

Vinícius Rodrigues Borba

**ANÁLISE DA FORÇA DE USINAGEM E DA RUGOSIDADE NO  
TORNEAMENTO DE AÇOS ENDURECIDOS COM  
FERRAMENTAS DE PCBN E DE METAL-DURO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof Rolf Bertrand Schroeter, Dr. Eng.

Florianópolis  
2016

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Borba, Vinícius Rodrigues

ANÁLISE DA FORÇA DE USINAGEM E DA RUGOSIDADE NO  
TORNEAMENTO DE AÇOS ENDURECIDOS COM FERRAMENTAS DE PCBN E  
DE METAL-DURO / Vinícius Rodrigues Borba ; orientador,  
Rolf Bertrand Schroeter - Florianópolis, SC, 2016.

169 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Mecânica.

Inclui referências

1. Engenharia Mecânica. 2. Torneamento de aços  
endurecidos. 3. Força de usinagem. 4. Rugosidade. 5.  
Ferramentas de PCBN e de metal-duro. I. Schroeter, Rolf  
Bertrand. II. Universidade Federal de Santa Catarina.  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

Vinícius Rodrigues Borba

**ANÁLISE DA FORÇA DE USINAGEM E DA RUGOSIDADE NO  
TORNEAMENTO DE AÇOS ENDURECIDOS COM  
FERRAMENTAS DE PCBN E DE METAL-DURO**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre em Engenharia Mecânica”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Florianópolis, 06 de Maio de 2016.

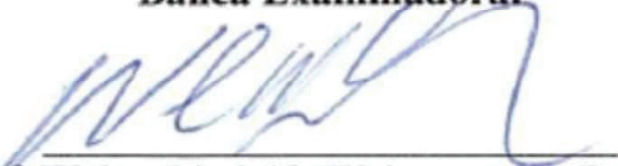


Prof. Rolf Bertrand Schroeter, Dr. Eng.  
Universidade Federal de Santa Catarina  
Orientador

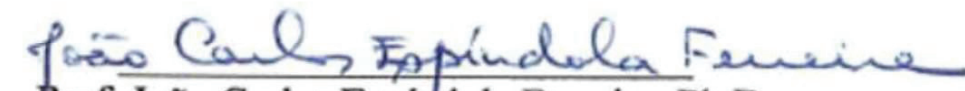


Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Jr., Dr. Eng.  
Coordenador do Curso

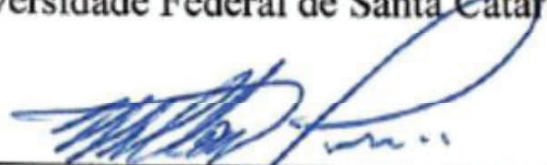
**Banca Examinadora:**



Prof. Walter Lindolfo Weingaertner, Dr.-Ing.  
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. João Carlos Espíndola Ferreira, Ph.D.  
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Milton Pereira, Dr. Eng.



Dedico esta dissertação a minha esposa Camila ♥, por seu incentivo, apoio e compreensão durante a realização do mestrado.



## AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Eng. Rolf Bertrand Schroeter pela orientação, pelo exemplo de profissionalismo e por sua amizade.

Ao Denis Boing por sua amizade, pelo apoio e sugestões para a realização deste trabalho.

À minha estimada esposa Camila Farias Fraga pelo companheirismo durante a realização deste trabalho.

À minha mãe Lúcia Rodrigues pelo apoio e incentivo dado durante mais uma jornada na minha vida.

À minha afilhada Maria Alice pelos momentos de descontração, por sua alegria e por me fazer ver a vida de uma forma mais simples.

Aos integrantes do Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP), Clarianne, Daniel, Emílio, Felipe, Janaína, Jonathan, Rodrigo, Thiago, pela amizade, ajuda e sugestões dadas.

Aos professores do POSMEC que contribuíram para a realização deste trabalho.

Aos técnicos de Laboratório de Usinagem e Comando Numérico (USICON), Carlos, João, Joe e Valtair, pela amizade e ajuda.

Ao técnico do Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP), Hélio, pela ajuda e por sua amizade.

Ao Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC) por conceder afastamento parcial e integral para realização desta pesquisa.

Aos servidores do Câmpus Criciúma do IFSC pelo incentivo e ajuda na organização de horários para a realização deste trabalho.

À Universidade Federal de Santa Catarina, em especial ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, pela oportunidade concedida.

Ao Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP), Laboratório de Usinagem e Comando Numérico (USICON) e Laboratório de Materiais (LABMAT) pela infraestrutura disponibilizada para a realização deste trabalho.

Ao Centro de Tecnologia e Inovação em Fabricação do Centro Universitário de Brusque (UNIFEBS) pela disponibilização do laboratório para a realização desta pesquisa.

À Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina (FAPESC), pelo suporte financeiro concedido a esta pesquisa.





## RESUMO

O processo de torneamento de materiais endurecidos tem sido aplicado industrialmente em operações de acabamento e/ou semiacabamento. Esse processo ganhou atenção a partir da década de 1980 em função do aprimoramento das máquinas-ferramentas com elevada rigidez e elevada estabilidade dinâmica, combinado com o desenvolvimento das ferramentas de usinagem fabricadas com materiais ultraduros (cerâmicas e PCBN). Além destas, tem sido desenvolvidas ferramentas de metal-duro de grãos ultrafinos que são resultado do desenvolvimento de novas classes, do refino de grãos e de técnicas de alterações do substrato, tornando-as adequadas para assumir uma específica faixa de aplicação no processo de torneamento de materiais endurecidos e de superligas. Este trabalho apresenta e discute os resultados de medições das componentes da força de usinagem e da rugosidade da superfície no torneamento dos aços AISI 4340, AISI 52100 e AISI D2 (em seis níveis de dureza) com ferramentas de PCBN e de metal-duro de grãos ultrafino. As análises dos resultados mostram que os menores valores das componentes da força de usinagem foram obtidos com a ferramenta de metal-duro de grãos ultrafinos, devido à diferença da geometria das ferramentas, principalmente em função do ângulo de saída. Além disso, as intensidades das componentes da força de usinagem foram influenciadas pelo incremento da dureza, para ambas as ferramentas, no processo de torneamento desses três aços, e cada aço apresentou tendência de aumento diferente, devido às distintas propriedades físicas, químicas e mecânicas. A qualidade da superfície, de modo geral para os três aços, melhorou com o incremento da dureza, para os dois tipos de ferramentas. Por fim, as menores rugosidades foram obtidas com a ferramenta de PCBN para as durezas de 60 HRC, no torneamento do aço AISI 4340 e AISI 52100, e para a dureza de 50 HRC, na usinagem do aço AISI D2. Já com a ferramenta de metal-duro alcançaram-se os menores valores de rugosidade para as durezas de 50 HRC, 45 HRC e 35 HRC no torneamento dos aços AISI 4340, AISI 52100 e AISI D2, respectivamente.

**Palavras-chave:** Torneamento de materiais endurecidos. Força de usinagem. Qualidade da superfície.



## ABSTRACT

Hard turning has been industrially applied in finishing processes and / or semi-finishing. This operation has received attention from the 1980s due to the improvement of machine tools with high rigidity and high dynamic stability, combined with the development of machining tools made of ultra-hard materials (ceramics and PCBN). In addition to these, it has been developed ultra-fine grains carbide cutting tools which are the result of development of new classes of refining grains and the substrate changes techniques, making them suitable for assuming a specific application range of the turning process hard materials and superalloys. This work presents and discusses the results of measurements of components of the machining force and surface roughness of turning tests of AISI 4340, AISI 52100 and AISI D2 (six levels of hardness) with the PCBN and ultra-fine grains carbide tools. The analyzes of the results show that the lowest values of the components of the machining force were obtained with the ultra-fine grains carbide due to the difference of the geometry of the tools, mainly due to rake angle. Moreover, the intensities of the components of the machining force are influenced by the increase of hardness for both tools in turning process these three steel, each steel showed a different tendency of increase, due to the different physical, chemical and mechanical properties. The surface quality, generally for three steels, improved with the increase of hardness for both tools. Finally, the smaller roughness intensities for PCBN tools were for hardness 60 HRC for turning AISI 4340 steel and AISI 52100 and the hardness of 50 HRC for machining AISI D2 steel. Since the ultra-fine grain carbide tool produced lower roughness values for hardness 50 HRC, 45 HRC and 35 HRC in the turning of AISI 4340, AISI 52100 and AISI D2, respectively.

**Keywords:** Hard turning. Force. Surface quality.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Comparações técnicas entre os processos de retificação e torneamento.....	31
Figura 2 - Tipos de cavacos em relação à deformação.....	33
Figura 3 – Etapas da formação do cavaco dente de serra.....	35
Figura 4 - Mecanismo de formação do cavaco do aço DIN 100Cr6 com o emprego de ferramenta de PCBN.....	36
Figura 5 - Morfologia do cavaco em função da dureza do material e da velocidade de corte no corte ortogonal.....	37
Figura 6 - Componentes da força de usinagem na operação de torneamento.....	38
Figura 7 - Comportamento das componentes da força de usinagem em função do avanço, da velocidade de corte e da profundidade de corte entre a usinagem convencional (lado esquerdo) e a usinagem do aço DIN 100-Cr6 (lado direito). ....	41
Figura 8 - Relação entre as componentes da força de usinagem e a dureza do aço AISI 4340 ( $v_c = 90$ m/min, $f = 0,15$ mm e $a_p = 0,9$ mm). ....	43
Figura 9 - Variação da força de usinagem em relação à dureza do aço AISI 4340.....	44
Figura 10 - Relação da temperatura de corte com a dureza do material. ....	45
Figura 11 - Efeitos da dureza do material sobre as componentes da força de usinagem.....	46
Figura 12 - Efeitos da força de corte sobre a dureza do material. ....	47
Figura 13 - <b>A</b> – Gráfico de forças em relação a dureza do aço AISI D2 ( $v_c = 150$ m/min, $a_p = 0,15$ mm e $f = 0,10$ mm). <b>B</b> – Gráfico do limite de resistência a tração correlacionado com a dureza do aço AISI D2. ....	48
Figura 14 - Correlação entre o tamanho do grão da ferramenta de metal-duro com sua dureza.....	51
Figura 15 - Classificação das ferramentas de metal-duro em função do tamanho de grão. ....	52
Figura 16 - Influência do ângulo de saída nas componentes da força de usinagem. ....	54
Figura 17 - Classificação do gume conforme a norma DIN 6582.....	55
Figura 18 – Classificação detalhada dos gumes. ....	56
Figura 19 – Representação esquemática de uma superfície usinada. ....	58
Figura 20 - Torno CNC de modelo Heynumat 10U.....	61
Figura 21 - Projeto do aparato de medição de força.....	62
Figura 22 - Representação do sistema de fixação do corpo de prova....	63

Figura 23 - Representação do inserto de metal-duro de grãos ultrafinos. ....	64
Figura 24 - Porta-ferramenta usado na pesquisa. ....	65
Figura 25 - Representação do inserto de PCBN.....	65
Figura 26 - Dimensões do corpo de prova. ....	68
Figura 27 – Combinações de dureza para os aços torneados. ....	69
Figura 28 - Representação do sistema de medição adotado no experimento.....	70
Figura 29 - Plataforma piezelétrica Kistler de modelo 9257A.....	71
Figura 30 - Amplificadores utilizados no experimento.....	72
Figura 31 - Gráfico do processo de usinagem com a ferramenta de PCBN do aço AISI 4340 com dureza 35 HRC. ....	74
Figura 32 - Recorte ampliado do gráfico do processo da Figura 31. ....	75
Figura 33 - Gráfico após aplicação do filtro passa-faixa. ....	76
Figura 34 - Representação da medição de força relativa. ....	77
Figura 35 - Representação do percurso da ferramenta ao longo do ensaio. ....	78
Figura 36 – Rugosímetro utilizado nas medições. ....	79
Figura 37 - Representação dos pontos medidos com o rugosímetro....	81
Figura 38 – Componentes da força de usinagem para aço AISI 4340 de 35 HRC de dureza com a ferramenta de PCBN.....	83
Figura 39 – Componentes da força de usinagem do aço AISI 4340 de 35 HRC de dureza com a ferramenta de metal-duro de grãos ultrafinos. ..	84
Figura 40 – Componentes da força de usinagem para as ferramentas de PCBN e de metal-duro de grãos ultrafinos (MD). ....	85
Figura 41 – Parâmetros de rugosidade Ra, Rz e Rt em função da ferramenta de metal-duro e da ferramenta de PCBN. ....	86
Figura 42 – <i>Boxplot</i> dos erros dos parâmetros de rugosidade Ra do aço AISI 4340 de 35 HRC para as ferramenta de PCBN e de metal-duro. .	87
Figura 43 – Força de corte, força de avanço, força passiva e força de usinagem no torneamento do aço AISI 52100 de 35 HRC. ....	89
Figura 44 – Parâmetros de rugosidade Ra, Rz e Rt em função da ferramenta de metal-duro e da ferramenta de PCBN. ....	90
Figura 45 – Valores das componentes da força de usinagem no torneamento do aço AISI D2 de 35 HRC com as ferramentas de PCBN e de metal-duro. ....	92
Figura 46 – Valores dos parâmetros de rugosidade do aço AISI D2 de 35 HRC com as ferramentas de PCBN e de metal-duro. ....	93
Figura 47 – Comparação dos valores da força de corte, da força passiva, da força de avanço e da força de usinagem na usinagem dos aços AISI 4340, AISI 52100 e AISI D2. ....	94

Figura 48 – Componentes da força de usinagem com o incremento da dureza para as ferramentas de PCBN e de metal-duro, e comportamento das forças durante o torneamento do aço AISI 4340 de 40 HRC de dureza. ....	96
Figura 49 – Valores dos parâmetros de rugosidade para as durezas de 35 HRC e de 40 HRC para as ferramentas de PCBN e de metal-duro. ....	97
Figura 50 – Componentes da força de usinagem com o incremento da dureza para as ferramentas de PCBN e de metal-duro, e comportamento das forças ao longo do torneamento aço AISI 52100 de 40 HRC de dureza. ....	98
Figura 51 – Valores dos parâmetros de rugosidade para as durezas de 35 HRC e de 40 HRC para as ferramentas de PCBN e de metal-duro. ....	99
Figura 52 – Componentes da força de usinagem com o incremento da dureza para as ferramentas de PCBN e de metal-duro, e comportamento das forças durante o torneamento do aço AISI D2 de 40 HRC de dureza. ....	100
Figura 53 – Parâmetros de rugosidade para as durezas de 35 HRC e de 40 HRC para as ferramentas de PCBN e de metal-duro. ....	101
Figura 54 – Componentes da força de usinagem com o incremento da dureza de 35 para 45 HRC no aço AISI 4340, e comportamento das forças ao longo do tempo de torneamento do aço AISI 4340 de 45 HRC de dureza. ....	103
Figura 55 – Variação dos parâmetros de rugosidade com a variação da dureza do aço AISI 4340 para as ferramentas de PCBN e de metal-duro. ....	105
Figura 56 – Componentes da força de usinagem com o aumento da dureza do aço AISI 52100, e o comportamento das forças durante a usinagem do aço AISI 52100 de 45 HRC de dureza. ....	107
Figura 57 – Parâmetros de rugosidade com a variação da dureza do aço AISI 52100 para as ferramentas de PCBN e de metal-duro. ....	108
Figura 58 – Componentes da força de usinagem com a evolução da dureza do aço AISI D2, e o comportamento das forças durante o processo de torneamento do aço AISI D2 de 45 HRC de dureza. ....	110
Figura 59 – Parâmetros de rugosidade com a variação da dureza do aço AISI D2 para as ferramentas de PCBN e de metal-duro. ....	111
Figura 60 – Força de usinagem com o aumento da dureza do aço AISI 4340, e comportamento das componentes da força de usinagem do aço AISI 4340 de 50 HRC de dureza para as ferramenta de PCBN e de metal-duro. ....	112

Figura 61 – Parâmetros de rugosidade com a variação da dureza do aço AISI 4340 no torneamento com as ferramentas de PCBN e de metal-duro. ....	114
Figura 62 – Componentes da força de usinagem com o incremento da dureza para as ferramentas de PCBN e de metal-duro, e comportamento das componentes da força de usinagem do aço AISI 52100 de 50 HRC de dureza. ....	115
Figura 63 – Parâmetros de rugosidade com a variação da dureza do aço AISI 52100 no torneamento com as ferramentas de PCBN e de metal-duro. ....	116
Figura 64 – Componentes da força de usinagem com a evolução da dureza para as ferramentas de PCBN e de metal-duro no torneamento do aço AISI D2. ....	118
Figura 65 – Parâmetros de rugosidade com a variação da dureza do aço AISI D2 na operação de torneamento com as ferramentas de PCBN e de metal-duro. ....	119
Figura 66 – Componentes da força de usinagem com o aumento da dureza do aço AISI 4340 de 55 HRC de dureza para as duas ferramentas, e comportamento das forças ao longo do processo de torneamento. ....	121
Figura 67 – Parâmetros de rugosidade com a variação da dureza do aço AISI 4340 na operação de torneamento com as duas ferramentas. ....	122
Figura 68 – Componentes da força de usinagem com o aumento da dureza do aço AISI 52100, e comportamento das forças do aço AISI 52100 de 55 HRC de dureza para as ferramenta de PCBN e de metal-duro de grãos ultrafinos. ....	123
Figura 69 – Parâmetros de rugosidade com a variação da dureza do aço AISI 52100 no torneamento com as ferramentas de PCBN e de metal-duro. ....	124
Figura 70 – Componentes da força de usinagem com o aumento da dureza do aço AISI D2, e comportamento da força de usinagem no torneamento do aço AISI D2 de 55 HRC de dureza com as duas ferramentas. ....	125
Figura 71 – Parâmetros de rugosidade com a variação da dureza do aço AISI D2 na operação de torneamento com as ferramentas de PCBN e de metal-duro. ....	126
Figura 72 – Componentes da força de usinagem com o aumento da dureza do aço AISI 4340, e comportamento da força de usinagem no torneamento do aço AISI 4340 de 60 HRC de dureza. ....	128



