

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

BÁRBARA CRISTINA MENDANHA REIS

INFLUÊNCIA DO MATERIAL DA FERRAMENTA DE CORTE SOBRE
A USINABILIDADE DO AÇO ABNT 4340 NO TORNEAMENTO

Belo Horizonte

2017

BÁRBARA CRISTINA MENDANHA REIS

**INFLUÊNCIA DO MATERIAL DA FERRAMENTA DE CORTE SOBRE
A USINABILIDADE DO AÇO ABNT 4340 NO TORNEAMENTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Área de concentração: Processos de Fabricação e Materiais

Orientador: Prof. Dr. Paulo Eustáquio aria

Coorientador: Prof. Dr. Marcelo Araújo Câmara

Belo Horizonte

2017

*Dedico essa obra àqueles que
me ampararam ao longo da
minha vida.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, porque, a Ele, toda honra, glória e louvor.

Ao professor Dr. Paulo Faria, pelos ensinamentos, hospitalidade e disponibilidade desde o início.

Ao professor Dr. Marcelo Araújo Câmara, por toda a paciência em transmitir seus conhecimentos e tolerar a minha ansiedade, sempre buscando inspirar constantemente meu crescimento pessoal, incentivando todos os meus sonhos.

Aos professores Dr. Alexandre Abrão e Dr. Juan Rubio, pelo ensino, suporte e valiosos conselhos.

À Escola de Engenharia da UFMG, pela infraestrutura física e intelectual disponibilizada.

Aos colegas mestrandos e doutorandos, que contribuíram de forma direta ou indireta na consecução deste trabalho.

Aos amigos e familiares, em especial aos meus pais, minhas irmãs e ao meu noivo, por nunca desistirem, sempre mencionando palavras motivadoras.

Aos profissionais da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais Instituto Politécnico (IPUC).

E à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pelo amparo financeiro ao longo desta trajetória acadêmica.

“Não fiquem preocupados com o dia de amanhã, pois o dia de amanhã trará as suas próprias preocupações. Para cada dia bastam as suas próprias dificuldades.” [Mateus 6:34]

RESUMO

A usinagem convencional baseia-se na remoção de material por meio de uma ferramenta de corte, a qual necessariamente deve apresentar maior dureza e resistência mecânica em relação ao material da peça. Entretanto, devido ao constante surgimento de novas ligas, com dureza e propriedades mecânicas mais altas, existe uma necessidade contínua por novos materiais para ferramentas de corte, com propriedades que possam superar as exigências dessas ligas. Procurando compreender os fenômenos intrínsecos que a variação dos parâmetros de entrada (velocidade de corte, avanço, material da ferramenta de corte (cermet e metal duro) e geometria do quebra-cavaco (LP e MP)) causa nos parâmetros de saída (força de corte, rugosidade, forma do cavaco, temperatura de corte e desgaste da ferramenta) durante a operação de torneamento do aço ABNT 4340, material utilizado neste trabalho, inicialmente um planejamento fatorial completo 2^3 foi empregado para análise estatística, além de outras configurações para as demais análises, totalizando 40 testes. Em relação à análise da força de corte, o material da ferramenta de corte e o avanço afetaram significativamente a força de corte, sendo os menores valores alcançados com a ferramenta de corte de cermet e o menor nível de avanço. Em relação à rugosidade, o avanço mostrou-se como o único parâmetro influente, e o material da ferramenta de corte, independentemente da geometria do quebra-cavaco, não trouxe alterações significativas. No que se refere à forma dos cavacos, as análises mostraram que o nível mais elevado de avanço gerou cavacos mais curtos e que o material da ferramenta se mostrou influente sobre a forma do cavaco. Em relação à temperatura de corte, os resultados indicaram que metal duro, quebra-cavaco LP e o menor nível de velocidade de corte asseguraram os menores valores de temperatura de corte. Como última análise, para os parâmetros de corte estabelecidos e percurso de corte não foi possível identificar desgaste nas ferramentas de corte.

Palavras-chave: aço ABNT 4340; torneamento; temperatura; rugosidade; desgaste da ferramenta; material da ferramenta de corte.

ABSTRACT

Conventional machining is based on the removal of material by means of a cutting tool, which necessarily must have higher hardness and strength relative to the workpiece material. However, due to the constant development of new alloys with higher hardness and mechanical properties, there is a continuing need for new materials for cutting tools, with properties that can overcome the requirements of these alloys. In order to understand the intrinsic phenomena that the variation of the input parameters (cutting speed, feed rate, cutting tool material and chip breaker) causes the output parameters (cutting force, roughness, chip, cutting temperature and wear tool) turning tests were performed using AISI 4340 steel as waste material experimental. Initially, a full factorial design 2^3 was used for statistical analysis together additional tests, thus resulting in 40 tests. Regarding the analysis of cutting force, tool material and feed rate affect significantly the cutting force, with the lowest value achieved with the is concerned cermet and the lowest level of feed rate. Regarding roughness, feed rate was shown as the only influential parameter and the cutting tool material, regardless of the form of chip breaker, did not bring significant benefits. The analysis of chip form showed that higher levels feed produced short chips and that tool material proved to be influential on the form of the chip. As far as the cutting temperature, the results indicated that cemented carbide, LP chip breaker and lower cutting speed levels ensured the lowest cutting temperatures. Finally, for the selected established cutting parameters and length cut it was not possible to identify wear on the cutting tools.

Keywords: AISI 4340 steel; turning; temperature; surface roughness; tool wear; cutting tool material

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1- Visão geral da operação e das variáveis que influenciam o torneamento.....	6
Figura 2.2 - Classificação esquemática de vários materiais para ferramentas de corte	9
Figura 2.3 - Efeitos das variações da porcentagem de Co,TiC,TaC e do tamanho de grão de WC e seus efeitos sobre as propriedades mecânicas	14
Figura 2.4 - Microestrutura de metal duro convencional e cermet.....	17
Figura 2.5 - Componentes da força de usinagem no torneamento	24
Figura 2.6 - Variação da força de corte em relação: (a) velocidade de corte (b) avanço	26
Figura 2.7- Mudanças na ductilidade e mecanismos de fratura associados para materiais com estrutura cristalina de corpo centrado (CCC):.....	33
Figura 2.8- Influência de V_c sobre a temperatura de corte e a taxa de desgaste da ferramenta de corte.....	34
Figura 2.9 - Temperatura média na interface cavaco-ferramenta com diferentes (a) velocidades de corte e (b) avanço	37
Figura 2.10 - Gráfico de barra com variação de temperatura do corpo de prova (a) metal duro e (b) cermet.....	39
Figura 2.11 - Formas características de desgaste no inserto durante o processo de torneamento.....	41
Figura 2.12 - Alguns tipos de desgaste e parâmetros utilizados para medir desgaste nas ferramentas de torneamento	42
Figura 3.1 - Fluxograma do procedimento experimental	49
Figura 3.2 - Características das ferramentas de cermet empregadas.....	51
Figura 3.3 - Características das ferramentas de metal empregadas.....	52
Figura 3.4 - Montagem do experimento (Etapa 1).....	53
Figura 3.5 - Montagem do multímetro para aquisição da corrente elétrica	55
Figura 3.6 - Montagem do sistema para ajuste do pirômetro	59
Figura 3.7 - Montagem do sistema para aquisição da temperatura	60
Figura 4.1 - Teste de Normalidade para força de corte	63

Figura 4.2- Análise residual do material da ferramenta de corte, geometria do quebra-cavaco e f para F_c	64
Figura 4.3 - Gráfico de efeito principal para a força de corte (f , geometria do quebra-cavaco e material da ferramenta, $a_p = 1,5$ mm)	65
Figura 4.4 - Gráfico de interação de segunda ordem para a força de corte (f , material da ferramenta de corte e geometria do quebra-cavaco)	66
Figura 4.5 - Teste de Normalidade para rugosidade (R_q)	69
Figura 4.6 - Análise residual do material da ferramenta, geometria do quebra-cavaco e f para rugosidade (R_q)	69
Figura 4.7 - Gráfico de efeito principal para R_q (f , geometria do quebra-cavaco e material da ferramenta, $a_p = 1,5$ mm).....	70
Figura 4.8 - Teste de Normalidade para temperatura do cavaco	75
Figura 4.9 - Análise residual do material da ferramenta de corte, geometria do quebra-cavaco e f para Temperatura do cavaco.....	76
Figura 4.10 - Gráfico de efeito principal para a temperatura (V_c , material da ferramenta e geometria do quebra-cavaco)	76
Figura 4.11 - Gráfico de interação para a temperatura (V_c e material da ferramenta)	78

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 - Relação entre propriedades dos materiais para ferramenta e o desempenho da ferramenta	9
Quadro 2.2 - Aplicação e classificação de materiais de corte duros	13
Quadro 4.1 - Imagem dos cavacos coletados ($V_c= 250$ m/min e $a_p = 1,5$ mm)	72
Quadro 4.2 - Imagem dos insertos ($V_c= 250$ m/min, $f=0,16$ mm/rev, $a_p = 1,5$ mm) ...	80
Quadro 4.3 - Imagem das superfícies dos insertos ($V_c= 250$ m/min, $f=0,16$ mm/rev, $a_p = 1,5$ mm).....	82
Quadro 4.4 - Imagem das superfícies de saída dos insertos e análise EDS ($V_c= 250$ m/min, $f=0,16$ mm/rev, $a_p = 1,5$ mm).....	83
Quadro 4.5 - Imagem das superfícies de folga dos insertos e análise EDS ($V_c= 250$ m/min, $f=0,16$ mm/rev, $a_p = 1,5$ mm).....	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Propriedades físicas do WC e do TiC	12
Tabela 2. 2 - Comparação das propriedades físicas do cermet (TiC) com o metal duro (WC)	18
Tabela 2.3 - Valores dos parâmetros da equação da temperatura ótima σ_{ct} para variados materiais da peça de trabalho	31
Tabela 2.4 - Regime e parâmetros geométricos da Figura 2.12 (a)	35
Tabela 2.5 - Parâmetros da curva da Figura 2.12(c).....	36
Tabela 2.6 - Parâmetros de corte conforme ordem de observação para o trabalho de Das <i>et al.</i>	38
Tabela 3.1 - Composição química dos corpos de prova	50
Tabela 3.2 - Descrição das ferramentas de corte.....	50
Tabela 3.3- Parâmetros utilizados no torneamento (Etapa 2)	57
Tabela 4.1- ANOVA para a força de corte (f, material da ferramenta de corte e geometria do quebra-cavaco)	62
Tabela 4.2- ANOVA para a rugosidade (f, material da ferramenta de corte e geometria do quebra-cavaco)	68
Tabela 4.3 - ANOVA para a temperatura (V_c , material da ferramenta e geometria do quebra-cavaco)	74

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	Instituto Americano do Ferro e do Aço (<i>American Institute for Iron and Steel</i>)
Al ₂ O ₃	Óxido de alumínio
ANOVA	Análise de variância (<i>Analysis of variance</i>)
APC	Aresta Postiça de Corte
a _p	Profundidade de usinagem
cBN	Nitreto cúbico de boro (<i>Cubic boron nitride</i>)
CVD	Deposição química de vapor (<i>Chemical vapour deposition</i>)
DOE	Planejamento Fatorial de Experimentos (<i>Design of Experiments</i>)
EDS	Espectroscopia de Energia Dispersiva (<i>Energy dispersive spectroscopy</i>)
f	Avanço
F _c	Força de corte
F _f	Força de avanço
HRA	Dureza Rockwell A
HRc	Dureza Rockwell C
HB	Dureza <i>Brinell</i>
k _s	Pressão Específica de Corte
PACVD	Deposição química de vapor assistida por plasma (<i>Plasma assisted chemical vapour deposition</i>)
PVD	Deposição física de vapor (<i>Physical vapour deposition</i>)
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura

NbC	Carboneto de Nióbio
R _a	Desvio aritmético médio
R _q	Desvio médio quadrático
R _t	Altura total do perfil
r _ε	Raio de Ponta da Ferramenta
TaC	Carboneto de Tântalo
TiC	Carboneto de Titânio
TiCN	Carbonitreto de Titânio
TiN	Nitreto de Titânio
VB _B	Desgaste de flanco médio
VB _{max}	Desgaste de flanco máximo
V _c	Velocidade de corte
WC	Carboneto de Tungstênio

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Objetivo geral	4
1.2	Objetivos específicos	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1	Operação de torneamento	5
2.2	Materiais para ferramenta de corte	7
2.2.1	Metal Duro	10
2.2.2	Cermet	15
2.3	Ferramentas de corte revestidas.....	20
2.3.1	Deposição química de vapor (CVD)	21
2.3.2	Deposição física de vapor (PVD).....	22
2.4	Influência do material da ferramenta de corte sobre a operação de torneamento.....	23
2.4.1	Força e potência de usinagem.....	23
2.4.2	Qualidade da superfície usinada	27
2.4.3	Temperatura de corte	30
2.4.4	Desgaste e vida da ferramenta de corte.....	40
2.5	Considerações parciais	46
3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	49
3.1	Materiais e Métodos	50
3.2	Tratamento térmico dos corpos de prova.....	52
3.3	Realização dos ensaios de torneamento (Etapa 1).....	53
3.4	Obtenção da força de corte.....	54
3.5	Medição da rugosidade	56
3.6	Coleta dos cavacos	56
3.7	Aplicação do método estatístico e análise dos resultados (Etapa 1)	57

3.8	Realização dos ensaios de torneamento (Etapa 2).....	57
3.9	Coleta dos dados de temperatura	58
3.10	Aplicação do método estatístico e análise dos resultados (Etapa 2)	60
3.11	Coleta de dados de desgaste da ferramenta de corte.....	60
3.12	Análise do desgaste por meio da microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de energia dispersiva (EDS)	61
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	62
4.1	Força de corte	62
4.2	Rugosidade da superfície torneada.....	68
4.2.1	Desvio médio quadrático (R_q).....	68
4.3	Análise dos cavacos.....	71
4.4	Temperatura de corte.....	73
4.5	Desgaste da ferramenta de corte	79
5	CONCLUSÃO	86
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	88
	REFERÊNCIAS.....	89
	ANEXO.....	93
	APÊNDICE A- Tabela com os dados da Etapa 1 (Força de Corte).....	94
	APÊNDICE B - Tabela com os dados da Etapa 1 (Rugosidade).....	95
	APÊNDICE C - Tabela com os dados da Etapa 2 (Temperatura de Corte)	96
	APÊNDICE D – Análises de Variância (ANOVA)	97

1 INTRODUÇÃO

A indústria metal mecânica constantemente eleva o nível das suas exigências em relação ao desempenho de ferramentas de corte visando proporcionar maior produtividade aos processos de fabricação. Tal mudança promoveu inovação tecnológica e desenvolvimento de novos materiais para ferramentas de corte, tornando possível encontrar desde um material para ferramenta de corte geral com aplicação em uma vasta gama de operações com desempenho satisfatório em todas elas, até um material específico, que apresenta um resultado ótimo somente numa determinada operação, com parâmetros de corte - velocidade de corte (V_c), avanço (f) e profundidade de usinagem (a_p) - bem estabelecidos para um tipo de material e operação a usinar.

Basicamente, uma ferramenta é capaz de cortar um material porque apresenta maior dureza e geometria mais aguda em relação à peça de trabalho; entretanto, nem todo material duro é adequado para ser uma ferramenta de corte. Dependendo do tipo de operação, a temperatura na interface cavaco-ferramenta pode ultrapassar 1000°C. 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). Tal propriedade, conhecida como dureza a quente, está fortemente associada à resistência ao desgaste por abrasão, isto é, resistência ao atrito, o que afeta o desgaste de flanco.

A tenacidade é um termo mecânico que pode ser usado em vários contextos. É possível definir tenacidade, mais especificamente a tenacidade à fratura, como uma propriedade que indica a resistência de um material à fratura quando algum defeito está presente (CALLISTER; RETHWISCH, 2009). Em outra definição, pode-se afirmar que a tenacidade de um material é a sua capacidade de absorver energia no regime plástico (DIETER, 1988). No contexto da usinagem, afirmar que uma ferramenta é tenaz significa dizer que ela é capaz de suportar bem os choques inerentes às operações de corte interrompido, sem que, com isto, ocorra a fratura e/ou lascamento da aresta de corte da ferramenta (DINIZ *et al.*, 2006).

O processo de usinagem envolve 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 a sua qualidade superficial, provocando variações dimensionais muitas vezes não aceitáveis. Logo, para resistir aos efeitos das ações destes agentes aceleradores de desgaste, é necessário equilibrar dureza e tenacidade, propriedades que geralmente se apresentam de forma antagônica.

Dentre as propriedades desejáveis para um material de ferramenta de corte, Machado *et al.* (2015) citam que o desempenho das ferramentas de corte depende principalmente dos seguintes aspectos: alta dureza, tenacidade para prevenção de falhas por fratura, alta resistência ao desgaste abrasivo, ao choque térmico, ao impacto, à compressão e ao cisalhamento, boas propriedades mecânicas e térmicas em altas temperatura de trabalho e a capacidade de ser inerte quimicamente.

A velocidade de corte (V_c), o avanço (f), a geometria da ferramenta de corte, as condições da máquina-ferramenta e o material da peça podem influenciar o comportamento da ferramenta durante o processo de usinagem, sendo necessário definir uma grandeza tecnológica que expressa, por meio de um índice comparativo, um conjunto de propriedades de usinagem de um material em relação a outro tomado como padrão. Esse indicador é o índice de usinabilidade, o qual pode ser interpretado como o grau de dificuldade de se usinar um determinado material. Diniz *et al.* (2006) afirmam que entende-se por propriedades de usinagem de um material aquelas que expressam seu efeito sobre grandezas mensuráveis inerentes ao processo de usinagem, tais como a vida da ferramenta, o acabamento superficial da peça, os esforços de corte, a temperatura de corte, a taxa de remoção de material e as características do cavaco.

O conceito “boa usinabilidade” geralmente se refere à ação de corte sem problemas e a uma vida apropriada da ferramenta. De acordo com Sandvik Coromant (2016), os testes de usinabilidade para um material específico são realizados usando avaliações práticas, e os resultados são determinados em relação a outro teste em outro tipo de material sob aproximadamente as mesmas condições. O fabricante citado afirma que, nestes testes, outros fatores, como microestrutura,

tendência à abrasão, máquina-ferramenta, estabilidade do sistema máquina-ferramenta-peça-dispositivo, ruído e vida útil da ferramenta, poderão ser levados em consideração.

Na década de 1920, o desenvolvimento do metal duro (carboneto de tungstênio e cobalto fabricado pelo processo de metalurgia do pó) representou um grande impulso para a indústria dos materiais para ferramentas de corte, uma vez que permitiu um aumento significativo das velocidades de corte. Por meio da adição de elementos como o carboneto de titânio (TiC), carboneto de nióbio (NbC) e carboneto de tântalo (TaC), combinados ao composto originalmente desenvolvido (WC+Co), foi possível desenvolver uma ferramenta com o propósito de obter alto desempenho na usinagem do aço. A fim de atender as mais distintas especificações do mercado, pode-se encontrar um grande número de metal duro com distintas composições químicas e tamanho dos grãos, bem como metal duro revestido com carboneto de titânio (TiC), nitreto de titânio (TiN), óxido de alumínio (Al_2O_3) e carbonitreto de titânio (TiCN), (DINIZ *et al.*, 2006).

As primeiras tentativas de desenvolvimento das ferramentas de cermets (fase cerâmica combinada a uma fase metálica) começaram na Alemanha, em 1929, quando as soluções sólidas de carboneto de titânio e carboneto de molibdênio com 15% de níquel como aglutinante foram fabricadas e utilizadas para torneamento de acabamento de aço (ASM HANDBOOK, 1995). Inicialmente, a aceitação foi limitada por causa da baixa resistência e alta fragilidade deste material. No entanto, o interesse pelo carboneto de titânio continuou e atualmente os cermets são ferramentas com grandes aplicações na indústria, tendo como características principais a alta dureza a elevadas temperaturas e a grande estabilidade química, com pouca tendência a difusão (MACHADO *et al.*, 2015). Mitsubishi (2006) complementa afirmando que estes materiais apresentam estabilidade térmica superior, alta resistência à oxidação e baixa afinidade com o ferro, proporcionando assim excelente acabamento na usinagem de alta velocidade de corte.

Diante deste cenário, ao longo do tempo surgiram diversos materiais aplicados a ferramentas de corte: metal duro, cermets, cerâmicas puras e mistas, materiais ultraduros. Logo, o uso de distintos materiais de ferramenta de corte nos processos de usinagem deve ser estudado para cada situação a fim de comparar a

usinabilidade dos materiais de ferramentas e, dessa forma, verificar a melhor relação desempenho-custo-benefício para a configuração da operação.

1.1 Objetivo geral

O objetivo desta dissertação é estudar o efeito que a variação dos parâmetros de entrada (velocidade de corte, avanço, material da ferramenta de corte e quebra-cavaco) causa nos parâmetros de saída (força de corte, rugosidade, forma do cavaco, temperatura de corte e desgaste da ferramenta) na operação de torneamento do aço ABNT 4340, utilizando um planejamento de experimentos fatorial.

1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste estudo são descritos a seguir:

- a. estudar o comportamento da força de corte obtida indiretamente pela variação da corrente elétrica consumida pelo motor principal do torno, visando estabelecer a influência do material da ferramenta de corte, da geometria do quebra-cavaco e do avanço;
- b. compreender a influência do material da ferramenta, da geometria do quebra-cavaco e do avanço sobre a rugosidade;
- c. descrever a forma do cavaco em relação à modificação dos parâmetros de entrada (material da ferramenta, geometria do quebra-cavaco e avanço) e verificar se estes atuam de forma significativa neste fenômeno;
- d. compreender a influência da velocidade de corte, do material da ferramenta e da geometria do quebra-cavaco sobre a variação da temperatura de corte;
- e. descrever o desgaste e seus mecanismos em relação à modificação do material da ferramenta e geometria do quebra-cavaco e verificar se estes atuam de forma significativa sobre o desgaste da ferramenta.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta seção contextualiza este trabalho de pesquisa. Inicialmente, são apresentadas as características da operação de torneamento. Na sequência, são retratados os materiais para ferramentas de corte 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, metal duro e cermet (revestidos ou não) são abordados em termos de suas características e fatores que influenciam na força de corte e potência de usinagem, na qualidade da superfície usinada, na temperatura de corte e na vida e no desgaste da ferramenta de corte.

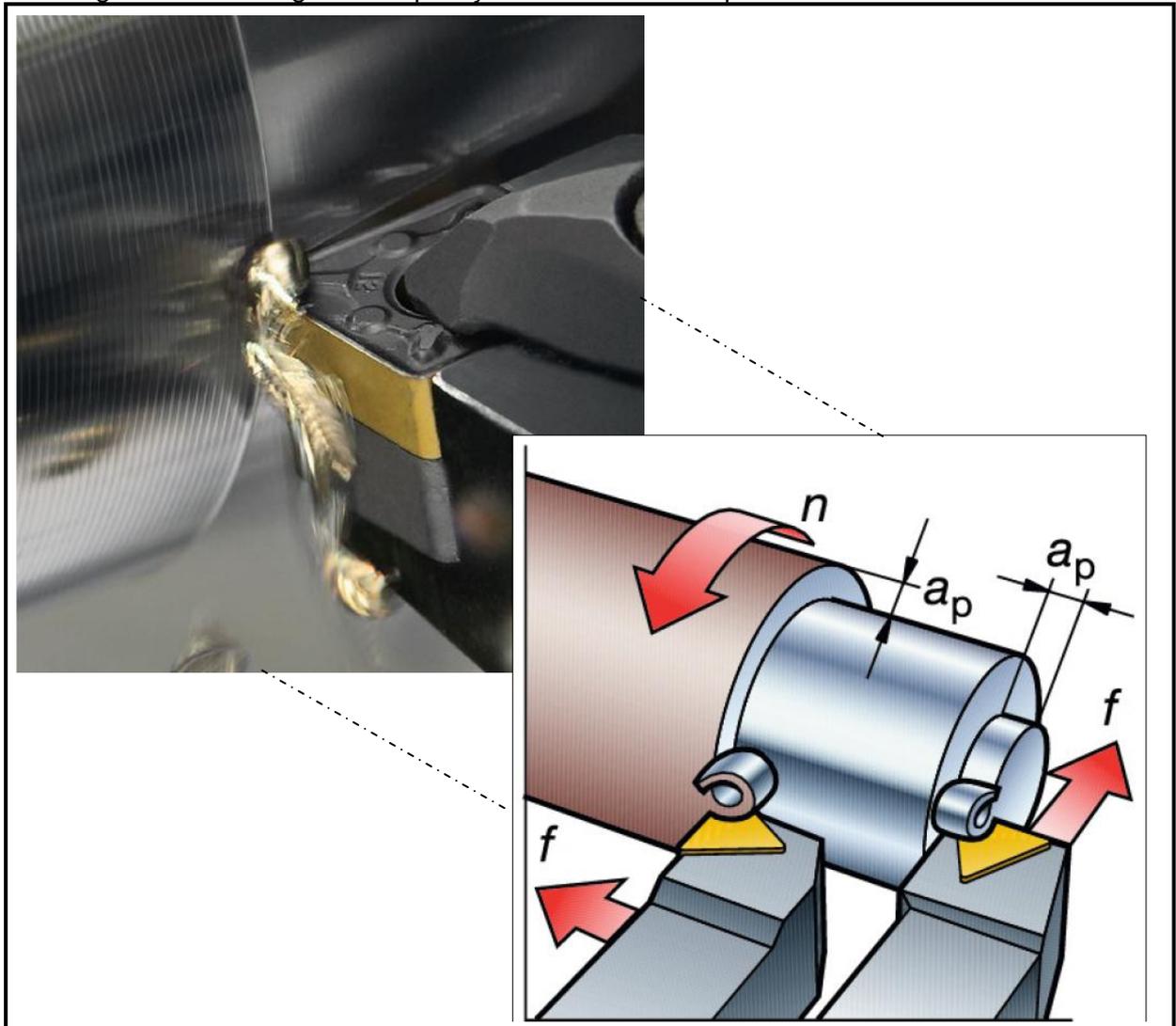
2.1 *Operação de torneamento*

Dentre as operações de usinagem que, ao conferir à peça forma, ou as dimensões, ou o acabamento, bem como a combinação destes três itens geram cavaco, destaca-se o torneamento como uma das operações comumente empregadas na indústria. Segundo ASM Handbook (1995), o torneamento proporciona a geração de superfícies de revolução pela ação de uma ferramenta de corte numa rotação da peça de trabalho, geralmente em um torno. Ferraresi (1970) define a operação de torneamento:

“Processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de superfícies de revolução com auxílio de uma ou mais 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, p.XXVI).

Na operação de torneamento, segundo Trent e Wright (2000), a ferramenta é fixada de maneira rígida em um porta-ferramenta, movendo-se a uma velocidade constante ao longo do eixo da peça, o que proporciona a retirada de uma camada de material para formar um cilindro ou uma superfície de perfil mais complexo. Isto é mostrado esquematicamente na Figura 2.1.

Figura 2.1- Visão geral da operação e das variáveis que influenciam o torneamento



Fonte: adaptado de Sandvik (Torneamento Geral, p.10)

Em relação aos parâmetros de corte descritos na Figura 2.1, a velocidade de corte (V_c) é definida como a velocidade tangencial instantânea resultante da rotação da ferramenta em torno da peça (DINIZ *et al.*, 2006). O movimento axial da ferramenta, ou radial no faceamento, é chamado avanço (f) e é medido em mm/rev. Por fim, a profundidade de usinagem (a_p) é a diferença entre a superfície cortada e a bruta e é medida em mm em um ângulo reto com relação à direção de avanço (SANDVIK- TORNEAMENTO GERAL). A partir do produto destes três fatores determina-se a taxa de remoção de material, um parâmetro frequentemente utilizado para medir a eficiência de operações de corte.

$$V_c \cdot a_p \cdot f = \text{Taxa de remoção de material} \quad (2.1)$$

Conforme Trent e Wright (2000), a velocidade de corte e o avanço são os dois parâmetros mais importantes que podem ser ajustados para atingir as condições ótimas de corte. Entretanto, os trabalhos de Souza (2004) e Bonandi (2012) mostram que o torneamento é uma operação extremamente complexa porque possui diversas variáveis, a dizer: variáveis independentes (material e geometria da peça, material e geometria da ferramenta, parâmetros de corte, meios lubri-refrigerantes e máquina-ferramenta), bem como 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), as quais podem afetar diretamente o resultado do torneamento.

Ainda é possível subdividir a operação de torneamento em desbaste e acabamento. Segundo Machado *et al.* (2015), no desbaste o objetivo é garantir alta taxa de remoção de material, sendo, portanto, limitado pela potência da máquina-ferramenta; já no acabamento, a qualidade final do componente é prioritária.

Nas operações de usinagem em que há corte contínuo de materiais dúcteis, geralmente ocorre a formação de cavacos contínuos. Machado *et al.* (2015) afirmam que situações como estas são indesejáveis, fazendo-se necessário o controle do cavaco, como, por exemplo, com a utilização de ferramentas específicas com dispositivos do tipo quebra-cavaco, além de formas de lubrificação e refrigeração a fim de reduzir as altas temperaturas. Logo, o estudo das relações entre estas variáveis para cada tipo de material a ser usinado permite determinar as melhores condições de corte que, por sua vez, trarão melhores resultados.

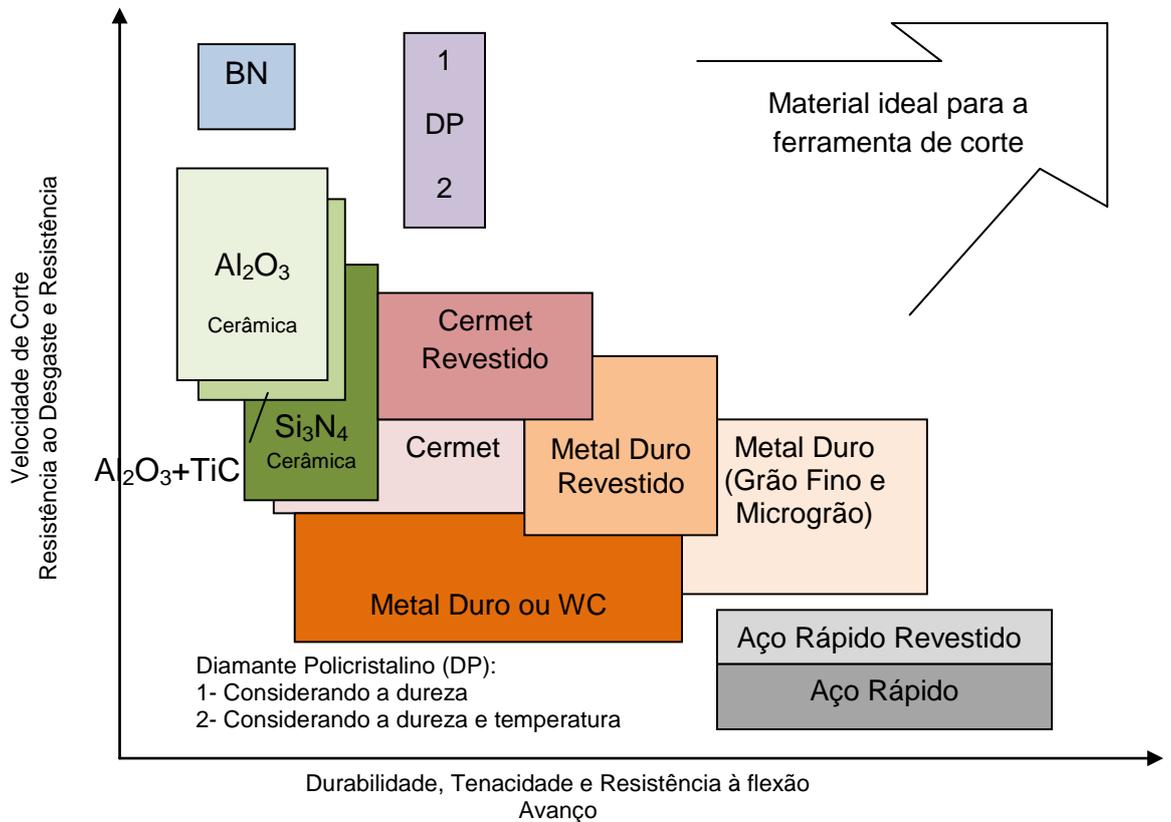
2.2 Materiais para ferramenta de corte

A usinagem convencional baseia-se na remoção de material por meio de uma ferramenta de corte, a qual necessariamente deve apresentar maior dureza e resistência mecânica em relação ao material da peça. Entretanto, devido ao constante surgimento de novas ligas, com dureza e propriedades mecânicas mais altas, existe uma demanda contínua por novos materiais para ferramentas de corte, com propriedades que possam suportar as exigências dessas ligas.

O grande desafio para a indústria de ferramentas de corte é conciliar dureza e tenacidade, visto que são fundamentais para o bom desempenho da ferramenta de corte e que dificilmente são encontradas em um mesmo material, conforme pode ser visto na Figura 2.2. Machado *et al.* (2015) afirmam que tal balanço foi conseguido por meio da produção de ferramentas com diferentes composições químicas, refinamentos dos grãos, controle dos processos de fabricação e tratamento térmico. Já Amorim (2002) ressalta a importância do revestimento tribológico na busca por um substrato tenaz e que apresente alguma dureza, e um revestimento com alta dureza, resistência à abrasão e inércia química. Nesse sentido, Holmberg e Matthews (2009) afirmam que as superfícies dos revestimentos têm atributos particulares que podem divergir daqueles do material no interior do revestimento. Porém, verifica-se a busca pelo desenvolvimento de novos revestimentos (AlCrN, CrN) [NN(a), 2017] e métodos de deposição visando garantir ferramentas com características tenazes no núcleo, resistentes ao desgaste e quimicamente inertes na superfície.

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. A Figura 2.2 dispõe os materiais para ferramentas em função das propriedades de resistência ao desgaste e da tenacidade.

