular utilizando serras com insertos intercambiáveis de metal duro revestidos e sem revestimento**. Tese (Doutorado em engenharia de produção), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, p .39-76, 2016.

NASCIMENTO, G. E ABRÃO A.M. **Influência da geometria da ferramenta de corte na usinabilidade do aço ABNT 1045**. 1º Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM, Natal, p. 1-8, 2000.

NGUYEN, T. C. et al. **Using Taguchi and ANOVA methods to study the combined effects of drilling parameters on dynamic barite sag**. Journal of Petroleum Science and Engineering, p. 121–133, 2014.

NOVAIS, F.B. E SOUZA R.A. **Análise da formação do cavaco no torneamento do alumínio utilizando câmara de alta velocidade**. Projeto de graduação da universidade federal do Espírito Santo, p. 12-38, 2009.

NOVASKI, O. **Introdução à engenharia de fabricação mecânica**. [s.l.] E. Blucher, 1994.

OLIVEIRA, V.V. et. Al. **Análise do comportamento de desgaste de ferramentas de corte no torneamento de ferro fundido nodular austemperado**. Congresso brasileiro de fabricação, N. 38, p. 2-9, 2007.

OWEN W., BOWEN E. **Biblioteca Científica Life: Rodas**. José Olympio Editora, Rio de Janeiro, p. 34-39, 1969.

PEREIRA R.B. D. **Influência do quebra-cavaco na dinâmica do torneamento do aço ABNT 1045**. Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica), São João Del Rei: Universidade Federal de São João Del Rei, p. 45-78, 2011.

PRENGEL, H. G., PFOUTS, W. R., SANTHANAM, A. T. **State of the Art in Hard Coatings for Carbide Cutting Tools**, Surface and Coatings Technology, vol 102, p. 183-190, 1998.

REIS B.C.M. **Influência do Material da Ferramenta de Cortes Sobre a Usinabilidade do Aço ABNT 4340 no Torneamento**. Dissertação (Mestrado em engenharia de produção). Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, p. 54-88, 2017.

REIS et. al. **Influência do Material da Ferramenta de Cortes Sobre a Usinabilidade do Aço ABNT 4340 no Torneamento**. Revista matéria, Universidade Federal do Rio de Janeiro, v. 24, n. 01, p. 2-8, 2019.

RICHTER, V., *et. al.* **Characterisation and wear behaviour of TiN- and TiC_xN_{1-x} -coated cermets.** Materials Science and Engineering A, v. 209, p. 353-357, 1996.

RODRIGUES H.L. **Relação desgaste-acabamento superficial em ferramentas de metal duro com revestimento triplo no torneamento de aços.** Tese (Doutorado em engenharia mecânica). Guaratinguetá: Universidade Estadual Paulista, p. 180-185, 2005.

SANDVIK COROMANT. **Torneamento Geral.** Disponível em: <http://www.sandvik.coromant.com/ptpt/knowledge/materials/workpiece_materials/machinability_definition?Country=br>, p. 1157, 2016.
Acesso em: 21 mar.2018.

SANDVIKEN. **Historical metal cutting. In: Modern metal cutting a practical handbook usinagem.** 1a ed. Sweden: Tofters Tryckeri AB, p. 1-67, 1994.

SANTHANAM, A. T.; TIERNEY, P.; HUNT, J. L. Cemented Carbides. In: **Metals Handbook**, 10 ed., v. 2 - Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, Materials Park, ASM International, p. 950-977, 1998.

SHAW, M.C., **Surface Finish. In Metal Cutting Principles.** 1st ed. New York: Oxford University Press, p. 487-543, 1986.

SILVA F.C.S., **Efeito do desgaste da ferramenta na morfologia do cavaco no torneamento de aço inoxidável ABNT 304.** Congresso brasileiro de engenharia de fabricação, São Paulo, p. 1-8, 2007

SILVA, J.S.R. **Comparação do desempenho de ferramentas de cerâmicas no faceamento de ferro nodular no estado endurecido.** Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica). São João Del Rei: Universidade Estadual São João Del Rei, p. 5-49 2012.

SILVA M.A. *et al.* **Análise da força residual na usinagem do aço ABNT 1045.** Congresso brasileiro de engenharia de Fabricação, Caxias do Sul, p. 3-7, 2011.

SILVEIRA M.L. **Furação de material sanduiche empregando brocas com geometrias diferentes.** Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica), Belo horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, p. 29-40, 2017.

SMITH, G. T. **Advanced machining the handbook of cutting technology**. IFS Publications, p. 12-17, 1989.