Figura 73 – Parâmetros de rugosidade com a variação da dureza do aço AISI 4340 no torneamento com as ferramentas de PCBN e de metal-duro. ....	129
Figura 74 – Componentes da força de usinagem com o aumento da dureza do aço AISI 52100, e comportamento das componentes no torneamento do aço AISI 52100 de 60 HRC de dureza para as ferramenta de PCBN e de metal-duro. ....	131
Figura 75 – Parâmetros de rugosidade com a variação da dureza do aço AISI 52100 na operação de torneamento com as ferramentas de PCBN e de metal-duro. ....	132
Figura 76 – Componentes da força de usinagem com o aumento da dureza do aço AISI D2, e comportamento das componentes no torneamento aço AISI D2 de 60 HRC de dureza para as ferramenta de PCBN e de metal-duro . ....	133
Figura 77 – Parâmetros de rugosidade com a variação da dureza do aço AISI D2 na operação de torneamento com as ferramentas de PCBN e de metal-duro. ....	134
Figura 78 – Força de usinagem em função da variação da dureza. ....	135
Figura 79 – Variação da rugosidade Ra com a variação da dureza para os aços AISI 4340, AISI 52100 e AISI D2. ....	137
Figura 80 - Sistema de balança utilizado para realizar a verificação da força estática no eixo Y. ....	156
Figura 81 - Dados de verificação para o eixo Z. ....	157
Figura 82 - Dados de verificação para o eixo Y. ....	157
Figura 83 - Dados de verificação para o eixo X. ....	158
Figura 84 – Equipamento de medição de forças durante o torneamento do aço AISI 4340 de 35 HRC de dureza. ....	161



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação dos grupos de materiais endurecidos.....	27
Tabela 2 – Classe de rugosidade em função do parâmetro de rugosidade Ra. ....	60
Tabela 3 - Características dos insertos de metal-duro de grãos ultrafinos. ....	64
Tabela 4 - Características dos insertos de PCBN. ....	66
Tabela 5 - Composição química (% em massa) padrão (segundo AISI) dos aços AISI 4340, AISI 52100 e AISI D2. ....	67
Tabela 6 - Plataforma piezelétrica Kistler de modelo 9257A. ....	72
Tabela 7 - Dados técnicos do amplificador de carga Kistler de modelo 5011 e modelo 5006. ....	73
Tabela 8 - Parâmetros de usinagem empregados no experimento.....	78
Tabela 9 – Condições de medição de rugosidade.....	80
Tabela 10 - Parâmetro de corte dos ensaios preliminares. ....	162
Tabela 11 - Valores das constantes de Kienzle. ....	162



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
ASTM	<i>American Society for Testing Material</i>
CBN	Nitreto de Boro Cúbico
CNC	Comando Numérico Computadorizado
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
<i>et al</i>	Mais de dois autores
FAPESC	Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de SC
GUME	Grupo de Usinagem de Materiais Endurecidos
ISO	International Standardization Organization
PCBN	Nitreto de Boro Cúbico Policristalino
LABMAT	Laboratório de de Materiais UFSC
LMP	Laboratório de Mecânica de Precisão
UNIFEBE	Centro Universitário de Brusque
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
USICON	Laboratório de Usinagem e Comando Numérico UFSC



## LISTA DE SÍMBOLOS

### Letras maiúsculas

A	[mm <sup>2</sup> ]	Área
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	[-]	Óxido de alumínio
F <sub>c</sub>	[N]	Força de corte
F <sub>f</sub>	[N]	Força de avanço
F <sub>p</sub>	[N]	Força passiva
F <sub>u</sub>	[N]	Força de usinagem
HRC	[kgf/mm <sup>2</sup> ]	Dureza Rockwell
M <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	[-]	Carboneto de cromo
NBR	[-]	Norma Brasileira
Ra	[μm]	Desvio aritmético médio da rugosidade no comprimento de avaliação
Rp	[μm]	Altura máxima de pico
Rpk	[μm]	Valor da rugosidade média dos picos que estão acima da área de contato mínima do perfil excluídos picos exagerados.
Rq	[μm]	Desvio médio quadratico
Rsk	[μm]	Coefficiente de simetria
RSm	[μm]	Largura média de um elemento do perfil de rugosidade
Rt	[μm]	Altura total do perfil de rugosidade no comprimento de avaliação
Rv	[μm]	Profundidade máxima de vale
Rz	[μm]	Altura média de pico a vale
Rλq	[μm]	Raiz quadrada do comprimento de onda do perfil
TiC	[-]	Carbeto de titânio
TiN	[-]	Nitreto de titânio

### Letras minúsculas

1-m <sub>c</sub>	[-]	Expoente da equação de Kienzle para força de corte
b	[mm]	Largura de corte
h	[mm]	Espessura de corte
k <sub>c1.1</sub>	[N/mm <sup>2</sup> ]	Força específica de corte para uma área de 1 x 1 mm <sup>2</sup>
rpm	[-]	Rotação por minuto

## Letras gregas

$\varepsilon$	[mm/mm]	Grau de deformação
$\rho$	[ $\mu\text{m}$ ]	Raio de gume
$\mu_{\text{PCBN}}$	[-]	Valor médio da ferramenta de PCBN
$\mu_{\text{MD}}$	[-]	Valor médio da ferramenta de metal-duro



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>25</b>
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>27</b>
2.1 MATERIAIS ENDURECIDOS .....	27
2.2 TORNEAMENTO DE MATERIAIS ENDURECIDOS .....	29
2.2 FORMAÇÃO DO CAVACO.....	32
2.3 FORÇA DE USINAGEM NO TORNEAMENTO DE MATERIAIS ENDURECIDOS.....	38
2.4 FERRAMENTA DE CORTE .....	49
<b>2.4.1 Ferramenta de PCBN.....</b>	<b>49</b>
<b>2.4.2 Ferramenta de Metal-duro .....</b>	<b>50</b>
<b>2.4.2 Considerações geométricas.....</b>	<b>53</b>
2.5 QUALIDADE DA SUPERFÍCIE .....	57
<b>3 EQUIPAMENTOS, MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>61</b>
3.1 MÁQUINA-FERRAMENTA .....	61
<b>3.2.1 Sistema de fixação .....</b>	<b>62</b>
3.3 FERRAMENTAS DE CORTE .....	63
<b>3.3.1 Ferramenta de metal-duro de grãos ultrafinos.....</b>	<b>63</b>
<b>3.3.2 Ferramenta PCBN.....</b>	<b>65</b>
3.4 MATERIAL ENSAIADO.....	66
<b>3.4.1 Corpo de prova.....</b>	<b>67</b>
3.5 SISTEMA DE MEDIÇÃO DE FORÇA .....	69
<b>3.5.1 Plataforma piezométrica .....</b>	<b>71</b>
<b>3.5.2 Amplificadores de sinais .....</b>	<b>72</b>
<b>3.5.3 Características dos sinais e tratamento dos dados .....</b>	<b>73</b>
3.6 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	77
3.7 MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE.....	79
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>83</b>
4.1 DUREZA DE 35 HRC .....	83
4.2 DUREZA DE 40 HRC .....	95
4.3 DUREZA DE 45 HRC .....	102
4.4 DUREZA DE 50 HRC .....	112
4.5 DUREZA DE 55 HRC .....	120
4.6 DUREZA DE 60 HRC .....	127
4.7 VARIAÇÃO DA DUREZA DE 35 A 60 HRC.....	135
<b>5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>141</b>
5.1 CONCLUSÕES.....	141
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	142

<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>143</b>
<b>APÊNDICE A – Verificação estática dos instrumentos de medição de força.....</b>	<b>155</b>
<b>APÊNDICE B – Algoritmo utilizado no <i>software</i> matlab para o tratamento dos sinais de força. ....</b>	<b>159</b>
<b>APÊNDICE C – Ensaio preliminar .....</b>	<b>161</b>
<b>ANEXO A – Microestruturas do aço AISI 4340 de 35 a 60 HRC de dureza com 500 vezes de ampliação .....</b>	<b>163</b>
<b>ANEXO B – Microestruturas do aço AISI 52100 de 35 a 60 HRC de dureza com 500 vezes de ampliação .....</b>	<b>165</b>
<b>ANEXO C – Microestruturas do aço AISI D2 de 35 a 60 HRC de dureza com 500 vezes de ampliação .....</b>	<b>167</b>

# 1 INTRODUÇÃO

O processo de torneamento de materiais endurecidos tem sido adotado em processos de acabamento e/ou semiacabamento na indústria automobilística, na indústria naval, na indústria de engrenagens, na indústria de rolamento, na indústria de moldes e matrizes [1], em função das ótimas características econômicas, dimensionais e ecológicas. A visão inicial dos seus desenvolvedores foi a substituição do processo de retificação para o processo de torneamento nas etapas finais de fabricação das peças. Isso justifica-se, principalmente, pela possibilidade de eliminação dos meios lubrificantes, pela possibilidade da usinagem de geometrias complexas e pela alta taxa de remoção de material do processo de torneamento em relação ao processo de retificação [2,3].

Tal processo ganhou atenção considerável a partir da década de 1980 em função do desenvolvimento de máquinas-ferramentas de elevada rigidez e estabilidade dinâmica, em conjunto com o desenvolvimento de ferramentas capazes de suportar as altas pressões de contato e as severas condições tribológicas impostas durante o corte desses materiais [4,5,6]. Desde então, inúmeras pesquisas evidenciam e consolidam a aplicação das ferramentas de cerâmica e de PCBN no torneamento de materiais endurecidos. No entanto, o processo de fabricação dessas ferramentas ainda é oneroso, o que limita sua aplicação no meio industrial.

Além das ferramentas ultraduras supracitadas, têm sido desenvolvidas ferramentas de metal-duro de granulometria ultrafina, que são resultantes do aperfeiçoamento de novas classes, do refino de grãos e de técnicas de alterações do substrato, proporcionando a melhoria de algumas propriedades da ferramenta de metal-duro, tais como: aumento da dureza, baixa tendência à difusão, alta resistência à flexão, maior tenacidade e maior resistência do gume [7]. Essas características propiciam o uso de ferramentas de metal-duro de grãos ultrafinos no torneamento de materiais endurecidos e tornam-se uma alternativa econômica para assumir uma faixa específica de aplicação no processo de torneamento de materiais endurecidos e de superligas utilizados industrialmente [8,9].

Além das propriedades dos materiais, a geometria da ferramenta reflete no comportamento da vida da ferramenta, no desempenho do processo, na qualidade da superfície bem como nas componentes da força de usinagem. As ferramentas comerciais de metal-duro e PCBN possuem significativas diferenças em função da geometria,

principalmente do ângulo de saída. Tradicionalmente, a ferramenta de PCBN tem ângulo de saída negativo, o que confere boa resistência ao gume [6]. Por outro lado, a ferramenta de metal-duro de grãos ultrafinos apresenta frequentemente ângulos de saída positivos, o que facilita a penetração da ferramenta na peça e também o escoamento do cavaco [11]. Por consequência, para condições similares de aplicação, as componentes da força de usinagem para a ferramenta de metal-duro tendem a ser menores em comparação com as forças que ocorrem na usinagem com a ferramenta de PCBN [5].

Tendo em vista as considerações descritas, o objetivo geral deste trabalho é estudar o comportamento das componentes da força de usinagem e a qualidade da superfície na operação de torneamento de materiais endurecidos, utilizando-se as ferramentas de PCBN e de metal-duro de grãos ultrafinos. Estas ferramentas serão aplicadas no processo de torneamento, em seis níveis de dureza, do aço de construção mecânica AISI 4340, do aço para rolamentos AISI 52100 e do aço-ferramenta AISI D2. Dessa maneira, busca-se: caracterizar o comportamento das componentes da força de usinagem em relação à dureza do material usinado com diferentes características microestruturais; determinar a influência da geometria das ferramentas de PCBN e de metal-duro tanto nas componentes da força de usinagem quanto na qualidade da superfície; e analisar a qualidade da superfície em relação à variação da dureza do material usinado com diferentes características microestruturais.

Este estudo faz parte do Grupo de Pesquisa de Materiais Endurecidos (GUME) do Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). A pesquisa analisou as forças de usinagem e a rugosidade no torneamento dos aços endurecidos (AISI 4340, AISI 52100 e AISI D2) com as ferramentas de PCBN e de metal-duro de grãos ultrafinos.

A realização deste trabalho foi possível em função do suporte financeiro concedido pela Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina (FAPESC).

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção serão apresentados os conceitos que fundamentarão a análise e discussão dos dados gerados durante a pesquisa. Assim, serão apresentados materiais de elevadas dureza, com ênfase nos aços AISI 4340, AISI 52100 e AISI D2. Em seguida, será realizada uma contextualização do torneamento de materiais endurecidos, da formação de cavacos, dos esforços no processo de torneamento e da ferramenta de corte. Por fim, serão discutidos aspectos relativos à qualidade da superfície.

### 2.1 MATERIAIS ENDURECIDOS

O processo de usinagem de materiais endurecidos com ferramentas de geometria definida é possível em função do desenvolvimento de máquinas-ferramentas e de ferramentas capazes de suportar as elevadas forças de corte e as severas condições tribológicas impostas por esses materiais [11,12].

Dentre os materiais endurecidos que possuem alta dureza e que podem ser usinados pelo processo de torneamento, destacam-se os aços de construção mecânica (AISI 4340), os aços de rolamentos (AISI 52100) e os aços-ferramentas (AISI D2). A microestrutura desses aços, em geral, é composta principalmente por martensita e carbonetos livres [6]. A presença de carbonetos no material durante o processo de corte pode promover desgaste, microlascamento e falhas na ferramenta [13], decorrentes dos impactos dos carbonetos contra o gume da ferramenta. Apesar da diferença microestrutural entre os aços AISI 4340, AISI 52100 e AISI D2, Boing [14] classificou-os em classes em função da estimativa da fração volumétrica de carbonetos, conforme apresenta a Tabela 1.

Tabela 1 – Classificação dos grupos de materiais endurecidos.

<b>Classes</b>	<b>Material base</b>	<b>Estimativa da fração volumétrica dos carbonetos</b>	<b>Fração volumétrica de carbonetos nas classes</b>
Classe A	AISI 4340	0%	Menor que 1%
Classe B	AISI 52100	≈ 4%	Entre 1 e 5%
Classe C	AISI D2	≈ 10%	Entre 5 e 15%

Fonte: Adaptado de Boing [14]

A formação de carbonetos na microestrutura desses aços tem relação com a composição química, principalmente com a quantidade de carbono e de elementos formadores de carbonetos, como o cromo [15]. De acordo com as informações da Tabela 1, o aço AISI 4340 não tem presença de fração volumétrica de carbonetos e sua fase é composta por martensita e bainita [16]. Os aços AISI 52100 e AISI D2 são compostos por uma estrutura martensítica, porém diferem na porcentagem de fração volumétrica e no tamanho dos carbonetos.

A microestrutura e a composição química desses aços são diferentes, o que lhes conferem propriedades distintas, as quais propiciam diferentes nichos de aplicação. O aço AISI 4340 é usado comercialmente desde 1955 como um aço de alta resistência e é constituído de martensita de baixa liga. Ele possui uma combinação de alta resistência mecânica com tenacidade, cujas aplicações envolvem projetos de engenharia nas áreas industrial e militar, como aeronáutica e marinha, onde elevadas propriedades mecânicas são requeridas [17]. Além destas propriedades, possui elevada temperabilidade, resistência à fluência, resistência à fadiga, boa retenção de dureza mesmo a elevadas temperaturas, e baixa susceptibilidade à fragilização pelo hidrogênio [18].

Tendo em vista suas propriedades mecânicas, o aço AISI 4340 é usualmente empregado nas indústrias automotiva, aeronáutica e marítima onde há severas condições de trabalho. Ele é utilizado, por exemplo, em componentes que estão sujeitos a tensões dinâmicas, como peças na indústria automotiva, petrolífera e construção naval. As aplicações típicas incluem pinos, parafusos, engrenagens, eixos, virabrequins e bielas para motores [15]. Além disso, é utilizado em componentes para sistemas mecânicos, principalmente estruturais, onde se necessita de uma homogeneidade de dureza ao longo da seção transversal em pequenas ou grandes seções.