Figura 2.2 - Classificação esquemática de vários materiais para ferramentas de corte



Fonte: adaptado de Klocke (2011, p.96)

Pode-se observar na Figura 2.2 que para cada ferramenta as propriedades variam bastante, não se reunindo necessariamente em um só material. No entanto, a partir da aplicação, priorizam-se aquelas que possam ser reunidas. O Quadro 2.1 mostra a relação entre as propriedades dos materiais para ferramenta de corte e o desempenho da ferramenta durante a usinagem.

Quadro 2.1 - Relação entre propriedades dos materiais para ferramenta e o desempenho da ferramenta

Dureza (Dureza a Quente) Baixa ↔ Alta	Resistência à ruptura transversal Pequena ↔ Alta	Energia Livre de Formação Alta ↔ Baixa	Condutividade Térmica Alta ↔ Baixa	Coefficiente de Expansão Térmica Alto ↔ Baixo
Resistência ao desgaste de flanco Baixa ↔ Alta	Resistência à fratura Baixa ↔ Alta	Resistência ao desgaste de cratera Baixa ↔ Alta	Resistência à deformação plástica Baixa ↔ Alta	Resistência ao choque térmico Baixa ↔ Alta
Resistência à deformação plástica Baixa ↔ Alta		Resistência à Oxidação Baixa ↔ Alta		

Fonte: adaptado de Mitsubishi (2006, p.42)

No Quadro 2.1 verifica-se que uma ferramenta de corte com alta dureza a quente consequentemente apresenta alta resistência ao desgaste de flanco e à deformação plástica. Quanto menor a resistência à ruptura transversal, menor a resistência à fratura. Relacionado à energia livre de formação, observa-se que, quanto maior este valor, menor a resistência ao desgaste de cratera e à oxidação. Por fim, uma ferramenta de corte com baixa condutividade térmica apresenta alta resistência à deformação plástica. Porém, caso possua alto coeficiente de expansão térmica, terá baixa resistência ao choque térmico.

Como pode ser acrescentado pela Figura 2.2, as propriedades não se reúnem necessariamente em um só material, mas, de acordo com a aplicação, algumas delas devem ser analisadas. Diante deste cenário, este trabalho buscou uma discussão pormenorizada dessas características para os materiais para ferramentas de corte - metal duro e cermet. Este último é considerado um material promissor (RAJABI; GHAZALI; DAUD, 2015; KUMAR; KUMAR; BASU, 2007) porque, devido a modificações em sua composição química, vem apresentando melhorias em propriedades como dureza, temperatura de fusão, condutividade térmica, resistência à oxidação e resistência à deformação, quando comparado à ferramenta de metal duro.

A seguir, detalham-se metal duro e cermet, com informações de características, propriedades, limitações e aplicações.

2.2.1 *Metal Duro*

O metal duro é um produto da metalurgia do pó feito de partículas duras finamente divididas de carbonetos de metais refratários, sinterizados com um ou mais metais do grupo do ferro (ferro, níquel ou cobalto), formando um corpo de alta dureza e resistência à compressão. As partículas duras são carbonetos de tungstênio, usualmente em combinação com outros carbonetos, como carboneto de tântalo, titânio e nióbio. O tamanho destas partículas varia geralmente entre 1 e 10µm e ocupam de 60 a 95% do volume do material (DINIZ *et al.*, 2006).

Klocke (2011) afirma que o metal duro é um material compósito. O autor caracteriza-o como compostos dos carbonetos de metais de transição (quarto ao sexto grupo da tabela periódica), que são incorporados em uma fase ligante de cobalto e/ou níquel, responsável por aglutinar os carbonetos e nitretos frágeis para um corpo relativamente sólido. Sandvik Coromant (2016) detalha metal duro a seguir:

“Metal duro é um material da metalurgia do pó; um composto de partículas de carboneto de tungstênio (WC) e um ligante rico em cobalto metálico (Co). Metais duros para aplicações de usinagem de metal representam mais de 80% do carboneto de tungstênio (WC) fase dura. Carbonitretos cúbicos adicionais são outros componentes importantes, especialmente em classes com gradiente sinterizado. O corpo do metal duro é conformado, através de prensagem do pó ou técnicas de molde por injeção, dentro de um corpo que é então sinterizado até densidade total” (SANDVIK COROMANT, 2016, s/n).

As vantagens do metal duro incluem boa uniformidade estrutural, devido ao seu processo de fabricação; elevada dureza, que, segundo Mitsubishi (2013), para o metal duro sem cobertura, está compreendida entre 90,5 HRA e 92,5 HRA; e resistência à compressão à alta temperatura e ao desgaste. Sob temperatura de 1000°C, o metal duro tem a mesma dureza do aço rápido à temperatura ambiente. Por fim, ressalta-se que é possível obter propriedades distintas nos metais duros pela mudança específica dos carbonetos, do tamanho de grão e das proporções do ligante (KLOCKE, 2011; CIMM, 2016).

A classe de material para ferramenta metal duro pode ser dividida em dois grupos: o grupo metal duro puro, composto por carboneto de tungstênio e cobalto (WC- Co), e o grupo metal duro com adições, que é formado por carboneto de tungstênio, cobalto e carboneto de titânio (WC -TiC- Co), (MITSUBISHI, 2006). As ferramentas originalmente compostas por carbonetos de tungstênio (WC) e cobalto eram adequadas para a usinagem de ferro fundido. Porém, durante a usinagem do aço, havia formação de cratera na superfície de saída da ferramenta devido a fenômenos de difusão e dissolução ocorridos entre o cavaco e a ferramenta (CIMM, 2016).

Para solucionar esses problemas, começou-se a acrescentar outros carbonetos (TiC, TaC e NbC). O carboneto de titânio (TiC) é capaz de apresentar

pouca tendência à difusão, aumentando, assim, a resistência ao desgaste. Já o carboneto de tântalo (TaC) e o carboneto de nióbio (NbC), quando adicionados em pequenas quantidades, atuam na diminuição do tamanho dos grãos, melhorando a tenacidade e a resistência das arestas. A Tabela 2.1 compara propriedades físicas para os carbonetos de tungstênio e carbonetos de titânio.

Tabela 2.1 - Propriedades físicas do WC e do TiC

		Resistência ao desgaste de flanco	Resistência à soldagem	Resistência ao desgaste de cratera
		Dureza	Solubilidade no Ferro	Energia livre de formação (1000°C)
		(HV)	(%)	(J/g.Pa)
Valor de cada componente	WC	1780	7	-0,4
	TiC	3200	<0,5	-1,2

Fonte: MITSUBISHI (2006, p.34)

Por meio da Tabela 2.1, é possível observar que a adição de TiC aumenta a resistência ao desgaste de flanco, garantida pela maior dureza do TiC em relação ao WC, o que permite uma maior resistência ao desgaste ou maiores velocidades de corte para o metal duro com adições. Outro fator importante do TiC é a baixíssima solubilidade no ferro sob temperaturas elevadas, o que inibe a dissolução do TiC e, portanto, reduz a difusão. Por fim, como TiC apresenta maior estabilidade térmica (menor energia livre de formação), existe maior resistência ao desgaste de cratera.

De acordo com a padronização e classificação da norma ISO 513(2004) para o metal duro, é possível encontrar três grupos: a classe K, aquela que apresenta a composição química WC+Co; a classe P, na qual ocorreram adições de TiC, TaC e/ou NbC; e a classe M, intermediária à K e à P porque possui as mesmas adições que a classe M, mas em menores quantidades.

Em 2004, essa norma sofreu uma revisão, e a classificação perdeu a exclusividade para ferramentas de metal duro, passando a incluir cerâmicas e materiais ultraduros. Atualmente, vê-se que a classificação da ISO não mais se baseia em composição química, mas sim na aplicação do material, conforme mostra o Quadro 2.2. As classes são divididas de acordo com os diferentes materiais da

peça a ser usinada, sendo identificadas por uma letra maiúscula e uma cor (ISO 513, 2004). Cada classe principal de aplicação possui uma subdivisão, sendo esta designada pela letra referente à classe e um número de classificação. Geralmente, o número está contido no intervalo entre 1 e 50, sendo que, quanto maior ele for, maior a tenacidade e menor a resistência ao desgaste daquela ferramenta. O Quadro 2.2 mostra essa classificação.

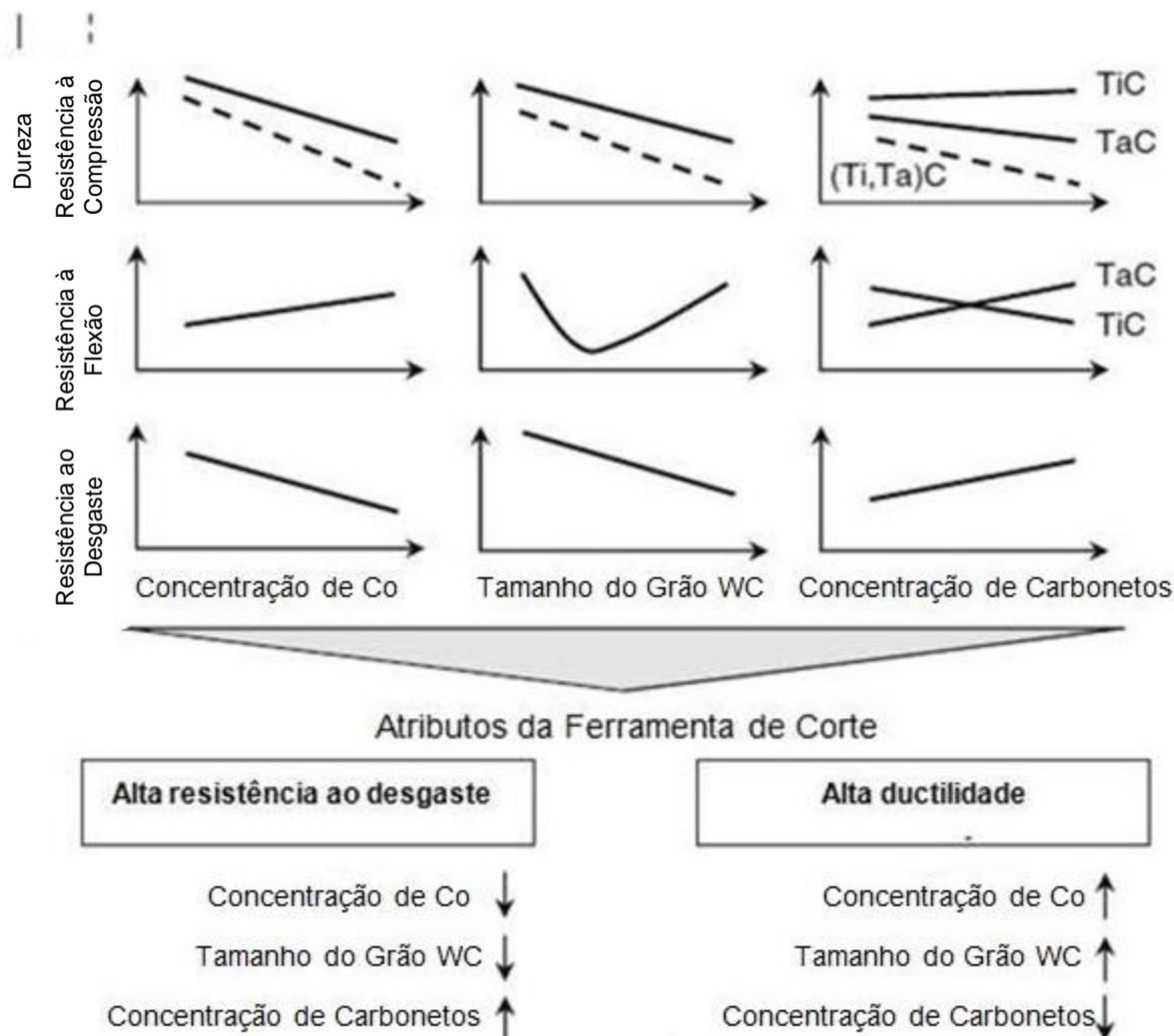
Quadro 2.2 - Aplicação e classificação de materiais de corte

Principais classes (grupos)			Classes de aplicação			
Letra de Identificação	Cor de Identificação	Materiais a serem usinados	Materiais de corte			
P	Azul	Aços: todos os tipos de aços e aços fundidos, exceto aços inoxidáveis com estrutura austenítica	P10 P20 P30 P40 P50	P05 P15 P25 P35 P45	↑ A	↓ B
M	Amarelo	Aço Inoxidável: aço inoxidável austenítico, aço duplex e aço fundido	M01 M10 M20 M30 M40	M05 M15 M25 M35	↑ A	↓ B
K	Vermelho	Ferro Fundido: ferro fundido cinzento, com grafita esferoidal e maleável	K01 K10 K20 K30 K40	K05 K15 K25 K35	↑ A	↓ B
N	Verde	Materiais não ferrosos: alumínio e outros metais não ferrosos, materiais metálicos	N01 N10 N20 N30	N05 N15 N25	↑ A	↓ B
S	Marrom	Superligas e Titânio: ligas resistentes ao calor à base de ferro, níquel e cobalto, titânio e suas ligas	S01 S10 S20 S30	S05 S15 S25	↑ A	↓ B
H	Cinza	Materiais Duros: aços endurecidos, ferros fundidos endurecidos, ferros fundidos resfriados	H01 H10 H20 H30	H05 H15 H25	↑ A	↓ B
<p>A: aumento da velocidade de corte, aumento da resistência ao desgaste do material da ferramenta. B: aumento do avanço, aumento da tenacidade do material da ferramenta.</p>						

Fonte: adaptado de ISO 513 (2004, p.2)

As variações da porcentagem de cobalto e carbonetos (TiC e TaC) e do tamanho de grão de WC e seus efeitos nas propriedades mecânicas do metal duro são ilustrados na Figura 2.3.

Figura 2.3 - Efeitos das variações da porcentagem de Co, TiC, TaC e do tamanho de grão de WC e seus efeitos sobre as propriedades mecânicas



Fonte: Adaptado de Klocke (2011, p.115)

Nota-se que o aumento do teor de Co e do tamanho de grão implica em menor dureza e resistência à compressão. Já o aumento de Co contribui para maior resistência à flexão - e, possivelmente, tenacidade - ou seja, maior resistência ao impacto. À medida que a concentração de carbonetos compostos sobe, dureza e resistência à compressão são reduzidas. O aumento da concentração dos carbonetos tem um efeito favorável sobre a resistência ao desgaste. A resistência à ruptura transversal (TRS) ou a resistência à flexão proporciona uma melhor

resistência ao lascamento da aresta de corte, dado o aumento do avanço ou da profundidade de usinagem (ASTAKHOV, 2014).

A resistência à flexão é a maneira mais simples e mais comum de determinar a resistência mecânica do metal duro. De acordo com General Carbide (2015), a resistência à flexão atinge o valor máximo para um teor de cobalto de cerca de 15% em peso, e um tamanho de grão médio a grosseiro, fato que corrobora o gráfico intermediário da Figura 2.3.

Vale ressaltar que a organização dos materiais para ferramenta de corte, segundo a norma ISO 513 (2004), considera, na maior parte das vezes, o binômio dureza-tenacidade. Em aplicações práticas, a especificação da norma pode ser substituída conforme a classificação específica de uma empresa fabricante de materiais, sendo possível encontrar um produto que cubra uma ampla faixa da classificação ISO com resultados semelhantes.

2.2.2 Cermet

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 HANDBOOK, 1995).

Em 1992, NTK *Cutting Tools Division* publicou que cermets eram um dos segredos mais bem guardados da indústria de ferramentas de corte, uma vez que eles permitiam ao usuário o aumento da produtividade e da rentabilidade por meio de maiores velocidades de corte e vida mais longa. Cermets preenchem a lacuna entre cerâmica e metal duro com velocidades que variavam de 100 a 395 m/min e forneciam excelente controle de cavacos. Quanto à caracterização técnica, NTK (1992) descreve cermets como:

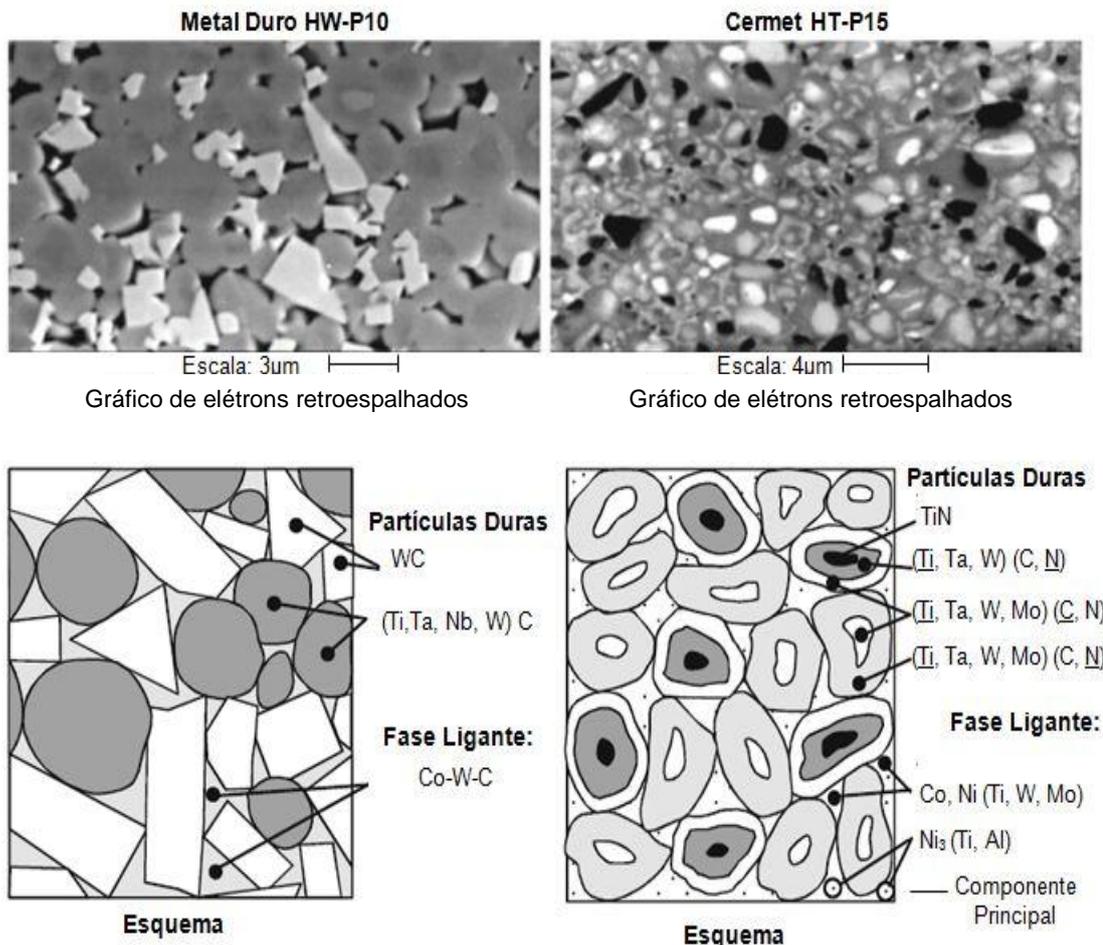
“Cermets são partículas de cerâmica ligadas com metal, sendo “cer” de cerâmica e “met” para o metal. São composições sólidas de

carboneto de titânio (TiC) e ou nitreto de titânio (TiN). Recentemente, metal duro tem sido revestido com carboneto de titânio (TiC) e ou nitreto de titânio (TiN) para melhorar a vida da ferramenta e inibir a formação de aresta postiça de corte. Após este revestimento se desgastar, a utilidade do inserto termina. Em contraste, o cermet apresenta uma composição sólida de (TiC) e ou (TiN) sendo assim o desgaste muito mais gradual ” (NTK 1992, p.84).

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 (2004), que organiza a notação e a aplicação de materiais para ferramenta de corte em quatro grandes grupos: carbonetos, cerâmica, nitreto de boro e diamante. De acordo com a norma, tanto metal duro quanto cermet pertencem ao grupo carbonetos, sendo que o metal duro sem revestimento, com base em carboneto de tungstênio, com um tamanho de grão superior ou igual a 1 μm , recebe a sigla HW, e, com tamanhos de grão inferiores a 1 μm , a notação HF. Os carbonetos com base em nitreto ou carboneto de titânio são representados com HT e conhecidos como cermets, e, por fim, o metal duro revestido representado pela sigla HC.

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 (SANDIVIK COROMANT, 2016). A Figura 2.4 ilustra, de forma comparativa, metal duro e cermet em termos de sua microestrutura e partículas constituintes.

Figura 2.4 - Microestrutura de metal duro convencional e cermet



Fonte: adaptado de Klocke (2011, p.116).

De acordo de Klocke (2011), a microestrutura das partículas duras é determinada pelos componentes contidos originalmente no pó. Elas podem exibir estruturas amplamente variadas, dependendo da composição e do tamanho de grão. Observa-se também que o cermet apresenta estrutura semelhante ao metal duro - de maneira geral, partículas duras ligadas por um aglomerante - sendo, que no cermet, estas partículas duras são nitreto de titânio e carbonitretos complexos de titânio com diferentes proporções de Ta, W e/ou Mo.

A respeito da composição química desses materiais, Kumar, Kumar e Basu (2007) afirmam que cermets baseados em TiCN consistem de grãos TiCN rígidos unidos por uma fase ligante metálica (normalmente Co, Ni ou Fe), que é formada durante a sinterização de fase líquida em temperaturas elevadas. A matriz confere a resistência ao desgaste, enquanto a fase ligante contribuiu para a tenacidade. Os

autores ressaltam que tal matriz pode ser reforçada com diferentes carbonetos de metal de transição para melhorar certas propriedades. A adição de NbC ou TaC melhora o desempenho no corte interrompido por contribuir com o aumento da dureza a quente e resistência ao choque térmico, enquanto VC melhora a resistência à fadiga. A presença HfC ou ZrC reduz a tensão entre diferentes fases microestruturais, e, por fim, para melhorar a tenacidade, WC é adicionado aos cermets.

Devido à alta fragilidade, o cermet inicialmente empregado em operações de corte contínuo. Porém, com a evolução desse material ao longo dos anos, ele passou a apresentar bons níveis de tenacidade e resistência a impacto, elevada resistência ao desgaste da aresta de corte e alta resistência à formação de crateras por possuir alta dureza a elevadas temperaturas e grande estabilidade química, com pouca tendência à difusão. Isso viabilizou sua utilização em uma ampla gama de operações na indústria de manufatura. A Tabela 2.2 permite a comparação entre as propriedades do cermet e do metal duro.

Tabela 2. 2 - 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

$$* \text{Coefficiente de choque térmico} = \frac{\text{condutividade térmica} \times \text{resistência à tração}}{\text{coeficiente de dilatação} \times \text{módulo de elasticidade}}$$

Fonte: Machado *et al.* (2015)

Conforme a Tabela 2.2, as principais vantagens do cermet são a dureza, que permite maior resistência ao desgaste (isto se deve ao fato de o TiC ter maior dureza em relação ao WC, possibilitando sua utilização sob velocidades de corte

mais altas); a menor solubilidade no ferro a temperaturas elevadas, o que evita a dissolução do TiC e, conseqüentemente, a supressão do desgaste por difusão; e, por fim, a alta temperatura de oxidação. Já as desvantagens do cermet são a baixa resistência a choque térmico (proporcionada pela baixa condutividade térmica associada ao alto coeficiente de dilatação), grande afinidade química com o titânio (restringindo o uso da ferramenta à usinagem de materiais ferrosos) e baixa tenacidade (utilização de baixos avanços).

Entretanto, estudos estão sendo realizados a fim de melhorar as propriedades dos cermets. Woong Oh *et al.* (2015) realizaram um trabalho com o objetivo de compreender a microestrutura e as mudanças das propriedades mecânicas de cermets à base de TiCN–(TiW)C–WC–TaC–Co/Ni causadas pela adição de (TiW)C. Foram observados o núcleo e a borda de um cermet com uma pequena adição de (TiW)C e sem a adição. Os autores concluíram que essa adição melhorou propriedades mecânicas importantes, como tenacidade e dureza, além de resistência ao desgaste sob condição de corte com fluidos.

Hu *et al.* (2015) relataram o desenvolvimento de um tipo de material de ferramenta de corte de cermet baseado em Ti (C,N) fabricado por sinterização por microondas. Os efeitos do teor de metal e da temperatura de sinterização sobre as propriedades mecânicas e a microestrutura foram minuciosamente investigados. Os resultados experimentais mostraram que uma fase líquida metálica suficiente pode melhorar significativamente a resistência à fratura do cermet. No entanto, o elevado teor de metal, por um lado, reduziu a dureza dos cermets e resultou nos microdefeitos dos materiais. Os autores afirmaram que os mecanismos de ativação do microondas permitiram diminuir a temperatura necessária para a formação da fase líquida metálica, possibilitando a densificação do cermet a baixas temperaturas sem pressão externa. O paradoxo encontrado durante a pesquisa foi que, sob baixa temperatura de sinterização, o fluxo líquido de fase metálica foi suprimido, o que causou os poros entre os grãos. Porém, a alta temperatura conduziu ao enrijecimento das partículas e à diminuição das propriedades mecânicas. Por fim, as propriedades mecânicas ótimas foram estabelecidas durante a sinterização de um cermet baseado em Ti (C,N) com 15% de Co-Ni a 1550 °C durante 10 minutos, onde dureza e tenacidade à fratura foram $15,49 \pm 0,21$ GPa e $10 \pm 0,55$ MPa m^{1/2}, respectivamente.

Zelinski (2016) ressalta que, inicialmente, cermets eram utilizados em profundidades de usinagem não muito maiores que 1,5 mm, mas hoje é possível cortar aço com $a_p = 3$ mm. O autor ainda menciona que, em relação à percepção de que cermets são frágeis e vulneráveis aos impactos e choques térmicos, atualmente é possível encontrar insertos que oferecem resistência à flexão igual à do metal duro da classe P15 e que o desenvolvimento de cermets microgrãos contribuiu para o aumento da tenacidade da ferramenta. Nesse sentido, retomando a Figura 2.2 verifica-se que em relação à resistência ao desgaste, alguns cermets ainda apresentam valores inferiores quando comparados às cerâmicas, apresentando-se em uma posição intermediária entre o metal duro e a cerâmica, para todas as características analisadas.

2.3 Ferramentas de corte revestidas

A fim de oferecer ferramentas com melhor desempenho, cada vez mais aumentam-se os esforços para o desenvolvimento de novos revestimentos e técnicas de deposição. 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.

Kalpakjian e Schmid (2010) afirmam que as ferramentas revestidas podem ter uma vida dez vezes maior em relação às aquelas não revestidas, permitindo velocidades de corte elevadas e reduzindo, assim, o tempo necessário para operações de usinagem e os custos de produção. Os autores ainda afirmam que as ferramentas revestidas são usadas, em média, em 40 a 80 % de todas as operações de usinagem, principalmente nas operações de torneamento, fresamento e furação.

Os materiais de revestimento comumente utilizados são o nitreto de titânio (TiN), carboneto de titânio (TiC), carbonitreto de titânio (TiCN) e óxido de alumínio (Al_2O_3) (KALPAKJIAN; SCHMID, 2010). Estes revestimentos, geralmente na gama

de espessura de 2 a 15 μm , são aplicados em ferramentas de corte e insertos por duas técnicas: deposição química de vapor (CVD, do inglês *Chemical Vapour Deposition*), incluindo a deposição de vapor químico assistido por plasma (PACVD, do inglês *Plasma-Assisted Chemical-Vapour Deposition*), e a deposição física de vapor (PVD, do inglês *Physical Vapour Deposition*), (KLOCKE, 2011).

2.3.1 Deposição química de vapor (CVD)

Neste processo, os gases que contêm material a ser depositado são introduzidos numa câmara de reação, condensando-se sobre o substrato para formar um revestimento. Tal processo normalmente requer temperaturas de deposição no intervalo de 800-1200° C (HOLMBERG e MATTHEWS, 2009). Os autores mencionam que a pressão na deposição CVD pode variar desde 101325 Pa até 1 Pa, ou menos.

O processo CVD é o método mais comumente utilizado para ferramentas de metal duro e cerâmicas. Entretanto, verifica-se que nesse processo ocorre o sacrifício da tenacidade devido à tensão residual de tração deixada pelo método, comprometendo, assim, a resistência ao lascamento da aresta de corte. Nesse sentido, Holmberg e Matthews (2009) complementam ao citar que existem vários meios de auxiliar o processo CVD, como, por exemplo, por meio da utilização de laser ou feixes de elétrons, ou por bombardeamento de íons. Esses métodos prometem o benefício de uma redução nos filmes de crescimento do revestimento, assim como nas temperaturas necessárias para a obtenção de filmes densos e bem aderentes. Nesse sentido, os autores realçam que dentre as muitas variações a este respeito é possível encontrar métodos que permitem temperaturas de deposição mais baixas, como a deposição química de vapor assistida por plasma (PACVD), a fim de controlar as taxas de deposição ou para permitir a deposição seletiva. Entre os benefícios Holmberg e Matthews (2009) destacam melhor adesão do revestimento, espessura do revestimento uniforme, estrutura do revestimento controlada e deposição de uma larga gama de materiais.

2.3.2 Deposição física de vapor (PVD)

Este processo consiste na atomização ou vaporização do material de uma fonte sólida e na deposição desse material sobre o substrato, para formar um revestimento (HOLMBERG e MATTHEWS, 2009). A temperatura de revestimento PVD é menor (aproximadamente 700° C) que no processo CVD; logo, os danos ao substrato durante o revestimento (uma diminuição na dureza) são reduzidos pela técnica. Assim, mesmo no canto da aresta, é possível manter a tenacidade (MITSUBISHI, 2005). Embora o processo PVD tenha sido inicialmente utilizado como um meio de deposição de filmes metálicos, essa técnica tem sido utilizada para a deposição de revestimentos cerâmicos (HOLMBERG; MATTHEWS, 2009).

Nesse sentido, Vandierendonck e Stappen (1997) estudaram o desempenho de ferramentas cermets revestidas pelas técnicas PACVD e PVD para o torneamento. Os revestimentos utilizados para os testes de corte foram: TiN (PVD), (Ti,Al)N (PVD), TiN (PACVD) e um revestimento multicamada TiN/Al₂O₃/TiN (PACVD). Os cermets revestidos foram comparados com os não revestidos e, para algumas aplicações, com o metal duro. Para o torneamento de uma liga de alumínio fundido e parâmetros de corte $V_c=440$ m/min, $a_p=0,7$ mm e $f=0,2$ mm/rev, os autores revelaram que, com insertos de metal duro, 600 peças foram cortadas, e, com o cermet, foram 2000 peças, sendo que ao fim havia um pequeno acúmulo de Al sobre a aresta de corte do cermet, o qual não influenciou a integridade superficial da peça. Já para o torneamento do aço 42CrMo4 com parâmetros de corte $V_c=160$ m/min, $a_p=0,3$ mm e $f=0,3$ mm/rev foram comparados metal duro (classe P15) revestido com Al₂O₃, cermet não revestido, cermet revestido com (Ti,Al)N por PVD e cermet revestido com TiN por PVD. Nas diferentes aplicações a que foram submetidos, os insertos de cermet (revestidos ou não) alcançaram os melhores resultados, realçando-se o desempenho daqueles revestidos por TiN e (Ti,Al)N. Em todos os casos, os desgastes foram determinados por abrasão. Os autores atribuíram ao TiN a melhoria na vida da ferramenta.

Em outro estudo, D'errico, Calzavarini e Vicenzi (1998) buscaram analisar as influências de revestimentos de TiN e Ti(C,N) produzidos pela técnica PVD sobre a vida da ferramenta cermet no torneamento contínuo e interrompido do aço AISI 1045. Para o corte interrompido, foram usados V_c entre 200 m/min e 500 m/min, f e

a_p fixos de 0,25 mm/rev e 1,5 mm, respectivamente. No corte interrompido, os parâmetros foram V_c entre 100 m/min e 350 m/min, f variável de 0,10 mm/rev a 0,25 mm/rev e a_p fixo em 2 mm. Em termos de valores individuais, insertos revestidos sempre exibiram maiores vidas em relação aos não revestidos e em relação a valores médios, o melhor desempenho foi o do revestimento Ti (C,N) para o corte contínuo. Nenhuma melhoria considerável foi obtida por meio da utilização de tais revestimentos no torneamento interrompido, uma vez que os autores não conseguiram explorar totalmente o efeito do revestimento, porque o filme foi removido prematuramente devido aos frequentes choques mecânicos causados pelo corte intermitente.

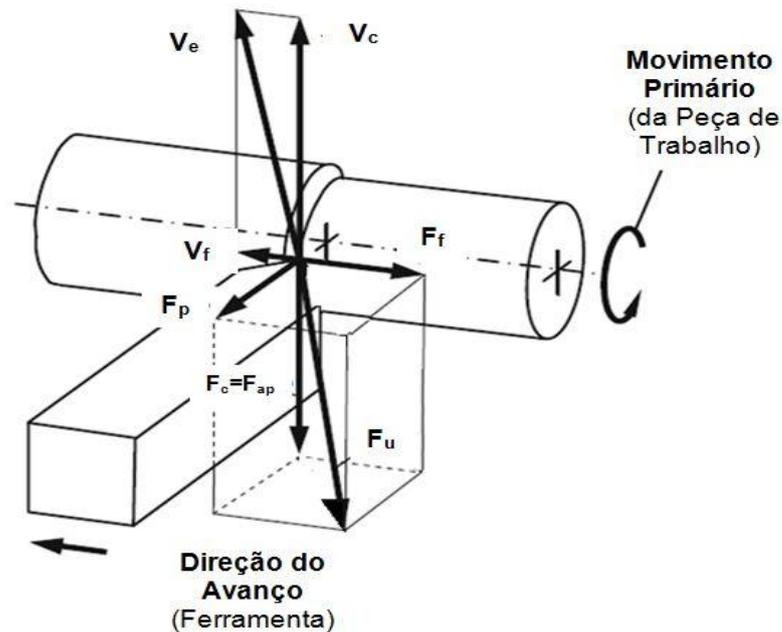
2.4 Influência do material da ferramenta de corte sobre a operação de torneamento

O material da ferramenta de corte no torneamento é capaz de afetar diversos parâmetros de entrada e saída considerados importantes para a avaliação da operação. Dentre eles, podem-se citar a força de corte e potência, a qualidade da superfície usinada, a temperatura de corte e a vida e o desgaste da ferramenta de corte. Essas variáveis serão discutidas a seguir.