SOUZA A.J. **Aplicação de multisensores no prognóstico da vida da ferramenta de corte em torneamento**. Tese (Doutorado em engenharia mecânica). Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, p. 44- 69, 2004.

SOUZA, S. A. **Composição Química dos Aços**. São Paulo, p. 21-39, 2001.

SOUZA A.J. e SCHROETER R.B. **Análise da influência dos parâmetros de corte nos sinais monitorados de força e vibração, e na variação da rugosidade da superfície torneada**. Congresso brasileiro de engenharia de Fabricação, Caxias do Sul, Caxias do Sul, p. 3- 8, 2007.

STACHOWIAK, G. W. BATCHELOR, A. W. **Tribologia**. 2ª ed. Butterworth Heinemann, Boston, p. 872, 2001.

STEMMER, C. E. “Ferramentas de corte”. 2 ed., Florianópolis: ed. UFSC, p.249 1993.

SU, Y.L.; *et. al.* **Analyses and design of a WC milling cutter with TiCN coating**. Wear, v. 21, p. 59-66, 1998.

SUAREZ, M. P. **Fresamento de canais da Liga de alumínio Aeronáutico 7075-T7**. Tese (Mestrado em engenharia mecânica), Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, p. 111, 2008.

SUNDARARAJAN, G. **A New Model for two-body Abrasive Wear Based on the Localization of Plastic Deformation**; HDU, v. 117, p.1-36, 1987.

TRENT, E. & WRIGHT, P. **Metal Cutting**. 4. ed. Estados Unidos da América: Butterworth Heinemann, p. 446-456, 2000.

TRENT, E. M. **Metal Cutting**. 3. ed, Butteworths-Heinemann ltd. ISBN 0-7506-1068-9, p. 273, 1991.

TRENT, M.C., Metal cutting principles. 2 ed. Estados Unidos da America: Butterworth-Heinemann, p. 234- 238, 1984.

WILLIAMS, J. A.: HDU_DQG_VXUIDFH_GDPDJH. **In: Engineering tribology.** tribologia, 2a ed., Avon: Bookcraft Ltd., p. 488, 1996.

ANEXO

APÊNDICE A - INTRODUÇÃO AO PLANEJAMENTO FATORIAL

O planejamento fatorial é uma ferramenta estatística importante utilizada quando se deseja analisar grande quantidade de informações (LIMA, 2012).

Na atividade estatística, a análise dos dados não constitui o fator mais importante, mas sim o planejamento como esses dados devem ser obtidos. Se o planejamento não for feito de forma adequada, as informações não serão confiáveis, das quais se poderá tirar quaisquer conclusões (BRUNS et.al., 2006).

Várias técnicas podem ser utilizadas no planejamento de experimentos, sendo algumas mais vantajosas do que as outras em certas circunstâncias. Podem ser citados o planejamento fatorial completo, planejamento fatorial 2^k , planejamento composto central e superfícies de resposta entre outros (MONTGOMERY, 2001).

É utilizado quando, após a seleção dos fatores de interesse na pesquisa, procede-se à avaliação quantitativa de suas influências sobre a variável de resposta, assim como as interações de uns fatores com os outros (CALADO; MONTGOMERY, 2003).

Para o tratamento de dados de um experimento, é comumente utilizada a análise de variância (ANOVA). A ANOVA é utilizada para verificação de quais fatores são estatisticamente significantes no processo (YANG e TARNG, 1998). De acordo com Nguyen *et al.* (2014), a análise de variância é um método estatístico empregado para testar diferenças significativas entre duas ou mais médias pela comparação de variâncias.

A ANOVA compreende um planejamento experimental no qual busca-se a avaliação da influência de diferentes fatores sob uma variável resposta. Um experimento planejado é um teste – ou uma série de testes – onde mudanças propositais são feitas em variáveis de entrada de um processo de modo a se observar mudanças correspondentes nas variáveis de saída (MONTGOMERY, 2001).

Os dados utilizados na análise de variância devem refletir a influência de mudanças ocorridas nos fatores (causas) de interesse sobre a variável de resposta (característica da qualidade) (WERKEMA *et al.*, 1996).