O aço AISI 52100 é formado por uma matriz martensítica com carbonetos de cromo ( $M_7C_3$ ) finamente dispersos em uma matriz martensítica revenida. Sua formação propicia uma elevada resistência ao desgaste, capacidade de suportar altas tensões de contato e alta estabilidade dimensional [19]. Em função de suas propriedades, o aço AISI 52100 apresenta boa usinabilidade, confiabilidade do produto final e uma satisfatória resistência à fadiga superficial por contato. Dessa maneira, a liga de aço AISI 52100 foi desenvolvida, principalmente, para o setor automobilístico, para fabricação de aços para rolamentos [20]. Esse aço, além do seu típico emprego em componentes de rolamentos, como pistas (interna e externa), esferas, roletes e anéis, é

também aplicado em ferramentas para trabalho a frio, como brocas, alargadores, machos, ferramentas para repuxo em tornos, estampos, punções e outros [21].

Já o aço AISI D2 é destinado à fabricação de matrizes de estampos de grande porte, matrizes de extrusão a frio, ferramentas de furação, cunhagem, rolos laminadores e outros, pois ele tem como característica técnica alta estabilidade dimensional e alta resistência ao desgaste, principalmente em condições abrasivas [22]. Trata-se de um aço indeformável, com altos teores de carbono e cromo, temperável ao ar ou em óleo, de alta tenacidade, alta temperabilidade, alta resistência mecânica e alta resistência ao desgaste. O alto teor de molibdênio (Mo) lhe confere boa resistência ao amolecimento pelo calor. Em função da composição química, o aço AISI D2 apresenta um ótimo balanceamento entre a resistência ao desgaste e a tenacidade. No entanto, a tenacidade desse aço é fortemente dependente da distribuição dos carbonetos eutéticos tipo  $M_7C_3$ . Esta dependência é de particular importância à medida que a dimensão do material de partida deve ser adequada à dimensão final da ferramenta, principalmente quando a matéria-prima é proveniente de material cortado em distribuidores [23].

Os três aços têm microestruturas bem distintas e possuem frações volumétricas de carbonetos distintas, conseqüentemente, cada aço tem um comportamento de usinagem específico. Apesar da severa distinção microestrutural, eles podem possuir durezas similares (macro dureza), que podem ser adquiridas pelo processo de tratamento térmico [24].

## 2.2 TORNEAMENTO DE MATERIAIS ENDURECIDOS

O torneamento de materiais endurecidos ganhou atenção a partir da década de 1980 em função do desenvolvimento de máquinas-ferramentas de elevada rigidez, de elevada estabilidade dinâmica, de elevada potência e com precisão dimensional, combinado com o desenvolvimento das ferramentas de usinagem fabricadas com materiais ultraduros (cerâmicas e o PCBN) e seus revestimentos [4,9].

O conceito mais encontrado na literatura sobre o processo de torneamento de materiais endurecidos define que este ocorre quando a dureza do material usinado é superior a 45 HRC [3,9,12,25,26,27]. Para Klocke [5] a concepção de torneamento de materiais endurecidos é caracterizada quando a dureza do material usinado está acima de 50 HRC. Já Poulachon, Moisan e Jawahir [28] conceituam usinagem de materiais endurecidos quando o material ultrapassa o limite de resistência à tração de aproximadamente 1700 MPa. Mesmo com a

pequena diferença de conceituação, os valores de dureza citados estão dentro de uma região de transição do fenômeno de corte [24].

A visão inicial dos desenvolvedores foi a substituição do processo de retificação pelo processo de torneamento nas etapas de acabamento de materiais endurecidos, pois são materiais que suportam grandes esforços mecânicos e são usados na indústria automobilística, na fabricação de engrenagens, rolamentos, bem como de moldes e matrizes. As operações de acabamento desses componentes podem ser realizadas tanto pelo processo de torneamento quanto pelo processo de retificação, sendo que este ainda é considerado como padrão no meio industrial.

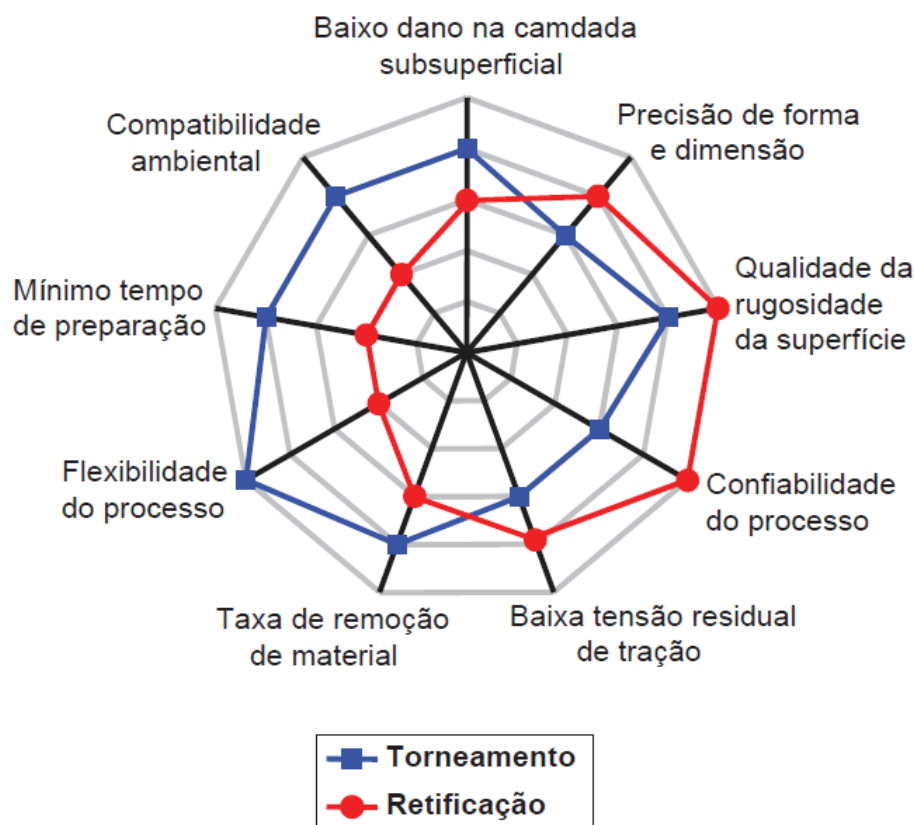
O processo de retificação é mais utilizado por produzir bom acabamento. Esta vantagem tem-se confirmado, principalmente, ao longo da história, pela confiabilidade do processo, no entanto, o processo de torneamento de materiais endurecidos pode produzir acabamento tão bom, ou melhor, utilizando-se pequenas profundidades de corte e de avanços, com altas velocidades de corte [29].

Na comparação entre os processos, o torneamento tem atraído interesse em diferentes setores da indústria em função, principalmente, da alta taxa de produção, da elevada flexibilidade do processo, da alta qualidade da superfície, da fácil automatização do processo e da possibilidade de usinar sem fluido de corte, impactando assim positivamente tanto no aspecto financeiro quanto no ambiental [12,29,30]. Com estas vantagens, o torneamento ganhou espaço na fabricação de alguns materiais, como a operação de acabamento do aço AISI 4340, que no passado era realizada pelo processo de retificação. Atualmente, entretanto, pode-se empregar o processo de torneamento em sua etapa final, permitindo acabamentos de superfície, de forma e de medida tão bons quanto a retificação, com a vantagem de ser mais econômico.

Klocke, Brinksmeier e Weinert [4] compararam as características operacionais do torneamento de materiais endurecidos em relação à retificação, e confirmaram que há vantagens no processo de torneamento em relação à retificação. Os resultados qualitativos dessa comparação são mostrados na Figura 1. Cabe destacar que os pontos que estão na periferia possuem os melhores resultados.



Figura 1 - Comparações técnicas entre os processos de retificação e torneamento.



FONTE: Adaptado de Klocke, Brinksmeier e Weinert [4]

Na comparação entre os processos, destaca-se como vantagem do torneamento a flexibilidade do processo, que se refere à capacidade de mudança da ferramenta e/ou do produto, consequentemente contribuindo para a redução do tempo de produção (*lead-time*). Além disso, permite realizar todos os processos de usinagem em uma única máquina-ferramenta, possibilitando combinar múltiplas operações em uma máquina.

Outro destaque é a compatibilidade ambiental que o torneamento apresenta, ou seja, a possibilidade de usinar a seco, resultando em vantagens econômicas e ecológicas se comparado à usinagem que utiliza fluido de corte. Quando se emprega o fluido de corte em um processo de usinagem, tem-se custos relacionados à introdução e ao tratamento deste fluido, que podem variar de 7 a 17% dos custos de fabricação [7]. Quanto aos aspectos ecológicos, o fluido de corte é frequentemente um agente nocivo ao homem, podendo ser causador de vários tipos de doenças, além do problema do seu descarte, que pode provocar agressão ao meio ambiente [7]. Em algumas situações, todavia, é necessário o emprego do fluido de corte na usinagem de materiais endurecidos, como por exemplo quando se precisa controlar a

estabilidade dimensional da peça. Neste caso assegura-se um fluxo contínuo do fluido de corte durante toda a operação de torneamento [26].

Ainda na comparação apresentada na Figura 1, a retificação apresenta como vantagens a confiabilidade do processo, precisão de forma e dimensão, baixa tensão residual de tração e qualidade da superfície. Algumas destas vantagens podem estar relacionadas ao histórico de utilização e de pesquisas envolvidas na área de retificação, por se tratar de um processo bem conhecido e dominado tanto na indústria quanto no meio científico.

Nas operações de torneamento de materiais endurecidos são empregadas ferramentas de PCBN, cerâmicas, e metal-duro [6,31]. Tais ferramentas necessitam de extrema dureza, elevada resistência à compressão, alta resistência a quente e elevada resistência interna de ligação para suportar as severas condições de usinagem [32].

Ferramentas de cerâmica e de PCBN possuem ótimo desempenho no torneamento de materiais endurecidos e inúmeras pesquisas evidenciaram e consolidaram a aplicação dessas ferramentas para o torneamento de materiais endurecidos. No entanto, o processo de fabricação dessas ferramentas ainda é oneroso, sendo as mesmas utilizadas apenas em situações muito específicas.

Uma solução para tais especificidades pode ser encontrada no metal-duro de grãos ultrafinos, que pode ser uma alternativa econômica em relação às ferramentas de PCBN e cerâmica. Metais-duros com granulometria fina e ultrafina possuem elevada dureza, baixa tendência à difusão, alta resistência à flexão, maior resistência do gume e menor custo em relação às ferramentas ultraduras e em função destas propriedades se tornam opções para operações de torneamento de materiais endurecidos [7,33].

Para uma melhor compreensão acerca dos fenômenos que ocorrem no processo de usinagem de materiais endurecidos, a seguir será abordada a formação do cavaco.

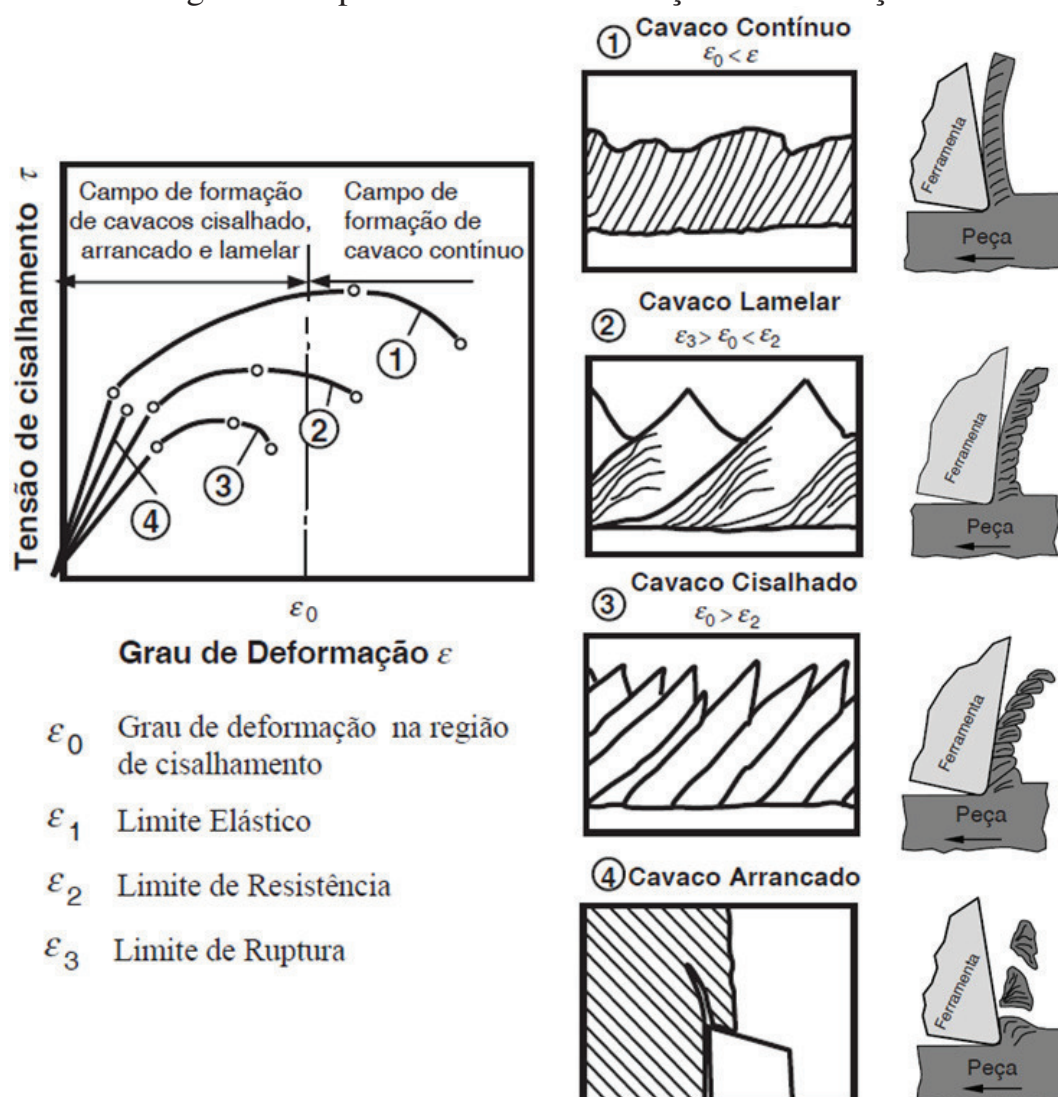
## 2.2 FORMAÇÃO DO CAVACO

O processo de formação de cavaco inicia quando a cunha da ferramenta penetra no material da peça, deformando-o elasticamente e plasticamente. Ao exceder a tensão de cisalhamento máxima do material, este começa a escoar na forma de cavaco, o qual desliza sobre a face da ferramenta [5]. As condições nas quais a formação do cavaco acontece têm influência sobre os vários fatores referentes à usinagem,

tais como: o desgaste da ferramenta, a força de corte, o calor gerado na usinagem, a aplicação do fluido de corte e outros. Adicionalmente tem-se também o seu envolvimento com o aspecto econômico, a qualidade da peça, a segurança do operador, o manuseio, a armazenagem e com o uso adequado da máquina-ferramenta [34].

O processo de formação de cavaco é uma operação dinâmica e cíclica, suas formações são influenciadas pelas propriedades mecânicas, propriedades térmicas e termoquímicas do material usinado, bem como da geometria da ferramenta, dos parâmetros de usinagem, da zona primária de cisalhamento, das possíveis interações entre a zona primária e secundária de cisalhamento e da máquina-ferramenta [10]. Sua formação pode resultar em quatro tipos de cavaco, segundo Klocke [5], o qual considera a relação do diagrama tensão de cisalhamento versus o grau de deformação  $\epsilon$ , conforme ilustra a Figura 2.

Figura 2 - Tipos de cavacos em relação à deformação.



FONTE: Adaptado de Klocke [5] e Wyen [35]

As definições dos tipos de cavacos são descritas sucintamente conforme Klocke [5] e Stemmer [10].