2.4.1 Força e potência de usinagem

A variação do material da ferramenta causa alterações no coeficiente de atrito na contraface ferramenta-cavaco e essa variação pode influenciar os valores da pressão específica de corte (k_s) - variável diretamente proporcional à força de corte. No torneamento, o cavaco é formado tridimensionalmente, por isso a força de torneamento resultante, a força de usinagem (F_u), pode ser decomposta em três componentes: força de corte ou força principal de corte (F_c), força de avanço (F_f) e força de profundidade ou força passiva (F_p), (FERRARESI, 1970). A Figura 2.5 ilustra a decomposição de F_u . As definições dos três componentes básicos da F_u são descritas a seguir, conforme Ferraresi (1970).

Figura 2.5 - Componentes da força de usinagem no torneamento



Fonte: Adaptado de KLOCKE (2011)

- Força de corte (F_c): também denominada força principal de corte, é a projeção da força de usinagem sobre o plano de trabalho (plano que contém as direções de avanço e corte), na direção de corte, dada pela velocidade de corte (V_c).
- Força de avanço (F_f): é a projeção da força de usinagem sobre o plano de trabalho, na direção de avanço da ferramenta, dada pela velocidade de avanço (V_f).
- Força passiva (F_p): também conhecida como força de apoio, é a projeção da força de usinagem F_u sobre a direção perpendicular à direção de avanço, situada no plano de trabalho.

Das *et al.* (2016) compararam o desempenho de um metal duro não revestido e de um cermet revestido (TiN/TiCN/TiN) pela técnica PVD sobre a usinabilidade do aço AISI 4340 (48 HRC) no torneamento a seco. As velocidades de corte foram 80, 100 e 120 m/min; os avanços, 0,05, 0,1 e 0,15 mm/rev; e as profundidades de usinagem, 0,1, 0,2 e 0,3 mm. No que diz respeito à força de corte, observou-se que a geometria do inserto tem um grande efeito sobre ela. Insertos quadrados exigem maior força de corte em relação à forma rômbrica, o que foi associado ao maior ângulo de ponta dos primeiros. Como o inserto de metal duro

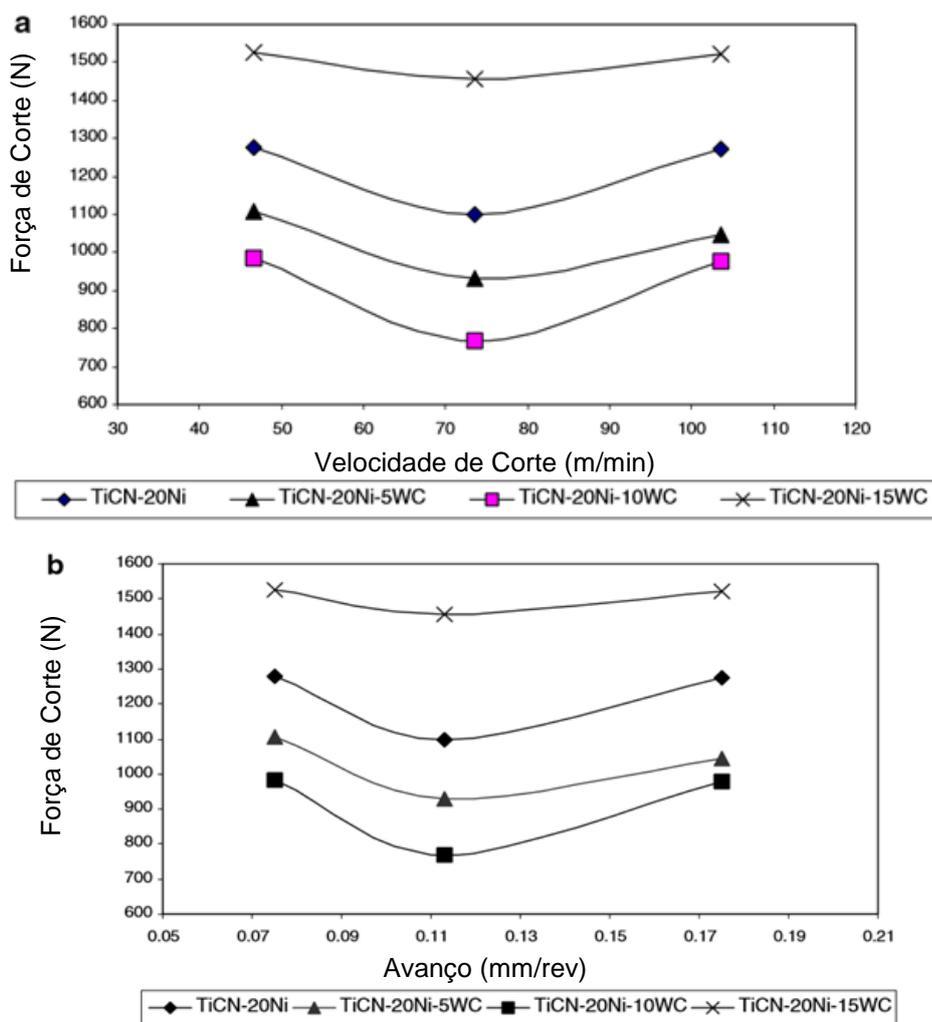
possui um ângulo de ponta maior, a maior parte da ferramenta de corte esta em contato com a peça e isto elevou as forças de usinagem e temperatura da peça de trabalho. Devido às maiores forças de usinagem e temperatura, ambas as cargas mecânica e térmica dominaram em insertos de metal duro. O ângulo de posição dos insertos de metal duro e cermet foi 75° e 95° , respectivamente. Por causa do ângulo de posição menor, a vibração durante o corte com metal duro mostrou-se maior do que a com cermet. Como resultado, tanto a força de corte quanto o desgaste de flanco foram maiores para o metal duro.

Em seu estudo sobre o torneamento do aço AISI D2 com dureza de 55 HRC, Anthony (2015) avaliou a influência dos seguintes parâmetros sobre a força de corte: $V_c = 100, 140$ e 180 m/min; $a_p = 0,2, 0,3$ e $0,4$ mm; $f = 0,1, 0,15$ e $0,2$ mm/rev, geometria da ferramenta de corte (ângulos de saída de $0^\circ, 6^\circ$ e 18° , ângulos de folga de $0^\circ, 7^\circ$ e 11° e raio de ponta de $0,4, 0,8$ e $1,2$ mm) e material da ferramenta de corte (metal duro revestido, cermet e cerâmica). O planejamento experimental foi baseado em uma matriz ortogonal L27 gerada pelo Método Taguchi. Por meio da análise de variância, o autor verificou que a_p tem mais influência na força de corte, seguida por V_c . Com o aumento da profundidade de usinagem, mais contato há entre a ferramenta e a peça de trabalho, resultando no aumento da força necessária para completar a operação de corte. Além de 120 m/min de velocidade de corte, há um rápido aumento da força de corte para qualquer profundidade de corte devido a uma maior área de contato. À medida que o raio de ponta aumentou, a área de contato entre a ferramenta e a peça de trabalho foi ampliada, o que resultou em mais atrito e aumentou, por conseguinte, a força de corte. Entretanto, o fator resistência à ruptura transversal foi o parâmetro considerado na ANOVA que representava a diferença entre os materiais das ferramentas de corte. Ele resultou em um p-valor inferior a $0,05$, o que mostra que esse parâmetro é significativo sobre a variação da força de corte ao nível de confiança estabelecido. Porém, o autor não registrou nenhuma explicação sobre tal fato.

Em um experimento no qual o aço A192 (aço para caldeira) com dureza de 45HRC foi torneado em condições de corte a seco, Kumar, Kumar e Basu (2007) investigaram a influência da concentração de carboneto de tungstênio (0-15% peso) sobre a vida da ferramenta de cermet com a composição de TiCN-20%Ni. Sobre a geometria dos insertos, determinaram-se um ângulo de folga de 5° e um ângulo de

saída de 0°. Durante o experimento foram utilizadas velocidades de corte de 47, 74 e 104 m/min e avanços de 0,075, 0,113 e 0,175 mm/rev. As Figuras 2.6(a) e (b) mostram o efeito da velocidade de corte e avanço sobre as forças de corte.

Figura 2.6 - Variação da força de corte em relação: (a) velocidade de corte (b) avanço



Fonte: KUMAR; KUMAR; BASU, (2007)

Com o aumento da velocidade (Figura 2.6 a) e do avanço (Figura 2.6 b), a força de corte inicialmente diminuiu para todos os cermets. Os autores afirmam que, para velocidades mais baixas, ocorria somente o sulcamento do material da peça, resultando em maior força de corte. Com o aumento da velocidade de corte e do avanço, o corte tornou-se estável, com a consequente redução na força de corte. Kumar, Kumar e Basu (2007) acreditam que o aumento da força de corte acima de 74 m/min ou 0,11 mm/rev, deve-se à degradação térmica da ferramenta de corte e à alteração da geometria do raio de ponta da ferramenta. A partir da Figura 2.6, é

evidente que, para uma dada velocidade de corte e avanço, a força diminuiu, com aumento do teor de WC, com adição até 10% para TiCN -20Ni. A ocorrência de um novo aumento de WC para 15% elevou a força de corte. A força de corte mínima foi obtida com velocidade de corte 74 m/min e avanço de 0,11 mm/rev, com adição de 10% WC em TiCN - 20Ni.

No torneamento de um aço temperado com dureza de 61-62 HRC, com insertos de cermet e metal duro revestido, Chen, Xu e Xiao (2015) investigaram o desempenho da ferramenta (vida da ferramenta, força de corte e rugosidade da superfície) e características do desgaste a título de comparação para estas duas ferramentas. A ferramenta de metal duro possuía substrato à base de Ti(C,N) e, como revestimento, TiN e Al₂O₃. Os pós comerciais de TiC (2,83 µm), TiN (1,18 µm), WC (0,82 µm), Mo₂C (2,30 µm) e Ni (2,36 µm) foram utilizados como matérias-primas para preparar os insertos de cermet à base de Ti(C,N). Na análise comparativa das ferramentas, verificou-se que a de cermet exigiu uma menor força de corte que a de metal duro revestida e, à medida que o tempo de corte prolongava, a força de corte aumentava gradualmente. No entanto, a força de corte, intensificada com o aumento de profundidade de usinagem, acabou por provocar a ruptura da aresta de corte do inserto de cermet devido à sua baixa resistência à fratura, o que resultou na falha catastrófica da ferramenta.

Por meio dos trabalhos citados, é possível afirmar que o comportamento da força de usinagem sofre influência significativa dos materiais das ferramentas de corte. No entanto, essa influência depende de vários fatores, tais como: composição química da ferramenta de corte, parâmetros de corte (velocidade de corte, profundidade de usinagem e avanço), geometria da ferramenta e tempo de corte.

2.4.2 Qualidade da superfície usinada

Para avaliar a qualidade do corte, é possível utilizar variáveis como rugosidade, tolerâncias dimensionais e alterações subsuperficiais. Ferraresi (1970) afirma que a qualidade superficial é caracterizada pelo acabamento obtido na operação de usinagem e pelas propriedades físicas e químicas do metal na camada superficial. Essas propriedades são passíveis de mudança ao longo do processo,

devido, principalmente, a ações de fatores como a pressão da ferramenta sobre a peça, atrito da superfície de saída da ferramenta contra a peça, atrito interno do metal na região de deformação plástica, calor gerado no processo de corte, vibração e fenômenos específicos da formação do cavaco (FERRARESI, 1970).

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.

Outro aspecto relacionado à rugosidade é o aparecimento da aresta postiça de corte (APC) em baixas velocidades de corte. Partes da APC são cisalhadas durante o processo e permanecem aderidas à superfície da peça usinada. Com o aumento da velocidade de corte, o aparecimento da APC é dificultado, a temperatura eleva-se e, conseqüentemente, diminui-se a resistência do material ao cisalhamento, reduzindo, assim, as forças de usinagem e gerando um melhor acabamento (SHAW, 1997; MACHADO *et al.*, 2015). Porém, o aumento excessivo da velocidade de corte poderá provocar vibrações indesejadas, além de acelerar o desgaste da ferramenta, piorando o acabamento.

Quando se aumenta a profundidade de usinagem, as forças de corte elevam-se e, logo, as possibilidades de flexões. As alturas das ondulações também aumentam com a profundidade de usinagem (MACHADO *et al.*, 2015). Em termos da geometria do inserto, o raio de ponta (r_ϵ) tem grande influência sobre a rugosidade. Quanto maior o valor do r_ϵ (ao menos o dobro do avanço), menores serão as marcas de avanço; mas, se r_ϵ for excessivamente alto, podem ocorrer vibrações na operação.

Chen, Xu e Xiao (2015) analisaram o desempenho do corte e características de desgaste de ferramenta de cermet à base de Ti(C,N) no torneamento de aço endurecido (61–62 HRC). Os autores utilizaram dois níveis de velocidade de corte (60 e 100 m/min), de profundidade de usinagem (0,2 e 0,5 mm) e avanço constante em 0,1mm/rev, sendo que, em relação à qualidade superficial, buscaram analisar a desvio aritmético médio (R_a). A qualidade de superfície obtida pela ferramenta de metal duro revestida foi ligeiramente melhor do que a obtida pela de cermet. Os autores atribuíram que esse fato à elevada resistência à adesão dos revestimentos quando o atrito ocorre entre a superfície recém-formada da peça e a superfície de

folga da ferramenta. Com a continuação do processo de corte, as ferramentas foram sendo desgastadas e as suas geometrias se modificaram. Conseqüentemente, o valor de Ra da superfície usinada aumentou gradualmente para as duas ferramentas de maneira exponencial; entretanto, este aumento foi mais rápido para as ferramentas de metal duro revestido. Os autores explicaram que, inicialmente, os menores valores de Ra obtidos para a superfície torneada com metal duro revestido foram devidos ao efeito dos revestimentos na fase inicial. Ao longo da operação, os revestimentos foram desgastados, o substrato de WC-Co ficou exposto, levando à deterioração da ferramenta e à formação de APC na superfície de folga desta, resultando em declínio da qualidade da superfície (CHEN, XU e XIAO, 2015).

Em outro trabalho, Zou *et al.* (2015) utilizaram uma ferramenta de cermet à base de $Ti(C_7N_3)/WC/TaC$ no torneamento de alta velocidade de aços inoxidáveis (17-4PH martensítico e 321 austenítico). Os parâmetros de corte empregados foram: velocidade de corte de 350 a 400 m/min para o aço 17-4PH, e 300 a 350 m/min para o aço 321, avanço de 0,10 a 0,20 mm/rev e profundidade de usinagem de 0,25 a 0,35 mm. Em seguida, os efeitos dos parâmetros de corte sobre a qualidade da superfície foram analisados para examinar o desempenho dos insertos com base no Método de Taguchi. Ao relacionar a rugosidade da superfície usinada com os três parâmetros de corte, o avanço foi a variável que mais influenciou a resposta para ambos os aços. Também foram investigadas as relações entre a rugosidade da superfície usinada e o desgaste da ferramenta dos dois aços inoxidáveis com parâmetros de corte diferentes. O valor da rugosidade elevou com o aumento das taxas de desgaste de flanco. A rugosidade tornou-se estável após o desgaste acelerado da ferramenta e foi ampliada no momento da falha catastrófica desta. Os valores de rugosidade da superfície evoluíram mais rapidamente na usinagem de aço inoxidável austenítico 321- fato explicado pela maior plasticidade em relação ao 17-4PH, o que poderia gerar uma deformação plástica maior, produzindo uma superfície mais grosseira.

Keblouti *et al.* (2017) realizaram um trabalho comparando os efeitos dos parâmetros de corte na rugosidade no torneamento do aço AISI 52100 com dureza de 230 HB. O planejamento experimental envolveu a variação de três fatores em três níveis: velocidade de corte (150, 200, 250 m/min), avanço (0,08, 0,12 e 0,16 mm/rev) e profundidade de usinagem (0,15, 0,30 e 0,45 mm). Foram selecionados

dois insertos, um metal duro da classe P15 revestido com TiCN / TiN pela técnica PVD com uma espessura total de 3 μm . E o segundo, uma ferramenta de cermet não revestida. A caracterização da qualidade da superfície usinada foi limitada aos critérios de desvio aritmético médio (R_a). Por meio da ANOVA, os autores concluíram que o avanço foi o parâmetro mais importante que afetou o acabamento superficial. Os resultados indicaram que ele contribuiu em 93,97% para a variação de R_a quando se usinou com metal duro revestido, e 82,09% quando o inserto utilizado foi o cermet não revestido. O segundo fator que interferiu na qualidade da superfície foi a velocidade de corte, contribuindo para a variação da qualidade superficial em 2,32% e 7,41% para inserto revestido e não revestido, respectivamente. A profundidade de usinagem apresentou pouca influência sobre a rugosidade da superfície, com contribuição inferior a 2%, para ambas ferramentas de corte.

Os autores atribuíram estes resultados ao fenômeno dos sulcos helicoidais de ranhura na superfície de acabamento causados pelo aumento do avanço combinado com o movimento ferramenta-peça. Por outro lado, esse fenômeno também foi explicado pela redução de avanço, que causou baixas forças de corte, resultando em menos vibração e favorecendo o acabamento superficial. Entretanto, os autores não citaram a influência do material da ferramenta de corte, seja do revestimento ou do substrato, sobre o acabamento superficial.

2.4.3 Temperatura de corte

Astakhov (2006) afirma que cerca de 30 a 50% da energia requerida pelo sistema de corte são gastos em trabalho útil, isto é, para a separação da camada a ser removida a partir da peça. O restante é utilizado nas interfaces cavaco-ferramenta e ferramenta-peça, fato que demonstra a necessidade do estudo da geração e dissipação de calor nos processos de usinagem. A temperatura na região de formação dos cavacos é influenciada por diversos fatores, sendo o principal a velocidade de corte, seguida pelo avanço e profundidade de usinagem, além das propriedades relacionadas ao material da ferramenta de corte, como a condutividade

térmica e sua capacidade térmica (produto da massa pelo calor específico), (MACHADO *et al.*, 2015).

Makarow (*apud* Astakhov, 2006) afirma que a temperatura é o parâmetro mais adequado para correlacionar as condições tribológicas das interfaces cavaco-ferramenta e ferramenta-peça com o desgaste da ferramenta. Portanto, a correlação da temperatura com parâmetros de corte deve ser estabelecida. Para isso, foi estabelecido um planejamento fatorial de experimentos e, como resultado, obteve-se uma equação que correlaciona a temperatura de corte (σ_{ct}) com parâmetros de corte para uma dada peça de trabalho.

$$\sigma_{ct} = C_{\sigma} f^{n_f} v_c^{n_v} ap^{n_{ap}} \quad (2.2)$$

Onde C_{σ} é uma constante que depende das propriedades da peça de trabalho, e n_f , n_{ap} e n_v , potências determinadas pelo DOE.

Para estudar a equação 2.2, Marakov realizou uma série de experimentos com os materiais descritos na Tabela 2.3, na qual é possível observar os valores das potências constantes obtidas na usinagem de diferentes aços. Em todos os experimentos, foi utilizada uma ferramenta de corte da classe P20, com ângulo de saída 8°; ângulo de folga, 15°; ângulo de posição, 45°; e ângulo de posição secundária de 15°. Como análise, é possível verificar que a maior influência na temperatura de corte provém da velocidade de corte. Outra conclusão é que a mesma temperatura pode ser obtida usando diferentes combinações dos termos da Equação 2.2.

Tabela 2.3 - Valores dos parâmetros da equação da temperatura ótima σ_{ct} para variados materiais da peça de trabalho

Material da Peça de Trabalho	C_{σ}	n_v	n_f	n_{ap}
AISI 1010	228	0,25	0,07	0,03
AISI 1020	269	0,27	0,15	0,10
AISI 1045	352	0,22	0,08	0,05
AISI 1080	224	0,33	0,11	0,07
AISI 07	326	0,28	0,12	0,07

Fonte: Astakhov (2006, p.229)

Analisando os dados e resultados provenientes do experimento, Marakov formulou o que Astakhov chamou de Primeira Lei do Corte de Metais:

“Para determinada combinação dos materiais da ferramenta de corte e da peça, há uma temperatura de corte referida como a temperatura de corte ótima $\sigma_{ótima}$, em que a combinação das mínimas taxas de desgaste da ferramenta, força de corte e mais alta qualidade da superfície usinada é obtida (ASTAKHOV, 2006, p.229).

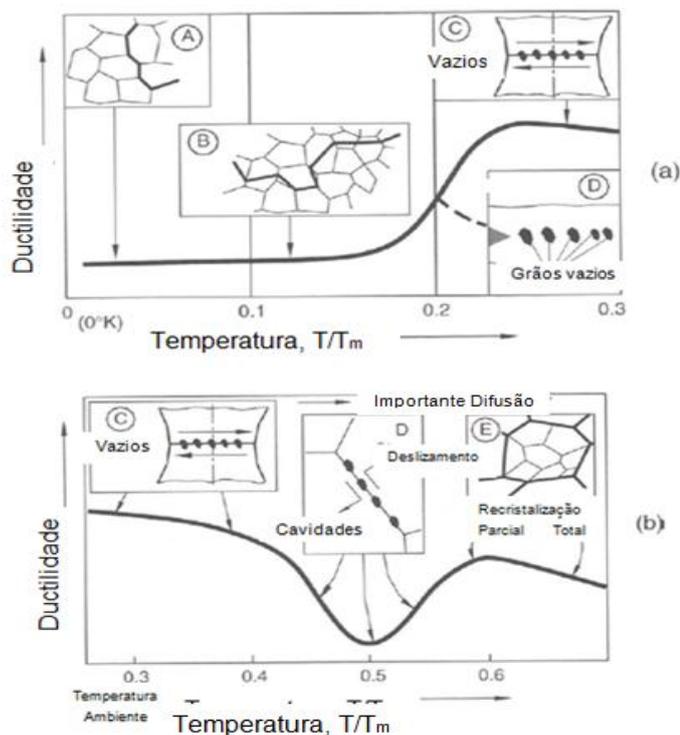
De acordo com Astakhov (2006), sob temperatura de corte ótima, por exemplo, ocorre o menor percentual de alongamento (que representa a tensão de ruptura), o que resulta no trabalho mínimo feito na fratura da camada que está sendo removida (neste caso, o cavaco). Na temperatura de corte ótima, segundo o autor, os valores de microdureza e módulo de Young são mínimos. O menor valor de microdureza garante o mínimo de tensão normal na interface ferramenta-cavaco; já o módulo mínimo de Young assegura o menor trabalho de deformação elástica.

Para compreender a existência da temperatura ótima, Astakhov propõe relacionar a ductilidade e a temperatura do ponto de fusão (T_m), conforme ilustra a Figura 2.7. Em altas temperaturas, os contornos de grãos tornam-se muito importantes. Abaixo de aproximadamente $0,45 T_m$, contornos de grão atuam principalmente como barreiras que inibem o escorregamento das discordâncias e causam o empilhamento destes. Em temperaturas mais elevadas, as regiões de intensa deformação, as quais estão contidas dentro dos grãos em temperaturas mais baixas, alteram os próprios contornos dos grãos. Os vazios são nucleados e, em seguida, trincas se desenvolvem nos limites do grão. Tensões de cisalhamento sobre os contornos deste causam deslizamento relativo dos grãos, e os espaços vazios são aumentados na região de concentrações de tensão. Por conseguinte, a região em volta desta temperatura pode ser denominada como o vale da ductilidade. A presença desse vale é a causa física da existência da temperatura de corte ideal.

De acordo com Astakhov (2006), o trabalho gasto na fratura da camada que está sendo removida (ou seja, o cavaco) deve ser considerado como o parâmetro principal na determinação da força de corte e da energia gasta na usinagem. Porém, o autor realça que outro aspecto importante do corte do metal é a deformação plástica, que deve ser considerada como um desperdício de energia. Portanto, no corte de metal, é desejável que os materiais de trabalho tenham uma menor tensão de ruptura quanto possível. Com isso, no vale de ductilidade, a energia será

convertida em cisalhamento macroscópico e a deformação plástica não ocorrerá, resultando em valores ótimos para a taxa de desgaste da ferramenta, força de corte e qualidade da superficial.

Figura 2.7- Mudanças na ductilidade e mecanismos de fratura associados para materiais com estrutura cristalina de corpo centrado (CCC):



Fonte: Astakhov (2006, p.233)

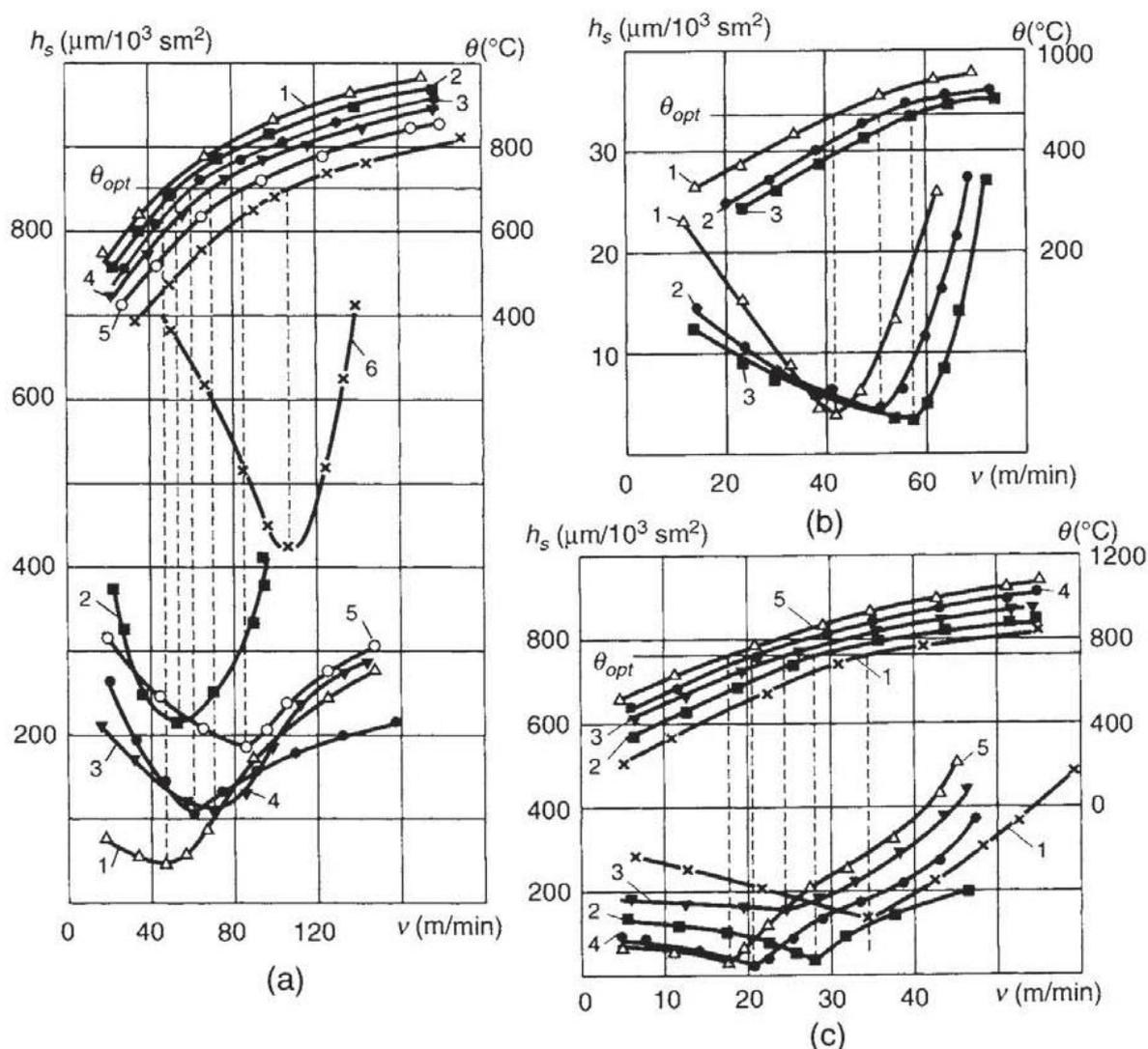
A Figura 2.7(a) mostra que, em temperaturas inferiores a $0,3 T_m$ em (A), em baixas temperaturas, ocorrem trincas intergranulares; em (B), acontece o trincas intergranulares e intragranulares; em (C), ocorre o deslizamento ao longo de planos paralelos levando a clivagem, sendo que, em (D), a energia de cisalhamento presente nas partículas é pequena. Na Figura 2.7(b), em temperaturas superiores a $0,3 T_m$ em (C), acontece a ruptura das partículas; em (D), surgem cavidades ao longo das faces do grão e, por fim, em (E), a recristalização suprime estas cavidades.

Sob temperaturas entre $0,5-0,6 T_m$, ocorrem a recuperação e os processos de recristalização. A recuperação refere-se a uma redistribuição de fontes de discordâncias de modo que o movimento se torne mais fácil, e, na recristalização, a energia de discordância gerada durante a deformação é utilizada para nuclear e crescer novos grãos, sendo o efeito líquido o aumento da ductilidade. O autor adverte que exceções ocorrem em determinados metais com estrutura cristalina

cúbica de face centrada (CFC), que normalmente não sofrem clivagem. Diante disso, não há transição de valores, que aumentam gradualmente com a temperatura.

Na Figura 2.8, é possível observar a influência da velocidade de corte sob a temperatura de corte e a taxa de desgaste da ferramenta de corte e, assim, verificar algumas consequências da Primeira Lei do Corte de Metais.

Figura 2.8- Influência de V_c sobre a temperatura de corte e a taxa de desgaste da ferramenta de corte



Fonte: Astakhov (2006, p.235)

Na Figura 2.8(a), foi estudado o desgaste no torneamento de uma liga de Al 610 com uma ferramenta de metal duro da classe P10 e combinações dos parâmetros descritos na Tabela 2.4. Verifica-se que para ferramentas de corte com várias combinações de parâmetros geométricos (ângulo de saída, de folga, de inclinação, de ponta, por exemplo), a temperatura de corte ótima corresponde ao

ponto mínimo da curva que representa a dependência da taxa de desgaste da ferramenta sobre a velocidade de corte; enquanto a velocidade de corte ideal, correspondendo a cada caso particular, varia numa vasta gama de velocidade de corte.

Tabela 2.4 - Regime e parâmetros geométricos da Figura 2.7 (a)

Curva	a_p (mm)	f (mm/rev)	Ângulo de Folga (°)	Ângulo de Saída (°)	Ângulo de Posição (°)	Ângulo de Inclinação (°)	Raio de Ponta (mm)
1	0,5		10	10	45	-10	0,3
2					90		0,1
3		0,09					1,0
4	0,25		16		45	0	
5				30			0,1
6		0,18	10	10			1,0

Fonte: Astakhov (2006, p.235)

A Figura 2.8 (b) busca descrever o desgaste de uma ferramenta de metal duro da classe M20 no torneamento de uma liga Haynes 263 (29%Cr e 2,5% Ti) com o avanço de 0,08 mm/rev e profundidade de usinagem de 0,5 mm em três ambientes: seco, fluido de corte com 6% de óleo com água, e fluido de corte integral contendo cloro e enxofre. A taxa de desgaste mínima da ferramenta é alcançada na mesma temperatura ótima de corte, seja no corte seco ou naquele com fluido. Na Figura 2.8, nota-se que a temperatura ótima alcançada foi a mesma na usinagem a seco e na usinagem com fluidos.

Por fim, a Figura 2.8 (c) apresenta os resultados do desgaste de uma ferramenta de metal duro da classe M10 no torneamento de uma liga Haynes 263 com um preaquecimento da peça de trabalho utilizando $a_p = 0,5$ mm e os valores de avanço e temperatura de preaquecimento mostrados na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 - Parâmetros da curva da Figura 2.7(c)

Curva	f (mm/rev)	Temperatura de preaquecimento (°C)
1	0,11	20
2	0,21	100
3	0,3	200
4	0,11	300
5	0,3	300

Fonte: Astakhov (2006, p.236)

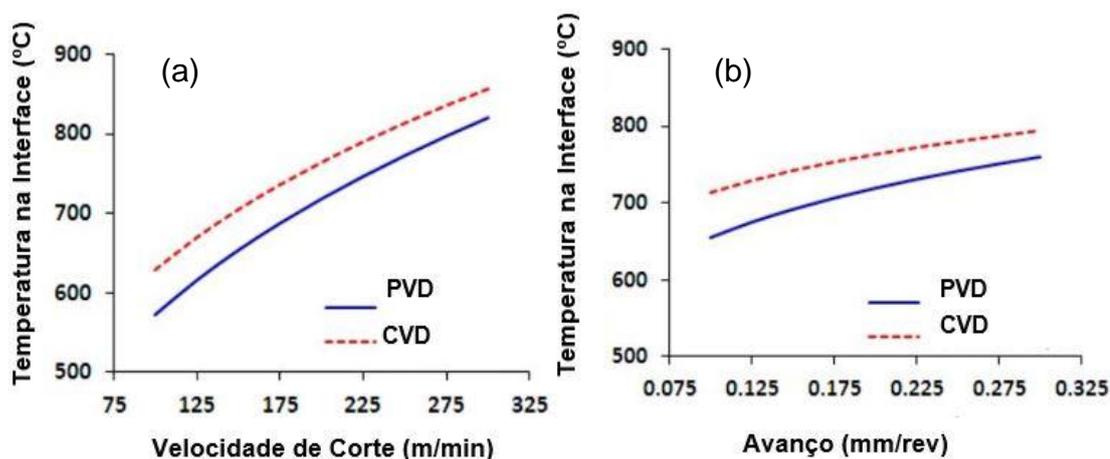
Observa-se que a temperatura de corte ótima é a mesma para várias combinações da temperatura de preaquecimento da peça de trabalho. O autor também relata experimentos que levaram a perceber que variações no diâmetro da peça no torneamento levam a uma mudança significativa na velocidade de corte ótima (aquela que corresponde à menor taxa de desgaste da ferramenta), mas a temperatura ótima permanece a mesma. Por fim, Astakhov (2006) relata que uma alteração na estrutura e/ou na dureza da peça levará a uma mudança na velocidade de corte ótima de maneira correspondente, mas a temperatura ótima permanece a mesma.