APÊNDICE B – ANÁLISE QUÍMICA DO AÇO ABNT 1045-CERTIFICADO SENAI



SENAI FIEMG

Laboratório de Ensaios e Análises em Materiais - LAMAT
 Acreditado pela Coordenação Geral de Acreditação - CGCRE
 Accredited by General Coordination for Accreditation - CGCRE

Análise Química por Espectrometria Ótica - Base Ferro
 Chemical Analysis by Optical Spectrometry - Iron Base

Ensaio NBR ISO/IEC 17025
 CRL 0126

Relatório / Report nº 11574/2019

Solicitante / Requester: Natália Fernanda Santos Pereira
Endereço / Address: Avenida Platina, 109 - Padre Eustáquio - Itaúna - MG
Material / Material: Amostra para análise
Identificação do Cliente / Identification by customer: Material: Aço - 1045 - Amostra 01

Elementos Elements	Concentração Concentration	Unidade Unit
Carbono (C)	0,4660	%
Silício (Si)	0,2119	%
Manganês (Mn)	0,7619	%
Fósforo (P)	0,0185	%
Enxofre (S)	0,0222	%
Cromo (Cr)	0,0604	%
Molibdênio (Mo)	0,0153	%
Níquel (Ni)	0,0209	%
Alumínio (Al Total)	0,0436	%
Cobalto (Co)	0,0041	%
Cobre (Cu)	0,0054	%
Nióbio (Nb)	ND	%
Titânio (Ti)	ND	%
Vanádio (V)	ND	%
Tungstênio (W)	ND	%

Elementos Elements	Concentração Concentration	Unidade Unit
Chumbo (Pb)	0,0015	%
Estanho (Sn)	0,0009	%
Arsênio (As)	0,0059	%
Zircônio (Zr)	ND	%
Bismuto (Bi)	ND	%
Cálcio (Ca)	0,0007	%
Céριο (Ce)	ND	%
Antimônio (Sb)	0,0036	%
Selênio (Se)	ND	%
Tântalo (Ta)	ND	%
Boro (B)	ND	%
Zinco (Zn)	ND	%
Lantânio (La)	ND	%
Nitrogênio (N)	0,0102	%
Ferro (Fe) Balanço	98,3276	%

Este relatório contém resultados que se referem exclusivamente à amostra enviada pelo solicitante e somente deve ser reproduzido por completo, sendo que a reprodução de partes requer aprovação

This report contain results referred exclusively specimen sent by requester and should only be full reproduced, and the reproductions of parts requires written approval of the LAMAT.

<p>Informações / Informations:</p> <p>* Temperatura máxima do laboratório: 28°C / <i>Maximum Temperature of laboratory: 28°C.</i></p> <p>Procedimento / Método / Procedure / Method:</p> <p>* Análise realizada segundo Instrução Técnica IT Lab 249 / <i>Analyses performed by technical instruction IT Lab 249.</i></p> <p>* Normas: ASTM E 415:2017, ASTM E 1086:2014 e ASTM A 751:2014a / <i>Standards: ASTM E 415:2017, ASTM E 1086:2014 e ASTM A 751:2014a.</i></p>
<p>Observações / Observations:</p> <p>O equipamento analisa somente os elementos apresentados no quadro deste relatório. A base refere-se ao balanceamento da composição para cem por cento podendo conter outros elementos não detectados / <i>The equipment only analyzes the elements presented in the chart of this report. The base refers to the balance of the composition for hundred percent and may contain other undetected elements.</i></p> <p>* Onde consta ND (Não Detectado), significa que o resultado do elemento está abaixo do limite inferior da faixa de detecção do equipamento e NQ (Não Quantificado) está acima do limite superior da faixa de detecção do equipamento / <i>Where reported ND (Not Detected), the result means that the element is below the lower limit of the detection range of equipment and NQ (Not Quantified) is above the upper limit of the detection range of the equipment.</i></p>

SENAI Itaúna CETEF Marcelino Corradi
 Rua Lilia Antunes, 99 - Bairro: Nogueira Machado - CEP: 35680-270
 Itaúna - MG - Fone: (37) 3249-2400
 Página 1 de 2



Relatório / Report nº 11574/2019

<p>Equipamento utilizado / Equipment used:</p> <p>* Método utilizado - Espectrometria de Emissão Ótica / <i>Method used - Optical emission spectrometry.</i></p> <p>Equipamentos / Instrumentos / Equipment / Instruments:</p> <p>* Espectrômetro de Emissão Ótica SPECTROMAXx identificação 159239, calibrado pelo fabricante / <i>Optical emission spectrometer Spectromaxx, identification 159239, calibrated by manufacturer.</i></p>