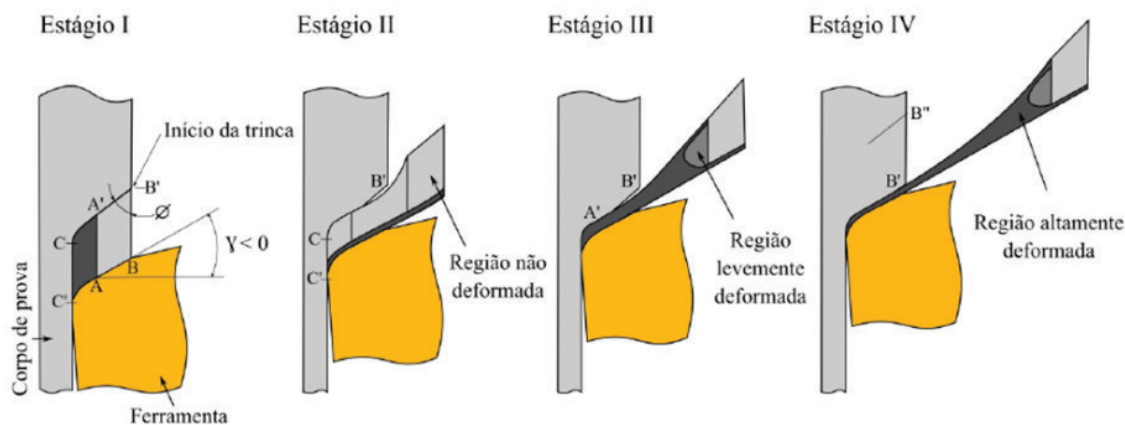
- Cavacos contínuos geralmente se formam durante a usinagem de materiais dúcteis e ocorrem quando o material tem uma capacidade de deformação elevada ( $\varepsilon_0 > \varepsilon$ ), não apresenta encruamento acentuado e tem baixa tendência a vibrações.
- Cavacos lamelares são formados quando a condição  $\varepsilon_3 > \varepsilon_0 > \varepsilon_2$  é válida, ou seja, sua estrutura está entre o cavaco contínuo e cisalhado, ou quando a estrutura do material é irregular ou quando vibrações levam a variações na espessura do cavaco. Apresentam lamelas justapostas e sua formação se dá pelo efeito da temperatura e da pressão que soldam as lamelas e o cavaco torna-se inteiriço.
- Cavacos segmentados ou cisalhados em geral se formam em materiais frágeis e em aços endurecidos. Sua formação consiste na separação de segmentos de cavacos que são seccionados na região de cisalhamento e subsequentemente se unem através do caldeamento.
- Cavacos arrancados são constituídos por fragmentos arrancados da peça usinada e ocorrem normalmente na usinagem de materiais frágeis com estrutura irregular. Eles não são cisalhados e sim arrancados da superfície, o que faz com que a superfície da peça seja danificada por lascamento.

Os materiais não apresentam o mesmo comportamento sob as mesmas condições de corte, e isso também é verdade para o mesmo material com diferentes durezas. Desse modo, o torneamento de materiais endurecidos é diferente da usinagem de materiais não endurecidos, basicamente, em função dos mecanismos envolvidos na formação de cavacos e do comportamento das componentes das forças de usinagem [36].

No processo de torneamento de materiais não endurecidos o principal mecanismo de formação de cavaco é o cisalhamento seguido da deformação plástica. Já em materiais endurecidos ocorre um mecanismo de nucleação e propagação das trincas [37,38], podendo ocorrer a geração de cavacos dente de serra. Os fatores que diretamente influenciam nesta formação são a dureza do material e a velocidade de corte [28].

Poulachon e Moisan [39], em estudo sobre o mecanismo de corte do aço DIN 100Cr6 de dureza 62 HRC, apresentam as etapas da formação do cavaco dente de serra, conforme Figura 3.

Figura 3 – Etapas da formação do cavaco dente de serra.



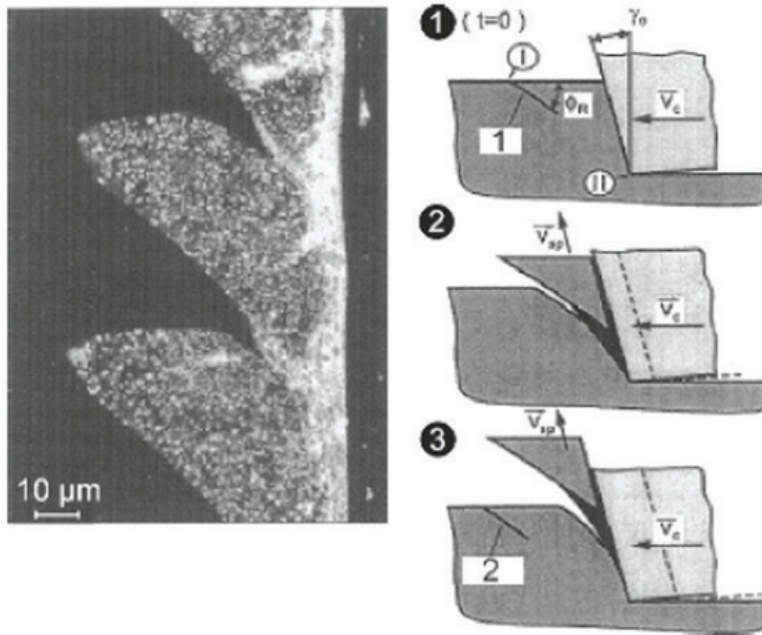
FONTE: Boing [14] *apud* Poulachon e Moisan [39]

A formação do cavaco dente de serra inicia-se com a separação do material da peça através de uma trinca que surge na superfície livre do cavaco, e continua em direção à ponta da ferramenta até que as tensões de compressão formadas a partir da ponta da ferramenta são fortes o suficiente para interromper a propagação da trinca. Quando a tensão atinge um determinado valor, ocorre o cisalhamento do material, e como o segmento é liberado a partir da trinca, a tensão de compressão começa a acumular e a formar uma nova trinca, dando assim início a um novo processo [36,39].

Segundo Klocke [5], na usinagem de materiais endurecidos, duas formas distintas de cavaco podem surgir, e são classificadas de acordo com a espessura do cavaco. Quando a espessura é menor que 20  $\mu\text{m}$ , ocorre a formação de cavaco contínuo, por outro lado, quando a espessura do cavaco é maior que 20  $\mu\text{m}$ , há a formação de cavaco dente de serra.

Grzesik [12] usou essa classificação em pesquisa sobre o mecanismo de formação do cavaco dente de serra na usinagem do aço DIN 100Cr6 (60 – 62 HRC) com ferramenta de PCBN. O resultado obtido desse experimento pode ser visualizado na Figura 4.

Figura 4 - Mecanismo de formação do cavaco do aço DIN 100Cr6 com o emprego de ferramenta de PCBN.



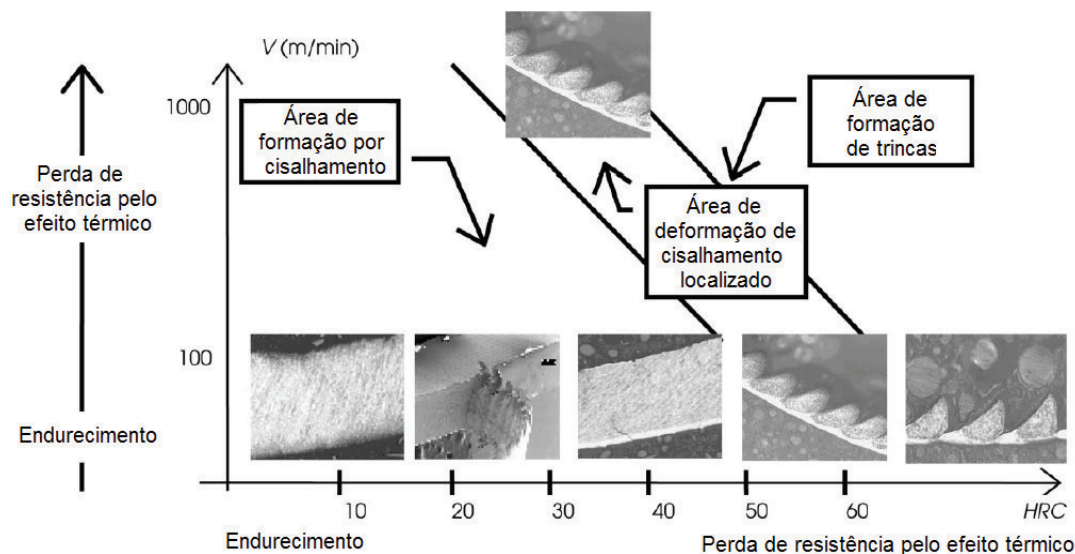
FONTE: Grzesik [12]

No lado esquerdo da Figura 4 é possível observar a forma do cavaco resultante do torneamento do aço DIN 100Cr6. De acordo com o autor, obteve-se um cavaco com espessura de 50  $\mu\text{m}$ , o qual foi classificado como cavaco dente de serra.

Já no lado direito da Figura 4 observa-se uma representação esquemática do processo de formação do cavaco, onde é possível visualizar o escorregamento da lamela em função do surgimento de uma trinca, e tem-se a propagação do esforço de cisalhamento na peça. Os segmentos de cavacos livres deslizam entre a face inclinada e separam a superfície recém-formada. Esse segmento de cavaco conduz ao aumento da pressão no cavaco para exercer novamente o esforço crítico de cisalhamento, formando-se assim a próxima trinca, e dando continuidade ao processo cíclico do mecanismo de formação de cavaco.

Em seus estudos, Poulachon, Moisan e Jawahir [28] e Poulachon e Moisan [39] mostraram a transição da formação do cavaco em função da variação da dureza do material e da velocidade de corte no torneamento do aço AISI 52100 com ferramenta de PCBN. Os resultados desse estudo são apresentados na Figura 5.

Figura 5 - Morfologia do cavaco em função da dureza do material e da velocidade de corte no corte ortogonal.



FONTE: Adaptado de Poulachon *et al* [28]

A Figura 5 mostra a morfologia dos cavacos em função da dureza do material. No intervalo de 10 a 50 HRC de dureza, constatou-se a formação de cavacos contínuos, a deformação plástica é predominante na área de cisalhamento, e a energia consumida é controlada pela resistência à tração do material [28].

Para baixas velocidades de corte os cavacos segmentados começam a se formar quando a dureza do material excede a dureza de 50 HRC, e nessa situação, normalmente, ocorre o cavaco dente de serra. Quando a dureza do material excede a 50 HRC, há dois fenômenos conflitantes que afetam o mecanismo de corte: o primeiro é o aumento da tensão de cisalhamento devido ao aumento da dureza do aço, e o segundo é a redução da tensão de escoamento devido à alta temperatura de corte [28].

A partir da Figura 5, é possível observar, também, que o cavaco dente de serra ocorre para durezas menores que 50 HRC, e tal fenômeno está relacionado com o emprego de alta velocidade de corte.

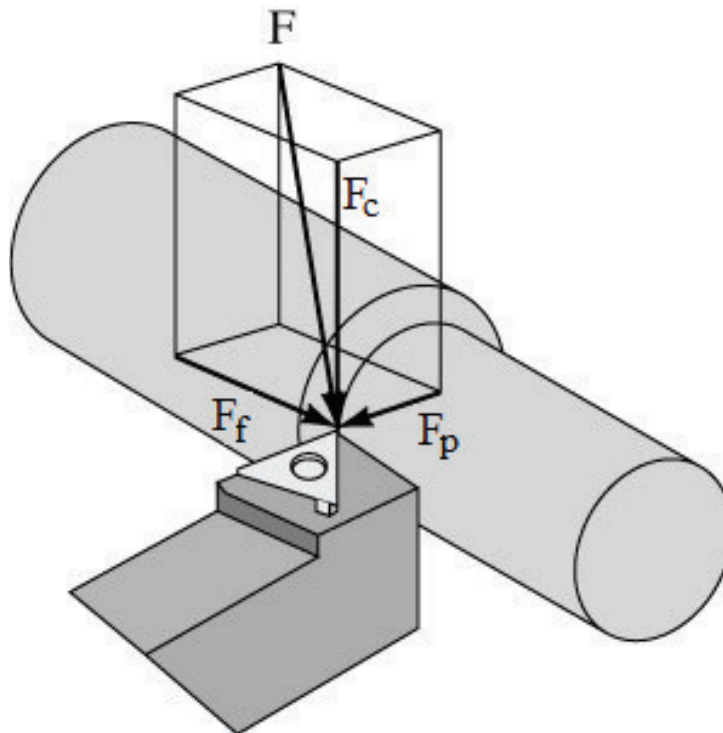
Para fundamentar e compreender os fenômenos que ocorrem na operação de torneamento de materiais endurecidos, a seguir será discutido o comportamento das componentes da força de usinagem no processo de torneamento de materiais endurecidos.

## 2.3 FORÇA DE USINAGEM NO TORNEAMENTO DE MATERIAIS ENDURECIDOS

Durante a operação de torneamento, para deformar e arrancar o material, ou seja, remover o cavaco, a ferramenta de corte exerce uma determinada força sobre a peça. Logo, o conhecimento da força de usinagem permite determinar a potência de corte, as forças atuantes nos elementos da máquina-ferramenta, o rendimento da máquina para diferentes cargas e velocidades de trabalho, além de contribuírem para o projeto da ferramenta de corte [6,40].

Na operação de torneamento, a peça exerce uma força sobre a ferramenta que é chamada de força de usinagem ( $F_u$ ). Essa força é desmembrada nas seguintes componentes: força de corte ( $F_c$ ), força de avanço ( $F_f$ ) e força passiva ( $F_p$ ), e sua decomposição está representada na Figura 6

Figura 6 - Componentes da força de usinagem na operação de torneamento.



FONTE: Adaptado de Isakov [41]

A intensidade da força de usinagem ( $F_u$ ) pode ser determinada matematicamente conforme a Equação 1, e os valores das componentes da força de corte, força de avanço e força passiva são obtidas por meio de ensaios práticos utilizando dinamômetros.



$$F_u = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2} \quad (1)$$

A correlação da força de usinagem com a seção do cavaco no processo de usinagem de geometria definida tem sido representada de forma adequada pelo modelo empírico de Kienzle, usualmente adotado para determinar a força de corte no processo de torneamento, pois fornece melhor equilíbrio entre a complexidade e exatidão no cálculo de força de corte [5,42]. Diferentemente de outros modelos, a equação de Kienzle baseia-se na espessura e na largura de corte e não mais no avanço e nem na profundidade de corte.

A equação de Kienzle, Equação 2, estabelece uma relação geométrica entre a força específica de corte e a seção de usinagem (espessura de usinagem e largura de usinagem), de modo a fornecer fundamentação para determinar as componentes da força usinagem [43].

$$F_c = k_{c1.1} \cdot b \cdot h^{(1-m_c)} \quad [N] \quad (2)$$

Onde:

- $k_{c1.1}$  é a força específica de corte, que é definida como a força necessária para arrancar um cavaco com a seção de  $1 \times 1 \text{ mm}^2$  [6,10];
- $b$  é a largura de corte;
- $h$  é a espessura de corte;
- $(1-m_c)$  é o expoente de Kienzle para espessura de usinagem.

Na equação de Kienzle, os valores da força específica de corte e do expoente de Kienzle são completamente dependentes entre si e caracterizam o material da peça usinada, bem como o material e a geometria da ferramenta de corte [43]. Para cada material tem-se uma força específica de corte ( $k_{c1.1}$ ) e um expoente  $(1-m_c)$ . Os valores de  $k_{c1.1}$  e  $(1-m_c)$  são determinados experimentalmente medindo-se a componente da força de usinagem em função da variação da espessura de usinagem.

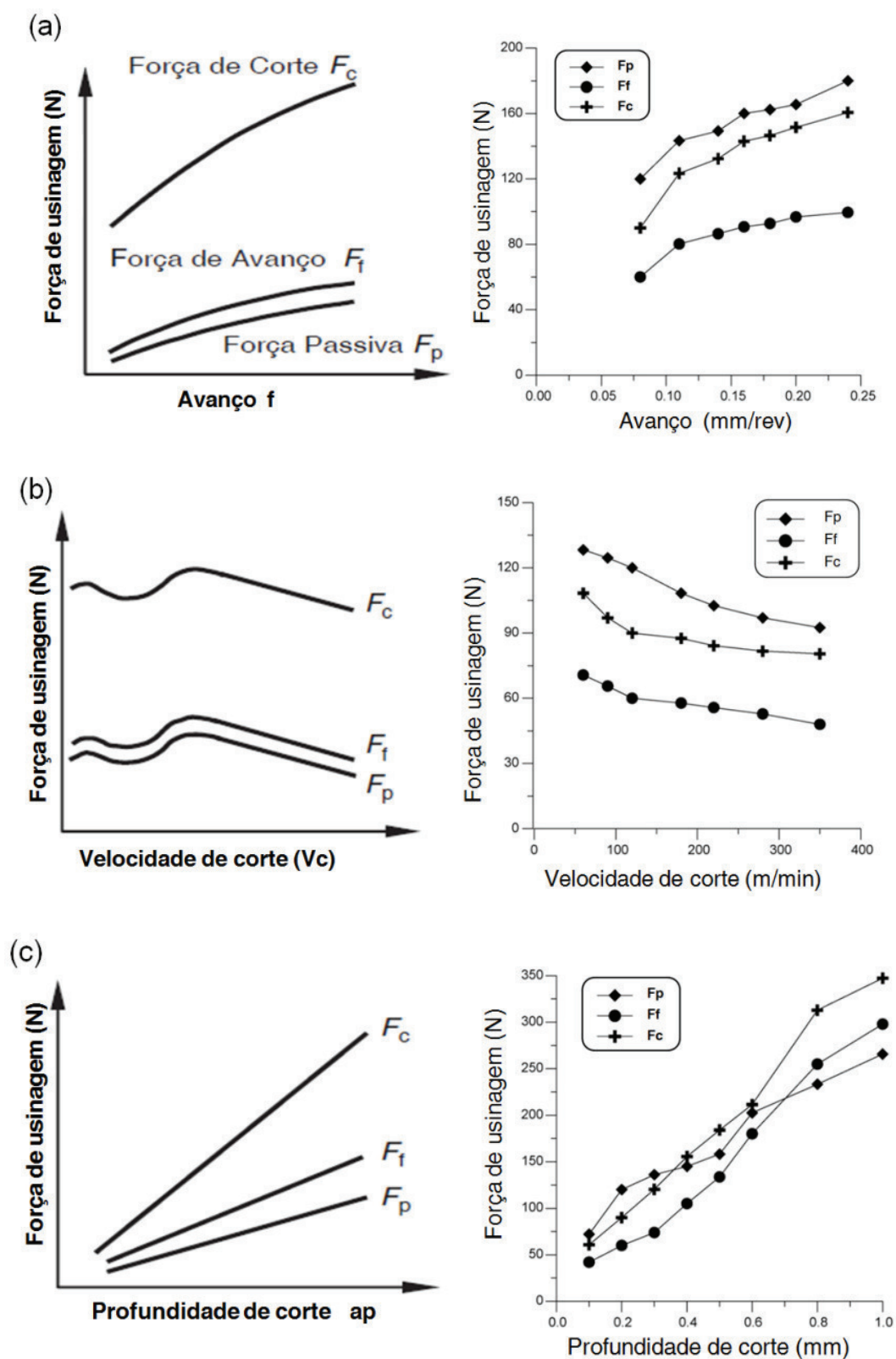
No torneamento de materiais endurecidos a intensidade da força de usinagem não é necessariamente elevada em comparação com as forças de usinagem envolvidas em materiais dúcteis [36]. Com o aumento da dureza do material, o ângulo de cisalhamento aumenta e, por conseguinte a área de contato da interface cavaco-ferramenta torna-

se menor, contribuindo para a redução das componentes da força de usinagem [44]. Além disso, o cavaco é formado depois da pequena deformação plástica, conseqüentemente, a energia consumida e a força de usinagem são reduzidas, apesar da alta resistência do material endurecido. Salienta-se ainda que, normalmente, no torneamento de materiais endurecidos empregam-se elevadas velocidades de corte, baixos valores de avanço e pequenas profundidades de corte, gerando uma pequena área de corte.