Logo, Astakhov (2006) afirma existir uma temperatura de corte ótima (Equação 2.2) e que esta depende apenas da composição dos materiais da ferramenta de corte e da peça de trabalho. Por isso, pode ser determinada uma vez e, em seguida, utilizada para otimizar vários processos de corte, onde a mesma combinação de materiais da ferramenta e da peça de trabalho é utilizada. O autor afirma que essa temperatura não depende do tipo de operação de corte, da geometria da ferramenta, dos parâmetros e regimes de usinagem nem do método de aplicação do fluido de corte.

Chinchanikara e Choudhury (2014) analisaram a influência do revestimento da ferramenta e dos parâmetros de corte durante o torneamento do aço AISI 4340 (35 HRC) sobre a temperatura da interface cavaco-ferramenta. Os insertos eram de metal duro, sendo um revestido com camada única de TiAlN pela técnica PVD, e o outro, por meio da técnica CVD aplicando multicamada de TiCN / Al₂O₃ / TiN. Um modelo matemático que pode prever a temperatura média da interface cavaco-ferramenta foi desenvolvido com base em observações experimentais que eram

obtidas da vasta gama das condições de corte. Uma configuração de calibração foi desenvolvida para correlacionar a força motriz elétrica gerada e a temperatura correspondente com base no princípio dos termopares inseridos na ferramenta. Curvas que mostram a temperatura da interface foram geradas com base nas equações de regressão desenvolvidas, fazendo variar somente um dos parâmetros de entrada. A Figura 2.9 (a) mostra a variação da temperatura de interface com a velocidade de corte, usando $f = 0,2 \text{ mm/rev}$ e $a_p = 1,5 \text{ mm}$. De modo semelhante, a Figura 2.9 (b) representa a variação da temperatura na interface, em função do avanço, usando os valores de $V_c = 200 \text{ m/min}$ e $a_p = 1,5 \text{ mm}$.

Figura 2.9 - Temperatura média na interface cavaco-ferramenta com diferentes (a) velocidades de corte e (b) avanço



Fonte: Adaptado de Chinchankara e Choudhury (2014)

Observa-se na Figura 2.9, que a temperatura média na interface cavaco-ferramenta é menor para a ferramenta com revestimento PVD. A curva ilustrada para a interação V_c e temperatura apresenta maior inclinação que aquela exibida para a relação f e temperatura. Percebe-se que a temperatura média da interface cavaco-ferramenta foi afetada principalmente pela velocidade de corte. No entanto, o efeito dos parâmetros de corte pode ser visto como mais predominante para o revestimento PVD. Os autores afirmam que a menor temperatura da interface para ferramenta revestida por TiAlN pode ser atribuída às características do processo de revestimento PVD, o qual proporciona um menor coeficiente de atrito entre a superfície de saída da ferramenta e os cavacos, resultando em forças de corte mais baixas e, por conseguinte, em temperatura de corte inferior.

Das *et al.* (2016) compararam o desempenho de dois insertos: metal duro não revestido e um cermet revestido (TiN/TiCN/TiN) pela técnica PVD sobre a usinabilidade do aço AISI 4340 (48 HRC) no torneamento a seco. Em relação à temperatura, a medição foi feita por meio de um pirômetro portátil, sendo a temperatura da superfície da peça medida em três zonas (0-100, 100-200, e 200-300 mm do comprimento de corte) e, logo depois, realizou-se a média desses valores. Os parâmetros de corte utilizados em cada observação foram descritos na Tabela 2.6.

Tabela 2.6 - Parâmetros de corte conforme ordem de observação para o trabalho de Das *et al.*

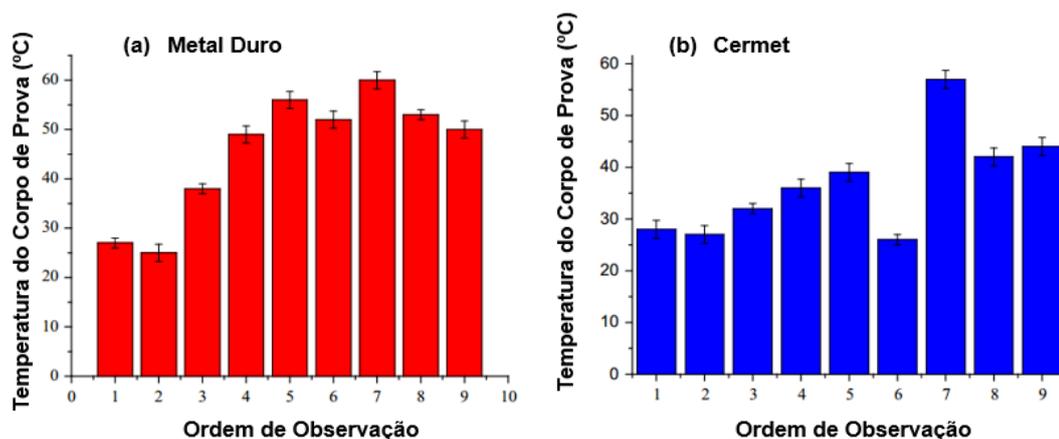
Metal Duro				Cermet			
Ordem de Observação	V_c (m/min)	f (mm/rev)	a_p (mm)	Ordem de Observação	V_c (m/min)	f (mm/rev)	a_p (mm)
1	80	0,05	0,1	1	80	0,05	0,1
2	80	0,10	0,2	2	80	0,10	0,2
3	80	0,15	0,3	3	80	0,15	0,3
4	100	0,05	0,2	4	100	0,05	0,2
5	100	0,10	0,3	5	100	0,10	0,3
6	100	0,15	0,1	6	100	0,15	0,1
7	120	0,05	0,3	7	120	0,05	0,3
8	120	0,10	0,1	8	120	0,10	0,1
9	120	0,15	0,2	9	120	0,15	0,2

Fonte: Das *et al.* (2016)

Para o metal duro sem revestimento, a análise de variância (ANOVA), com nível de confiança de 95%, mostrou serem significativos os efeitos de V_c e a_p sobre a variação da temperatura das peças. Já para o cermet revestido, todos os efeitos principais (V_c , f e a_p) foram considerados suficientes para gerar mudanças expressivas na temperatura. A Figura 2.10 (a) mostra um gráfico de barras com a

variação de temperatura da peça quando usinada com a ferramenta de metal duro, e a Figura 2.10 (b), quando usinada com a ferramenta de cermet.

Figura 2.10 - Gráfico de barra com variação de temperatura do corpo de prova (a) metal duro e (b) cermet



Fonte: Adaptado de Das *et al.* (2016)

A temperatura superficial da peça durante o torneamento com ferramentas de metal duro permanece mais elevada do que a do cermet, o que fica claro a partir da Figura 2.10 (a) e (b). Porém, para a V_c de 80 m/mim, as temperaturas são bastante próximas, independentemente dos insertos. Em ambos os insertos de metal duro e de cermet, a temperatura aumenta em função do aumento da velocidade de corte. Há uma alteração insignificante da temperatura da superfície da peça com o aumento do avanço quando se avaliam os resultados da ferramenta de metal duro. Uma ligeira queda de temperatura ocorre com o aumento do avanço na usinagem com cermet revestido. A temperatura do corpo de prova aumenta com a profundidade do corte em toda a gama de 0,1 a 0,3 mm, no caso de cermet com cobertura, enquanto que, para o metal duro, inicialmente diminui e depois aumenta. Os autores atribuíram ao revestimento a ajuda na melhoria do desempenho das ferramentas de cermet.

Complementando a análise da temperatura, os autores realizaram a análise dos cavacos. Os insertos de metal duro geraram cavacos dourados do tipo helicoidal contínuo. Eles afirmam que esta cor do cavaco pode ser devido ao calor gerado pelo atrito entre o inserto e o material de trabalho, sendo este não removido suficientemente. Assim, o calor retido é responsável pela maior temperatura de corte

e menor vida útil da ferramenta. Por outro lado, os cavacos de cor azul, produzidos na usinagem com as ferramentas cermet, sugerem que uma quantidade adequada de calor é transferida a partir do cavaco.

Por fim, no trabalho de Das *et al.* (2016), outro fator considerado influente sobre a temperatura foi a geometria do quebra-cavaco. Os insertos de metal duro não têm nenhum tipo específico de geometria de quebra-cavaco; no entanto, o cermet apresentava quebra-cavaco, o que proporcionou um comprimento de contato controlado entre cavaco e inserto. Isso resultou em menor desgaste da ferramenta cermet, ocorrendo uma maior transferência de calor para o cavaco, tornando-o azul. Tal fato foi responsável pela diminuição da temperatura do corpo de prova e força de corte para o cermet revestido.

2.4.4 Desgaste e vida da ferramenta de corte

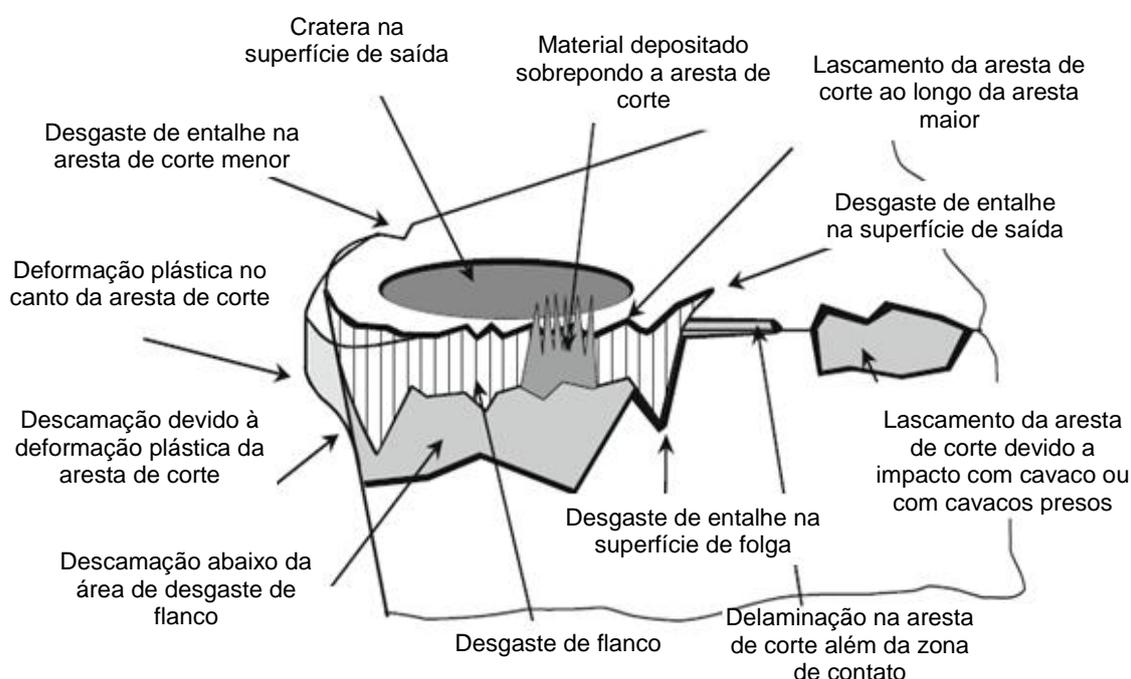
Em qualquer operação de usinagem, a ferramenta de corte sofre algum tipo de desgaste, o que exige a sua troca durante algum momento do processo. Logo, investigar as formas de desgaste, bem como seus mecanismos, é fundamental, pois possibilita tomar ações visando à redução do desgaste, minimizando, portanto, o tempo de parada das máquinas-ferramentas para troca de aresta de corte, elevando a produtividade da operação.

Conforme Childs *et al.* (2000), os danos sofridos pelas ferramentas podem ser classificados em dois grupos (desgaste ou fratura), conforme sua escala e como eles progridem. Já Machado *et al.* (2015) afirmam que os três fenômenos: avaria, desgaste e deformação plástica são os responsáveis pela perda de eficiência da ferramenta de corte. Os autores explicam que eles causam alterações na geometria de aresta de corte, sendo que os dois primeiros, geralmente, promovem a remoção de material da ferramenta, e o último, somente o seu deslocamento.

Klocke (2011) relata que esses fenômenos variam muito, dependendo do tipo e da duração das tensões. A Figura 2.11 mostra as principais formas de desgaste que ocorrem principalmente em ferramentas de torneamento, sendo que, na superfície de saída, observa-se desgaste de cratera e, nas superfícies de folga, o

desgaste de flanco. Dependendo dos parâmetros de corte e da combinação da peça e do material da ferramenta de corte, o desgaste de flanco tende a ser mais intenso na aresta de corte, continuando na superfície de folga. Já o desgaste de entalhe é causado pelas transições bruscas de tensões mecânica e térmica, prevalecendo na extremidade da área de contato. Por fim, a ocorrência de avaria (trinca, lascamento ou quebra) é rara em operações de corte contínuo, como o torneamento, pois, nesse tipo de processo, a ocorrência de choques mecânicos e térmicos é baixa.

Figura 2.11 - Formas características de desgaste no inserto durante o processo de torneamento



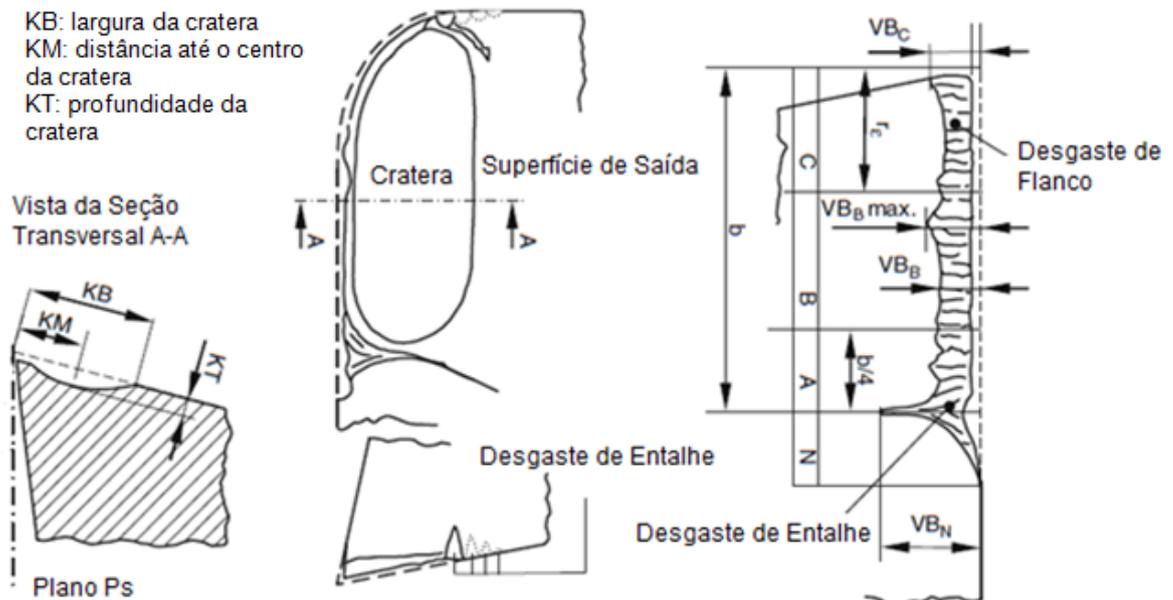
Fonte: adaptado de Klocke (2011, p.86)

A norma ISO 3685 (1993) define o desgaste como a mudança de forma da ferramenta a partir da sua forma original, durante o corte, resultante da perda gradual de material da ferramenta ou deformação. Conforme Hutchings (1992), o desgaste é a destruição de uma ou ambas as superfícies que compõem um sistema tribológico, que, na maioria das vezes, envolve perda progressiva de material. Durante o processo de desgaste, ao contrário da avaria, a retirada de material da ferramenta acontece de forma contínua e progressiva e em pequenas quantidades (em nível atômico ou nível do tamanho dos grãos do material), seja na superfície de folga, seja na superfície de saída de ferramenta (MACHADO *et al.*, 2015).

A norma ISO 3685 (1993) apresenta os parâmetros que quantificam os desgastes presentes nas ferramentas de corte. A Figura 2.12 mostra os parâmetros utilizados nesta norma, sendo que os principais indicadores são:

- profundidade da cratera (KT): utilizado para quantificar o desgaste de cratera que ocorre na superfície de saída da ferramenta de corte.
- desgaste de flanco médio (VB_B): utilizado para quantificar o desgaste de flanco médio presente em toda a superfície de folga principal da ferramenta de corte.
- desgaste de flanco máximo ($VB_B \text{ max.}$): quantifica o maior valor de desgaste de flanco presente na superfície de folga principal da ferramenta de corte.
- desgaste de entalhe (VB_N): quantifica o desgaste dos entalhes que podem estar presentes tanto na aresta de corte principal quanto na aresta secundária de corte da ferramenta.

Figura 2.12 - Alguns tipos de desgaste e parâmetros utilizados para medir desgaste nas ferramentas de tornear



Fonte: Adaptado de ISO 3685 (1993, p.12)

A norma ISO 3685 (1993) define vida da ferramenta como o tempo de corte necessário para alcançar um critério desta, o qual é um valor limiar predeterminado de uma medida de desgaste da ferramenta ou a ocorrência de um fenômeno.

Como elucidada a norma, a fim de manter o processo de fabricação dentro de condições de corte econômicas, deve-se adotar um critério para determinar o fim da vida útil da ferramenta, uma vez que a quebra de uma ferramenta em atividade pode ter um custo muito elevado, porque pode danificar a máquina-ferramenta, aumentar o tempo de parada e gerar um produto não conforme. Em relação ao momento de troca, a norma ISO 3685 (1993) recomenda utilizar parâmetros relacionados à rugosidade para operações de acabamento. Já para operações de desbaste, considerando-se ferramentas de metal duro sinterizado, são recomendados os seguintes critérios de fim de vida:

- $VB_B = 0,3$ mm, se o desgaste de flanco é considerado regular na zona B.
- $VB_{Bmáx} = 0,6$ mm, se o desgaste de flanco não é exibido na zona B.
- $KT = 0,06 + 0,3f_c$, onde f_c é o avanço de corte em mm/revolução, representando a profundidade da cratera em mm.
- a distância da cratera dianteira (KF) reduzida a um valor de 0,02 mm.
- a cratera rompe na aresta de corte menor, causando um mau acabamento da superfície usinada.

Além disso, Astakhov (2006) reafirma que podem ser utilizados como critérios a rugosidade da superfície no torneamento de acabamento e o comprimento do desgaste de entalhe (VB_N) de 1 mm. No entanto, o autor ressalta que essas características geométricas de desgaste da ferramenta são subjetivas e insuficientes. Em primeiro lugar, elas não levam em consideração a geometria da ferramenta (ângulo de folga, ângulo de inclinação, ângulo de ponta, entre outros), criando assim os mesmos parâmetros de desgaste de ferramentas de corte para geometrias de corte distintas. Em segundo lugar, elas não avaliam o regime de corte e, portanto, não refletem a quantidade real do trabalho, de material removido pela ferramenta, durante o tempo de funcionamento desta, que é definido como o tempo necessário para atingir o critério de vida útil da ferramenta escolhida.

Logo, o ideal é adotar um sistema de monitoramento para determinar, com segurança, o momento de troca da aresta de corte, utilizando os parâmetros recomendados pela norma ISO 3685 (1993) para casos extremos, onde essa monitoração não é possível. Machado *et al.* (2015) sugerem que este controle seja feito por meio de componentes de força de usinagem, potência do motor de

acionamento do eixo-árvore, temperatura de corte, emissão acústica ou vibração do sistema, dentre outros. Os autores ressaltam que, na indústria, é muito comum usar a aresta até que as peças produzidas ultrapassem a faixa de tolerância e/ou acabamento pré-estabelecida, mas que ainda estejam dentro das especificações de projeto.

O desgaste da ferramenta não depende somente do tempo de corte ou do seu percurso, mas também da geometria da ferramenta (ângulo de saída, ângulos de inclinação, ângulo de folga, raio da ponta), regimes de corte (velocidade de corte, avanço e profundidade de usinagem), propriedades da peça (dureza, tenacidade, estrutura cristalina), presença e propriedades de fluidos de corte e muitos outros parâmetros do sistema de usinagem (ASTAKHOV, 2006). Na prática, no entanto, o autor resalta que a velocidade de corte é uma preocupação primordial na consideração de desgaste da ferramenta. Logo, as suas curvas de desgaste são construídas para velocidades de corte diferentes, mantendo invariáveis outros parâmetros de usinagem.

Zhang *et al.* (2007) prepararam cermets variando as proporções WC / TiCN, Co / Ni e C / N em solução sólida de TiCN. Um aço carbono com dureza de 280 HB foi selecionado como material de trabalho. Todos os parâmetros de corte foram mantidos constantes, a saber: velocidade de corte de 300 m/min, avanço de 0,18 mm/rev e profundidade de usinagem de 0,5 mm, para um torneamento a seco de 20 min. O desempenho do corte, em termos de desgaste de flanco (VB_B) das ferramentas, foi comparado. Quando a relação WC/TiCN foi inferior a 0,30, o cermet apresentou baixa dureza e resistência à ruptura transversal, e isso conduziu ao desgaste elevado. Com a proporção WC / TiCN superior a 0,30, a ferramenta cermet também apresentou alto desgaste de flanco, embora a sua dureza tenha aumentado com a elevação de WC / TiCN. Ao realizar a análise microscópica, foram encontrados sulcos na superfície de folga dos cermets, o que indicou o desgaste abrasivo. Em relação à proporção dos ligantes Co/Ni, inicialmente o aumento da razão diminuiu o desgaste, mas depois aumenta, quando a proporção supera 2,0. A baixa resistência ao desgaste do cermet com razão Co/Ni inferior a 2,0 deve-se à baixa dureza e resistência à ruptura transversal. Entretanto, com o aumento de Co/Ni, a quantidade de Fe que vem da superfície do aço carbono aumenta. Isso indica que Co/Ni acima de 2,0 contribuiu para a oxidação e a difusão em alta

velocidade de corte. Por fim, os autores verificaram que a solução sólida $TiC_{0.5}N_{0.5}$ tem uma maior resistência ao desgaste de flanco. Diminuindo-se a relação C/N em solução sólida TiCN, será melhorada a resistência à difusão e oxidação. Isso está de acordo com o acúmulo de calor da ferramenta, o qual depende da condutividade térmica. Os cermets com $C/N > 1$, tal como $TiC_{0.7}N_{0.3}$ e $TiC_{0.6}N_{0.4}$, apresentaram uma baixa condutividade térmica. Assim, a oxidação torna-se mais fácil nas fases duras ricas em C, quando comparadas com aquelas ricas em N.

Em outro trabalho (GONZÁLEZ et al., 2011), o torneamento foi realizado em um aço médio carbono AISI 1045 com dureza de 150 HB, variando-se a velocidade de corte em 400, 500 e 600 m/min, 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, Al_2O_3 e Ti(N,C)) e metal duro com revestimento duplo (Ti(C,N) e Al_2O_3) com espessuras de 15 e 10 μm , respectivamente. Foram realizados, entre testes e réplicas, 90 experimentos assumindo-se como critério de desgaste de flanco $VB_B = 0,2$ mm. Para todos os insertos, fizeram-se medições do desgaste de flanco e imagens das superfícies por meio da microscopia de varredura eletrônica (MEV). Tanto para a velocidade de corte (V_c) de 600 m/min quanto para a de 500 m/min, as imagens foram realizadas após 4 minutos de corte. Observou-se desgaste intenso para a velocidade de corte intermediária (500 m/min) e falha catastrófica para a velocidade de corte alta (600 m/min), para o cermet e para o metal duro com duplo revestimento. As imagens revelaram o comportamento superior do inserto de metal duro com revestimento triplo. Empregando a velocidade de corte de 400 m/min, o inserto de cermet alcançou o critério de fim de vida muito antes de terminar o tempo de usinagem final (10 min), em comparação aos insertos de metal duro que não alcançaram o limite estabelecido. Para a velocidade de corte de 500 m/min, tanto o cermet quanto o metal duro com revestimento duplo chegaram ao critério de fim de vida ($VB_B = 0,2$ mm) antes do tempo de usinagem final (5 min). Para a velocidade de corte de 600 m/min, o melhor comportamento em relação à tendência de desgaste foi também para o inserto de metal duro com revestimento triplo. Entretanto, a ferramenta de cermet apresentou uma melhor tendência que a de metal duro com revestimento duplo, devido ao fato de que, quando este último perdeu suas camadas de revestimento, o substrato ficou desprotegido e o desgaste cresceu intensamente.

2.5 Considerações parciais

O desenvolvimento do carboneto de tungstênio (WC) em pó mostrou-se uma inovação tecnológica à época, pois revolucionou a forma de se realizar a usinagem e trouxe benefícios agregados importantes, tais como a elevação da produtividade, dado que as velocidades de corte puderam ser aumentadas em cerca de dez vezes (de 35 m/min para 250 a 300 m/min), (MACHADO *et al.*,2015). Diante disso, há que se considerar ainda que o desenvolvimento de novos tipos de materiais para ferramenta avançou desde então, emergindo metal duro, cerâmicas puras ou misturadas, cermets e materiais ultraduros, tanto sem cobertura quanto revestidos. Cerca de noventa anos passados desde o depósito da patente de Schröter (ASTAKHOV, 2014), ainda não é possível encontrar um único material que reúna todas as propriedades consideradas necessárias. Sendo assim, é comum encontrar discussões e opiniões divergentes no que se refere à aplicação de materiais de ferramenta de corte na operação de torneamento. Como se trata de um processo que frequentemente requer uma análise multivariada, conclusões generalizadas sobre a ferramenta de corte ideal dificilmente podem ser formuladas.

Dados os trabalhos citados na revisão bibliográfica, as considerações direcionam para a necessidade de um exame individualizado para cada situação real vivida em laboratório ou na indústria, além dos objetivos pretendidos. Isso significa que os benefícios ou malefícios de um determinado material de ferramenta de corte dependerão de inúmeros fatores, a saber: da geometria da ferramenta de corte; da presença ou não do quebra-cavaco; dos materiais, do número, arranjo e espessura das camadas de revestimento ou da sua ausência; da máquina-ferramenta disponível para realizar a operação, que poderá atingir determinados níveis de parâmetros, como velocidade de corte, profundidade de usinagem e avanço, ou não; dos níveis de acabamento superficial requeridos; da presença ou não de fluido de corte; da necessidade de redução das forças de corte; entre outros.

Para a força de corte, o uso de cermet a princípio proveu os melhores resultados; no entanto, é necessário realçar as condições que determinaram esse comportamento. Quando um inserto de cermet revestido foi comparado a um metal duro sem cobertura, as menores forças podem ser atribuídas à redução do coeficiente de atrito para o par tribológico. Além disso, devido a um ângulo de

posição menor, maior vibração foi observada durante o ensaio. Já quando um metal duro revestido foi comparado a um cermet sem cobertura, inicialmente este último apresentou as menores forças. Entretanto, a força de corte, intensificada com o aumento de a_p , provocou a falha catastrófica do cermet. Em todos os trabalhos analisados, independentemente do material da ferramenta de corte, a presença de revestimento permitiu a redução das forças de corte. Constatou-se, também, que o uso de quebra-cavaco permite um maior controle do comprimento de contato, o que favorece a redução de F_c quando comparado à sua ausência, seja qual for o material da ferramenta de corte.

Examinando o desempenho do material da ferramenta de corte sobre o parâmetro rugosidade, não é possível afirmar qual material apresenta melhor desempenho nos trabalhos citados. Constata-se aqui, novamente, que o uso de revestimentos propicia a obtenção de valores menores de rugosidade da peça acabada, evidenciado com o aumento deste parâmetro quando a cobertura sofre delaminação. Neste sentido, o aumento das taxas de desgaste também reflete no pior desempenho desse sistema.

Analisando a influência do material da ferramenta de corte na temperatura da interface cavaco-ferramenta, entende-se que a condutividade térmica é fundamental na determinação da temperatura de corte, e este fato é intrínseco à composição química do material. Valores distintos de temperatura foram obtidos a partir do ponto onde estava ocorrendo a medição: no cavaco, na peça e na ferramenta. Contudo, há que se considerar que o torneamento de materiais distintos e os intervalos de parâmetros de corte estabelecidos podem resultar em taxas de dissipação de calor distintas, seja para cavaco, meio, peça ou ferramenta.

Em relação à vida e ao desgaste da ferramenta, os estudos abordados e leituras adjacentes levam a inferir que a vida desta está mais associada aos parâmetros de corte (V_c , a_p e f) e de revestimento que o material da ferramenta.

Por fim, de maneira surpreendente, o trabalho de Asthakhov (2006) demonstra existir um conjunto de parâmetros dependentes das propriedades da peça que permite otimizar a temperatura de corte e, conseqüentemente, garantir as menores forças de corte e de taxas de desgaste da ferramenta e a mais alta qualidade da superfície usinada, simultaneamente. Desse modo, fica evidente a

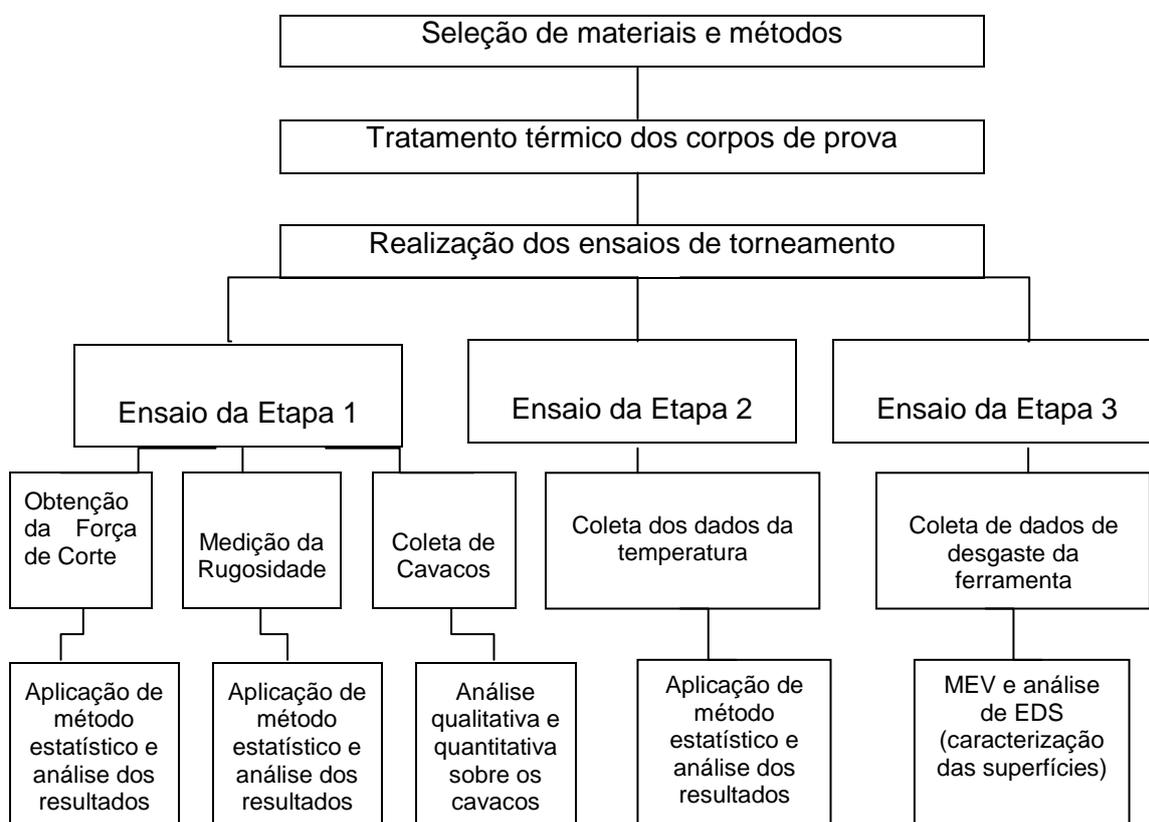
necessidade de mais estudos no que concerne à busca pelas condições ótimas de corte.

Todavia, nesta pesquisa, o objetivo foi analisar a influência do material da ferramenta de corte para um material específico (aço ABNT 4340) empregando parâmetros de corte e de avaliação previamente definidos. Por conseguinte, as constatações realizadas possuem limitação de aplicação e não poderão ser generalizadas.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os experimentos foram realizados conforme o fluxograma apresentado na Figura 3.1. Cada uma das etapas será detalhada neste capítulo. Os testes foram conduzidos no Laboratório de Usinagem e Automação do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, com exceção da microscopia de varredura eletrônica (MEV) e da espectroscopia de energia dispersiva (EDS).