Incerteza de Medição / Measurement Uncertainty			
Elemento <i>Element</i>	+/- U 95% / <i>Uncertainty</i>	Fator de Abrangência <i>Coverage factor (K)</i>	Graus de Liberdade <i>Degrees of freedom</i> V eff
C	0,0090	2,11	25,379
Si	0,0128	2	infinito
Mn	0,0023	2	infinito
P	0,0083	2	infinito
S	0,0019	2,06	39,464
Cr	0,0051	2,23	12,014
Mo	0,0101	2,25	11,878
Ni	0,0088	2,15	18,503
Al t	0,0032	2,05	57,907
Co	0,0032	2	infinito
Cu	0,0041	2,05	58,736
Nb	0,0063	2,14	19,18
Ti	0,0068	2,25	11,942
V	0,0025	2,16	17,034
W	0,0124	2	infinito
Pb	0,0007	2	infinito
Sn	0,0014	2,05	50,671
As	0,0056	2,2	14,54
Zr	0,0026	2,02	103,238
Bi	0,0006	2,13	42,46
Ca	0,0002	2	infinito
Ce	0,0002	2	infinito
Sb	0,0024	2	infinito
Se	0,0014	2,05	58,273
Ta	0,0042	2,15	18,171
B	0,0003	2,02	183,64
Zn	0,0002	2	infinito
La	0,0002	2,05	68,598
N	0,0019	2,11	23,62

* Esta foi a maior incerteza encontrada e foi obtida através da multiplicação da incerteza de medição combinada pelo fator de abrangência K (coeficiente de segurança), proporcionando um nível de confiança de aproximadamente de 95% / *This is the bigger uncertainty found and was obtained through for multiplication for measurement uncertainty combined by the coverage factor K (safety factor), providing a level by safety approximately 95%.*

Recepção / Reception	30/09/19	Analista <i>Analyst</i>	Responsável <i>Responsible</i>
Realização / Achievement	02/10/19	Jorge Henrique Queiroz Ferreira	
Emissão / Emission	02/10/19	Laboratorista Técnico	Patrícia Resende
			Laboratorista-CRQ 02102194-2°R
Responsável Técnico LAMAT: João Pousa Alves Filho, CREA-MG 0000168139D			
<i>Technical Responsible LAMAT: João Pousa Alves Filho, CREA-MG 0000168139D</i>			

SENAI Itaúna CETEF Marcelino Corradi
Rua Lilia Antunes, 99 - Bairro: Nogueira Machado - CEP: 35680-270
Itaúna - MG - Fone: (37) 3249-2400
Página 2 de 2

APÊNDICE C - TABELA COM DADOS DA RUGOSIDADE

Teste N	Sequência	Material da Ferramenta de Corte e Geometria do Quebra-Cavaco	VC (m/min)	Ap (mm/rev)	Inicial			Final		
					Média Ra [µm]	Média Rz [µm]	Média Rt [µm]	Média Ra [µm]	Média Rz [µm]	Média Rt [µm]
1	2	NX2525 Acabamento(FP)	300	0,2	1,58	3,85	4,88	1,79	5,78	7,48
2	10	MC6025 Acabamento(FP)	200	0,2	1,61	7,95	9,03	1,61	7,70	8,53
3	16	MC6025 Usinagem leve(LP)	200	0,2	1,82	8,48	10,45	1,77	8,78	9,73
4	8	MC6025 Acabamento(FP)	300	0,2	1,68	7,98	9,28	1,71	8,38	9,38
5	7	MC6025 Acabamento(FP)	300	0,1	0,69	3,85	4,88	0,71	5,08	6,58
6	1	NX2525 Acabamento(FP)	300	0,1	0,69	3,85	4,88	0,71	5,78	7,48
7	12	MC6025 Acabamento(FP)	250	0,2	1,81	8,05	9,23	1,92	9,03	10,83
8	17	MC6025 Usinagem leve(LP)	250	0,1	0,81	5,25	7,75	1,17	8,30	11,03
9	4	NX2525 Acabamento(FP)	200	0,2	1,67	8,43	9,43	1,87	9,75	16,23
10	18	MC6025 Usinagem leve(LP)	250	0,2	2,26	10,73	11,45	2,10	10,48	11,38
11	3	NX2525 Acabamento(FP)	200	0,1	0,69	3,85	4,88	0,80	4,43	5,15
12	13	MC6025 Usinagem leve(LP)	300	0,1	1,03	6,88	10,70	0,80	5,40	6,98
13	14	MC6025 Usinagem leve(LP)	300	0,2	1,87	7,60	8,30	1,87	8,13	9,03
14	5	NX2525 Acabamento(FP)	250	0,1	0,56	3,33	4,20	0,73	5,73	6,65
15	6	NX2525 Acabamento(FP)	250	0,2	1,57	9,00	10,13	1,83	11,90	13,78
16	11	MC6025 Acabamento(FP)	250	0,1	0,64	4,08	5,45	0,63	4,10	5,10
17	15	MC6025 Usinagem leve(LP)	200	0,1	0,60	4,20	5,48	0,71	6,03	7,88
18	9	MC6025 Acabamento(FP)	200	0,1	0,97	6,60	8,75	0,73	4,98	9,38