A força de usinagem e sua direção são influenciadas pelos parâmetros de corte (profundidade de corte, taxa de avanço, velocidade de corte) e pela geometria da ferramenta utilizada.

A Figura 7 mostram uma comparação das tendências do comportamento das componentes da força de usinagem em função do avanço, da velocidade de corte e da profundidade corte entre a usinagem convencional [5] (lado esquerdo da figura), e da usinagem do aço DIN 100Cr6 (60 HRC de dureza) com uma ferramenta de CBN-L apresentada por Yallese *et al* [45] (lado direito da figura).

Figura 7 - Comportamento das componentes da força de usinagem em função do avanço, da velocidade de corte e da profundidade de corte entre a usinagem convencional (lado esquerdo) e a usinagem do aço DIN 100-Cr6 (lado direito).



FONTE: Adaptado de Klocke [5] e Yallese *et al* [45]

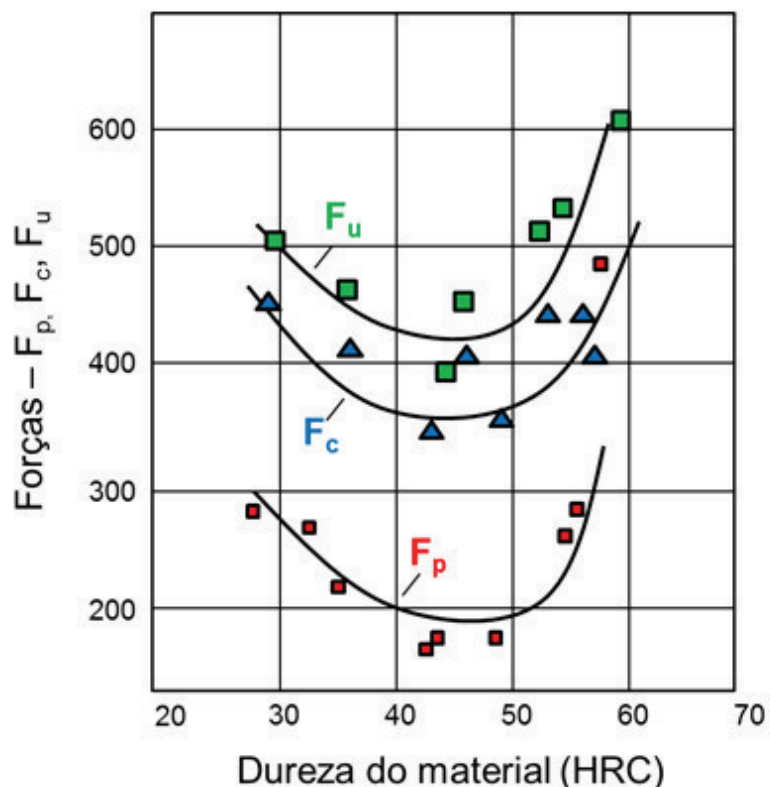
Uma característica destacada na Figura 7 (a) e (b) é a semelhança do comportamento das componentes da força de usinagem entre a usinagem de materiais não endurecidos e da usinagem do aço DIN 100Cr6 de 60 HRC de dureza. No caso da Figura 7 (a) os valores das componentes da força de usinagem para ambos os tipos de usinagem aumentam com o aumento da espessura de usinagem. Este comportamento de aumento está associado com o aumento linear do contorno e o aumento geométrico da seção de corte. Já nos gráficos da Figura 7 (b), observa-se uma redução das componentes das forças de usinagem com o aumento da velocidade de corte. Esta redução é provocada pelo aumento da temperatura na raiz do cavaco, decorrente da redistribuição da condução do calor gerado nesta região, minimizando a quantidade de calor conduzido para a peça, pela diminuição da resistência ao cisalhamento do material com o aumento das temperaturas [5], e conseqüentemente alterando o ângulo de cisalhamento que o leva a uma redução na área de contato entre cavaco-ferramenta.

Nos gráficos da Figura 7 (c) as componentes da força de usinagem aumentam proporcionalmente com o aumento da profundidade de corte. Este comportamento de aumento linear das componentes mostra uma independência da largura de usinagem sobre as componentes. Os valores experimentais da parte (c) da Figura 7, mostram que quando a largura de usinagem é muito próxima à espessura de usinagem esta independência não é muito evidente.

A grandeza da força de usinagem depende do material da peça (propriedades mecânicas, físicas e químicas) dos parâmetros de corte, da geometria da ferramenta, da afiação da ferramenta, do fluido de corte e do material da ferramenta [40].

Dentre os fatores mencionados, destaca-se a dureza do material, que tem forte influência sobre a força de usinagem, conforme mostra o estudo de Matsumoto, Barash e Liu [46] e de Tönshoff, Arendt e Amor [44]. Os resultados dessas investigações sobre a dureza do material em relação às forças de usinagem podem ser visualizados na Figura 8

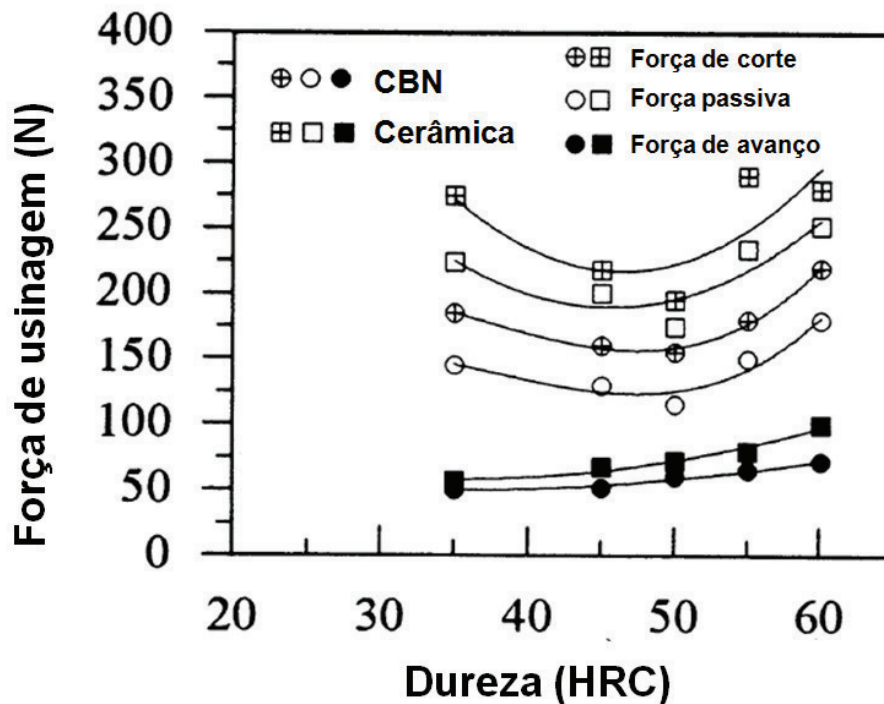
Figura 8 - Relação entre as componentes da força de usinagem e a dureza do aço AISI 4340 ( $v_c = 90$  m/min,  $f = 0,15$  mm e  $a_p = 0,9$  mm).



FONTE: Adaptado de Matsumoto Matsumoto, Barash e Liu [46]

O gráfico da Figura 8 mostra que as forças envolvidas apresentam variação com o aumento da dureza, e quando a dureza do aço varia de 30 a 50 HRC (aproximadamente), têm-se cavacos contínuos e uma diminuição das componentes das forças de usinagem. Esse fenômeno se dá em função do incremento da temperatura na interface cavaco-ferramenta, ocasionando o amolecimento do aço que está sendo usinado, que por sua vez reduz a força de cisalhamento do material [46,44]. Esse comportamento também foi relatado por Luo, Liao e Tsai [11] na usinagem do aço AISI 4340 com ferramentas de cerâmicas e CBN com velocidade de corte de 100 m/min, com avanço de 0,1 mm e com profundidade de corte de 0,2 mm, conforme mostra Figura 9.

Figura 9 - Variação da força de usinagem em relação à dureza do aço AISI 4340.

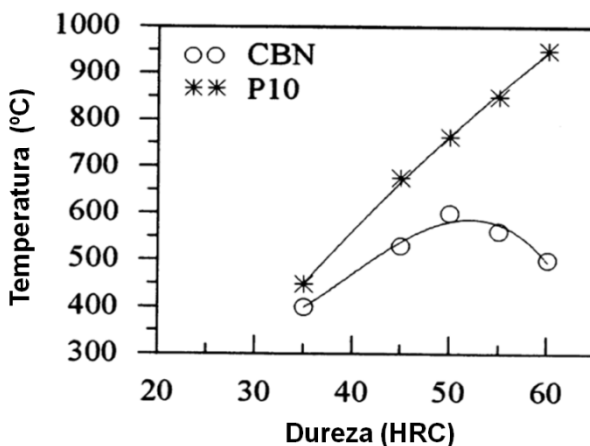


FONTE: Adaptado de Luoa, Liao e Tsai [11]

Na Figura 9, é possível verificar que as componentes da força de usinagem têm diferentes grandezas para cada material de ferramenta empregado. Destaca-se a ferramenta de cerâmica, que apresenta maior força do que a ferramenta de CBN, e esse evento, segundo os autores, está condicionado à menor temperatura na zona de corte, pois a ferramenta de CBN possui maior condutividade térmica do que a ferramenta de cerâmica, ocasionando um aumento na força de adesão entre cavaco-ferramenta.

O comportamento da temperatura em relação à dureza do material foi relatado por Luo, Liao e Tsai [11], que tornearam o aço AISI 4340 com diferentes durezas com ferramenta de CBN e de metal-duro de classe P10, com uma velocidade de corte de 100 m/min, com avanço de 0,1 mm e com profundidade de corte de 0,2 mm, conforme mostra o gráfico da Figura 10.

Figura 10 - Relação da temperatura de corte com a dureza do material.



FONTE: Adaptado de Luo, Liao e Tsai [11]

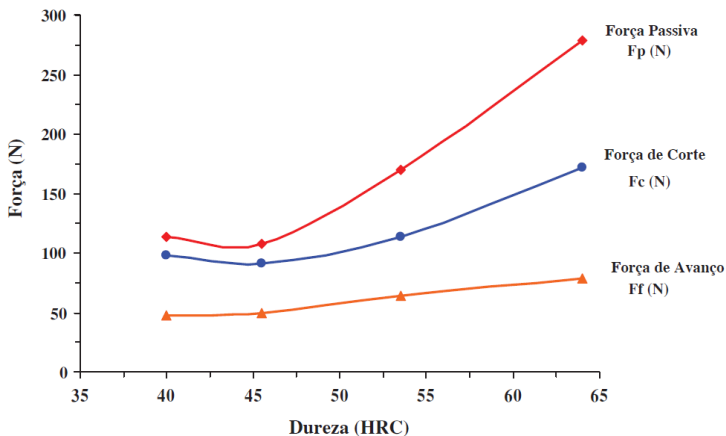
A temperatura verificada com a ferramenta de CBN aumenta progressivamente e sofre uma inflexão na dureza de aproximadamente de 50 HRC, e a partir deste valor de dureza a temperatura diminui. A região de maior temperatura consiste com a região de menor força mostrada nos gráficos da Figura 8 e da Figura 9. Este comportamento é explicado pela diminuição da resistência do cisalhamento do material com o aumento da temperatura na região de corte, o que por sua vez ocasiona um aumento no ângulo de cisalhamento, que reduz a espessura do cavaco, e conseqüentemente reduz a área de contato entre ferramenta-cavaco, reduzindo a quantidade de calor transmitida para a ferramenta [46,44,47].

Após a região de inflexão, conforme Figura 8 e Figura 9, ou seja, em que a dureza da peça excede 50 HRC, há um aumento drástico das componentes das forças usinadas e o mecanismo de formação de cavaco é alterado, formando-se cavacos segmentados. Esse aumento é ocasionado pelo aumento da resistência mecânica do material, pelo aumento da força de atrito na região e pela redução da tensão de escoamento devido à geração de calor, tendo como resultado o aumento das componentes da força de usinagem. Adiciona-se também a este aumento a queda da temperatura na interface ferramenta-cavaco, de acordo com o gráfico da Figura 10, pois com o aumento da dureza do aço, o material tende a ficar frágil e a energia de deformação é pequena.

Dessa maneira, o calor gerado na região do corte não é suficiente para amolecer termicamente o material [46,44].

Os fenômenos citados para o aço AISI 4340 também foram reportados para o aço AISI 52100 de acordo com Bouacha *et al* [48]. Esses autores tornearam o aço AISI 52100 com durezas distintas, com ferramenta de CBN com velocidade de corte de 130 m/min, com avanço de 0,08 mm/rev e profundidade de corte de 0,15 mm, conforme Figura 11.

Figura 11 - Efeitos da dureza do material sobre as componentes da força de usinagem.



FONTE: Adaptado de Bouacha *et al* [48]

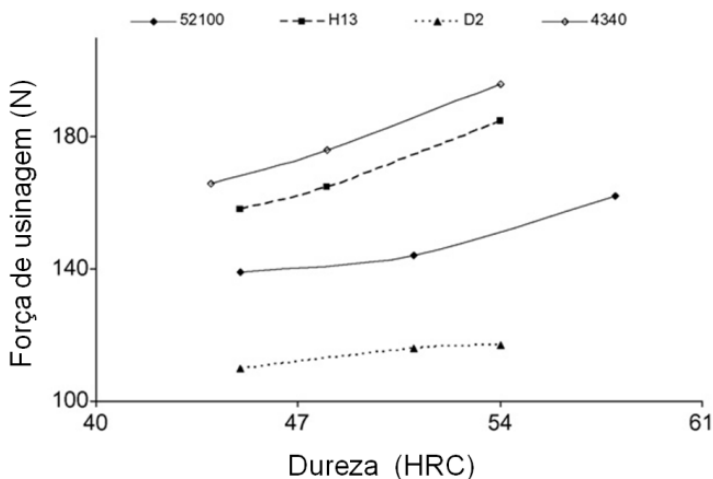
No experimento realizado por Bouacha *et al* [48] é possível observar uma queda nas componentes das forças e posteriormente um rápido aumento das mesmas, comportamento similar visto no gráfico da Figura 8 e Figura 9. Na Figura 11, destaca-se a componente da força passiva que apresenta maior valor entre as forças de usinagem, e esta diferença está relacionada com a composição do material, com o aumento da resistência do material e com a utilização de um ângulo de saída negativo do cavaco [48], pois este ângulo tem relação com a área de contato que influencia no escorregamento do cavaco sobre a superfície de saída.

Qian e Hossan [49] realizaram uma simulação numérica do processo de torneamento de materiais endurecidos para os aços AISI 52100, AISI H13, AISI D2 e AISI 4340 em relação a sua dureza, e



empregaram uma ferramenta de CBN na simulação. O resultado está representado na Figura 12.

Figura 12 - Efeitos da força de corte sobre a dureza do material.