Figura 3.1 - Fluxograma do procedimento experimental



Fonte: o autor (2016)

3.1 Materiais e Métodos

Os corpos de prova utilizados neste estudo foram confeccionados em aço ABNT 4340, amplamente utilizado na fabricação de eixos, bielas, virabrequins e peças com alta solicitação mecânica nas indústrias aeroespacial, automobilística, de máquinas e equipamentos. A faixa de composição química deste aço pode ser vista na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Composição química dos corpos de prova

C%	Si%	Mn%	P%	S%	Cr%	Mo%	Ni%	Al%	Cu%
0,39	0,24	0,71	0,01	0,006	0,77	0,22	1,72	0,02	0,01

Fonte: Açolíver (2016)

Os corpos cilíndricos possuíam diâmetro inicial de 78 mm e comprimento de 300 mm. O método escolhido para a realização deste experimento foi o torneamento cilíndrico. Um suporte com geometria PCLNR 2020K-12 foi utilizado juntamente com as ferramentas de corte descritas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Descrição das ferramentas de corte

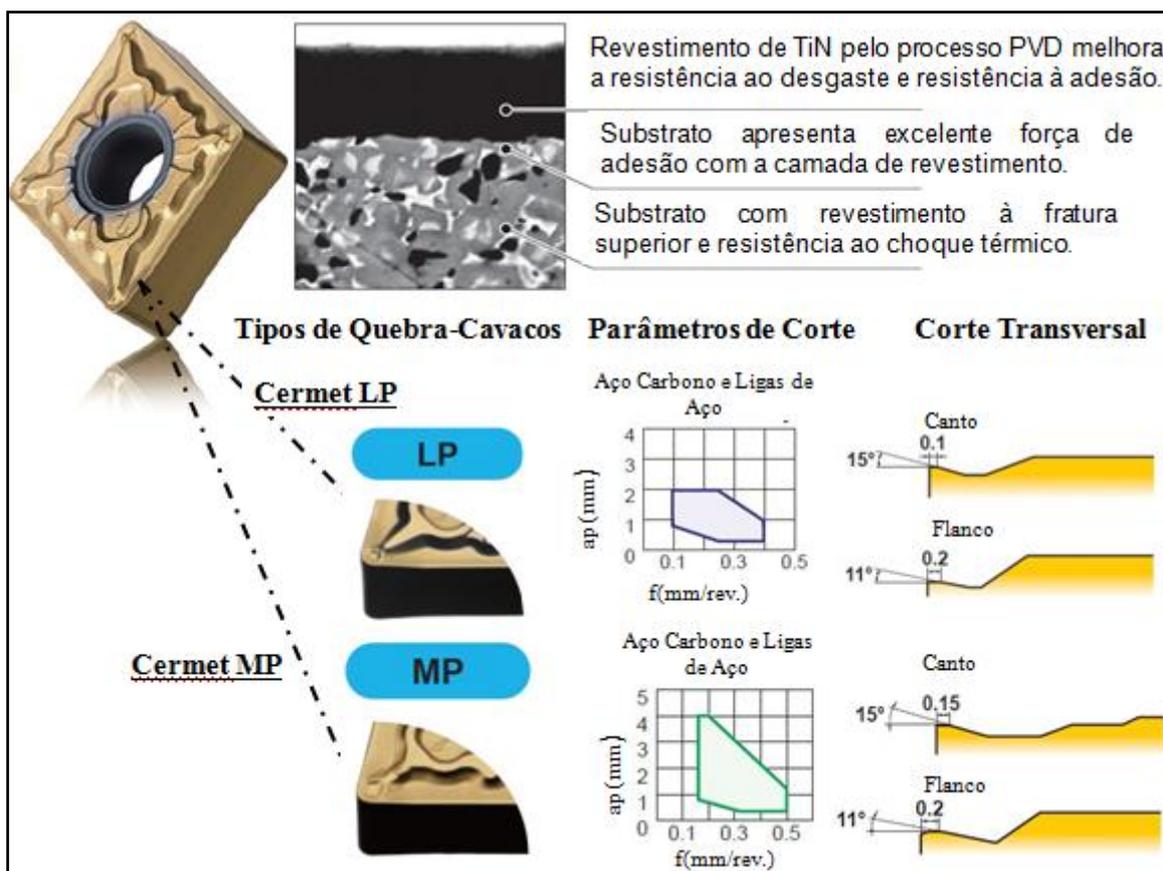
Material da Ferramenta de Corte	Geometria do Quebra-Cavaco	Geometria	Descrição	Intervalos recomendados para os Parâmetros de Corte do material da ferramenta
Cermet	LP	CNMG12040 8LP	Revestimento de TiN pelo processo PVD;	V _c : 195- 295 m/min; f: 0,10-0,40 mm/rev; ap: 0,3- 2,0 mm;
Cermet	MP	CNMG12040 8MP	Revestimento de TiN pelo processo PVD;	V _c : 175- 270 m/min; f: 0,16-0,50 mm/rev; ap: 0,3- 4,0 mm;
Metal Duro	MP	CNMG12040 8MP	Revestimento de TiN Al ₂ O ₃ e TiCN pelo processo CVD.	V _c : 190- 310 m/min; f: 0,16-0,50 mm/rev; ap: 0,3- 4,0 mm;
Metal Duro	LP	CNMG12040 8LP	Revestimento de TiN Al ₂ O ₃ e TiCN pelo processo CVD.	V _c : 210- 340 m/min; f: 0,10-0,40 mm/rev; ap: 0,3- 2,0 mm;

Fonte: Mitsubishi (2015)

A Figura 3.2 ilustra as ferramentas da classe cermet de forma a descrever revestimento e substrato, ressaltando como detalhe as duas geometrias de quebra-

cavacos possíveis: LP e MP. Para cada geometria de quebra-cavaco, estão descritos os parâmetros de corte avanço (f) e profundidade de usinagem (a_p) recomendados pelo fabricante, materiais das peças e os ângulos característicos, respectivamente.

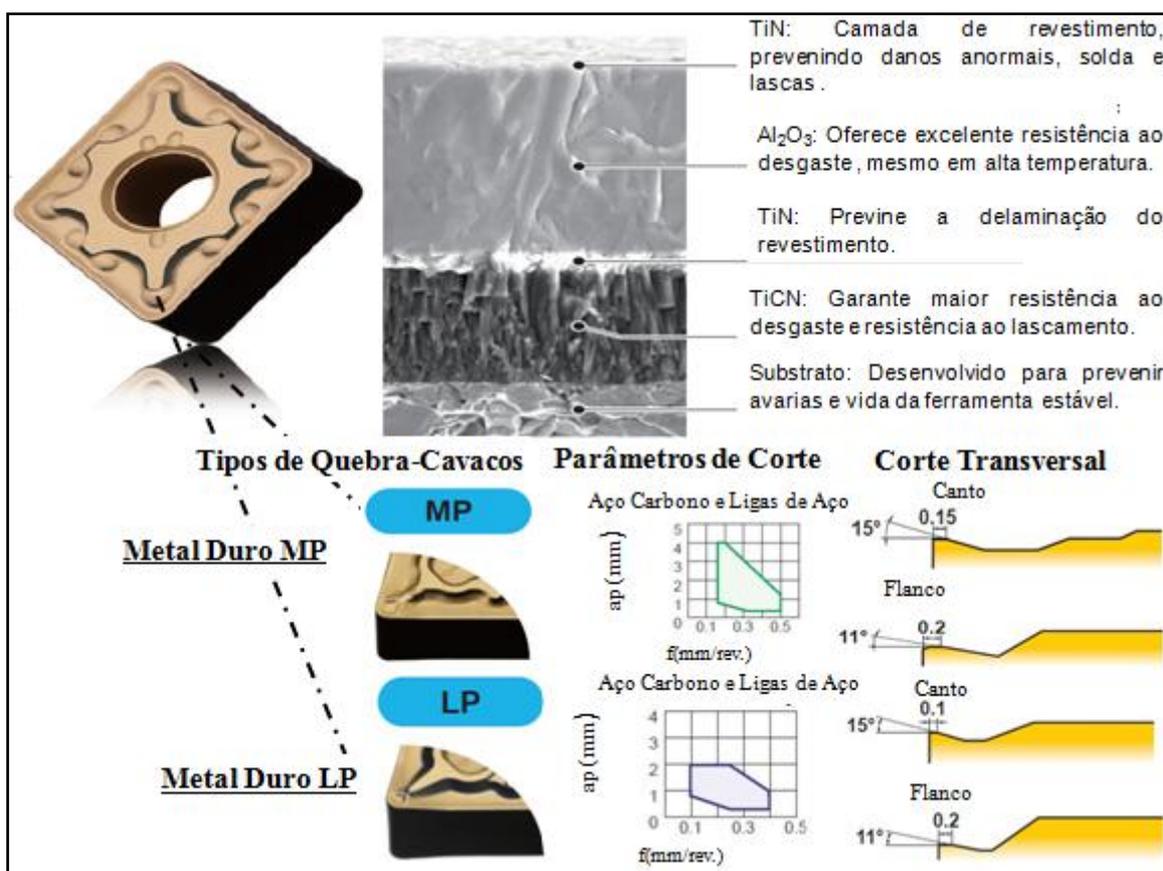
Figura 3.2 - Características das ferramentas de cermet empregadas



Fonte: adaptado de Mitsubishi (2015)

De forma análoga, a Figura 3.3 detalha as ferramentas da classe metal duro.

Figura 3.3 - Características das ferramentas de metal empregadas



Fonte: adaptado de Mitsubishi (2015)

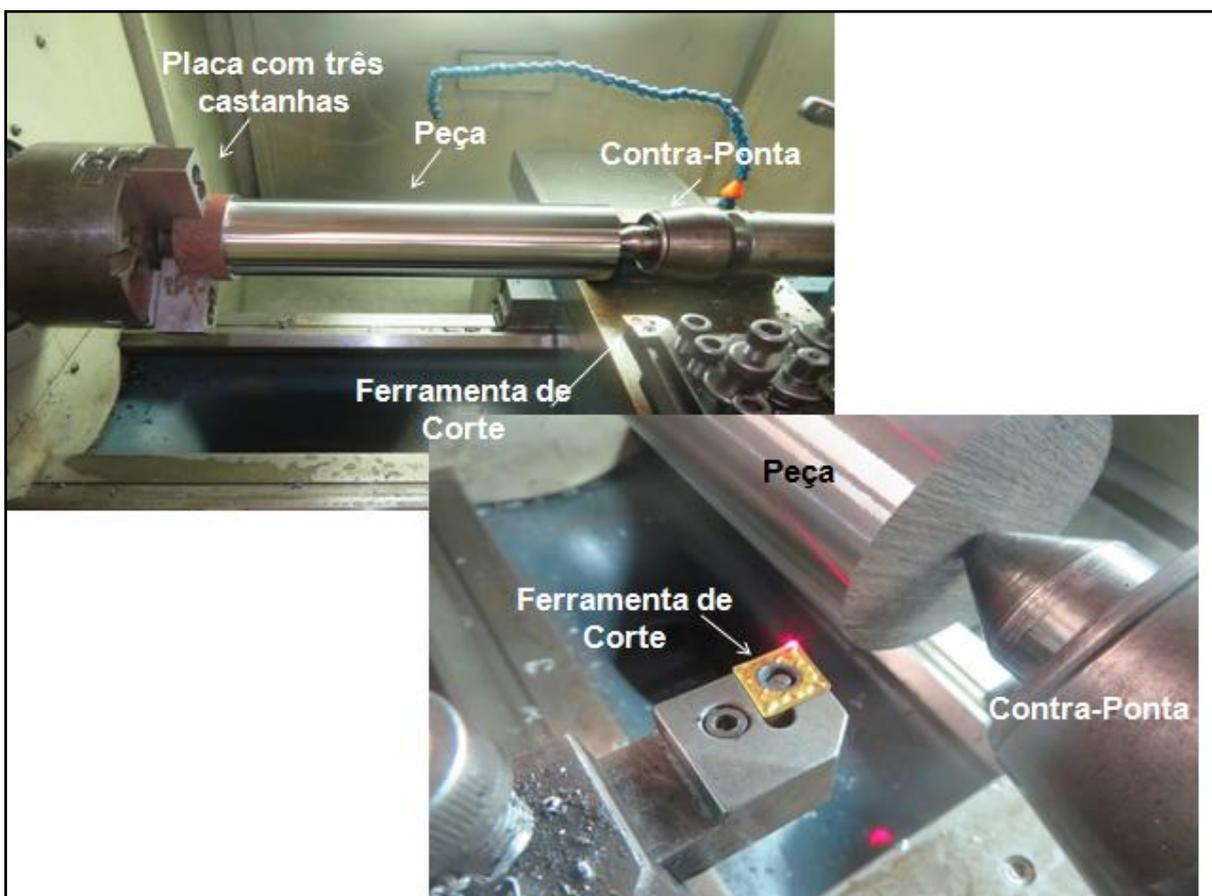
3.2 Tratamento térmico dos corpos de prova

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 690°C durante quatro horas. O resfriamento dos corpos de prova ocorreu dentro do próprio forno. Realizou-se a análise da dureza do material na Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, unidade Contagem, por meio de um durômetro WOLPERT modelo D-6700. Durante os ensaios utilizou-se uma esfera de 2,5 mm de diâmetro e carga de 187,5 kgf. A média de seis medições indicou uma dureza de 222 HB.

3.3 Realização dos ensaios (Etapa 1)

Os ensaios foram realizados em um torno CNC ROMI modelo Centur 305 (5,5 kW de potência e rotação máxima de 3500 rpm). A montagem do experimento pode ser vista na Figura 3.4.

Figura 3.4 - Montagem do experimento (Etapa 1)



Fonte: o autor (2016)

Durante o planejamento dos testes, foi necessário estabelecer um arranjo que permitisse manter constante a rotação. Childs *et al.* (2000) mostram que o torque (T) pode ser expresso pela Equação 3.1, enquanto a potência (P) que o motor deve gerar para suportar uma operação de torneamento, pela Equação 3.2.

$$T = \frac{F_c \cdot D}{2} \quad (3.1)$$

$$P = F_c \cdot V_c \quad (3.2)$$

Onde V_c é a velocidade de corte, e D , o diâmetro a ser usinado. Colocando em evidência F_c nas Equações 3.1 e 3.2 e, logo após, igualando-as, obtém-se a Equação 3.3.

$$P = \frac{2.T.V_c}{D} \quad (3.3)$$

A Equação 3.3 mostra que P é diretamente proporcional a V_c ; logo, um aumento na V_c acarretará um acréscimo na potência e, conseqüentemente, na corrente consumida. Já o diâmetro da peça é inversamente proporcional à potência de usinagem. Dessa forma, é necessário garantir que a razão entre V_c e D permaneça constante ao longo dos testes. Com isto, a rotação do motor permanecerá constante e qualquer variação na potência e, por conseguinte, na corrente consumida, será atribuída ao efeito que a mudança dos parâmetros de entrada (V_c , a_p e f) gerar.

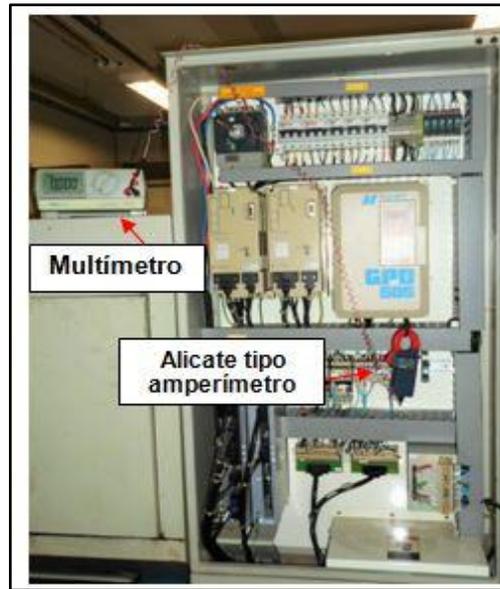
Portanto, a fim de satisfazer as condições citadas anteriormente, para a realização dos testes da etapa 1, utilizaram-se a velocidade de corte de 250 m/min, a profundidade de usinagem no nível de 1,5 mm e valores de avanço de 0,16 e 0,40 mm/rev, para os quatro corpos de prova. O diâmetro inicial de cada barra foi de 67 mm.

3.4 Obtenção da força de corte

A rotação inicial do eixo árvore foi definida automaticamente pelo equipamento após a seleção da velocidade de corte. Todos os corpos de prova apresentavam o mesmo diâmetro (67 mm), de modo a se manter a proporção de acordo com o exposto no item 3.3.

Para a coleta dos sinais de corrente elétrica consumida durante o teste, um multímetro PoliMed modelo Tru RMS PM-4650, foi conectado ao cabo de alimentação do motor principal por um amperímetro de alicate, como ilustrado na Figura 3.5.

Figura 3.5 - Montagem do multímetro para aquisição da corrente elétrica



Fonte: o autor (2016)

Após a estabilização do sinal, foram coletados cinco valores referentes à corrente elétrica, e, ao final, realizou-se uma média aritmética com estes valores. Subtraindo-se o valor da corrente em vazio, obtido por média aritmética de sete valores referentes à corrente elétrica antes do início da operação de corte, obteve-se o valor da variação de corrente, o qual corresponde ao consumo líquido durante o torneamento. Pela relação que estabelece que 10 mV no amperímetro equivalem a 1 A, foi possível determinar os dados da corrente elétrica consumida pela operação em cada teste e, assim, determinar a força de corte de forma indireta por meio da Equação 3.4. Estes valores encontram-se no Apêndice A.

$$F_c = \frac{60.I.V.\sqrt{3}.\cos(\varphi).\eta}{V_c} \quad (3.4)$$

Onde:

F_c = Força de corte [N]

I = Corrente consumida [A]

V = Tensão de alimentação do torno [220 V]

$\cos \varphi$ = Fator de potência [0,95][arbitrário]

η = Eficiência de transmissão do torno [0,8][arbitrário]

V_c = Velocidade de corte [m/min]

O valor de η é arbitrário e está relacionado ao valor da eficiência de transmissão do torno. O fabricante da máquina-ferramenta utilizada neste trabalho determinou que a eficiência do sistema de transmissão é 0,8. Conforme Machado *et al.* (2015), o ângulo de defasagem entre tensão e corrente é representado por φ . O valor de $\cos\varphi$ é o quociente entre as potências ativa e aparente, porém varia muito ao longo da operação de um motor de indução. Neste caso, justifica-se o valor $\cos\varphi = 0,95$, devido à operação a plena carga.

3.5 Medição da rugosidade

Após cada conjunto de testes realizados, os valores do desvio aritmético médio (R_a), do desvio médio quadrático (R_q) e da altura total do perfil (R_t) foram coletados com um rugosímetro Mitutoyo, modelo SurfTest 301, 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 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 três pontos equidistantes da circunferência do corpo de prova, para cada configuração, e o valor médio foi calculado. 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 B.

3.6 Coleta dos cavacos

Amostras dos cavacos foram coletadas ao final de cada teste. Posteriormente, fizeram-se fotografias para cada configuração utilizando uma câmera Canon modelo SX280HS. As imagens dos cavacos foram editadas no software PhotoScape, versão 3.7, para recortes, alinhamento e ajustes dimensionais, de brilho e de contraste.

Para cada conjunto de testes realizados, os valores da espessura do cavaco (h') foram coletados com um paquímetro Mitutoyo com resolução de 0,02 mm. A medição foi feita em cinco cavacos, calculando-se o valor médio.

3.7 Aplicação do método estatístico e análise dos resultados (Etapa 1)

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 na Tabela 3.3. Ao final da coleta, os dados foram organizados em tabelas utilizando o *software* Microsoft Excel, versão 2013, de forma que, para o cálculo dos efeitos, fosse utilizado o planejamento fatorial 2³.

3.8 Realização dos ensaios (Etapa 2)

Os ensaios de torneamento foram realizados no mesmo torno empregado na Etapa 1. Não havendo mais a necessidade de manter constante a rotação, como na etapa anterior, selecionaram-se três valores de V_c que permitissem trabalhar próximo aos intervalos recomendados pelo fabricante; em relação ao a_p e o f , estes foram mantidos constantes. Os valores dos parâmetros de entrada definidos para este experimento encontram-se na Tabela 3.3.

Tabela 3.3- Parâmetros utilizados no torneamento (Etapa 2)

Material da Ferramenta de Corte	Geometria do Quebra-Cavaco	Velocidade de Corte [m/min]			Avanço f [mm/rev]	Profundidade de Usinagem a_p [mm]
		200	250	300		
Cermet	LP	200	250	300	0,16	1,5
Cermet	MP	200	250	300	0,16	1,5
Metal Duro	LP	200	250	300	0,16	1,5
Metal Duro	MP	200	250	300	0,16	1,5

Fonte: o autor (2016)

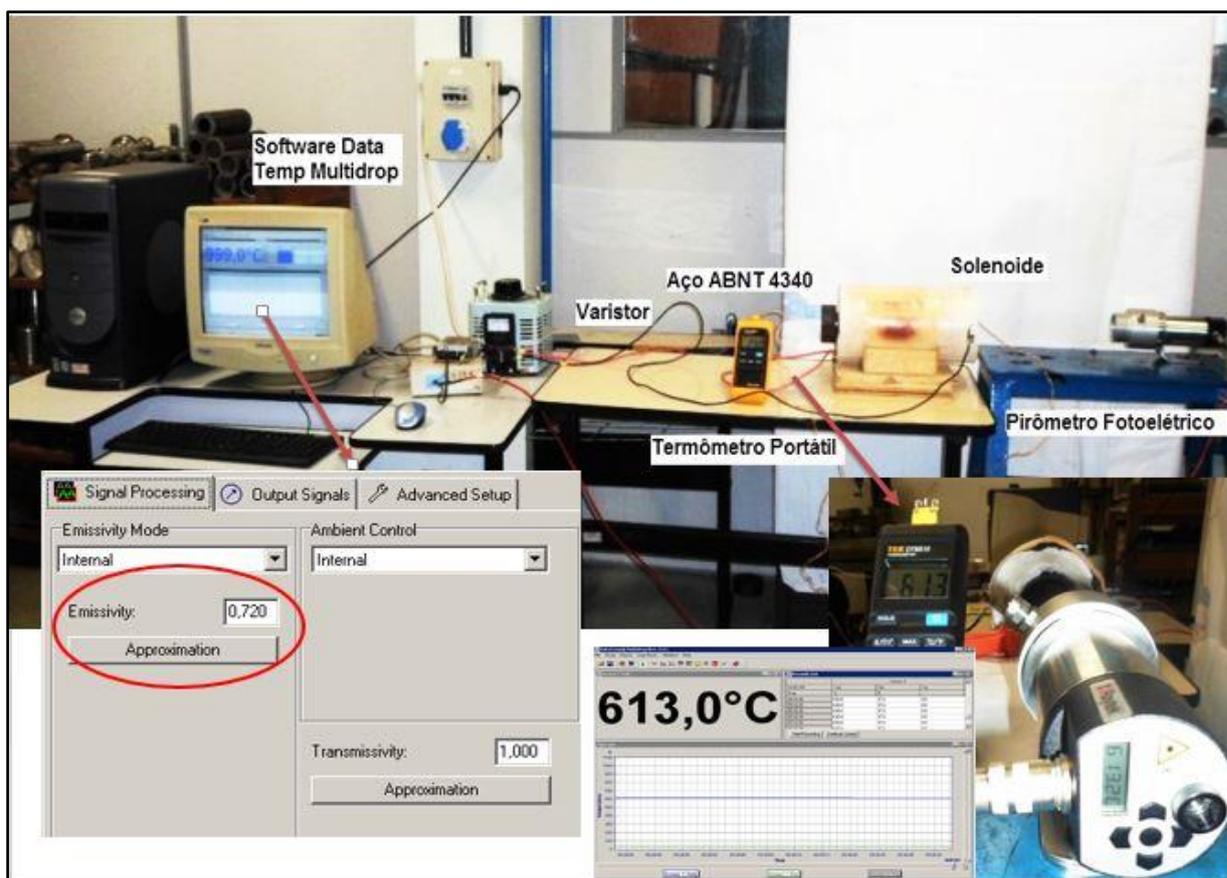
3.9 Coleta dos dados de temperatura

Para a coleta de dados da temperatura, utilizou-se um pirômetro infravermelho Raytek modelo MM2ML com faixa de operação de 300°C a 1100°C, tempo de resposta de 2 ms e uma distância focal de 300mm.

O material a ser medido apresenta uma resposta espectral própria, ou seja, sua emissividade. Portanto, para uma medição correta, torna-se necessário conhecer a emissividade do aço ABNT 4340 para o ajuste manual no software Data Temp® Multidrop. A montagem foi realizada de forma a permitir que o calor emitido pelo objeto atingisse o sistema óptico do pirômetro, a fim de conduzir para um ou mais detectores fotossensíveis.

O detector converteu o calor irradiado em um sinal elétrico que, por sua vez, foi convertido em um valor de temperatura, que se baseia na equação de calibração do sensor e na emissividade do alvo. Este valor de temperatura foi comparado com os valores indicados pelo termopar tipo K inserido no material e, então, conectado a um termômetro portátil da Tektronix®, modelo TEK DTM510, com faixa de operação de 50°C a 1300°C e resolução de 1°C. A Figura 3.6 mostra a montagem do sistema para calibração do pirômetro, realçando o sistema calibrado para um valor de emissividade de 0,720.

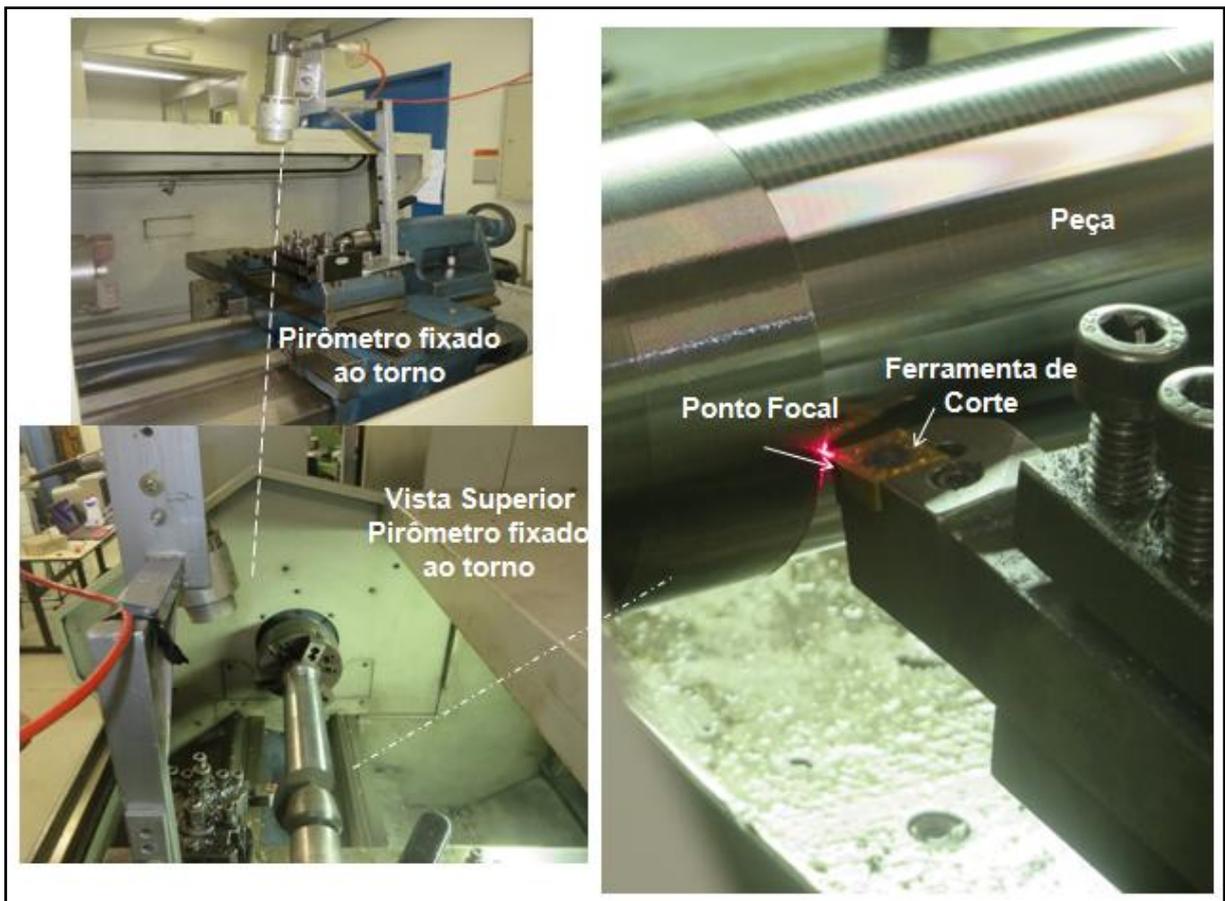
Figura 3.6 - Montagem do sistema para ajuste do pirômetro



Fonte: O autor (2016)

Um suporte foi assentado junto ao torno, para a fixação do pirômetro, de modo a garantir rigidez ao equipamento e a correta posição do foco. Os dados de temperatura mostrados no Apêndice C referem-se à média das temperaturas máximas atingidas para intervalos de 1 segundo. A montagem do experimento pode ser vista na Figura 3.7. O ponto focal está direcionado sobre a aresta de corte na superfície de saída, como pode ser observado nos detalhes da Figura 3.7.

Figura 3.7 - Montagem do sistema para aquisição da temperatura



Fonte: o autor (2016)

3.10 Aplicação do método estatístico e análise dos resultados (Etapa 2)

Para a variável de resposta temperatura, foram realizadas análises estatísticas no *software* MINITAB versão 17. Fez-se a análise dos resíduos para todas as combinações citadas na Tabela 3.3, além da análise dos efeitos principais e das interações.

3.11 Coleta de dados de desgaste da ferramenta de corte

Para a coleta dos dados de desgaste das ferramentas, optou-se pela realização de uma operação de torneamento de desbaste. Os valores dos parâmetros de corte foram estabelecidos de maneira a atender, simultaneamente, os

intervalos recomendados pelo fabricante para cada material da ferramenta (cermet e metal duro) e geometria de quebra-cavaco (LP e MP) descritos na Tabela 3.1. Nessa etapa, os parâmetros de corte foram mantidos constantes, a saber: velocidade de corte de 250 m/min, avanço de 0,16 mm/rev e profundidade de usinagem de 1,5 mm sendo que para as quatro barras a distância usinada foi de 1880 mm.

3.12 Análise do desgaste por meio da microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de energia dispersiva (EDS)

Em relação ao desgaste da ferramenta, foi realizada uma análise qualitativa com as imagens obtidas por meio do microscópio Mitutoyo ToolMarker's WF 15x na Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, unidade Contagem. As imagens das superfícies de saída e de folga foram editadas no software PhotoScape, versão 3.7, para recortes, alinhamento e ajustes dimensionais, de brilho e de contraste.

Logo após a análise das imagens obtidas por meio da microscopia ótica, buscou-se por técnicas que permitissem a caracterização do material. Neste trabalho, optou-se pela microscopia eletrônica de varredura (MEV) e pela análise por espectroscopia de energia dispersiva (EDS). Todas as imagens e análises foram feitas no Instituto Politécnico (IPUC) da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.

Inicialmente, as amostras foram inseridas numa solução de etanol PA em um equipamento ultrassônico Branson, modelo 1800, por 10 minutos, para a limpeza das amostras. Foi utilizado um microscópio JEOL, modelo JSM-IT300, como instrumento para a técnica de microscopia eletrônica de varredura, a qual permitiu a obtenção de uma imagem ampliada da amostra a partir da interação de um feixe de elétrons com o material (ORÉFICE; PEREIRA e MANSUR; 2012). O microscópio eletrônico de varredura utilizado para esta análise possuía um equipamento de microanálise acoplado - um detector do EDS Oxford Instruments, modelo X-Max^N - que possibilitou a obtenção dos constituintes em área da ordem de micrômetro ao quadrado. Para a geração e tratamento dos dados obtidos pelas técnicas de caracterização, utilizou-se o software AZtec.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados de todos os ensaios realizados neste trabalho serão apresentados na seguinte ordem: força de corte, rugosidade da superfície torneada, análise dos cavacos, temperatura de corte e desgaste da ferramenta de corte. Na análise estatística, considerou-se $\alpha = 0,05$ para todas as variáveis de resposta, isto é, um intervalo de confiança de 95%.

4.1 Força de corte

Para analisar os efeitos referentes à força de corte, V_c e a_p foram mantidos constantes, porque, uma vez que a obtenção da força de corte deu-se indiretamente, um aumento na V_c , sem o devido ajuste no diâmetro da peça, acarretaria em acréscimo da potência, não pela modificação dos parâmetros de entrada, mas sim pela característica do equipamento. O fato de V_c e a_p terem sido mantidos constantes garantiu a manutenção da mesma relação entre V_c e o diâmetro ao longo dos testes, e, por conseguinte, qualquer alteração na corrente consumida foi atribuída ao efeito que a mudança dos parâmetros de entrada gerou. Logo, variaram-se material da ferramenta de corte, geometria do quebra-cavaco e avanço, o que resultou num planejamento de experimentos para um fatorial completo 2^3 . O resultado dessa análise pode ser visto no Apêndice D. A Tabela 4.1 mostra apenas o p-valor para os efeitos principais e os efeitos combinados.

Tabela 4.1- ANOVA para a força de corte (f, material da ferramenta de corte e geometria do quebra-cavaco)

Fonte	p-valor
Material da Ferramenta	0,009
Geometria do Quebra-Cavaco	0,141
f [mm/rev]	0,000
Material da Ferramenta* Geometria do Quebra-Cavaco	0,000
Material da Ferramenta* f [mm/rev]	0,015
Geometria do Quebra-Cavaco * f [mm/rev]	0,000
Material da Ferramenta* Geometria do Quebra-Cavaco * f [mm/rev]	0,556

Fonte: o autor (2016)

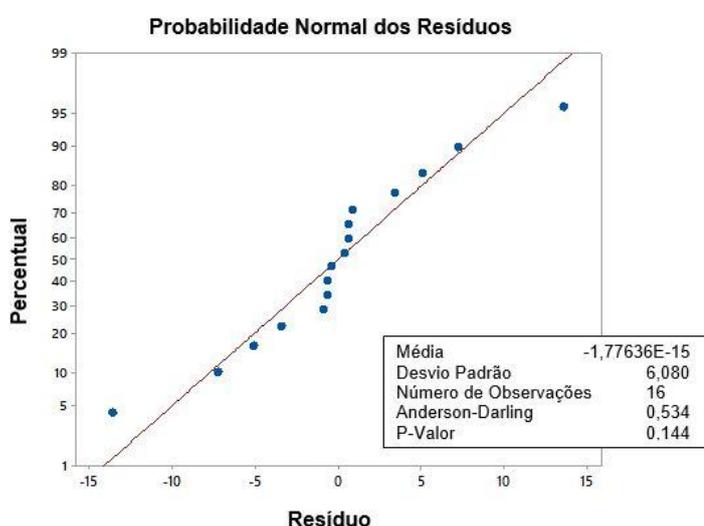
Entre os efeitos principais, material da ferramenta e avanço mostraram-se significativos ao nível de significância considerada. Quanto às interações de segunda ordem, todas apresentaram um p-valor menor que 0,05; a interação de terceira ordem, por outro lado, mostrou-se não significativa dentro do intervalo de confiança estudado. Logo, é possível constatar que existe uma correlação estatisticamente significativa, ao nível de confiança considerado, entre a mudança no avanço e no material da ferramenta de corte e entre as interações de segunda ordem e a variação da força de corte.