Fonte: o autor (2019)

APÊNDICE D - ANÁLISE DE VARIÂNCIA

D.1 - Rugosidade inicial (Ra) (Material da Ferramenta de corte x Velocidade de corte x Avanço)

Informações dos Fatores

Fator	Níveis	Valores
Ferramenta	3	NX2525 Acabamento (FP); MC6025 Acabamento (FP); MC6025 Usinagem leve (LP)
Velocidade de corte (m/min)	3	200; 250; 300
Avanço (mm/rev)	2	0,1; 0,2

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	5	4,94307	0,98861	33,50	0,000
Linear	5	4,94307	0,98861	33,50	0,000
Ferramenta	2	0,22881	0,11440	3,88	0,050
Velocidade de corte (m/min)	2	0,00693	0,00346	0,12	0,890
Avanço (mm/rev)	1	4,70733	4,70733	159,53	0,000
Erro	12	0,35409	0,02951		
Total	17	5,29716			

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
0,171779	93,32%	90,53%	84,96%

Coefficientes

Termo	Coef	EP de Coef	Valor- T	Valor-P	VIF
Constante	1,2508	0,0405	30,89	0,000	
Ferramenta					
NX2525 Acabamento (FP)	-0,1275	0,0573	-2,23	0,046	1,33
MC6025 Acabamento (FP)	-0,0192	0,0573	-0,33	0,744	1,33
Velocidade de corte (m/min)					
200	0,0042	0,0573	0,07	0,943	1,33
250	-0,0258	0,0573	-0,45	0,660	1,33
Avanço (mm/rev)					
0,1	-0,5114	0,0405	-12,63	0,000	1,00

Equação de Regressão

$$\begin{aligned}
 \text{Rugosidade inicial (RA)} &= 1,2508 - 0,1275 \text{ Ferramenta_NX2525 Acabamento(FP)} \\
 &\quad - 0,0192 \text{ Ferramenta_MC6025 Acabamento(FP)} \\
 &\quad + 0,1467 \text{ Ferramenta_MC6025 Usinagem leve(LP)} \\
 &\quad + 0,0042 \text{ Velocidade de corte (m/min)_150} \\
 &\quad - 0,0258 \text{ Velocidade de corte (m/min)_200} \\
 &\quad + 0,0217 \text{ Velocidade de corte (m/min)_250} \\
 &\quad - 0,5114 \text{ Avanço (mm/rev)_0,1} \\
 &\quad + 0,5114 \text{ Avanço (mm/rev)_0,2}
 \end{aligned}$$

Ajustados e Diagnósticos para Observações Atípicas

Obs.	Rugosidade		Resid		
	inicial (RA)	Ajuste	Resid	Pad	
10	2,2600	1,9306	0,3294	2,35	R

R Resíduo grande

Método

Transformação de Box-Cox	
λ arredondado	0,5
λ estimado	0,658853
IC de 95% para λ	(-0,0706469; 1,34535)

Informações dos Fatores

Fator	Níveis	Valores
Ferramenta	3	NX2525 Acabamento (FP); MC6025 Acabamento (FP); MC6025 Usinagem leve (LP)
Velocidade de corte (m/min)	3	200; 250; 300
Avanço (mm/rev)	2	0,1; 0,2

Análise de Variância para Resposta Transformada

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	5	1,03577	0,207155	33,01	0,000
Linear	5	1,03577	0,207155	33,01	0,000
Ferramenta	2	0,04151	0,020754	3,31	0,072
Velocidade de corte (m/min)	2	0,00076	0,000379	0,06	0,942
Avanço (mm/rev)	1	0,99351	0,993509	158,32	0,000
Erro	12	0,07530	0,006275		
Total	17	1,11108			

Sumário do Modelo para Resposta Transformada

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
0,0792159	93,22%	90,40%	84,75%