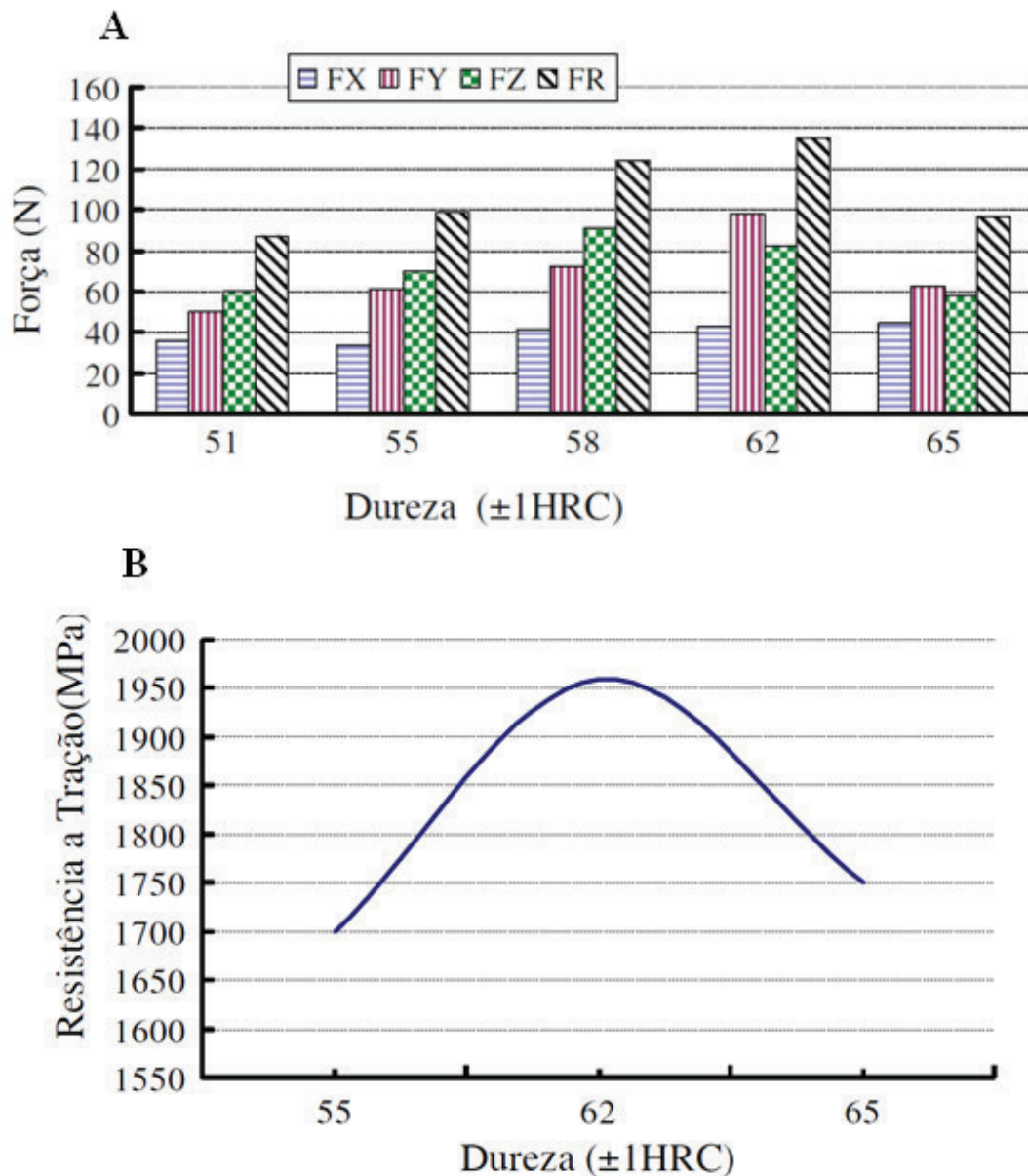


FONTE: Adaptado de Qian e Hossan [49]

Com a simulação numérica realizada pelos autores, Figura 12, verifica-se que as forças de usinagem variam em função da dureza do material simulado, e que cada material apresenta um comportamento distinto. Dessa maneira, observa-se que a força de usinagem para o aço AISI 4340 é a maior entre os materiais simulados e a menor força de usinagem é do aço AISI D2. Os autores relacionam essa diferença de força de usinagem com a microestrutura de cada material, com a temperatura na interface ferramenta-cavaco, bem como com a diferença da região elástica de cada material.

Tang *et al* [50], ao estudarem a relação entre força de usinagem e dureza do aço AISI D2, observaram que as forças variam conforme o aumento da dureza do aço e que esta variação tem associação com o limite de resistência à tração do material. Essa relação pode ser visualizada na Figura 13, na qual FX é a componente da força de avanço, FY é a componente da força passiva, FZ é a componente da força de corte e FR é a força de usinagem.

Figura 13 - **A** – Gráfico de forças em relação a dureza do aço AISI D2 ( $v_c = 150$  m/min,  $a_p = 0,15$  mm e  $f = 0,10$  mm). **B** – Gráfico do limite de resistência a tração correlacionado com a dureza do aço AISI D2.



FONTE: Adaptado de Tang *et al* [50]

Na Figura 13, parte A, o valor da força resultante aumenta com o incremento da dureza da peça até 62 HRC e depois a intensidade da força diminui quando a dureza da peça chega a 65 HRC. Esse comportamento é um reflexo da resistência à tração do material representada na parte B da Figura 13.

O entendimento do comportamento das componentes da força de usinagem e dos fenômenos que ocorrem na interface cavaco-ferramenta é importante para a compreensão dos fenômenos que ocorrem durante o torneamento de materiais endurecidos. Tal conhecimento ajuda a

entender a operação de torneamento de materiais endurecidos empregando novos materiais de ferramentas, como as ferramentas de metal-duro de grãos ultrafinos.

Para discutir com mais propriedade estes fenômenos, no próximo item serão abordadas ferramentas de corte utilizadas na usinagem de materiais endurecidos.

## 2.4 FERRAMENTA DE CORTE

Nas operações de torneamento de materiais endurecidos, normalmente utilizam-se ferramentas de PCBN e de cerâmica [51] por suportarem as severas condições de usinagem geradas durante o processo de corte desses materiais.

Além dessas ferramentas, pode-se empregar ferramentas de metal-duro de grãos ultrafinos na usinagem de materiais endurecidos, pois elas são resultantes do desenvolvimento de novas classes, do refino de grãos e de técnicas de alterações do substrato, tornando-as adequadas para o emprego no processo de usinagem de materiais endurecidos. Além disso, elas podem ser uma alternativa econômica em relação às ferramentas de PCBN e de cerâmica.

A seguir serão discutidas as propriedades e as aplicações das ferramentas de PCBN e de metal-duro no torneamento de materiais endurecidos.

### 2.4.1 Ferramenta de PCBN

A ferramenta de corte de Nitreto de Boro Cúbico de Policristalino (PCBN) é composta por grãos micrométricos de nitreto de boro cúbico (CBN) em uma matriz ligante (cerâmica ou metálica), fabricada por metalurgia do pó. As ferramentas de PCBN são classificadas como sendo de alto teor de CBN e de baixo teor de CBN [52]. Ferramentas classificadas como de alto teor de CBN constituem-se de cerca de 80-90 % de CBN e têm um ligante do tipo metálico. O elevado teor de CBN aumenta a dureza e a tenacidade, porém causa maior propensão à difusão quando comparada às ferramentas de baixo teor de CBN. Dessa maneira, as ferramentas de alto teor de CBN são geralmente recomendadas em operações de torneamento de materiais endurecidos com cortes interrompidos [51], na produção mista e quando houver um pouco de instabilidade no *set-up* da máquina [53].

Já as ferramentas com baixo teor de CBN são compostas de 40-70% de CBN, e normalmente seu ligante é à base de cerâmica (TiC ou

TiN) [52], o que proporciona maior estabilidade química, porém reduz a dureza e a tenacidade, favorecendo o desgaste por microlascamentos. Essa ferramenta é mais resistente ao desgaste por difusão, e normalmente é aplicada em operações de acabamento de corte contínuo [54] e de cortes interrompidos leves em que as condições da máquina são estáveis [53].

As ferramentas de PCBN são geralmente empregadas na usinagem de materiais endurecidos, sobre as quais inúmeras pesquisas evidenciam e consolidam sua aplicação. Seu emprego na usinagem de materiais endurecidos se dá, principalmente, em função de sua elevada dureza, e por apresentar elevada estabilidade química, principalmente em relação à oxidação, além de ter baixa solubilidade no ferro, boa resistência ao choque térmico, boa tenacidade à fratura e resistência à compressão e à flexão [10,52]. A ferramenta de PCBN também é utilizada em cortes severos, interrompidos e na remoção de cascas tenazes, abrasivas e irregulares de peças fundidas e forjadas.

O que mais limita a aplicação dessa ferramenta na indústria é o seu alto custo, em função da sua fabricação. Na tentativa de diminuir os custos com ferramentas para o torneamento de materiais endurecidos, os fabricantes estão buscando novas ferramentas para esse nicho de aplicação, e a ferramenta de metal-duro de grãos ultrafinos é uma alternativa. A seguir serão discutidas as propriedades e aplicações da ferramenta de metal-duro de grãos ultrafinos.

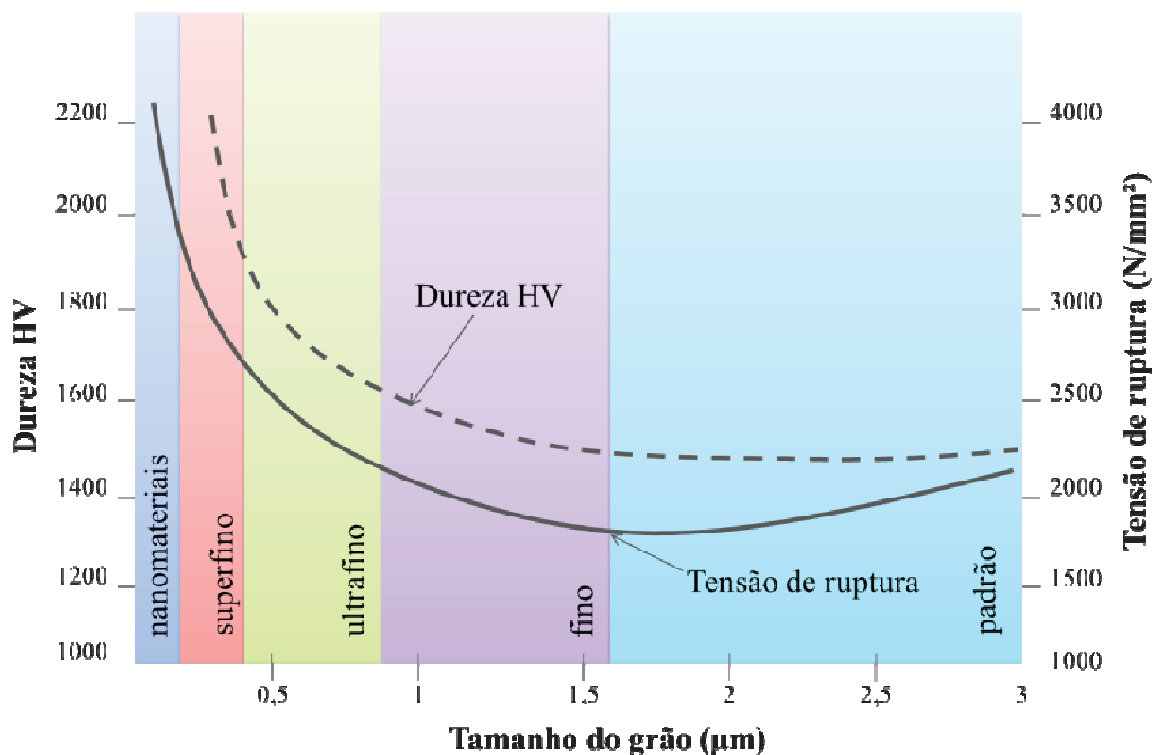
#### **2.4.2 Ferramenta de Metal-duro**

O metal-duro é fabricado pelo processo de metalurgia do pó e composto por partículas duras finamente divididas de carbonetos de metais refratários sinterizados com um ou mais metais do grupo do ferro, formando um produto de elevada dureza e resistência à compressão, que são excelentes combinações para a resistência ao desgaste, para a resistência mecânica e para a resistência à tenacidade [6,34].

A fabricação da ferramenta de metal-duro pode ser feita com diferentes materiais, o que oportuniza diversas composições, resultando em diferentes propriedades e aplicações. O desempenho da ferramenta de metal-duro no processo de usinagem é influenciado pela composição química, pela microestrutura, pela quantidade de ligante, bem como pelo tamanho dos grãos do substrato, e estes podem variar desde submicrométricos até poucos micrometros. A Figura 14 mostra os

efeitos que a granulometria da ferramenta de metal-duro tem em função da dureza.

Figura 14 - Correlação entre o tamanho do grão da ferramenta de metal-duro com sua dureza.

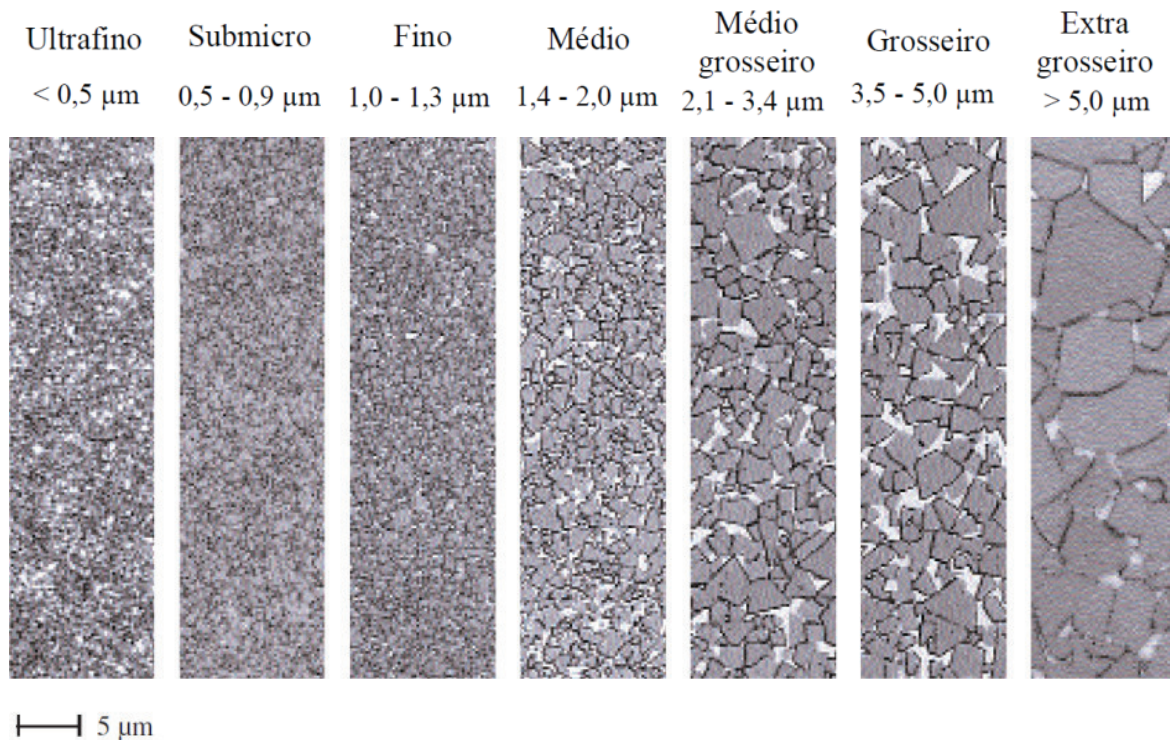


FONTE: Adaptado de Christoffel (2001) *apud* Rodrigues [55]

Alterando-se o tamanho do grão da ferramenta de metal-duro, modifica-se a dureza da ferramenta, conforme ilustra o gráfico da Figura 14. Dessa maneira, é possível aumentar a dureza e a resistência mecânica da ferramenta de corte diminuindo o tamanho médio dos grãos.

Os grãos da ferramenta de metal-duro podem ser classificados de acordo com o tamanho do grão de sua estrutura. A Figura 15 mostra a classificação das ferramentas de metal-duro em função do tamanho dos grãos, segundo o fabricante Sandvik Coromant.

Figura 15 - Classificação das ferramentas de metal-duro em função do tamanho de grão.



FONTE: Adaptado de Sandvik Coromant [56]

Grãos muito pequenos propiciam maior fator de empacotamento, e à medida que se diminui o tamanho do grão da ferramenta de metal-duro aumenta-se a dureza e a resistência ao desgaste, bem como a resistência mecânica da ferramenta de corte [57]. Além disso, diminui a condutibilidade térmica da ferramenta, o que favorece a diminuição da afinidade química e do aumento da resistência do gume [5,33].

Além dos substratos, os tipos e os métodos de revestimento também contribuíram para a melhora da ferramenta de metal-duro, pois com a aplicação de uma ou mais camadas de revestimento promove-se menor atrito, maior estabilidade química e melhor resistência ao desgaste da ferramenta.

Diante dos benefícios que a ferramenta de metal-duro de grãos ultrafinos tem quando comparada à ferramenta de metal-duro convencional, ela pode assumir uma específica faixa de aplicação no processo de torneamento de materiais endurecidos e de superliga. Assim, a ferramenta de metal-duro de grãos ultrafinos pode se tornar uma alternativa econômica em relação às ferramentas de PCBN e de cerâmica no corte de materiais endurecidos.