A fim de atestar os resultados da ANOVA, é necessário garantir que a distribuição de probabilidade, associada ao conjunto de dados da força de corte, pode ser aproximada pela distribuição normal. Para o teste de normalidade, foi utilizado o teste de Anderson-Darling, o qual, segundo Minitab (2016), apresenta as seguintes hipóteses:

- H_0 : Os dados seguem uma distribuição específica;
- H_1 : Os dados não seguem uma distribuição específica.

Se o valor de p for menor que o α escolhido, rejeita-se a hipótese nula de que os dados seguem determinada distribuição. Sendo assim, a Figura 4.1 apresenta o gráfico de probabilidade normal dos resíduos, bem como as saídas do teste de Anderson-Darling, para os dados da força de corte.

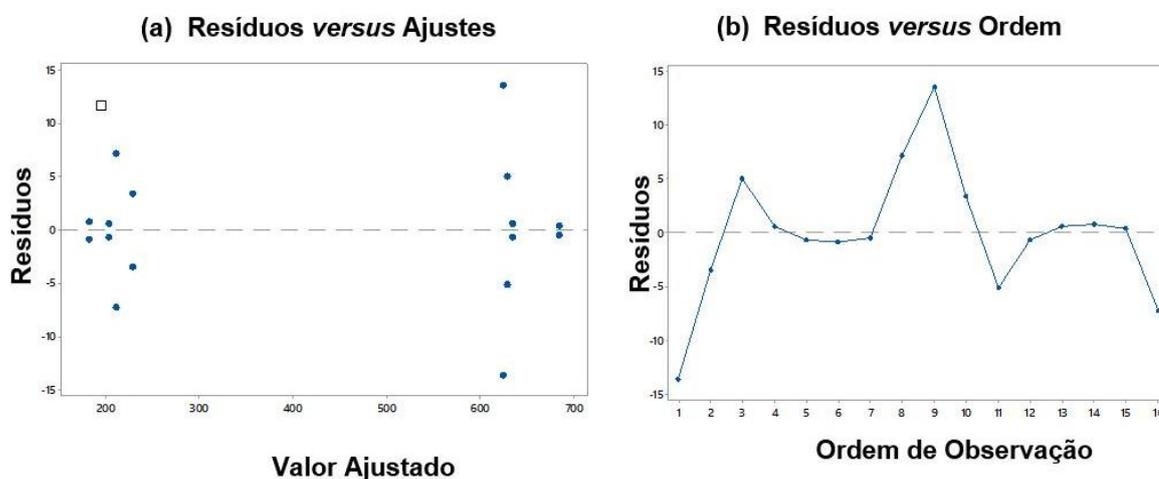
Figura 4.1 - Teste de Normalidade para força de corte



Fonte: o autor (2016)

Na Figura 4.1, é possível observar que os valores dos resíduos estão distribuídos em torno da linha reta de distribuição normal. Como o p-valor (0,144) é maior que o nível de significância ($\alpha=0,05$), aceita-se a hipótese nula, afirmando assim que os dados seguiram a distribuição normal. Barros Neto, Scarminio e Bruns (2010) asseguram que o exame dos resíduos é fundamental para avaliar a qualidade e o grau do ajuste do modelo. Os gráficos de resíduos são apresentados na Figura 4.2, para verificar a validade do modelo.

Figura 4.2- Análise residual do material da ferramenta de corte, geometria do quebra-cavaco e f para F_c

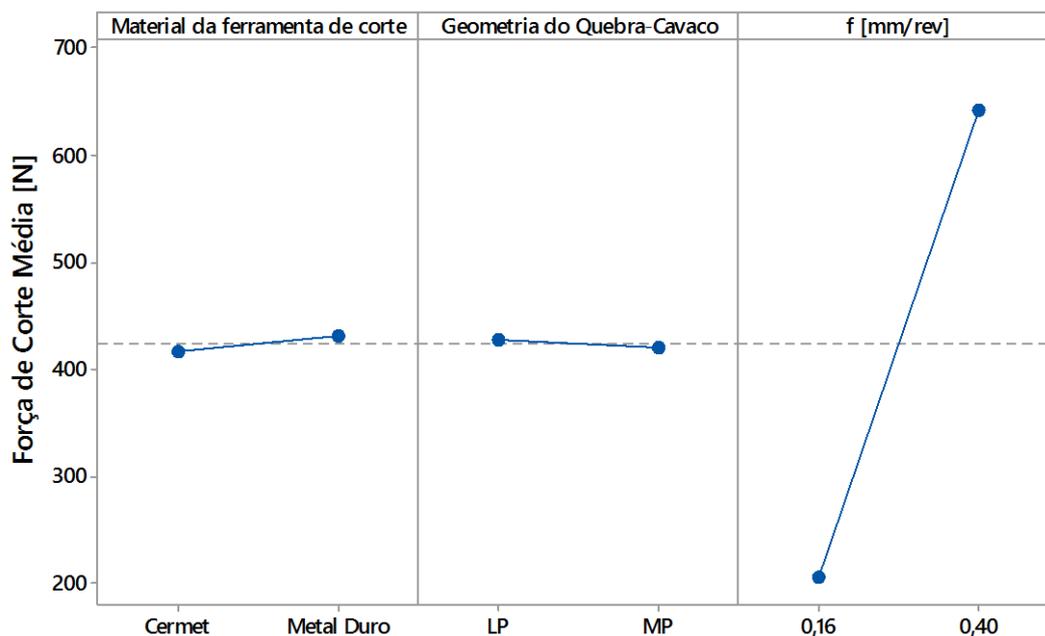


Fonte: o autor (2016)

A Figura 4.2 (a) mostra um espaço em branco após a força de corte de 200 N até o ponto 600 N, que indica a ausência de dados amostrais nessa região. Entretanto, ainda na Figura 4.2 (a), observa-se que a variação dos resíduos ao redor da linha de referência não seguiu nenhuma tendência específica, o que comprova que a variância foi constante. Na Figura 4.2 (b), é possível observar que para detectar que os resíduos estão distribuídos aleatoriamente em relação ao tempo. Por fim, o nível de explicação do modelo para a variação da força de corte foi de 99,86%. Logo, com base nas discussões acima, pode-se afirmar que os erros decorrentes do modelo foram aleatórios e que a regressão gerada pela ANOVA pode ser confirmada.

A Figura 4.3 mostra os efeitos principais, correlacionando as médias da força de corte com os níveis de cada variável de entrada.

Figura 4.3 - Gráfico de efeito principal para a força de corte (f , geometria do quebra-cavaco e material da ferramenta, $a_p = 1,5$ mm)

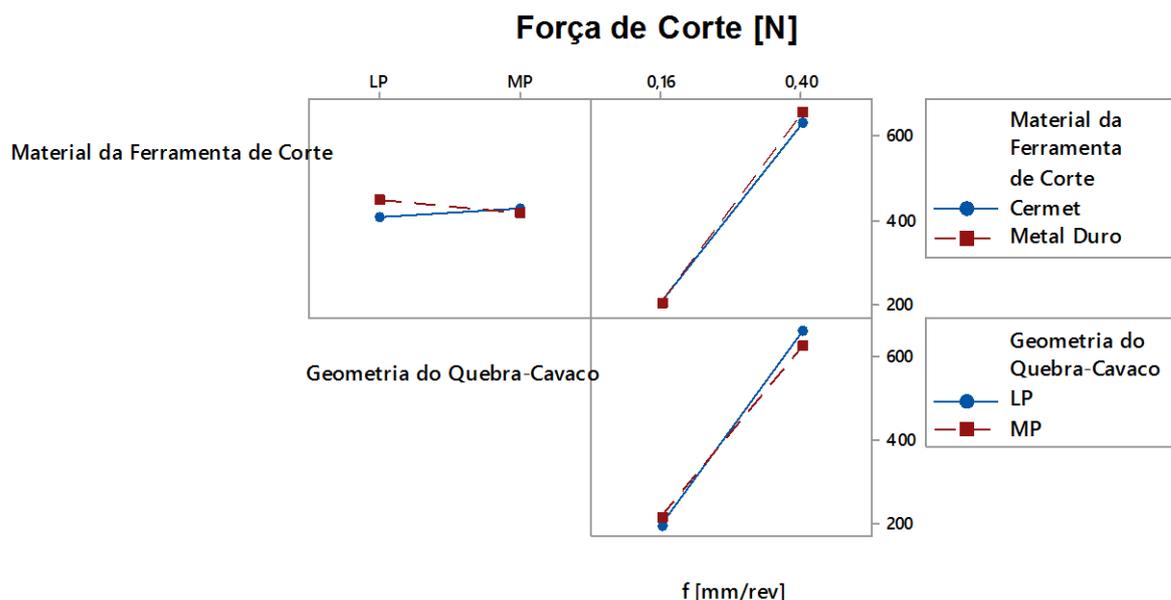


Fonte: o autor (2016)

Em relação ao material da ferramenta de corte, mesmo o efeito principal sendo considerado significativo ao nível de confiança, verificou-se uma curva levemente inclinada, sendo que os insertos de cermet apresentaram uma força de corte aproximadamente 5% menor em relação aos valores obtidos pelos insertos de metal duro. Diniz *et al.* (2006) afirmam que, com a variação do material da ferramenta, ocorre uma pequena variação do coeficiente de atrito entre cavaco e superfície de saída da ferramenta, afetando de maneira pouco significativa k_s . Retomando a ANOVA, verificou-se que o efeito principal da geometria do quebra-cavaco não foi significativo ao nível de confiança do modelo - fato ilustrado com a curva quase paralela à linha média geral no gráfico de efeito principal. Tal fato corrobora os estudos de Mills e Redford (1983), que afirmam que quebra-cavacos do tipo anteparo trabalhando sob condições normais de usinagem, quando comparados a superfícies de saída planas, não afetam significativamente as forças de usinagem. Por fim, para o avanço, observou-se que, apesar do aumento de f sugerir uma diminuição da pressão específica de corte (k_s), maiores valores de f proporcionam aumento da área da seção de corte, ocasionando, por conseguinte, o aumento da F_c .

Na Figura 4.4, está o gráfico de interação de segunda ordem entre f , a geometria do quebra-cavaco e o material da ferramenta de corte e a resposta na força de corte.

Figura 4.4 - Gráfico de interação de segunda ordem para a força de corte (f , material da ferramenta de corte e geometria do quebra-cavaco)



Fonte: o autor (2016)

Em relação ao material da ferramenta de corte, verificou-se que, para $f=0,16$ mm/rev, cermet e metal duro apresentam forças de corte médias semelhantes. Para $f=0,40$ mm/rev, metal duro mostrou F_c ligeiramente superior ao cermet. Para a interação entre material da ferramenta de corte e geometria do quebra-cavaco, a ferramenta de cermet apresentou o menor valor de F_c para a configuração LP; já para o quebra-cavaco, MP não é possível diferenciar, dado que foram encontrados valores bem próximos de F_c . Pressupõe-se que o fato de a camada externa de revestimento do cermet e do metal duro serem a mesma (TiN) e não terem sofrido desgaste aparente durante o corte contribuiu para que essa diferença na F_c não fosse maior. Por fim, acredita-se que o melhor desempenho da ferramenta cermet está relacionado à técnica de revestimento PVD, pela qual os inserts foram submetidos. Essa técnica, realizada em temperatura inferior ao processo CVD,

garante a mesma tenacidade, mesma configuração da aresta de corte e mesma precisão, quando comparada à das ferramentas sem revestimento.

Em relação ao material da ferramenta de corte, observou-se que, para a geometria de quebra-cavaco LP, o cermet apresentou menor F_c ; já para a geometria MP não foi possível verificar significativa alteração em relação à mudança de material. Ao se considerar o avanço, para $f=0,16$ mm/rev, o uso de cermet ou de metal duro não causou modificações significativas em F_c . Para $f=0,40$ mm/rev, ocorreu uma sensível redução na F_c quando a ferramenta de cermet foi utilizada. Justificam-se tais comportamentos por meio da menor condutividade térmica do cermet, que levou ao aumento do calor no plano de cisalhamento e conseqüente efeito de amolecimento. Como explica Machado *et al.* (2015), a elevação da temperatura nas zonas de corte primária e secundária, quando se usina com ferramenta de cermet, pode ser benéfica ao diminuir a resistência mecânica do material da peça de trabalho para auxiliar a continuação da deformação plástica e da ruptura do cavaco.

Neste estudo, os quebra-cavacos operaram em condições determinadas pelo fabricante, tanto para f quanto para a a_p , como é possível verificar nas Figuras 3.2 e 3.3. Tal condição não permitiu que F_c sofresse alterações de maneira significativa. Entretanto, a interação entre a geometria do quebra-cavaco e f mostrou-se significativa, sendo que, para $f=0,16$ mm/rev, os valores de F_c foram bem próximos, mas destacando-se o quebra-cavaco LP com um valor um pouco menor. Para $f=0,40$ mm/rev, essa diferença já se mostrou maior, confirmando o quebra-cavaco LP com a maior força. Quando se verificam as Figuras 3.2 e 3.3, percebe-se que o quebra-cavaco LP, destinado para a usinagem leve, está trabalhando em seu limite superior quando empregado $f=0,40$ mm/rev e bem próximo de seu maior valor admitido para a a_p . Já MP, desenvolvido para a usinagem média, opera com folga em relação aos intervalos de trabalho estabelecidos para a_p e f . Logo, pressupõe-se que o maior valor de F_c deve-se aos rígidos valores estabelecidos para os parâmetros de corte, quando analisadas as recomendações do fabricante.

4.2 Rugosidade da superfície torneada

Os seguintes parâmetros foram disponibilizados pelo rugosímetro a cada leitura: desvio aritmético médio (R_a), desvio médio quadrático (R_q) e altura total do perfil (R_t). Contudo, somente os resultados relativos ao R_q serão apresentados, visto que foram semelhantes aos resultados e análises realizados para o R_a . O parâmetro R_t não será apresentado, dado que seu uso como parâmetro de avaliação é menos frequente na indústria.

4.2.1 Desvio médio quadrático (R_q)

O desvio médio quadrático R_q representa a “raiz quadrada da média dos valores das ordenadas no comprimento de amostragem” (MACHADO *et al.*, 2015, p. 312). Este parâmetro tem o efeito de ampliar os valores dos picos e dos vales isolados, o que possibilita realçar defeitos em superfícies bem-acabadas.

A análise estatística dos efeitos foi feita também para o parâmetro R_q , usando o mesmo método da força de corte, e o resultado é apresentado resumidamente na Tabela 4.2. A análise de variância completa foi realizada no Minitab[®] e está retratada no Apêndice D.

Tabela 4.2- ANOVA para a rugosidade (f, material da ferramenta de corte e geometria do quebra-cavaco)

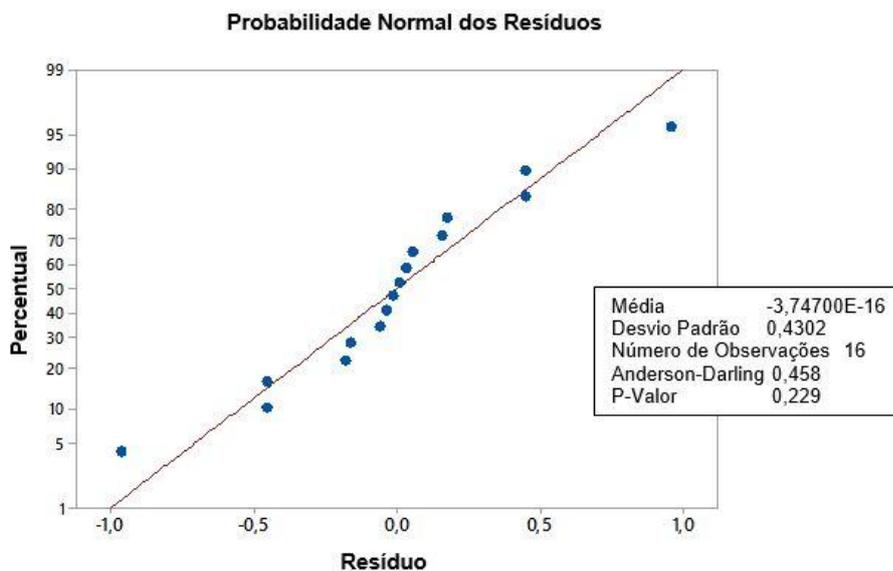
Fonte	p-valor
f [mm/rev]	0,000
Material da Ferramenta	0,671
Geometria do Quebra-Cavaco	0,182
f [mm/rev]*Material da Ferramenta	0,225
f [mm/rev]* Geometria do Quebra-Cavaco	0,799
Material da Ferramenta* Geometria do Quebra-Cavaco	0,659
f [mm/rev]*Material da Ferramenta* Geometria do Quebra-Cavaco	0,641

Fonte: o autor (2016)

Neste caso, constatou-se que somente o efeito principal f influencia significativamente, ao nível de confiança estabelecido pelo modelo, a rugosidade da superfície torneada, uma vez que foi o único parâmetro que apresentou um p-valor

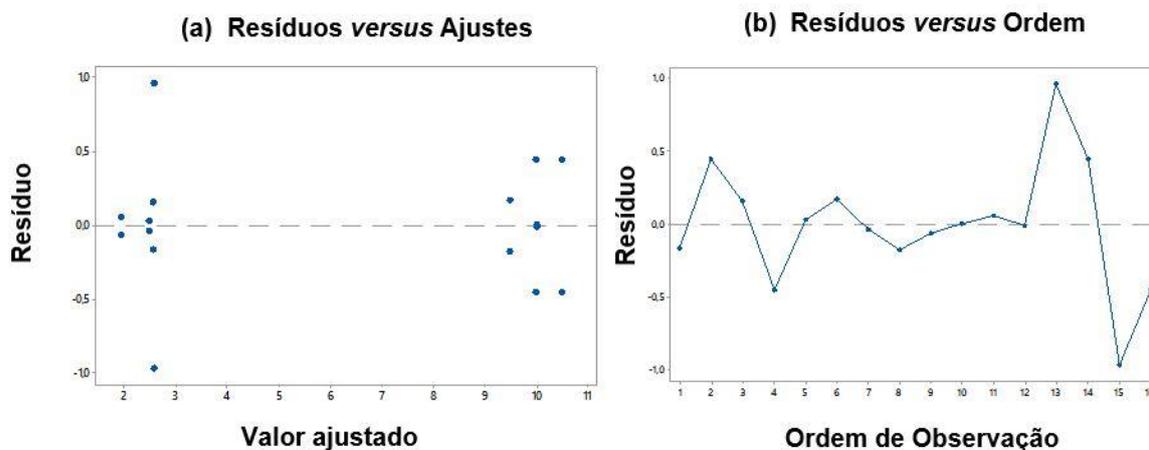
inferior a 0,05. Assim, infere-se que nem a mudança no material da ferramenta de corte ou na geometria do quebra-cavaco e nem as interações são suficientes para influenciar significativamente o valor de Rq. O teste de normalidade e os gráficos de resíduos são apresentados nas Figuras 4.5 e 4.6, respectivamente, para verificar a validade do modelo.

Figura 4.5 - Teste de Normalidade para rugosidade (Rq)



Fonte: o autor (2016)

Figura 4.6 - Análise residual do material da ferramenta, geometria do quebra-cavaco e f para rugosidade (Rq)

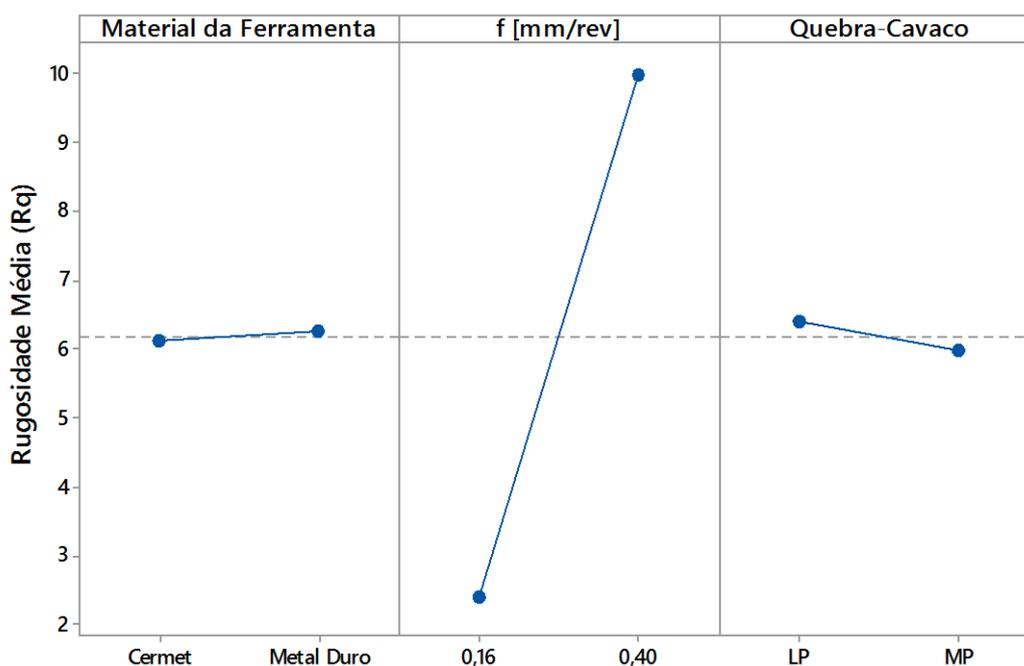


Fonte: o autor (2016)

Em relação à Figura 4.6, verifica-se que a saída do teste de Anderson-Darling para o p-valor foi de 0,229, atestando a normalidade dos dados. Na Figura 4.6 (a), existe um espaço em branco após a rugosidade de $3\mu\text{m}$ até o ponto $8\mu\text{m}$, indicando inexistência de dados amostrais nessa região. Mas, ainda na Figura 4.6 (b), é possível observar que os resíduos estão distribuídos aleatoriamente em relação ao tempo e não exibem um padrão óbvio. Logo, os gráficos de resíduos apresentados permitem afirmar que os erros decorrentes do modelo foram aleatórios e que a regressão gerada pela ANOVA pode ser confirmada, dado que o nível de explicação do modelo para a variação da rugosidade foi de 97,79%.

A Figura 4.7 mostra os efeitos principais, correlacionando as médias do desvio médio quadrático (R_q) com os níveis de cada variável de entrada.

Figura 4.7 - Gráfico de efeito principal para R_q (f, geometria do quebra-cavaco e material da ferramenta, $a_p = 1,5\text{ mm}$)



Fonte: o autor (2016)

Quanto ao material da ferramenta e à geometria do quebra-cavaco, a curva gerada é pouco inclinada, quase paralela à linha média geral, indicando que tais efeitos principais não foram suficientes para gerar mudanças significativas no R_q , confirmando, assim, a ANOVA realizada anteriormente.

Em relação ao parâmetro f , nota-se que a mudança de nível afeta consideravelmente a média de R_q , sendo a taxa de crescimento semelhante tanto para $f = 0,16$ mm/rev quanto para $f = 0,40$ mm/rev. O aumento do f em cerca de 2,5 vezes levou a um ganho de 5 vezes na rugosidade média da superfície, o que corrobora 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. Já Shaw (1997) realça a atenção ao demonstrar que, no torneamento do aço AISI 1045 com ferramenta de metal duro, o melhor acabamento não ocorreu no menor valor de avanço (0,05 mm/rev), mas no valor de 0,1 mm/rev. O autor explica esse fato por meio da energia de corte por unidade de volume (u) e dos esforços que aumentam rapidamente sobre a face da ferramenta quando o avanço é menor que 0,1 mm/rev, causando maior fluxo lateral a partir da borda de corte ao longo da aresta de corte secundária.

4.3 Análise dos cavacos

O Quadro 4.1 apresenta os cavacos gerados para os diferentes avanços, materiais de ferramentas de corte e geometria de quebra-cavacos testados. A princípio, em relação à forma, verificou-se que esta foi instável, variando muito facilmente mesmo quando apenas um parâmetro sofria alguma alteração. De acordo com a classificação estabelecida pela norma ISO 3685 *apud* Machado *et al.*, (2015), os cavacos podem ser caracterizados da seguinte maneira: para cavaco em arco conectado cermet LP ($a_p=0,16$ mm/rev), cermet MP e metal duro MP ($a_p=0,40$ mm/rev), cavaco em arco solto para cermet LP ($a_p=0,40$ mm/rev), metal duro MP ($a_p=0,16$ mm/rev e $a_p=0,40$ mm/rev) e cavaco helicoidal curto para metal duro MP ($a_p=0,40$ mm/rev) cavaco fragmentado e cermet MP ($a_p=0,16$ mm/rev).

Quadro 4.1 - 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: o autor (2016)

Pode-se observar, no Quadro 4.1, que 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. Observou-se que, para $f = 0,16$ mm/rev, a espessura do cavaco apresentou valores bem inferiores em relação aos obtidos para $f = 0,40$ mm/rev, independentemente do material da ferramenta de corte e do tipo de quebra-cavaco. Logo, notou-se que a quebra do cavaco foi facilitada pelo aumento da espessura deste (h'), ou seja, do grau de recalque da operação. Quanto menor h' , mais flexíveis são os cavacos e, portanto, se tornam mais difíceis para se quebrar.

Em relação à geometria de quebra-cavaco, o tipo MP para o inserto de cermet no avanço de 0,16 mm/rev apresentou a forma mais distinta entre as demais. O quebra-cavaco MP, desenvolvido para operações de usinagem média, apresenta

uma maior superfície de contato com o cavaco, como pode ser observado no corte transversal descrito nas Figuras 3.2 e 3.3. Essa característica, associada à baixa condutividade térmica do material, permitiu que grande parte do calor gerado entre o cavaco e a superfície da ferramenta fosse transferida para o cavaco. Menor avanço, pequena h' e o calor contribuindo para a redução da resistência ao cisalhamento favoreceram o aumento da ductibilidade do material, dificultando sua quebra.

Em relação à coloração, cavacos provenientes do avanço igual a 0,16 mm/rev apresentaram coloração azul, e aqueles de 0,40 mm/rev, cor dourada. A cor azul está relacionada a uma fina camada de óxido que é formada poucos segundos após a constituição do cavaco na presença de maiores temperaturas. A justificativa para a coloração azul na condição de menor nível de avanço deve-se ao fato de a espessura do cavaco ser menor, o que fez com que este ficasse represado por um maior tempo e, assim, apresentasse maior oxidação.

Controlar o cavaco significa contribuir para o ganho de produtividade na fabricação. Entre outros agravantes, cavacos longos podem ocasionar situações de perigo ao trabalhador, prejudicar o acabamento superficial, aumentar a força de usinagem, a temperatura e o desgaste da ferramenta. Nesse sentido, os fabricantes de ferramentas de corte geralmente apresentam um gráfico que correlaciona as variáveis a_p e f , como mostram as Figuras 3.2 e 3.3, a fim de indicar o limite de controle do cavaco, de acordo com as condições de corte e com o material da peça. Utilizar parâmetros que estejam dentro daqueles intervalos recomendados contribuirá para evitar prejuízos em vários aspectos, inclusive na forma do cavaco. O Quadro 4.1 apenas corrobora as sugestões do fabricante ao evidenciar os tipos de cavaco gerados pelas combinações dos parâmetros, porém, as análises demonstram o melhor desempenho do metal duro.

4.4 *Temperatura do cavaco*

Para analisar os efeitos referentes à temperatura do cavaco, f e a_p foram mantidos constantes, variando-se então a V_c , visto que não existe a necessidade de manter constante a rotação do motor como anteriormente, o material da ferramenta de corte e a geometria do quebra-cavaco, o que resultou num planejamento de

experimentos para um fatorial $3^1 2^2$. O resultado completo dessa análise pode ser visto no Apêndice D. A Tabela 4.3 mostra apenas o p-valor para os efeitos principais e os efeitos combinados.

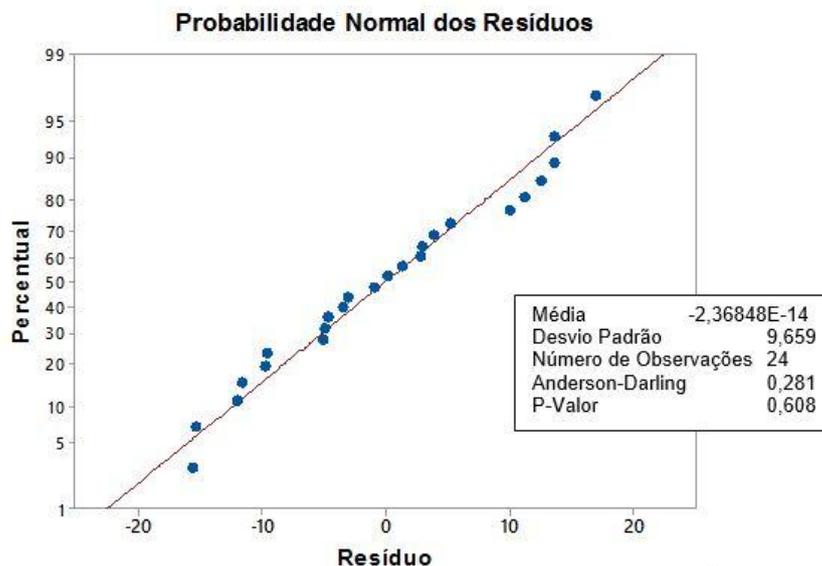
Tabela 4.3 - ANOVA para a temperatura (V_c , material da ferramenta e geometria do quebra-cavaco)

Fonte	p-valor
Material da Ferramenta	0,000
Geometria do Quebra-Cavaco	0,000
Velocidade de Corte [m/min]	0,000
Material da Ferramenta* Geometria do Quebra-Cavaco	0,102
Material da Ferramenta*Velocidade de Corte [m/min]	0,015
Geometria do Quebra-Cavaco *Velocidade de Corte [m/min]	0,327
Material da Ferramenta* Geometria do Quebra-Cavaco *Velocidade de Corte [m/min]	0,356

Fonte: o autor (2016)

Ao observar a Tabela 4.3, verifica-se que todos os efeitos principais (velocidade de corte, material da ferramenta de corte e geometria do quebra-cavaco) e a interação de segunda ordem entre tipo de material de ferramenta e V_c apresentaram um p-valor menor que 0,05, o que remete à existência de uma correlação estatisticamente significativa entre o nível de confiança considerado pelo teste e a variação da temperatura de corte. Já as demais interações mostraram-se não significantes ao nível de confiança estabelecido pelo modelo. A Figura 4.8 apresenta o gráfico de probabilidade normal dos resíduos, bem como as saídas do teste de Anderson-Darling, como forma de atestar a normalidade dos dados da temperatura.

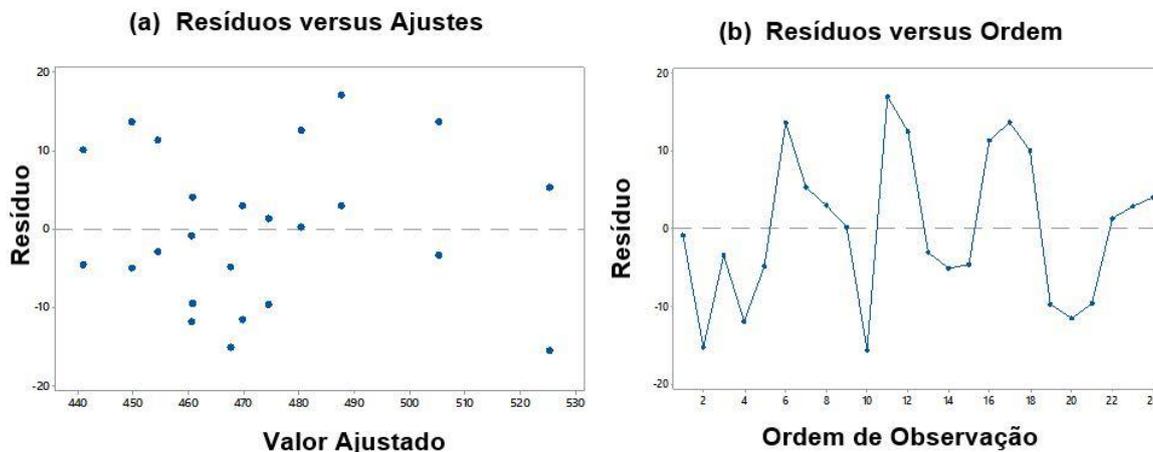
Figura 4.8 - Teste de Normalidade para temperatura do cavaco



Fonte: o autor (2016)

Na Figura 4.8, observa-se que os valores dos resíduos variaram em torno da linha reta de distribuição normal. Como o p-valor (0,608) foi maior que o nível de significância ($\alpha=0,05$), aceitou-se a hipótese nula, afirmando assim que os dados seguiram a distribuição normal. Os gráficos de resíduos são apresentados na Figura 4.9, para verificar a validade do modelo. Na Figura 4.9 (a), confirma-se a pressuposição de que os resíduos possuem variância constante, e na Figura 4.9 (b), os resíduos não estão correlacionados, dado que estão distribuídos de forma aleatória. O nível de explicação do modelo, considerando-se as variáveis e interações significativas ao nível de 95% de confiança para a variação da temperatura, foi de 80,30%. Sendo assim, pode-se afirmar que os erros decorrentes do modelo foram aleatórios e que a regressão gerada pela ANOVA pôde ser confirmada.