Coefficientes para Resposta Transformada

Termo	Coef	EP de Coef	Valor-T	Valor-P	VIF
Constante	1,0905	0,0187	58,40	0,000	
Ferramenta					
NX2525 Acabamento (FP)	-0,0568	0,0264	-2,15	0,053	1,33
MC6025 Acabamento (FP)	-0,0038	0,0264	-0,15	0,887	1,33
Velocidade de corte (m/min)					
200	0,0080	0,0264	0,30	0,767	1,33
250	-0,0079	0,0264	-0,30	0,770	1,33
Avanço (mm/rev)					
0,1	-0,2349	0,0187	-12,58	0,000	1,00

Equação de Regressão

$$\begin{aligned}
 \text{Rugosidade inicial} &= 1,0905 - 0,0568 \text{ Ferramenta_NX2525} \\
 (\text{RA})^{0,5} &\text{ Acabamento(FP)} \\
 &- 0,0038 \text{ Ferramenta_MC6025 Acabamento(FP)} \\
 &+ 0,0606 \text{ Ferramenta_MC6025 Usinagem leve(LP)} \\
 &+ 0,0080 \text{ Velocidade de corte (m/min)_150} \\
 &- 0,0079 \text{ Velocidade de corte (m/min)_200} \\
 &- 0,0001 \text{ Velocidade de corte (m/min)_250} \\
 &- 0,2349 \text{ Avanço (mm/rev)_0,1} \\
 &+ 0,2349 \text{ Avanço (mm/rev)_0,2}
 \end{aligned}$$

Ajustados e Diagnósticos para Observações Atípicas

Resposta original		
Obs.	Rugosidade inicial (RA)	Ajuste
17	0,6	0,825
18	0,97	0,712

Ajustados e Diagnósticos para Observações Atípicas

Resposta Transformada					
Rugosidade					
	inicial	Ajuste	Resid	Resid	
Obs.	RA'			Pad	
17	0,7746	0,908	-0,134	-2,07	R
18	0,9849	0,844	0,1411	2,18	R

Rugosidade inicial (RA)' = resposta transformada

R Resíduo grande

D.2 - Rugosidade inicial (Rz) (Material da Ferramenta de corte x Velocidade de corte x Avanço)

Informações dos Fatores

Fator	Níveis	Valores
Ferramenta	3	NX2525 Acabamento (FP); MC6025 Acabamento (FP); MC6025 Usinagem leve (LP)
Velocidade de corte (m/min)	3	200; 250; 300
Avanço (mm/rev)	2	0,1; 0,2

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	5	64,440	12,888	6,02	0,005
Linear	5	64,440	12,888	6,02	0,005
Ferramenta	2	9,834	4,917	2,30	0,143
Velocidade de corte (m/min)	2	4,021	2,011	0,94	0,418
Avanço (mm/rev)	1	50,585	50,585	23,63	0,000
Erro	12	25,686	2,141		
Total	17	90,127			

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
1,46305	71,50%	59,62%	35,87%

Coefficientes

Termo	Coef	EP de Coef	Valor-T	Valor-P	VIF
Constante	6,329	0,345	18,35	0,000	
Ferramenta					
NX2525Acabamento (FP)	-0,946	0,488	-1,94	0,076	1,33
MC6025 Acabamento (FP)	0,088	0,488	0,18	0,861	1,33
Velocidade de corte (m/min)					
200	-0,663	0,488	-1,36	0,199	1,33
250	0,254	0,488	0,52	0,612	1,33
Avanço (mm/rev)					
0,1	-1,676	0,345	-4,86	0,000	1,00

Equação de Regressão

$$\begin{aligned}
 Rz(\text{inicial}) = & 6,329 - 0,946 \text{ Ferramenta_NX2525 Acabamento(FP)} \\
 & + 0,088 \text{ Ferramenta_MC6025} \\
 & \text{Acabamento(FP)} + 0,858 \text{ Ferramenta_MC6025 Usinagem leve(LP)} \\
 & - 0,663 \text{ Velocidade de corte (m/min)_150} \\
 & + 0,254 \text{ Velocidade de corte (m/min)_200} \\
 & + 0,408 \text{ Velocidade de corte (m/min)_250} \\
 & - 1,676 \text{ Avanço (mm/rev)_0,1} \\
 & + 1,676 \text{ Avanço (mm/rev)_0,2}
 \end{aligned}$$

Ajustados e Diagnósticos para Observações Atípicas

Obs.	Rz(inicial)	Ajuste	Resíd	Resíd Pad	R
1	3,850	6,397	-2,547	-2,13	R

R Resíduo grande

D.3 - Rugosidade inicial (Rt) (Material da Ferramenta de corte x Velocidade de corte x Avanço)