## 2.4.2 Considerações geométricas

Dentre as variáveis envolvidas no processo de torneamento, a geometria da ferramenta de corte tem importância nos fenômenos relacionados à usinagem, uma vez que pequenas alterações dimensionais e angulares refletem no comportamento da vida da ferramenta, no desempenho do processo, bem como nas componentes da força de usinagem. A geometria também interfere na formação do cavaco, na geração de calor, nos fenômenos mecânicos, no desgaste da ferramenta, na qualidade da superfície e na integridade da superfície durante o processo de torneamento [58].

A geometria de corte muitas vezes é projetada para realização de uma operação específica de usinagem e deve ser escolhida para atender à necessidade requisitada. Ademais, a definição da geometria está associada às condições de usinagem, às especificações da ferramenta e às características do material da peça. Consequentemente, uma geometria bem definida contribui para o aumento da resistência de desgaste, do tempo de vida da ferramenta e da confiabilidade do processo [59]. Para atender às exigências de aplicação, pode-se variar os ângulos das ferramentas de corte, a fim de adequar o gume da ferramenta ao material da peça e aos parâmetros de usinagem. Mudanças no ângulo de saída, no ângulo de folga, no ângulo de posição, no ângulo de inclinação e outros, podem melhorar ou piorar os resultados de usinagem.

O ângulo de saída é por onde o cavaco escoar e é um dos ângulos mais importantes da ferramenta de corte, pois influencia nas componentes da força de usinagem, na potência de corte, na geração de calor e no acabamento da superfície usinada [10]. Quanto maior for o ângulo de saída, menor será o trabalho de recalque e de dobramento do cavaco [6]. Quando se emprega ângulo de saída negativo, coloca-se a ponta da ferramenta sob ação de compressão e elimina-se a formação de trincas devido à tração [60].

No torneamento de materiais endurecidos com o emprego de ferramentas de PCBN e cerâmicas, emprega-se ângulo de saída negativo para manter a integridade do gume, ou seja, para suportar a elevada força de corte e o alto calor gerado durante o torneamento de materiais endurecidos.

Por outro lado, ferramentas de metal-duro de grãos ultrafinos normalmente tem ângulo de saída positivo, o que facilita a penetração da ferramenta na peça, proporciona um maior ângulo de cisalhamento, assegura um menor grau de deformação do material da peça no plano de

cisalhamento, e oportuniza um menor grau de recalque, bem como, favorece o escoamento do cavaco [55].

Em função dessa diferença entre o ângulo de saída da ferramenta de PCBN e da ferramenta de metal-duro de grãos ultrafinos, as componentes da força de usinagem sofrem mudanças consideráveis, pois o ângulo de saída afeta diretamente as componentes da força de usinagem e na potência de usinagem [6]. A Figura 16 apresenta alguns valores teóricos da variação das componentes da força de usinagem em relação ao ângulo de saída de acordo com Klocke [5].

Figura 16 - Influência do ângulo de saída nas componentes da força de usinagem.

Fatores de influência	Mudança nas componentes das forças de usinagem para cada grau de ângulo mudado		
	Força de corte $F_c$	Força de avanço $F_f$	Força passiva $F_p$
Diminuição ↓ Ângulo de saída	↑ 1,5 %	↑ 5,0 %	↑ 4,0 %
Aumento ↑ Ângulo de saída	↓ 1,5 %	↓ 5,0 %	↓ 4,0 %

FONTE: Adaptado de Klocke [5]

Os valores das componentes da força de usinagem mudam distintamente com o aumento ou com a diminuição do ângulo da saída da ferramenta. Quando o ângulo de saída é incrementado, este influencia na diminuição das componentes das forças de usinagem, porém reduz a estabilidade mecânica da ferramenta e pode ocasionar uma fratura da ferramenta. Uma redução no ângulo de saída tende a tornar a área de contato maior e limita o escorregamento do cavaco sobre a face da ferramenta, ocasionando o aumento das componentes da força de usinagem, e vice-versa [61].

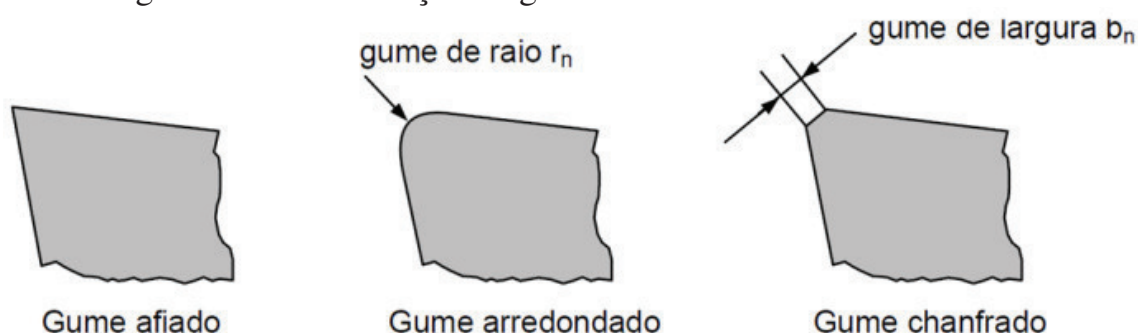
O aprimoramento das ferramentas de corte deu-se, principalmente, no passado em função do melhor desempenho dos materiais de ferramenta de corte, do aperfeiçoamento dos revestimentos e do aprimoramento da macrogeometria e da microgeometria [62]. Dentre essas melhorias, segundo Dogra, Sharma e Durejac [58],



destaca-se o gume da ferramenta, que está relacionado à microgeometria. Este fator exerce grande influência no desempenho e na confiabilidade do processo de usinagem.

A caracterização do gume da ferramenta atualmente é definida pela norma DIN 6582, a qual se refere ao perfil do gume. Tal classificação se dá basicamente da seguinte forma: gume arredondado, gume chanfrado e gume afiado, como mostra a Figura 17. Cabe salientar que essa classificação é viável desde que o raio do gume exerça pouca influência sobre a força de usinagem [63,64].

Figura 17 - Classificação do gume conforme a norma DIN 6582.



FONTE: Adaptado de Wyen [64]

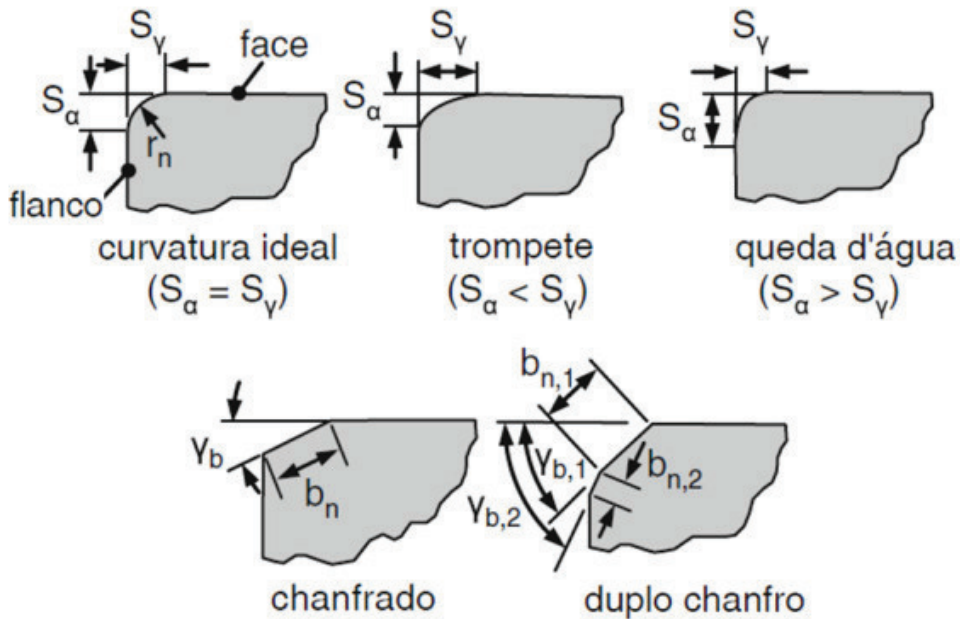
O gume arredondado tem como característica aumentar a resistência mecânica do gume, e este tem um raio de curva de concordância que une os gumes principal e secundário, ou seja, é formado por uma transição entre a face e o flanco [64]. Dependendo do material e do tamanho do raio, esse tipo de geometria gera alterações microestruturais na superfície da peça e produz maiores tensões residuais de compressão, o que favorece a integridade da superfície na peça de trabalho [58,55].

Já o gume chanfrado tem como diferencial um ou mais chanfros na zona de transição, e a execução do chanfro aumenta o ângulo de quina da ferramenta e produz um cavaco fino, porém de espessura uniforme. Os chanfros atuam no fortalecimento do gume, na prevenção de falhas prematuras, bem como na distribuição de tensão e na eficiência térmica [10,55].

Por último, o gume afiado não é arredondado e nem chanfrado, é formado na transição entre a face e o flanco da ferramenta, e, na prática, não é possível produzir um gume afiado. Além disso, um gume afiado não é apropriado para processos de usinagem por causa de sua baixa estabilidade mecânica, quando comparado ao gume arredondado e ao gume chanfrado [59].

Uma diferenciação mais detalhada dos perfis do gume é relatada pelos autores Wyen, Knapp e Wegener [35], Wyen, Knapp e Wegener [63], Wyen [64] e Gonçalves [65], onde gumes arredondados assimétricos e gumes chanfrados e combinações entre estes são levadas em considerações, e esses diferentes tipos são apresentados na Figura 18.

Figura 18 – Classificação detalhada dos gumes.



$r_n$ : Raio do gume

$S_\alpha, S_\gamma$ : comprimento na curvatura do flanco ( $\alpha$ ) e face ( $\gamma$ )

$b_n$ : Largura do chanfro

$\gamma_b$ : ângulo do chanfro

FONTE: Adaptado de Wyen, Knapp e Wegener [63]

Na parte superior da Figura 18 são apresentadas três variações de gumes arredondados, que são: gume de curvatura ideal, gume de trompete e gume de queda d'água. Já na parte inferior são mostrados duas variantes de gumes chanfrados, que são: gume chanfrado e gume duplamente chanfrado. Essa especificação do gume da ferramenta é importante, pois cada tipo atua de maneira diferenciada sobre o material da peça usinada e pequenas variações dimensionais e angulares do gume afetam o mecanismo de formação de cavaco, os esforços de usinagem e o mecanismo de corte.

Além disso, essas alterações influenciam diretamente nas pequenas espessuras de usinagem, como as praticadas no torneamento

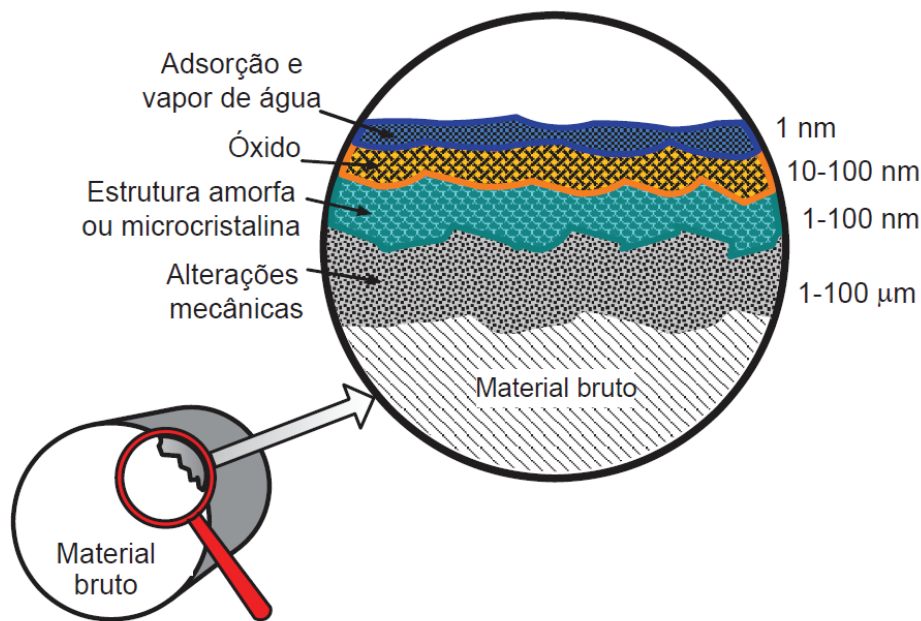
de materiais endurecidos, pois quanto menor a espessura maior é a influência da microgeometria e vice-versa [65]. Cabe destacar que para uma remoção segura de cavacos em ferramentas com gumes arredondados ou chanfrados, recomenda-se usar uma espessura mínima de usinagem de 2 a 3 vezes o valor do raio de gume ( $\rho$ ), ou a largura do chanfro [5].

No torneamento de materiais endurecidos com ferramenta de PCBN, pode-se utilizar gumes arredondados e chanfrados, no entanto, na maioria das vezes são empregados gumes chanfrados [58]. Essa característica foi estudada por Diniz e Oliveira [51] ao empregarem um gume chanfrado de 0,1 mm x 20° e outro com o mesmo chanfro, porém com um incremento de um segmento arredondado na extremidade do chanfro, na usinagem do aço AISI 4340 com 56 HRC. Os autores observaram que no corte contínuo e semi-interrompido, a microgeometria com arredondamento apresentou maior vida na usinagem com a ferramenta de alto teor de CBN. Já na usinagem desse aço com a ferramenta de baixo teor de CBN, a microgeometria que teve maior vida foi a com chanfro. Tal diferença está relacionada ao tipo de desgaste da ferramenta e às pequenas mudanças dimensionais do gume.

## 2.5 QUALIDADE DA SUPERFÍCIE

A qualidade da superfície usinada é caracterizada pelo acabamento obtido durante o processo de usinagem e depende das propriedades físicas, químicas e mecânicas do material, bem como dos parâmetros de usinagem, da máquina-ferramenta e das características da ferramenta de corte. A superfície usinada é o resultado de um processo que envolve recuperação elástica, deformação plástica, geração de calor, vibrações, tensões residuais e, às vezes, reações químicas [6]. Essas transformações são geradas pelo intenso, localizado e rápido efeito mecânico e térmico inerentes ao processo. Tais transformações resultam em uma superfície com fatores superficiais (textura) e subsuperficiais (integridade). A Figura 19 ilustra esquematicamente essas camadas.

Figura 19 – Representação esquemática de uma superfície usinada.



FONTE: Adaptado Astakhov [66]

A integridade da superfície para a engenharia pode ser definida como um conjunto de propriedades que abrange tanto a superfície quanto a camada abaixo da superfície, a fim de garantir segurança, confiabilidade, longevidade e desempenho da superfície [25]. Dessa maneira, a integridade tem relação funcional com as características topográficas, mecânicas, químicas e metalúrgicas da superfície usinada [27], que podem provocar tensões na superfície usinada. As tensões influenciam no comportamento de um componente quando submetido a esforços cíclicos alternantes, influenciando a resistência à fadiga de um componente [4].

A textura da superfície constitui-se por desvios repetitivos ou aleatórios da superfície que formam a topografia tridimensional, e representam os aspectos geométricos da superfície, como: ondulação, rugosidade, defeitos e marcas da ferramenta, os quais são considerados como critérios de controle da qualidade de uma superfície [25,27]. Para analisar a textura da superfície existem vários princípios de medição, instrumentos e métodos, e também um grande número de parâmetros que descrevem a macro e microgeometria da superfície. Dentre os aspectos geométricos citados, destaca-se a rugosidade, pois em muitos processos de usinagem a rugosidade da peça é usada como parâmetro de saída do processo de produção, pode ser utilizada como critério de fim de vida da ferramenta de corte e pode ser empregada para monitorar a

qualidade durante o processo de fabricação, bem como pode ser um indicador da integridade da ferramenta.

A rugosidade consiste em irregularidades finas ou em erros microgeométricos que normalmente resultam da ação inerente do processo de usinagem [6,40]. Ela é constituída por sulcos ou marcas oriundas do processo de usinagem, provenientes da ferramenta, de partículas abrasivas, do gume postiço, do desgaste da ferramenta, de defeitos do material, entre outros.

A rugosidade é quantificada pelos parâmetros verticais de rugosidade. Atualmente existe um grande número de parâmetros relacionados à rugosidade que são adotados por normas internacionais, fato que é atribuído à forma usualmente complexa dos perfis das superfícies. A rugosidade 2D de uma superfície usinada é classificada em parâmetros de amplitude, de espaço e híbrido, com base no sistema de linha média (M), de acordo com os autores [6,25,27]. Os parâmetros de amplitude avaliam o comportamento do perfil da superfície mediante as alturas dos picos ou pelas profundidades dos vales, ou pelos dois, sem considerar o espaçamento entre as irregularidades ao longo da superfície, e são indicados pelos parâmetros  $R_a$ ,  $R_q$ ,  $R_z$ ,  $R_p$ ,  $R_v$  e  $R_{pk}$ . Já os parâmetros de espaço analisam as características pelo espaçamento do desvio do perfil ao longo da superfície e são quantificados pelos parâmetros  $R_{Sm}$  e  $R_{\lambda q}$ . Enfim, os parâmetros híbridos avaliam a combinação dos parâmetros de amplitude e de espaço e são caracterizados pelos parâmetros  $R_{sk}$  e  $R_{ku}$ .