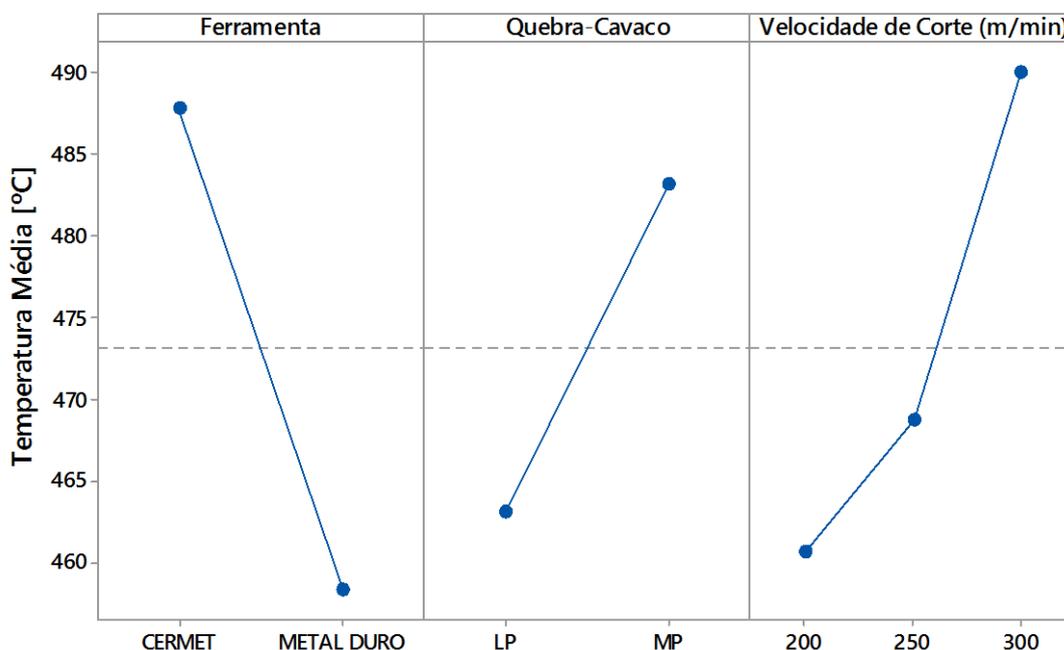
Figura 4.9 - Análise residual do material da ferramenta de corte, geometria do quebra-cavaco e f para Temperatura do cavaco



Fonte: o autor (2016)

O gráfico da Figura 4.10 mostra os efeitos principais V_c , material da ferramenta de corte e geometria do quebra-cavaco e a resposta na temperatura de corte.

Figura 4.10 - Gráfico de efeito principal para a temperatura (V_c , material da ferramenta e geometria do quebra-cavaco)



Fonte: o autor (2016)

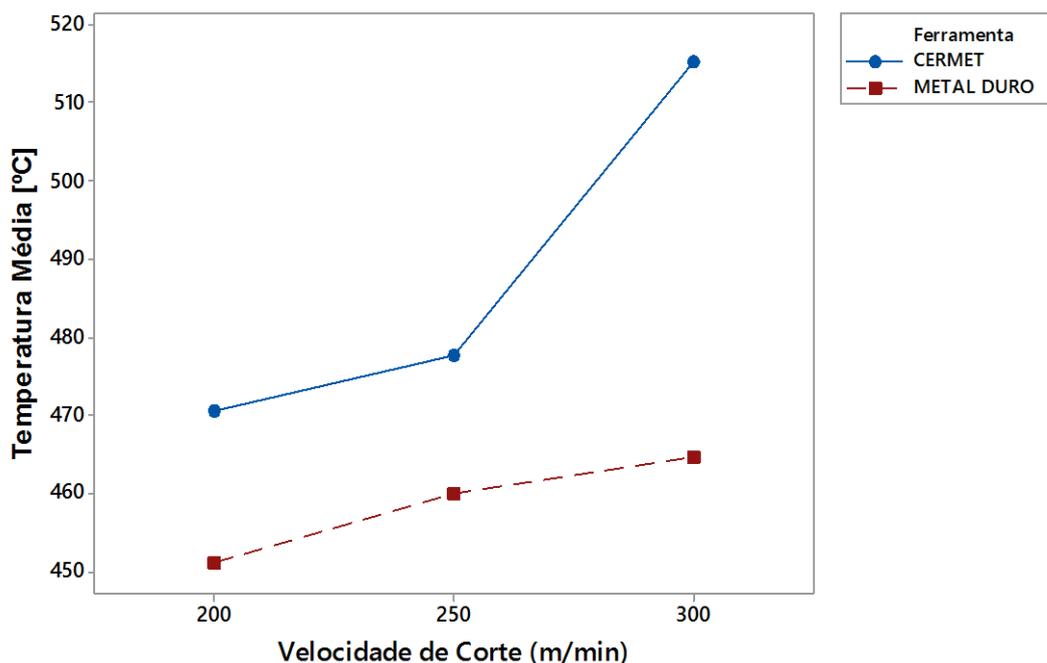
Em relação ao parâmetro material da ferramenta, nota-se que a mudança de material afeta consideravelmente a média de temperatura, sendo os valores

alcançados pelas ferramentas de cermet superiores às do metal duro. Dado que a condutividade térmica do cermet é aproximadamente 12% do valor do metal duro, conforme verificado na Tabela 2.2, o calor gerado durante a operação de corte na interface cavaco-ferramenta da ferramenta de cermet é transferido, em sua grande maioria, para o cavaco, explicando assim o resultado encontrado, sabendo-se que o ponto focal estava localizado sobre o local de formação do cavaco.

Já em relação à geometria do quebra-cavaco, verifica-se que a configuração LP foi aquela que garantiu a menor temperatura do cavaco. O quebra-cavaco LP foi desenvolvido para a usinagem leve, e o MP, para a usinagem média. Como é possível observar nas Figuras 3.2 e 3.3, no corte transversal dos insertos com quebra-cavaco MP, percebe-se uma fase negativa maior que a do quebra-cavaco LP (0,15 mm e 0,1 mm, respectivamente), o que ocasionou um comprimento de contato mais extenso e com maior resistência. Tal condição proporcionou maior esforço para a formação do cavaco, elevou a transferência de calor para a interface e, conseqüentemente, provocou maiores temperaturas no cavaco.

Quanto à velocidade de corte, nota-se que o aumento desta levou a um aumento da temperatura. Esse fato deve-se ao incremento da taxa de remoção de material por meio do aumento da V_c (conforme Equação 2.1), ocasionando o aumento do calor gerado. Porém, vê-se que a mudança de nível de V_c leva a uma taxa de crescimento da temperatura diferente para os intervalos 200-250 m/min e 250-300 m/min, sendo maior neste último. De acordo com Shaw (1997), a fração de energia que vai para o cavaco eleva-se com o aumento de V_c ; já as frações transferidas para a ferramenta de corte e para a peça de trabalho diminuem. Sob velocidades de corte muito altas, praticamente toda a energia é levada no cavaco, uma pequena quantidade é transferida para a peça de trabalho e uma quantidade menor ainda para a ferramenta de corte. Logo, no intervalo 200-250 m/min, o aumento da temperatura mostra-se menos acentuado porque parte do calor está sendo dissipada pela peça de trabalho, e, no intervalo 250-300m/min, essa porção aumenta, sendo a gradiente de temperatura gerada pelo aumento de V_c transferido em grande parte para o cavaco.

Na Figura 4.11, observa-se o gráfico de interação de segunda ordem entre velocidade de corte e material da ferramenta e a resposta na temperatura do cavaco.

Figura 4.11 - Gráfico de interação para a temperatura (V_c e material da ferramenta)

Fonte: o autor (2016)

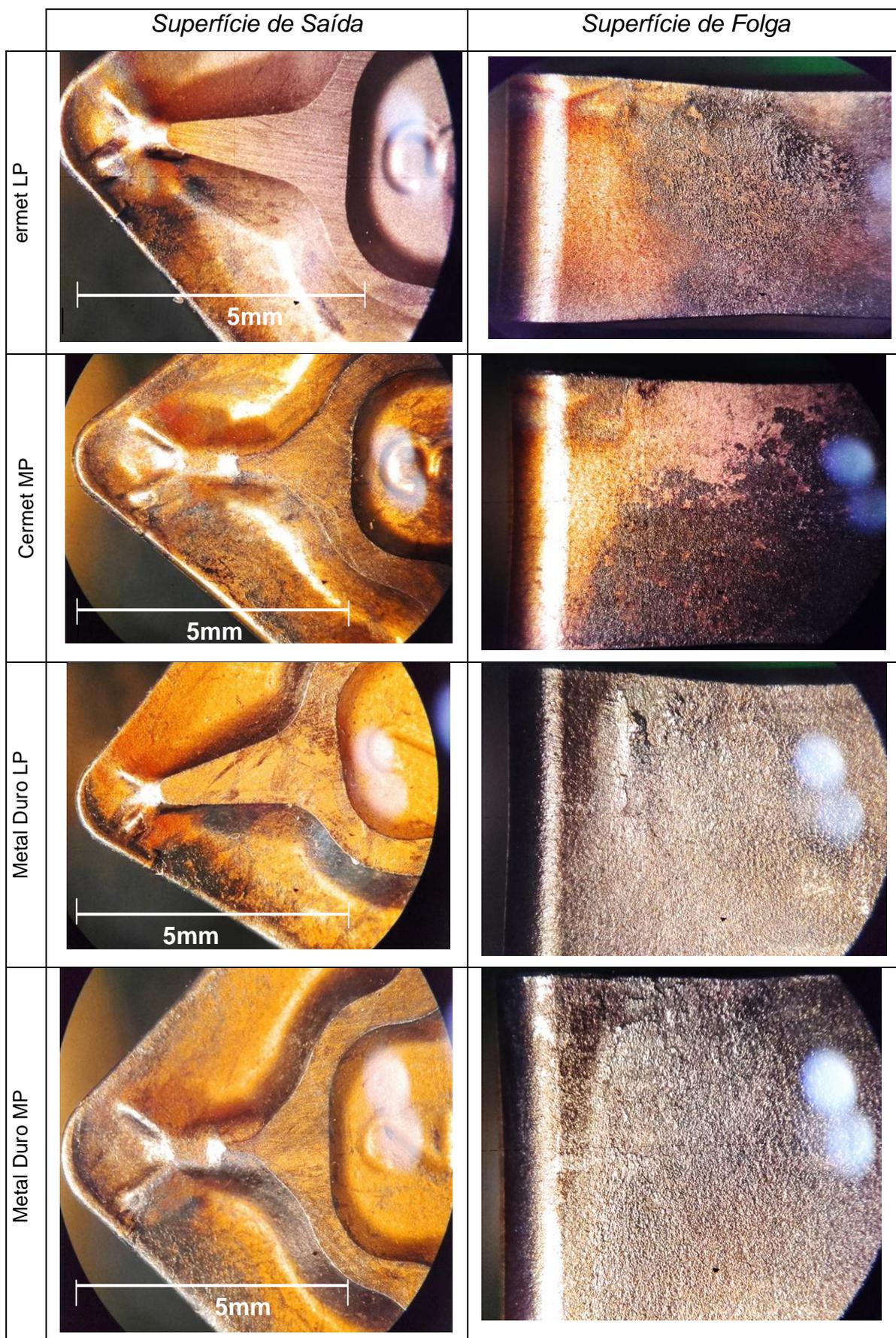
Da Figura 4.11 é possível, mais uma vez, confirmar a relação de significância entre os efeitos principais V_c e material de ferramenta de corte e a resposta na temperatura de corte. Entretanto, é possível perceber que a temperatura apresentou uma taxa de crescimento constante, dado o aumento da V_c para o metal duro. Mas, para o cermet, este crescimento não foi constante, acentuando-se no intervalo 250-300 m/min. Com base na discussão anterior, no intervalo 200-300 m/min para o metal duro, supõe-se que a porção de calor dissipada pela peça de trabalho e pelo cavaco mantém-se constante; já para o cermet, a porção de calor dissipada pelo cavaco aumenta no intervalo 250-300 m/min.

Outra análise possível baseia-se na condutividade térmica dos materiais. Como dito anteriormente, o calor gerado durante a operação é dissipado por meio do cavaco, da peça de trabalho e do meio ambiente, sendo o restante transferido para a ferramenta de corte. Nesse sentido, ao comparar metal duro e cermet, devido à baixa condutividade térmica deste, mesmo com o aumento de V_c , a quantidade de calor transferida para a ferramenta de cermet é menor que para o metal duro, elevando-se, dessa forma, a quantidade dissipada pelo cavaco, o que resulta na elevação da temperatura detectada pelo sistema utilizado neste trabalho.

A energia gasta no processo de formação de cavacos é percebida na forma de calor nas zonas primária, secundária e terciária. Wright, Horne e Tabor (1978) afirmam que a zona secundária, na interface entre o cavaco e a superfície de saída da ferramenta, contribui para a energia consumida durante o corte, de forma que as quantidades de calor conduzidas para a ferramenta e o processo de desgaste desta estão associados com as condições tribológicas desta região. Nesse sentido, Machado *et al.* (2015) afirmam que o calor gerado na zona secundária de cisalhamento tem maior influência sobre o desempenho da ferramenta e é praticamente fator limitante para a taxa de remoção de material, em especial por meio do aumento de V_c . Logo, para este trabalho, infere-se que o calor gerado nessa região, quando a usinagem ocorria com o metal duro, foi transferido para a ferramenta em taxas constantes, no intervalo estudado. Já quando se utilizou a ferramenta de cermet, sua baixa condutividade térmica dificultou a transferência do calor da zona secundária para a ferramenta, elevando-se a quantidade transferida para o cavaco.

4.5 *Desgaste da ferramenta de corte*

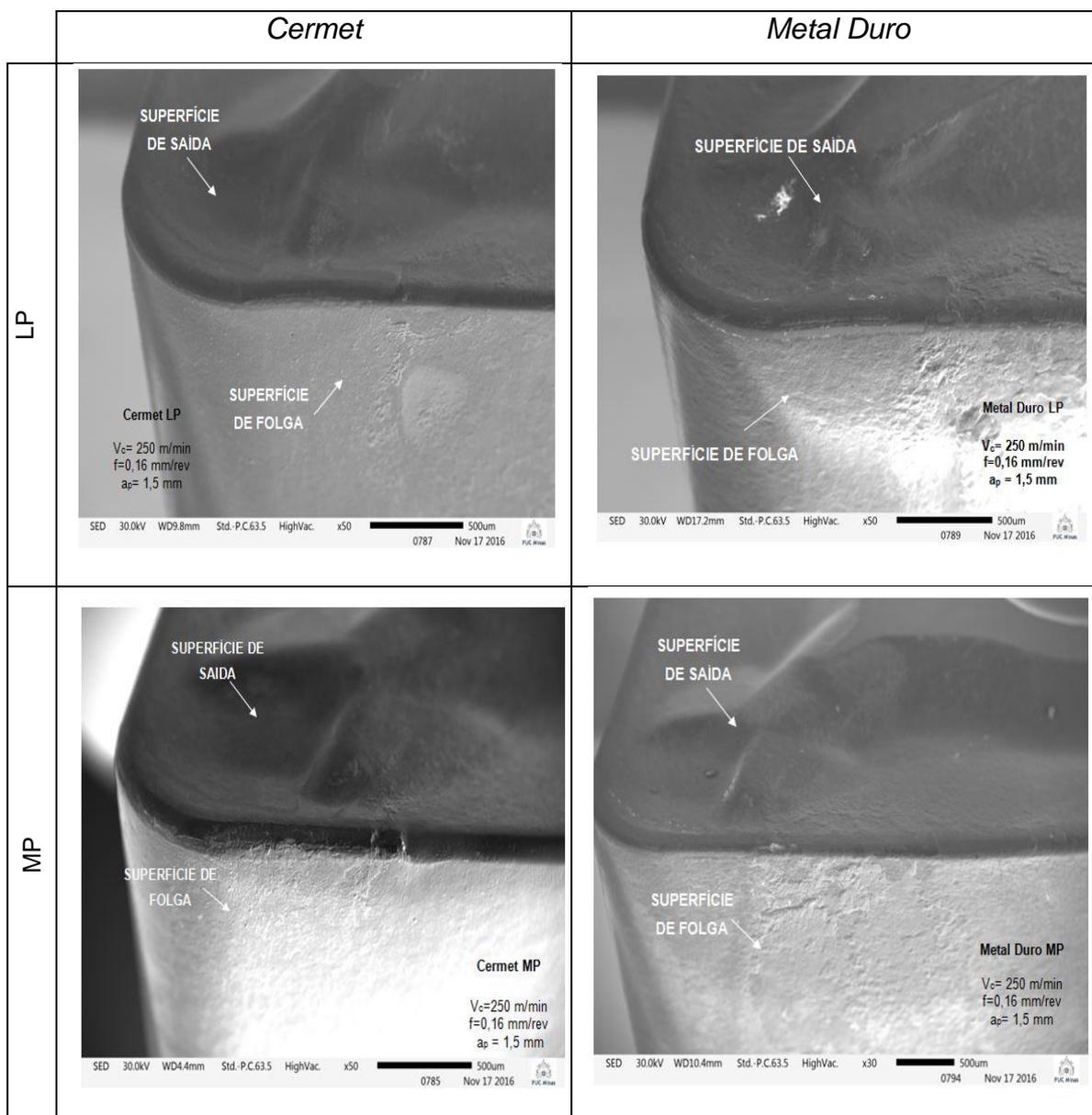
O Quadro 4.2 apresenta as imagens obtidas pela microscopia ótica para as superfícies de folga e de saída para os diferentes materiais de ferramenta e geometria de quebra-cavacos testados.

Quadro 4.2 - Imagem dos insertos ($V_c = 250$ m/min, $f = 0,16$ mm/rev, $a_p = 1,5$ mm)

Fonte: O autor (2016)

Inicialmente, verifica-se que não ocorreu nenhum tipo de avaria (quebra, lascamento ou trinca) em nenhuma das ferramentas analisadas para os parâmetros de corte estabelecidos. Além disso, não é possível afirmar se ocorreu desgaste de flanco, de cratera ou entalhe por meio das imagens obtidas. O Quadro 4.3 contém as imagens das superfícies das ferramentas de corte obtidas por meio da microscopia eletrônica de varredura (MEV), de maneira a realçar as superfícies de saída e de folga. De maneira geral, corroborando as imagens obtidas na microscopia ótica, não foi possível afirmar a ocorrência de desgaste nem descrever possíveis mecanismos de desgaste. As imagens obtidas por meio do MEV não revelaram comportamento superior do inserto de metal duro com revestimento triplo quando comparado ao cermet com camada única de cobertura. Supõe-se que o fato de nenhum inserto ter apresentado desgaste de flanco, cratera ou entalhe evidenciar critérios de fim de vida ou falha catastrófica deveu-se à pouca distância usinada, associada aos parâmetros de corte estabelecidos para a realização dos testes que estavam dentro dos intervalos recomendados pelo fabricante.

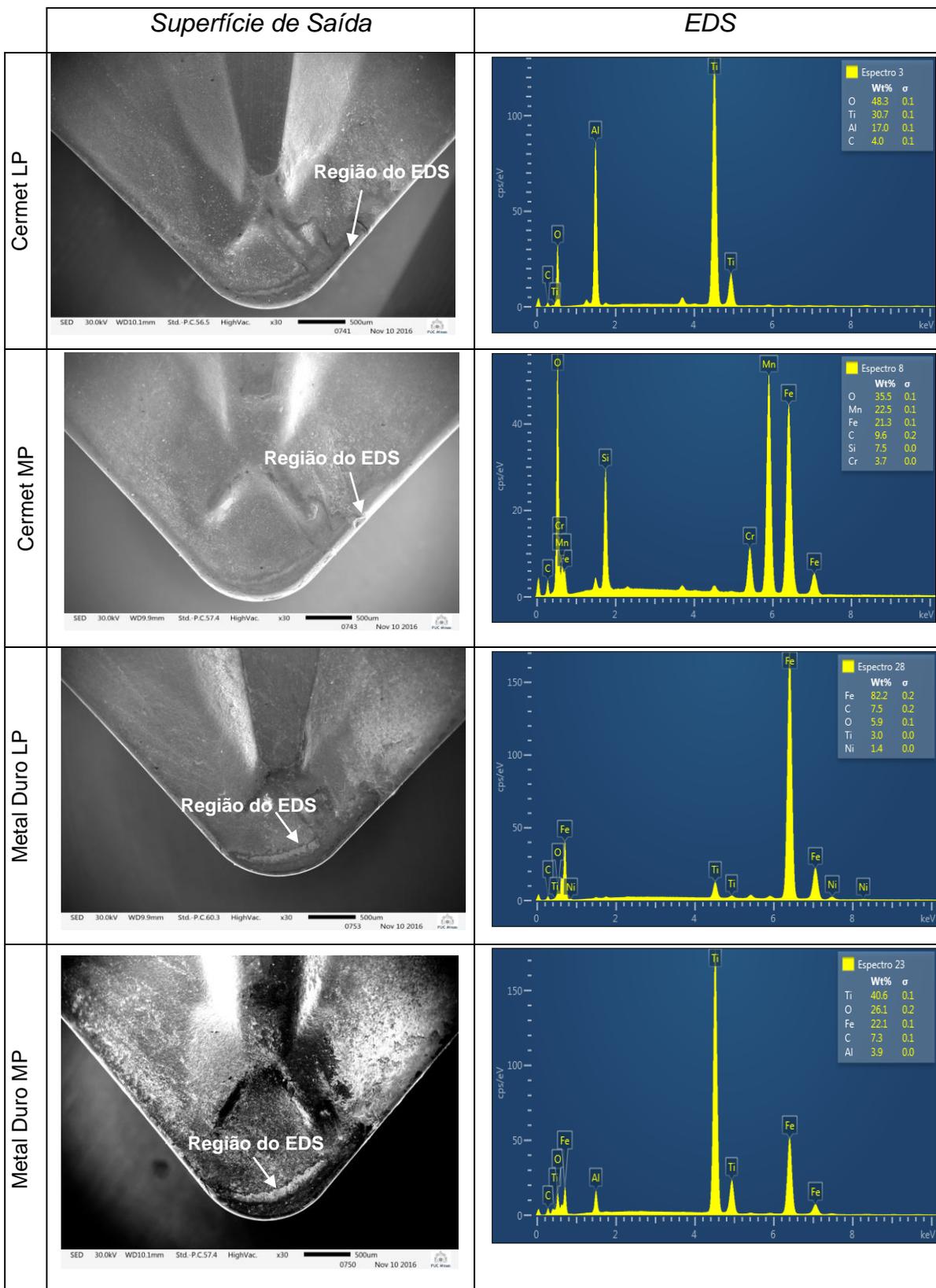
Quadro 4.3 - Imagem das superfícies dos inserts ($V_c= 250$ m/min, $f=0,16$ mm/rev, $a_p = 1,5$ mm)



Fonte: O autor (2016)

Por meio das imagens obtidas pela microscopia ótica (Quadro 4.2), sugere-se que, em todas as superfícies de saída e na superfície de folga do cermet MP, iniciou-se um processo de retirada do revestimento, e que, na superfície de folga do cermet LP, ocorreu a adesão de material. Essas suposições poderão ser comprovadas ou rechaçadas por meio da análise EDS, conforme imagens organizadas nos Quadros 4.4 e 4.5.

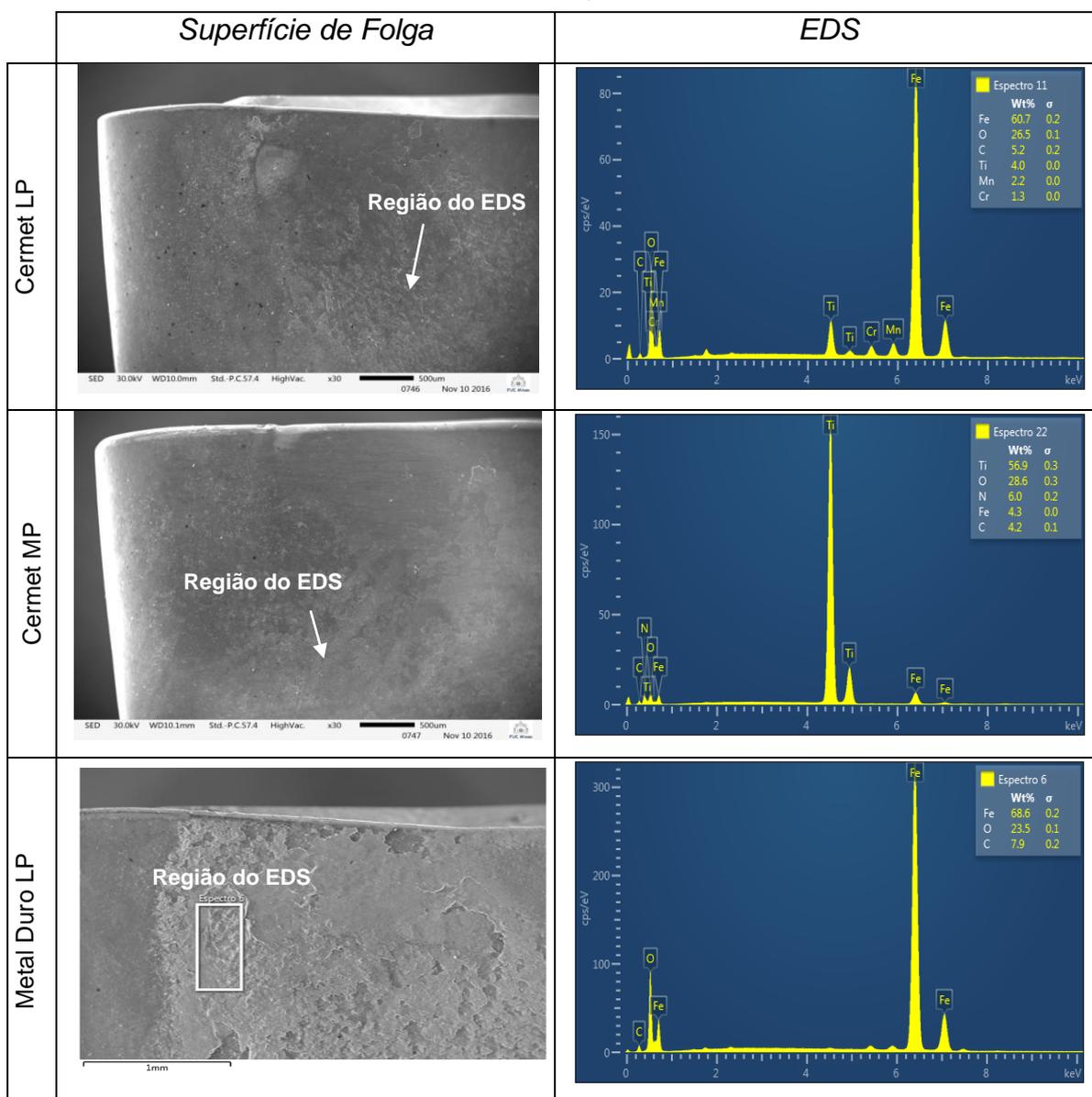
Quadro 4.4 - Imagem das superfícies de saída dos inserts e análise EDS ($V_c = 250$ m/min, $f = 0,16$ mm/rev, $a_p = 1,5$ mm)

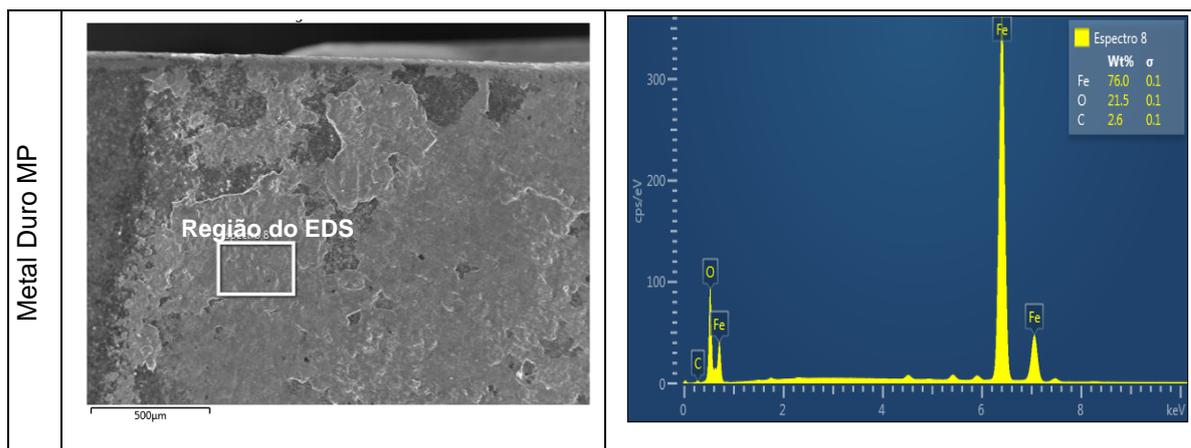


Fonte: O autor (2016)

As imagens buscaram caracterizar regiões da superfície de saída onde estiveram presentes as zonas de aderência e escorregamento. A ocorrência dos elementos ferro, manganês, silício, enxofre, cromo, alumínio e carbono, todos presentes na composição química da peça, elucida a adesão de material dos cavacos. Por fim, o Quadro 4.5 apresenta as imagens das superfícies de folga com respectivas análises EDS.

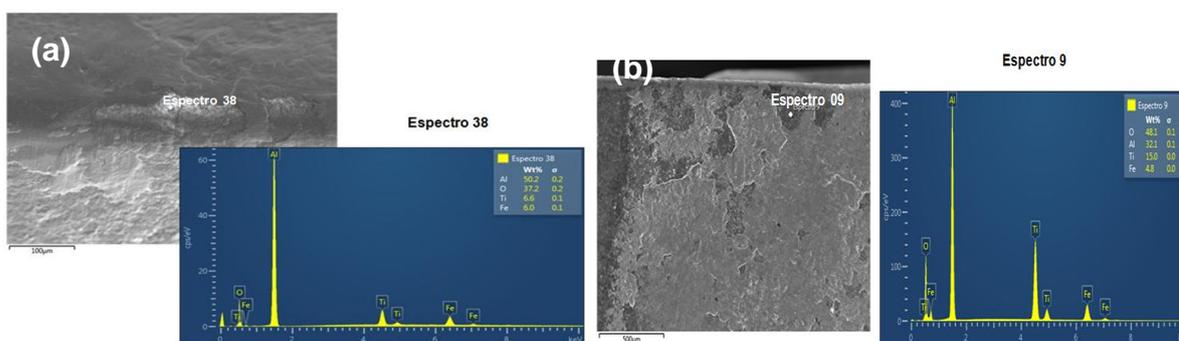
Quadro 4.5 - Imagem das superfícies de folga dos insertos e análise EDS ($V_c=250$ m/min, $f=0,16$ mm/rev, $a_p=1,5$ mm)





Em todas as análises EDS, para as regiões em destaque, verificou-se a presença de ferro e oxigênio - fato que elucida a adesão de material do aço ABNT 4340, bem como a presença de óxidos. Para as superfícies de folga dos cermets, percebeu-se a presença de titânio, acreditando-se que pertença à camada de revestimento de TiN, sendo que a adesão ocorreu acima desta. Tal suposição pode ser justificada com a explicação de Oréfica, Pereira e Mansur (2012), que associam a análise EDS ao formato de uma pera, pois a interação de feixe de elétrons com a amostra gera uma variedade de sinais e, na microscopia eletrônica de varredura para a obtenção da imagem, são captados elétrons secundários, elétrons retroespalhados e raios X característicos, os quais apresentam distintos níveis energéticos, bem como volumes específicos de interação. Por fim, a Figura 4.12 elucida dois pontos distintos nas superfícies de folga dos insertos de metal duro MP e metal duro LP. Sendo o revestimento desta região uma camada única de Al_2O_3 , verifica-se que não ocorreu delaminação do revestimento.

Figura 4.1– Análise EDS superfície de folga: (a) metal duro MP e (b) metal duro LP



Fonte: O autor (2016)

5 CONCLUSÃO

Por meio dos resultados dos testes de torneamento do aço ABNT 4340 utilizando-se ferramentas de corte de metal duro e de cermet e diferentes parâmetros de corte, são descritas algumas considerações a seguir.

Em relação à força de corte, pode-se concluir que:

- a aplicação do planejamento fatorial completo 2^3 permitiu confirmar que os parâmetros principais - material da ferramenta de corte e avanço - e todas as interações de segunda ordem entre os efeitos principais (f , material da ferramenta de corte e quebra-cavaco) afetaram significativamente a força de corte. De maneira geral, o aumento do avanço elevou a força de corte, e o material de ferramenta de corte cermet garantiu as menores forças. Quanto à geometria do quebra-cavaco e suas interações com o avanço e o material da ferramenta de corte, os menores valores de F_c foram encontrados para a configuração MP.

Em relação à rugosidade da superfície torneada, constatou-se que:

- o mesmo planejamento fatorial aplicado para a análise da força de corte permitiu atestar que, dentre os parâmetros principais, somente o avanço mostrou-se como parâmetro de maior influência para a superfície torneada do aço ABNT 4340. O aumento de f contribuiu, em proporção quadrática, para o aumento de R_q .

Em relação à forma do cavaco, concluiu-se que:

- o aumento do avanço fez com que a forma do cavaco fosse modificada para todos os tipos de material de ferramenta e geometrias de quebra-cavaco estudados. Ao se comparar espessura do cavaco (h') e f , percebeu-se que quanto menor f , menor h' , e que, quanto maior h' , maior a fragmentação do cavaco. Em relação à coloração, verificou-se que cavacos provenientes de $f=0,16$ mm/rev (menor espessura) apresentaram tom azulado, e aqueles de $f=0,40$ mm/rev, a cor dourada. Logo, metal duro apresentou um desempenho superior ao cermet.