Informações dos Fatores

Fator	Níveis	Valores
Ferramenta	3	NX2525 Acabamento (FP); MC6025 Acabamento (FP); MC6025 Usinagem leve (LP)
Velocidade de corte (m/min)	3	200; 250; 300
Avanço (mm/rev)	2	0,1; 0,2

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	5	4,94307	0,98861	33,50	0,000
Linear	5	4,94307	0,98861	33,50	0,000
Ferramenta	2	0,22881	0,11440	3,88	0,050
Velocidade de corte (m/min)	2	0,00693	0,00346	0,12	0,890
Avanço (mm/rev)	1	4,70733	4,70733	159,53	0,000
Erro	12	0,35409	0,02951		
Total	17	5,29716			

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
0,171779	93,32%	90,53%	84,96%

Coefficientes

Termo	Coef	EP de Coef	Valor-T	Valor-P	VIF
Constante	1,2508	0,0405	30,89	0,000	
Ferramenta					
NX2525 Acabamento (FP)	-0,1275	0,0573	-2,23	0,046	1,33
MC6025 Acabamento (FP)	-0,0192	0,0573	-0,33	0,744	1,33
Velocidade de corte (m/min)					
200	0,0042	0,0573	0,07	0,943	1,33
250	-0,0258	0,0573	-0,45	0,660	1,33
Avanço (mm/rev)					
0,1	-0,5114	0,0405	-12,63	0,000	1,00

Equação de Regressão

$$\begin{aligned}
 \text{Rugosidade inicial (RA)} &= 1,2508 - 0,1275 \text{ Ferramenta_NX2525 Acabamento(FP)} \\
 &\quad - 0,0192 \text{ Ferramenta_MC6025 Acabamento(FP)} \\
 &\quad + 0,1467 \text{ Ferramenta_MC6025 Usinagem leve(LP)} \\
 &\quad + 0,0042 \text{ Velocidade de corte (m/min)_150} \\
 &\quad - 0,0258 \text{ Velocidade de corte (m/min)_200} \\
 &\quad + 0,0217 \text{ Velocidade de corte (m/min)_250} \\
 &\quad - 0,5114 \text{ Avanço (mm/rev)_0,1} \\
 &\quad + 0,5114 \text{ Avanço (mm/rev)_0,2}
 \end{aligned}$$

Ajustados e Diagnósticos para Observações Atípicas

Obs.	Rugosidade		Resid		
	inicial (RA)	Ajuste	Resid	Pad	
10	2,2600	1,9306	0,3294	2,35	R

R Resíduo grande

D.4 - Rugosidade final (Ra) (Material da Ferramenta de corte x Velocidade de corte x Avanço)

Método

Transformação de Box-Cox	
λ arredondado	1
λ estimado	0,814729
IC de 95% para λ	(-0,148771; 1,71723)

Informações dos Fatores

Fator	Níveis	Valores
Avanço (mm/rev)	2	0,1; 0,2

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	1	4,9875	4,98753	229,26	0,000
Linear	1	4,9875	4,98753	229,26	0,000
Avanço (mm/rev)	1	4,9875	4,98753	229,26	0,000
Erro	16	0,3481	0,02175		
Total	17	5,3356			

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
0,147495	93,48%	93,07%	91,74%

Coefficientes

Termo	Coef	EP de Coef	Valor-T	Valor-P	VIF
Constante	1,3008	0,0348	37,42	0,000	
Avanço (mm/rev)					
0,1	-0,5264	0,0348	-15,14	0,000	1,00

Equação de Regressão

$$\begin{aligned} \text{Rugosidade} &= 1,3008 - 0,5264 \text{ Avanço (mm/rev)}_{0,1} \\ \text{final} &+ 0,5264 \text{ Avanço (mm/rev)}_{0,2} \end{aligned}$$

Ajustados e Diagnósticos para Observações Atípicas

Obs.	Rugosidade		Resid		R
	inicial (RA)	Ajuste	Resid	Pad	
8	1,17	0,7744	0,3956	2,84	R

R Resíduo grande

D.5 - Rugosidade final (Rz) ((Material da Ferramenta de corte x Velocidade de corte x Avanço)

Informações dos Fatores

Fator	Níveis	Valores
Ferramenta	3	NX2525 Acabamento (FP); MC6025 Acabamento (FP); MC6025 Usinagem leve (LP)
Velocidade de corte (m/min)	3	200; 250;300
Avanço (mm/rev)	2	0,1; 0,2

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	5	66,183	13,237	7,83	0,002
Linear	5	66,183	13,237	7,83	0,002
Ferramenta	2	5,139	2,569	1,52	0,258
Velocidade de corte (m/min)	2	10,710	5,355	3,17	0,079
Avanço (mm/rev)	1	50,334	50,334	29,79	0,000
Erro	12	20,277	1,690		
Total	17	86,459			

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
1,29990	76,55%	66,78%	47,23%

Coefficientes

Termo	Coef	EP de Coef	Valor-T	Valor-P	VIF
Constante	7,206	0,306	23,52	0,000	
Ferramenta					
NX2525 Acabamento (FP)	0,019	0,433	0,04	0,965	1,33
MC6025 Acabamento (FP)	-0,664	0,433	-1,53	0,151	1,33
Velocidade de corte (m/min)					
200	-0,785	0,433	-1,81	0,095	1,33
250	-0,264	0,433	-0,61	0,554	1,33
Avanço (mm/rev)					
0,1	-1,672	0,306	-5,46	0,000	1,00

Equação de Regressão

$$\begin{aligned}
 R_z \text{ (final)} &= 7,206 + 0,019 \text{ Ferramenta_NX2525 Acabamento(FP)} \\
 &- 0,664 \text{ Ferramenta_MC6025} \\
 &\text{Acabamento(FP)} + 0,644 \text{ Ferramenta_MC6025 Usinagem leve(LP)} \\
 &- 0,785 \text{ Velocidade de corte (m/min)_150} \\
 &- 0,264 \text{ Velocidade de corte (m/min)_200} \\
 &+ 1,049 \text{ Velocidade de corte (m/min)_250} \\
 &- 1,672 \text{ Avanço (mm/rev)_0,1} \\
 &+ 1,672 \text{ Avanço (mm/rev)_0,2}
 \end{aligned}$$

Ajustados e Diagnósticos para Observações Atípicas

Obs.	Rz	Ajuste	Resíd	Resíd	Pad
	(final)				
1	5,775	8,112	-2,337	-2,2	R

R Resíduo grande

D.6 - Rugosidade final (Rt) ((Material da Ferramenta de corte x Velocidade de corte x Avanço)

Informações dos Fatores

Fator	Níveis	Valores
Ferramenta	3	NX2525 Acabamento (FP); MC6025 Acabamento (FP); MC6025 Usinagem leve (LP)
Velocidade de corte (m/min)	3	200; 250; 300
Avanço (mm/rev)	2	0,1; 0,2

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	5	68,829	13,766	2,30	0,110
Linear	5	68,829	13,766	2,30	0,110
Ferramenta	2	4,887	2,443	0,41	0,673
Velocidade de corte (m/min)	2	13,524	6,762	1,13	0,355
Avanço (mm/rev)	1	50,418	50,418	8,44	0,013
Erro	12	71,715	5,976		
Total	17	140,544			

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
2,44464	48,97%	27,71%	0,00%

Coefficientes

Termo	Coef	EP de Coef	Valor-T	Valor-P	VIF
Constante	9,029	0,576	15,67	0,000	
Ferramenta					
NX2525 Acabamento (FP)	0,429	0,815	0,53	0,608	1,33
MC6025 Acabamento (FP)	-0,733	0,815	-0,90	0,386	1,33
Velocidade de corte (m/min)					
200	-1,213	0,815	-1,49	0,163	1,33
250	0,450	0,815	0,55	0,591	1,33
Avanço (mm/rev)					
0,1	-1,674	0,576	-2,90	0,013	1,00

Equação de Regressão

$$\begin{aligned}
 R_t \text{ (final)} &= 9,029 + 0,429 \text{ Ferramenta_NX2525 Acabamento(FP)} \\
 &\quad - 0,733 \text{ Ferramenta_MC6025} \\
 &\quad \text{Acabamento(FP)} + 0,304 \text{ Ferramenta_MC6025 Usinagem leve(LP)} \\
 &\quad - 1,213 \text{ Velocidade de corte (m/min)_150} \\
 &\quad + 0,450 \text{ Velocidade de corte (m/min)_200} \\
 &\quad + 0,762 \text{ Velocidade de corte (m/min)_250} \\
 &\quad - 1,674 \text{ Avanço (mm/rev)_0,1} \\
 &\quad + 1,674 \text{ Avanço (mm/rev)_0,2}
 \end{aligned}$$

Ajustados e Diagnósticos para Observações Atípicas

Obs.	Rz	Ajuste	Resíd	Resíd Pad	
	(final)				
9	16,23	11,58	4,64	2,33	R

R Resíduo grande