Em relação à temperatura do cavaco, atestou-se que:

- os parâmetros principais (material da ferramenta de corte, geometria do quebra-cavaco e velocidade de corte) são estatisticamente significativos para a temperatura de corte. Neste quesito, as menores temperaturas foram obtidas com a utilização de metal duro LP. A interação dos fatores V_c e material da ferramenta de corte apresentou influência estatística significativa ao nível de confiança estabelecido. Independentemente do material da ferramenta, a geometria do quebra-cavaco LP proporcionou as menores temperaturas, e o aumento da velocidade de corte levou à elevação destas.

Em relação ao desgaste da ferramenta de corte, pode-se concluir que:

- não ocorreu nenhum tipo de avaria significativa (quebra, lascamento ou trinca) em nenhuma das ferramentas analisadas para os parâmetros de corte estabelecidos. Para a distância usinada (1880 mm) associada aos parâmetros de corte estabelecidos para os ensaios de desgaste, com as imagens obtidas por meio da microscopia ótica e MEV, não foi possível afirmar a ocorrência de desgaste, sequer descrever possíveis mecanismos de desgaste. Verificou-se adesão de material da peça, tanto na superfície de saída quanto na de folga, para todos os insertos.

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:

- coleta dos 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 V_c e a_p . 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.
- retomar a análise de desgaste por meio de uma maior distância usinada e estabelecimento de um critério de fim de vida. Um maior número de testes permitirá identificar o desgaste e os mecanismos envolvidos, bem como comparar o desempenho dos materiais cermet e metal duro.
- realizar ensaios para verificar se na temperatura ótima realmente ocorrem as mínimas forças de corte, o menor desgaste da ferramenta e a melhor qualidade de acabamento.

REFERÊNCIAS

AÇOLÍVER. **Certificado de Qualidade**. Contagem, 2016.

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). Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002.

ANTHONY, X.M. Analysis of cutting force and chip morphology during hard turning of AISI D2 steel. **Journal of Engineering Science and Technology**, v. 10, n.3, p.282-290, 2015.

ASTAKHOV, V. P. **Tribology of Metal Cutting**. 1.ed. Ed. Elsevier, Great Britain, 2006.

ASTAKHOV, V. P. **Drills: Science and Technology of Advanced Operations**. 1.ed. Ed. CRC Press, Boca Raton, 2014.

ASM HANDBOOK. **Machining**. 9.ed. Nova York: ASM International, 1995.

ASM INTERNATIONAL. **Materials Selection and Design**. In: ASM Handbook. EUA: ASM International, 1997. v. 20.

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

BONANDI, M. **Estudo das Condições de Corte no Torneamento do Aço AISI M4 Endurecido, utilizando a Metodologia de Projeto de Experimentos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia). São Paulo: Universidade Nove de Julho, 2012.

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

CHINCHANIKAR, S.; CHOUDHURY, S.K.: Evaluation of chip-tool interface temperature: effect of tool coating and cutting parameters during turning hardened AISI 4340 steel. **Procedia Materials Science**.v. 6, 996–1005 (2014)

CHEN, X.; XU, J.; XIAO, Q. Cutting performance and wear characteristics of Ti(C,N)-based cermet tool in machining hardened steel. **Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, v. 52, p. 143-150, 2015.

CHILDS, T., *et al.* **Metal Machining: Theory and Applications**. 1.ed. Londres: Arnold, 2000.

CIMM - Centro de Informação Metal Mecânica. Disponível em: <http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/4812#.V5d8LWgrLIU> Acesso em: 26 jul. 2016.

DAS, A., *et al.* Comparative Assessment on Machinability Aspects of AISI 4340 Alloy Steel Using Uncoated Carbide and Coated Cermet Inserts During Hard Turning. **Arabian Journal for Science and Engineering**, p. 1-22, 2016.

DIETER, G.E. **Mechanical Metallurgy**. McGraw-Hill Book Company (UK) Limited. SI Metric Ed/ adapted by David Bacon, 1988.

D'ERRICO, G.E; CALZAVARINI, R; VICENZI, B. Influences of PVD coatings on cermet tool life in continuous and interrupted turning. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 78, p. 53–58, 1998.

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

FERRARESI, D. **Usinagem dos Metais**. São Paulo: Blucher, 1970.

GENERAL CARBIDE. **The designer's guide to tungsten carbide**. Greensburg Guide, General Carbide Corporation, 2015.

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. 262-272, 2011.

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

HU, H. *et al.* Mechanical properties and microstructure of Ti(C, N) based cermet cutting tool materials fabricated by microwave sintering. **Ceramics International**, v. 41, p. 15017–15023, 2015.

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

ISO Standard 3685. **Tool life testing with single – point turning tools**. 2.ed. 1993.

ISO Standard n.513 (E). **Classification and application of hard cutting materials for metal removal with defined cutting edges — Designation of the main groups and groups of application**, 2004.

KALPAKJIAN, S.; SCHIMD, S. R. **Manufacturing Engineering and Technology**. Sixth Edition. New Jersey: Prentice Hall, 2010.

KEBLOUTI, O. *et al.* Modeling and multi-objective optimization of surface roughness and productivity in dry turning of AISI 52100 steel using (TiCN-TiN) coating cermet tools. **International Journal of Industrial Engineering Computations**, v.8, p.71–84, 2017.

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

KUMAR, B. V. M.; KUMAR, J. R.; BASU, B. Crater wear mechanisms of TiCN–Ni–WC cermets during dry machining, **Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, v. 25, n.5, p. 392–399, 2007.

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

MILLS, B.; REDFORD, A.H. **Machinability of Engineering Materials**. Applied Science Publishers, 1983.

MINITAB. Disponível em <http://support.minitab.com/pt-br/minitab/17/topic-library/basic-statistics-and-graphs/introductory-concepts/data-concepts/anderson-darling/>. Acesso em: 04/10/2016

MITSUBISHI. **Mitsubishi Tooling Technology Level 2**, 2006.

MITSUBISHI. **Mitsubishi Materials Ferramentas de Corte**, 2013.

MITSUBISHI. **Mitsubishi Materials**, 2015.

NN(a). Disponível em: <<https://www.oerlikon.com/balzers/br/pt-br/portfolio/solucoes-de-superficie-balzers/>>. Acesso em: 21 jan.2017.

NTK. **NTK Cutting Tools**. Estados Unidos da América,1992.

ORÉFICE, R. L.; PEREIRA, M. M.; MANSUR, H. S.; **Biomateriais: fundamentos e aplicações**. 1ed.,1reimpr. Rio de Janeiro: Cultura Médica: Guanabara Koogan, 2012.

RAJABI, A.; GHAZALI, M. J.; DAUD, A. R. Chemical composition, microstructure and sintering temperature modifications on mechanical properties of TiC-based cermet : a review. **Journal of Materials and Design**, v. 67, p. 95–106, 2015.

SANDVIK COROMANT. Disponível em:< http://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/materials/cutting_tool_materials/coated_cemented_carbide >. Acesso em: 28 jul.2016, a.

SANDVIK COROMANT. Disponível em: < http://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/materials/workpiece_materials/machinability_definition?Country=br>. Acesso em: 12 out.2016, b.

SANDVIK COROMANT. **Torneamento Geral**. Sem data, p.1-156.

SHAW, M. C.; **Metal Cutting Principles**. 1st ed. New York: Oxford University Press, 1997. 594 p.

SOUZA, A.J.D. **Aplicação de Multisensores no Prognóstico da Vida da Ferramenta de Corte no Torneamento**. Tese (Doutorado em Engenharia). Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.

TRENT, E.; WRIGHT, P. **Metal Cutting**. 4. ed. Estados Unidos da América: Butterworth Heinemann, 2000.

VANDIERENDONCK, K.; STAPPEN, M. V.; Study of the performance of PVD and PCVD coated cermets for different cutting applications. **Journal of Surface and Coatings Technology**, p.218-223, 1997.

ZHANG, H. *et al.* Cutting performance of titanium carbonitride cermet tools. **Journal of Refractory Metals & Hard Materials**, v. 25, p. 440–444, 2007.

ZELINSKI, P. Cermets get Assertive. Modern Machine Shop on Line. Disponível em: <<http://www.mmsonline.com/articles/cermets-get-assertive>>. Acesso em : 16 julho de 2016.

ZOU, B. *et al.* Tool damage and machined-surface quality using hot-pressed sintering Ti(C₇N₃)/WC/TaC cermet cutting inserts for high-speed turning stainless steels. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v.79, p. 197–210, 2015.

WOONG OH, S. *et al.* Investigation into the microstructure and cutting performance of (Ti,Ta,W)(CN)–Co/Ni cermets. **Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, v. 53, p. 36–40, 2015.

WRIGHT,P.K.; HORNE,J.G.;TABOR,D. Boundary conditions at the chip-tool interface in machining: comparisons between seizure and sliding friction. **Elsevier Sequoia S.A.**, Wear, 54 (1979) 371 – 390.

ANEXO



Certificado de Qualidade

Av. Cardeal Eugênio Pacelli, 1998 - Bairro Cidade Industrial - CEP 32.210-003 - Contagem - Minas Gerais - Fone: 3368-2800 - Fax: 3368-2837

Cliente: ALEXANDRE MENDES ABRÃO

Nota Fiscal: 166592

Dt. Emissão: 11/08/16

Item	Produto	Quantidade	Un.	No. Certifi.	Corrida	No. NF For.	Fornecedor
3	SAE 4340 Ø 78,00 LAM. X 300	45,20	KG	3440	008467303	062676	ACOS TREFITA LTDA. UNID.3

Análise química

	A.I	C	Cr	Cu	Mn	Mo	Ni	P	S	Si
	0,02200	0,39000	0,77000	0,01000	0,71000	0,22000	1,72000	0,01100	0,00600	0,24000

Ensaíos do item

APÊNDICE A- Tabela com os dados da Etapa 1 (Força de Corte)

Teste n	Barra	Sequência	Vc [m/min]	f [mm/rev]	ap [mm]	Material da ferramenta de corte	Geometria do Quebra-Cavaco	ΔI [A]	F[N]
1	1	1	250	0,4	1,5	Cermet	MP	14,35	610,69
2	1	2	250	0,16	1,5	Cermet	MP	5,32	226,40
3	2	5	250	0,4	1,5	Metal Duro	MP	14,90	634,10
4	2	6	250	0,16	1,5	Metal Duro	MP	4,80	204,27
5	3	9	250	0,4	1,5	Cermet	LP	14,90	634,10
6	3	10	250	0,16	1,5	Cermet	LP	4,28	182,14
7	4	13	250	0,4	1,5	Metal Duro	LP	16,07	683,89
8	4	14	250	0,16	1,5	Metal Duro	LP	5,15	219,17
Réplica n	Barra	Sequência	Vc [m/min]	f [mm/rev]	ap [mm]	Ferramenta	Geometria do Quebra-Cavaco	ΔI [A]	F[N]
1	1	3	250	0,4	1,5	Cermet	MP	14,99	637,93
2	1	4	250	0,16	1,5	Cermet	MP	5,48	233,21
3	2	7	250	0,4	1,5	Metal Duro	MP	14,66	623,89
4	2	8	250	0,16	1,5	Metal Duro	MP	4,77	203,00
5	3	11	250	0,4	1,5	Cermet	LP	14,93	635,38
6	3	12	250	0,16	1,5	Cermet	LP	4,32	183,84
7	4	15	250	0,4	1,5	Metal Duro	LP	16,09	684,74
8	4	16	250	0,16	1,5	Metal Duro	LP	4,81	204,70

APÊNDICE B - Tabela com os dados da Etapa 1 (Rugosidade)

Teste n	Barra	Sequência	Vc [m/min]	f [mm/rev]	ap [mm]	Material da Ferramenta de Corte e Geometria do Quebra-Cavaco	Média Ra [µm]	Média Rq [µm]	Média Rt [µm]
1	1	1	250	0,4	1,5	Cermet MP	8,39	9,65	35,80
2	1	2	250	0,16	1,5	Cermet MP	2,12	2,52	11,73
3	2	5	250	0,4	1,5	Metal Duro MP	8,68	10,01	38,83
4	2	6	250	0,16	1,5	Metal Duro MP	1,62	1,89	8,37
5	3	9	250	0,4	1,5	Cermet LP	8,92	10,44	45,83
6	3	10	250	0,16	1,5	Cermet LP	2,03	2,40	11,20
7	4	13	250	0,4	1,5	Metal Duro LP	9,42	10,95	46,90
8	4	14	250	0,16	1,5	Metal Duro LP	2,89	3,54	18,60
Réplica n	Barra	Sequência	Vc [m/min]	f [mm/rev]	ap [mm]	Material da Ferramenta de Corte e Geometria do Quebra-Cavaco	Média Ra [µm]	Média Rq [µm]	Média Rt [µm]
1	1	3	250	0,4	1,5	Cermet MP	8,19	9,30	33,30
2	1	4	250	0,16	1,5	Cermet MP	2,05	2,45	11,80
3	2	7	250	0,4	1,5	Metal Duro MP	8,79	9,99	38,50
4	2	8	250	0,16	1,5	Metal Duro MP	1,72	2,01	10,17
5	3	11	250	0,4	1,5	Cermet LP	8,47	9,54	34,23
6	3	12	250	0,16	1,5	Cermet LP	2,24	2,72	15,53
7	4	15	250	0,4	1,5	Metal Duro LP	8,95	10,05	37,93
8	4	16	250	0,16	1,5	Metal Duro LP	1,38	1,62	7,07

APÊNDICE C - Tabela com os dados da Etapa 2 (Temperatura do Cavaco)

Teste n	Seqüência	Vc [m/min]	f [mm/rev]	ap [mm]	Material da Ferramenta de Corte	Geometria do Quebra-Cavaco	Temperatura [°C]
1	13	300	0,16	1,5	Cermet	MP	530,60
2	14	250	0,16	1,5	Cermet	MP	490,63
3	15	200	0,16	1,5	Cermet	MP	480,70
4	19	300	0,16	1,5	Metal Duro	MP	464,83
5	20	250	0,16	1,5	Metal Duro	MP	458,25
6	21	200	0,16	1,5	Metal Duro	MP	451,36
7	1	300	0,16	1,5	Cermet	LP	502,00
8	2	250	0,16	1,5	Cermet	LP	452,50
9	3	200	0,16	1,5	Cermet	LP	459,70
10	7	300	0,16	1,5	Metal Duro	LP	451,64
11	8	250	0,16	1,5	Metal Duro	LP	444,85
12	9	200	0,16	1,5	Metal Duro	LP	436,39
Réplica n	Seqüência	Vc [m/min]	f [mm/rev]	ap [mm]	Material da Ferramenta de Corte	Geometria do Quebra-Cavaco	Temperatura [°C]
1	16	300	0,16	1,5	Cermet	MP	509,70
2	17	250	0,16	1,5	Cermet	MP	504,73
3	18	200	0,16	1,5	Cermet	MP	493,10
4	22	300	0,16	1,5	Metal Duro	MP	475,91
5	23	250	0,16	1,5	Metal Duro	MP	472,69
6	24	200	0,16	1,5	Metal Duro	MP	464,90
7	4	300	0,16	1,5	Cermet	LP	519,10
8	5	250	0,16	1,5	Cermet	LP	462,89
9	6	200	0,16	1,5	Cermet	LP	448,67
10	10	300	0,16	1,5	Metal Duro	LP	465,95
11	11	250	0,16	1,5	Metal Duro	LP	463,54
12	12	200	0,16	1,5	Metal Duro	LP	451,09

APÊNDICE D – Análises de Variância (ANOVA)

D.1 Força de corte (Material da Ferramenta de corte x Avanço x Quebra-Cavaco)

Factor Information

Factor	Levels	Values
f [mm/rev]	2	0,16; 0,40
Material da Ferramenta	2	Cermet; Metal Duro
Quebra-Cavaco	2	LP; MP

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	7	767285	109612	1581,59	0,000
Linear	3	761378	253793	3661,96	0,000
f [mm/rev]	1	760380	760380	10971,47	0,000
Material da Ferramenta	1	813	813	11,73	0,009
Quebra-Cavaco	1	185	185	2,68	0,141
2-Way Interactions	3	5881	1960	28,28	0,000
f [mm/rev]*Material da Ferramenta	1	663	663	9,56	0,015
f [mm/rev]*Quebra-Cavaco	1	2718	2718	39,21	0,000
Material da Ferramenta*Quebra-Cavaco	1	2500	2500	36,08	0,000
3-Way Interactions	1	26	26	0,38	0,556
f [mm/rev]*Material da Ferramenta*Quebra-Cavaco	1	26	26	0,38	0,556
Error	8	554	69		
Total	15	767840			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
8,32497	99,93%	99,86%	99,71%

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	425,09	2,08	204,25	0,000	
f [mm/rev]					
0,16	-218,00	2,08	-104,74	0,000	1,00
Material da Ferramenta					
Cermet	-7,13	2,08	-3,43	0,009	1,00
Quebra-Cavaco					
LP	3,40	2,08	1,64	0,141	1,00
f [mm/rev]*Material da Ferramenta					
0,16 Cermet	6,44	2,08	3,09	0,015	1,00
f [mm/rev]*Quebra-Cavaco					
0,16 LP	-13,03	2,08	-6,26	0,000	1,00
Material da Ferramenta*Quebra-Cavaco					
Cermet LP	-12,50	2,08	-6,01	0,000	1,00
f [mm/rev]*Material da Ferramenta*Quebra-Cavaco					
0,16 Cermet LP	-1,28	2,08	-0,61	0,556	1,00

Regression Equation

$$\begin{aligned}
 F[N] = & 425,09 - 218,00 f \text{ [mm/rev]}_{0,16} + 218,00 f \text{ [mm/rev]}_{0,40} \\
 & - 7,13 \text{ Material da Ferramenta_Cermet} + 7,13 \text{ Material da Ferramenta_Metal Duro} \\
 & + 3,40 \text{ Quebra-Cavaco_LP} - 3,40 \text{ Quebra-Cavaco_MP} \\
 & + 6,44 f \text{ [mm/rev]*Material da Ferramenta}_{0,16} \text{ Cermet} \\
 & - 6,44 f \text{ [mm/rev]*Material da Ferramenta}_{0,16} \text{ Metal Duro} \\
 & - 6,44 f \text{ [mm/rev]*Material da Ferramenta}_{0,40} \text{ Cermet} \\
 & + 6,44 f \text{ [mm/rev]*Material da Ferramenta}_{0,40} \text{ Metal Duro} \\
 & - 13,03 f \text{ [mm/rev]*Quebra-Cavaco}_{0,16} \text{ LP} + 13,03 f \text{ [mm/rev]*Quebra-Cavaco}_{0,16} \text{ MP} \\
 & + 13,03 f \text{ [mm/rev]*Quebra-Cavaco}_{0,40} \text{ LP} - 13,03 f \text{ [mm/rev]*Quebra-Cavaco}_{0,40} \text{ MP} \\
 & - 12,50 \text{ Material da Ferramenta*Quebra-Cavaco_Cermet LP} \\
 & + 12,50 \text{ Material da Ferramenta*Quebra-Cavaco_Cermet MP} \\
 & + 12,50 \text{ Material da Ferramenta*Quebra-Cavaco_Metal Duro LP} \\
 & - 12,50 \text{ Material da Ferramenta*Quebra-Cavaco_Metal Duro MP} \\
 & - 1,28 f \text{ [mm/rev]*Material da Ferramenta*Quebra-Cavaco}_{0,16} \text{ Cermet LP} \\
 & + 1,28 f \text{ [mm/rev]*Material da Ferramenta*Quebra-Cavaco}_{0,16} \text{ Cermet MP} \\
 & + 1,28 f \text{ [mm/rev]*Material da Ferramenta*Quebra-Cavaco}_{0,16} \text{ Metal Duro LP} \\
 & - 1,28 f \text{ [mm/rev]*Material da Ferramenta*Quebra-Cavaco}_{0,16} \text{ Metal Duro MP}
 \end{aligned}$$

```

+ 1,28 f [mm/rev]*Material da Ferramenta*Quebra-Cavaco_0,40 Cermet LP
- 1,28 f [mm/rev]*Material da Ferramenta*Quebra-Cavaco_0,40 Cermet MP
- 1,28 f [mm/rev]*Material da Ferramenta*Quebra-Cavaco_0,40 Metal Duro LP
+ 1,28 f [mm/rev]*Material da Ferramenta*Quebra-Cavaco_0,40 Metal Duro MP

```

Fits and Diagnostics for Unusual Observations

Obs	F[N]	Fit	Resid	Std Resid
1	610,69	624,31	-13,62	-2,31 R
9	637,93	624,31	13,62	2,31 R

R Large residual

D.2 Rugosidade (Rq) ((Material da Ferramenta de corte x Avanço x Quebra-Cavaco))

Factor	Levels	Values
f [mm/rev]	2	0,16; 0,40
Material da Ferramenta	2	Cermet; Metal Duro
Quebra-Cavaco	2	LP; MP

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	7	232,474	33,211	95,72	0,000
Linear	3	231,695	77,232	222,61	0,000
f [mm/rev]	1	230,888	230,888	665,50	0,000
Material da Ferramenta	1	0,068	0,068	0,19	0,671
Quebra-Cavaco	1	0,740	0,740	2,13	0,182
2-Way Interactions	3	0,698	0,233	0,67	0,594
f [mm/rev]*Material da Ferramenta	1	0,601	0,601	1,73	0,225
f [mm/rev]*Quebra-Cavaco	1	0,024	0,024	0,07	0,799
Material da Ferramenta*Quebra-Cavaco	1	0,073	0,073	0,21	0,659
3-Way Interactions	1	0,081	0,081	0,23	0,641
f [mm/rev]*Material da Ferramenta*Quebra-Cavaco	1	0,081	0,081	0,23	0,641
Error	8	2,775	0,347		
Total	15	235,249			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,589014	98,82%	97,79%	95,28%

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	6,192	0,147	42,05	0,000	
f [mm/rev]					
0,16	-3,799	0,147	-25,80	0,000	1,00
Material da Ferramenta					
Cermet	-0,065	0,147	-0,44	0,671	1,00
Quebra-Cavaco					
LP	0,215	0,147	1,46	0,182	1,00
f [mm/rev]*Material da Ferramenta					
0,16 Cermet	0,194	0,147	1,32	0,225	1,00
f [mm/rev]*Quebra-Cavaco					
0,16 LP	-0,039	0,147	-0,26	0,799	1,00
Material da Ferramenta*Quebra-Cavaco					
Cermet LP	-0,068	0,147	-0,46	0,659	1,00
f [mm/rev]*Material da Ferramenta*Quebra-Cavaco					
0,16 Cermet LP	-0,071	0,147	-0,48	0,641	1,00

Regression Equation

$$\begin{aligned}
 \text{Média Rq } [\mu\text{m}] = & 6,192 - 3,799 f [\text{mm/rev}]_{0,16} + 3,799 f [\text{mm/rev}]_{0,40} \\
 & - 0,065 \text{ Material da Ferramenta Cermet} + 0,065 \text{ Material da Ferramenta Metal} \\
 & \text{Duro} + 0,215 \text{ Quebra-Cavaco LP} - 0,215 \text{ Quebra-Cavaco MP} \\
 & + 0,194 f [\text{mm/rev}]_{0,16} \text{ Cermet} \\
 & - 0,194 f [\text{mm/rev}]_{0,16} \text{ Metal Duro} \\
 & - 0,194 f [\text{mm/rev}]_{0,40} \text{ Cermet}
 \end{aligned}$$

```

+ 0,194 f [mm/rev]*Material da Ferramenta_0,40 Metal Duro
- 0,039 f [mm/rev]*Quebra-Cavaco_0,16 LP
+ 0,039 f [mm/rev]*Quebra-Cavaco_0,16 MP
+ 0,039 f [mm/rev]*Quebra-Cavaco_0,40 LP
- 0,039 f [mm/rev]*Quebra-Cavaco_0,40 MP
- 0,068 Material da Ferramenta*Quebra-Cavaco_Cermet LP
+ 0,068 Material da Ferramenta*Quebra-Cavaco_Cermet MP
+ 0,068 Material da Ferramenta*Quebra-Cavaco_Metal Duro LP
- 0,068 Material da Ferramenta*Quebra-Cavaco_Metal Duro MP
- 0,071 f [mm/rev]*Material da Ferramenta*Quebra-Cavaco_0,16 Cermet LP
+ 0,071 f [mm/rev]*Material da Ferramenta*Quebra-Cavaco_0,16 Cermet MP
+ 0,071 f [mm/rev]*Material da Ferramenta*Quebra-Cavaco_0,16 Metal Duro LP
- 0,071 f [mm/rev]*Material da Ferramenta*Quebra-Cavaco_0,16 Metal Duro MP
+ 0,071 f [mm/rev]*Material da Ferramenta*Quebra-Cavaco_0,40 Cermet LP
- 0,071 f [mm/rev]*Material da Ferramenta*Quebra-Cavaco_0,40 Cermet MP
- 0,071 f [mm/rev]*Material da Ferramenta*Quebra-Cavaco_0,40 Metal Duro LP
+ 0,071 f [mm/rev]*Material da Ferramenta*Quebra-Cavaco_0,40 Metal Duro MP

```

Fits and Diagnostics for Unusual Observations

Obs	Rq [μm]	Média	Fit	Resid	Std Resid	
8	3,540	2,580	2,580	0,960	2,30	R
16	1,620	2,580	2,580	-0,960	-2,30	R

D.3 Temperatura do Cavaco (Material da Ferramenta x Velocidade de Corte x Quebra-Cavaco) (Todos os fatores)

Factor Information

Factor	Levels	Values
Ferramenta	2	CERMET; METAL DURO
Quebra-Cavaco	2	LP; MP
Velocidade de Corte (m/min)	3	200; 250; 300

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value
Model	11	13439,4	1221,8	11,29
Linear	4	11220,1	2805,0	25,93
Ferramenta	1	5189,7	5189,7	47,97
Quebra-Cavaco	1	2381,6	2381,6	22,02
Velocidade de Corte (m/min)	2	3648,8	1824,4	16,87
2-Way Interactions	5	1975,7	395,1	3,65
Ferramenta*Quebra-Cavaco	1	338,4	338,4	3,13
Ferramenta*Velocidade de Corte (m/min)	2	1371,5	685,7	6,34
Quebra-Cavaco*Velocidade de Corte (m/min)	2	265,8	132,9	1,23
3-Way Interactions	2	243,6	121,8	1,13
Ferramenta*Quebra-Cavaco*Velocidade de Corte (m/min)	2	243,6	121,8	1,13
Error	12	1298,1	108,2	
Total	23	14737,5		

Source	P-Value
Model	0,000
Linear	0,000
Ferramenta	0,000
Quebra-Cavaco	0,001
Velocidade de Corte (m/min)	0,000
2-Way Interactions	0,031
Ferramenta*Quebra-Cavaco	0,102
Ferramenta*Velocidade de Corte (m/min)	0,013
Quebra-Cavaco*Velocidade de Corte (m/min)	0,327
3-Way Interactions	0,356
Ferramenta*Quebra-Cavaco*Velocidade de Corte (m/min)	0,356
Error	
Total	

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)

10,4007 91,19% 83,12% 64,77%

Coefficients

Term	Coef	SE	Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	473,15	2,12		222,87	0,000	
Ferramenta						
CERMET	14,71	2,12		6,93	0,000	1,00
Quebra-Cavaco						
LP	-9,96	2,12		-4,69	0,001	1,00
Velocidade de Corte (m/min)						
200	-12,42	3,00		-4,14	0,001	1,33
250	-4,39	3,00		-1,46	0,169	1,33
Ferramenta*Quebra-Cavaco						
CERMET LP	-3,75	2,12		-1,77	0,102	1,00
Ferramenta*Velocidade de Corte (m/min)						
CERMET 200	-4,90	3,00		-1,63	0,129	1,33
CERMET 250	-5,78	3,00		-1,92	0,078	1,33
Quebra-Cavaco*Velocidade de Corte (m/min)						
LP 200	-1,81	3,00		-0,60	0,557	1,33
LP 250	-2,85	3,00		-0,95	0,361	1,33
Ferramenta*Quebra-Cavaco*Velocidade de Corte (m/min)						
CERMET LP 200	-0,83	3,00		-0,28	0,788	1,33
CERMET LP 250	-3,42	3,00		-1,14	0,277	1,33

Regression Equation

Temperatura (°C) = 473,15 + 14,71 Ferramenta_CERMET - 14,71 Ferramenta_METAL DURO
 - 9,96 Quebra-Cavaco_LP + 9,96 Quebra-Cavaco_MP
 - 12,42 Velocidade de Corte (m/min)_200
 - 4,39 Velocidade de Corte (m/min)_250
 + 16,81 Velocidade de Corte (m/min)_300
 - 3,75 Ferramenta*Quebra-Cavaco_CERMET LP
 + 3,75 Ferramenta*Quebra-Cavaco_CERMET MP
 + 3,75 Ferramenta*Quebra-Cavaco_METAL DURO LP
 - 3,75 Ferramenta*Quebra-Cavaco_METAL DURO MP
 - 4,90 Ferramenta*Velocidade de Corte (m/min)_CERMET 200
 + 5,78 Ferramenta*Velocidade de Corte (m/min)_CERMET 250
 + 10,68 Ferramenta*Velocidade de Corte (m/min)_CERMET 300
 + 4,90 Ferramenta*Velocidade de Corte (m/min)_METAL DURO 200
 + 5,78 Ferramenta*Velocidade de Corte (m/min)_METAL DURO 250
 - 10,68 Ferramenta*Velocidade de Corte (m/min)_METAL DURO 300
 - 1,81 Quebra-Cavaco*Velocidade de Corte (m/min)_LP 200
 - 2,85 Quebra-Cavaco*Velocidade de Corte (m/min)_LP 250
 + 4,67 Quebra-Cavaco*Velocidade de Corte (m/min)_LP 300
 + 1,81 Quebra-Cavaco*Velocidade de Corte (m/min)_MP 200
 + 2,85 Quebra-Cavaco*Velocidade de Corte (m/min)_MP 250
 - 4,67 Quebra-Cavaco*Velocidade de Corte (m/min)_MP 300
 - 0,83 Ferramenta*Quebra-Cavaco*Velocidade de Corte (m/min)_CERMET LP 200
 - 3,42 Ferramenta*Quebra-Cavaco*Velocidade de Corte (m/min)_CERMET LP 250
 + 4,25 Ferramenta*Quebra-Cavaco*Velocidade de Corte (m/min)_CERMET LP 300
 + 0,83 Ferramenta*Quebra-Cavaco*Velocidade de Corte (m/min)_CERMET MP 200
 + 3,42 Ferramenta*Quebra-Cavaco*Velocidade de Corte (m/min)_CERMET MP 250
 - 4,25 Ferramenta*Quebra-Cavaco*Velocidade de Corte (m/min)_CERMET MP 300
 + 0,83 Ferramenta*Quebra-Cavaco*Velocidade de Corte (m/min)_METAL DURO LP
 200 + 3,42 Ferramenta*Quebra-Cavaco*Velocidade de Corte (m/min)_METAL DURO
 LP 250 - 4,25 Ferramenta*Quebra-Cavaco*Velocidade de Corte (m/min)_METAL
 DURO LP 300
 - 0,83 Ferramenta*Quebra-Cavaco*Velocidade de Corte (m/min)_METAL DURO MP
 200 - 3,42 Ferramenta*Quebra-Cavaco*Velocidade de Corte (m/min)_METAL DURO
 MP 250 + 4,25 Ferramenta*Quebra-Cavaco*Velocidade de Corte (m/min)_METAL
 DURO MP 300

D.4 Temperatura do Cavaco (Material da Ferramenta x Velocidade de Corte x Quebra-Cavaco) (Somente fatores significativos ao nível de confiança)

Factor Information

Factor	Levels	Values
Ferramenta	2	CERMET; METAL DURO
Quebra-Cavaco	2	LP; MP
Velocidade de Corte (m/min)	3	200; 250; 300

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	6	12591,6	2098,6	16,63	0,000
Linear	4	11220,1	2805,0	22,22	0,000
Ferramenta	1	5189,7	5189,7	41,11	0,000
Quebra-Cavaco	1	2381,6	2381,6	18,87	0,000
Velocidade de Corte (m/min)	2	3648,8	1824,4	14,45	0,000
2-Way Interactions	2	1371,5	685,7	5,43	0,015
Ferramenta*Velocidade de Corte (m/min)	2	1371,5	685,7	5,43	0,015
Error	17	2145,9	126,2		
Lack-of-Fit	5	847,8	169,6	1,57	0,242
Pure Error	12	1298,1	108,2		
Total	23	14737,5			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
11,2351	85,44%	80,30%	70,98%

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	473,15	2,29	206,32	0,000	
Ferramenta					
CERMET	14,71	2,29	6,41	0,000	1,00
Quebra-Cavaco					
LP	-9,96	2,29	-4,34	0,000	1,00
Velocidade de Corte (m/min)					
200	-12,42	3,24	-3,83	0,001	1,33
250	-4,39	3,24	-1,36	0,193	1,33
Ferramenta*Velocidade de Corte (m/min)					
CERMET 200	-4,90	3,24	-1,51	0,149	1,33
CERMET 250	-5,78	3,24	-1,78	0,093	1,33

Regression Equation

Temperatura (°C) = 473,15 + 14,71 Ferramenta_CERMET - 14,71 Ferramenta_METAL DURO
 - 9,96 Quebra-Cavaco_LP + 9,96 Quebra-Cavaco_MP
 - 12,42 Velocidade de Corte (m/min)_200
 - 4,39 Velocidade de Corte (m/min)_250
 + 16,81 Velocidade de Corte (m/min)_300
 - 4,90 Ferramenta*Velocidade de Corte (m/min)_CERMET 200
 - 5,78 Ferramenta*Velocidade de Corte (m/min)_CERMET 250
 + 10,68 Ferramenta*Velocidade de Corte (m/min)_CERMET 300
 + 4,90 Ferramenta*Velocidade de Corte (m/min)_METAL DURO 200
 + 5,78 Ferramenta*Velocidade de Corte (m/min)_METAL DURO 250
 - 10,68 Ferramenta*Velocidade de Corte (m/min)_METAL DURO 300