Dentre os parâmetros de amplitude, o parâmetro  $R_a$  é normalmente empregado no controle do processo de fabricação, pois mudanças em sua grandeza indicam alterações no processo, em especial no desgaste da ferramenta [6]. Além disso, o parâmetro de rugosidade  $R_a$  é usado para indicar o estado da superfície em desenhos técnicos e identifica a classe de rugosidade de uma superfície, de acordo com as normas NBR 8404:1984 [67]. A Tabela 2 ilustra essa classificação.

Tabela 2 – Classe de rugosidade em função do parâmetro de rugosidade Ra.

<b>Classe de Rugosidade</b>	<b>Rugosidade Ra [<math>\mu\text{m}</math>]</b>
N12	50
N11	25
N10	12,5
N9	6,3
N8	3,2
N7	1,6
N6	0,8
N5	0,4
N2	0,2
N3	0,1
N2	0,05
N1	0,025

FONTE: Adaptado da norma NBR 8404:1984 [67]

A classe de rugosidade do parâmetro Ra pode ser utilizada para comparar as rugosidades de superfícies diferentes e pode auxiliar na indicação da aplicabilidade de uma superfície usinada. Na operação de torneamento de materiais endurecidos é possível atingir valores de rugosidade de Ra de 0,2 a 0,6  $\mu\text{m}$  em tornos CNC convencionais [68] e valores de rugosidade de Ra 0,2 a 0,3  $\mu\text{m}$  na utilização de tornos CNC com alta precisão, de acordo com Klocke *et al* [69]. Devido a essas grandezas de rugosidade, a indústria metal-mecânica almeja esse processo na tentativa de substituir alguns processos de retificação pelo processo de torneamento. Com esses valores de rugosidade, é possível produzir uma grande parte das peças usadas na indústria automobilística.

Cabe destacar que só o parâmetro Ra não é suficiente para identificar características importantes da superfície da peça, pois ele não distingue picos e vales. Assim, é necessário o emprego de outros parâmetros de rugosidade, tais como Rz e Rt, para identificar as falhas na superfície e as possíveis interações com os fenômenos durante a usinagem.

### 3 EQUIPAMENTOS, MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão descritos os equipamentos, ferramentas e materiais utilizados durante os ensaios de torneamento.

#### 3.1 MÁQUINA-FERRAMENTA

Os ensaios foram realizados em um torno CNC de modelo Heynumat 10U do fabricante Heyligenstaedt pertencente ao Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP) da UFSC.

A máquina-ferramenta possui as seguintes características técnicas: potência nominal no eixo árvore de 75 kW; rotação máxima de 4500 rpm; placa com fechamento hidráulico de três castanhas com pressão máxima de 45 bar; diâmetro da placa de 300mm; e com comando CNC Siemens 802D.

A máquina-ferramenta, que pode ser visualizada na Figura 20, possui uma estrutura robusta, dotada de um rígido barramento inclinado, características imprescindíveis na usinagem de materiais endurecidos.

Figura 20 - Torno CNC de modelo Heynumat 10U.



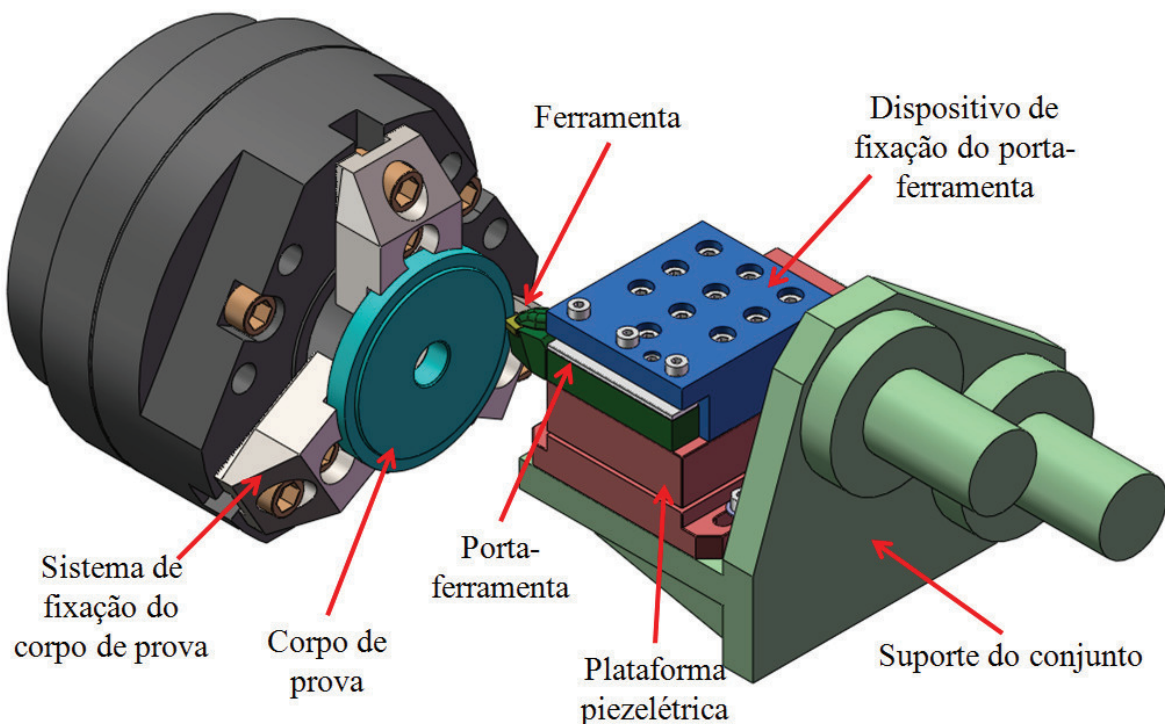
FONTE: Acervo do Grupo GUME

### 3.2.1 Sistema de fixação

Para obtenção de dados confiáveis dos esforços de usinagem no torneamento radial dos materiais endurecidos, foi montado um sistema de medição acurado e rígido.

A Figura 21 mostra uma representação esquemática do conjunto montado para adquirir sinais de força no torneamento. Destaca-se, na figura, o dispositivo de fixação do porta-ferramenta, pois tal foi projetado e fabricado de modo que permitisse realizar o torneamento radial do corpo de prova. No projeto deste dispositivo, assegurou-se que o seu posicionamento ficou de forma plana com a plataforma piezelétrica, conforme o recomendado pelo fabricante da plataforma piezelétrica. Além disso, observou-se os limites de aplicação dos esforços recomendados pelo fabricante do dinamômetro.

Figura 21 - Projeto do aparato de medição de força.



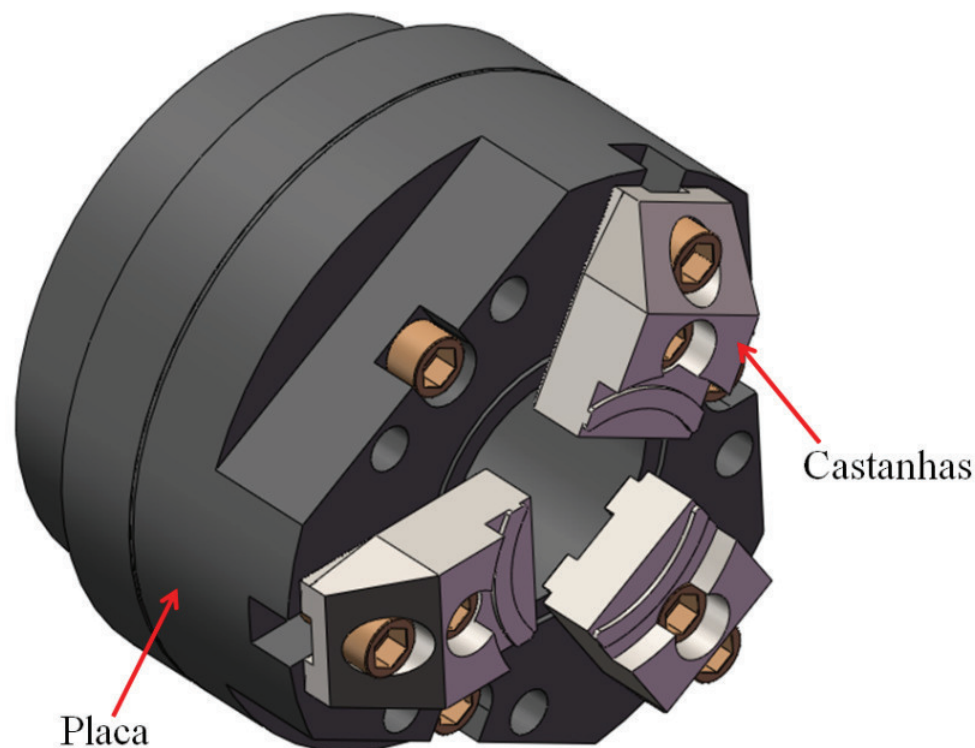
FONTE: Acervo do Grupo GUME

Outro dispositivo desenvolvido e fabricado para o experimento foi a castanha do sistema de fixação do corpo de prova. Ela foi projetada para fixar um corpo de prova específico para os ensaios, com o intuito de garantir o mínimo de espessura possível.



A Figura 22 mostra a representação da castanha que foi construída com o aço AISI 4340 e com dureza de  $40 \pm 1$  HRC.

Figura 22 - Representação do sistema de fixação do corpo de prova.



FONTE: Acervo do Grupo GUME

### 3.3 FERRAMENTAS DE CORTE

Para o torneamento dos materiais endurecidos utilizados nesta pesquisa foram utilizadas as ferramentas de metal-duro de grãos ultra-finos e nitreto de boro cúbico policristalino (PCBN), cujas características serão detalhadas a seguir.

#### 3.3.1 Ferramenta de metal-duro de grãos ultrafinos

Para o torneamento dos aços endurecidos, foram empregadas ferramentas de metal-duro do fabricante Sandvik Coromant®. Os insertos são de metal-duro de grãos ultrafinos de código ISO SNMG 12 04 08 - SM Classe 1105, como mostra a Figura 23.

Figura 23 - Representação do inserto de metal-duro de grãos ultrafinos.



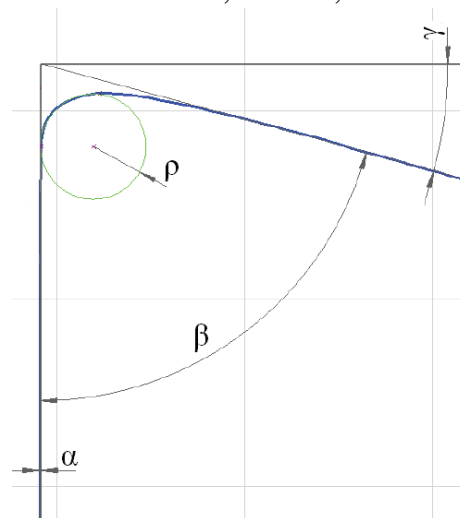
FONTE: Sandvik [70]

As principais características geométricas das ferramentas foram determinadas utilizando-se o microscópio InfiniteFocus G5® da fabricante ALICONA. Na Tabela 3 estão as principais características químicas e geométricas da ferramenta de metal-duro de grãos ultrafinos.

Tabela 3 - Características dos inserts de metal-duro de grãos ultrafinos.

Características	Inserto de meta-duro
Tipo de metal-duro	Classe P
Revestimento	$\text{Al}_3\text{O}_2$
Raio do gume	$28,01 \pm 2,89 \mu\text{m}$
Ângulo de saída	$+ 15,32 \pm 1,29^\circ$
Ângulo de incidência	$- 0,12 \pm 0,10^\circ$
Ângulo de cunha	$74,80 \pm 1,29^\circ$

Perfil do gume



FONTE: Do autor

Os insertos foram fixados no porta-ferramenta externo do fabricante Sandvik Coromant®, de código ISO de DSBNR 2020K, por meio de grampo e pino, conforme Figura 24.

O porta-ferramenta apresenta um ângulo de inclinação de  $-6^\circ$  e ângulo de direção de  $+75^\circ$ .

Figura 24 - Porta-ferramenta usado na pesquisa.

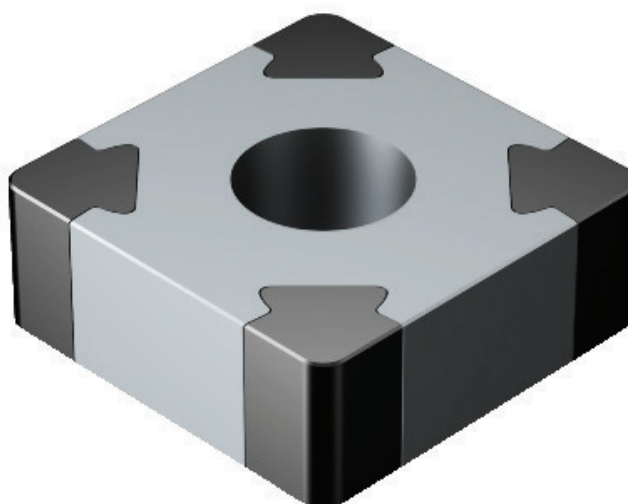


FONTE: Acervo do Grupo GUME

### 3.3.2 Ferramenta PCBN

Foram empregadas ferramentas de PCBN do fabricante Sandvik Coromant®. Os insertos de PCBN são de código ISO SNGA 12 04 08 S01030A classe 7025, conforme mostra a Figura 25, e suas principais características geométricas são apresentadas na Tabela 4. Os insertos foram fixados no mesmo porta-ferramenta utilizado para o inserto de metal-duro.

Figura 25 - Representação do inserto de PCBN.

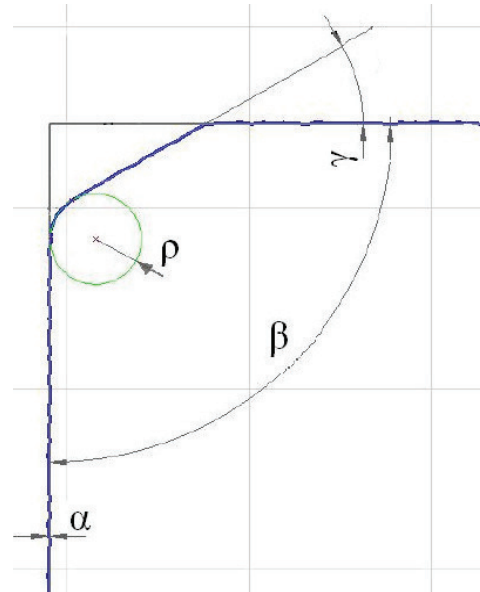


FONTE: Sandvik [71]

Tabela 4 - Características dos insertos de PCBN.

Características	Inserto de PCBN
Tipo de PCBN	Classe H
Revestimento	Sem revestimento
Raio do gume	$24,33 \pm 5,26 \mu\text{m}$
Ângulo de saída	$-29,71 \pm 0,26^\circ$
Ângulo de incidência	$-0,20 \pm 0,06^\circ$
Ângulo de cunha	$90,12 \pm 0,06^\circ$

Perfil do gume



FONTE: Do autor

A caracterização geométrica da ferramenta montada foi verificada também por microscópio InfiniteFocus G5® da fabricante ALICONA do Centro de Tecnologia e Inovação em Fabricação do Centro Universitário de Brusque (UNIFEBE).

### 3.4 MATERIAL ENSAIADO

Os materiais empregados nos ensaios foram: o aço AISI 4340 comprado na empresa Favorit, e os aços AISI 52100 e AISI D2, ambos adquiridos na empresa Villares Metals. Cabe destacar que os aços citados foram fabricados pelo processo de conformação mecânica de laminação e que na fabricação dos corpos de prova com cada tipo de aço utilizou-se a mesma barra laminada, de modo a minimizar a divergência de composição química entre os corpos de prova.

Os aços foram analisados quimicamente e estão de acordo com as especificações da norma American Iron and Steel Institute (AISI) [72], e a Tabela 5 mostra a comparação da composição química segundo a

norma AISI e a composição química dos corpos de prova, cujos valores são provenientes do fabricante. Cabe salientar que na tabela constam somente os principais elementos químicos dos aços, sendo que os demais (exceto o Fe) foram considerados elementos residuais, pois apresentam valores insignificantes.

Tabela 5 - Composição química (% em massa) padrão (segundo AISI) dos aços AISI 4340, AISI 52100 e AISI D2.

<b>Aço</b>	<b>C</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>Si</b>	<b>Ni</b>	<b>Cr</b>	<b>Mo</b>	<b>V</b>
AISI 4340 (norma)	0,38 0,43	0,6 0,8	0,035 máx	0,15 0,35	1,65 2,00	0,70 0,90	0,20 0,30	-
AISI 4340 (medido)	0,39	0,67	0,02	0,27	1,74	0,76	0,22	-
AISI 52100 (norma)	0,98 1,10	0,24 0,45	0,025 máx	0,15 0,35	-	1,30 1,60	-	-
AISI 52100 (medido)	1	0,37	0,015	0,26	-	1,46	-	-
AISI D2 (norma)	1,40 1,60	0,60 máx	0,035 máx	0,60 máx	0,30 máx	11,0 13,0	0,70 1,20	1,10 máx
AISI D2 (medido)	1,53	0,34	0,02	0,35	0,22	11,66	0,76	0,80

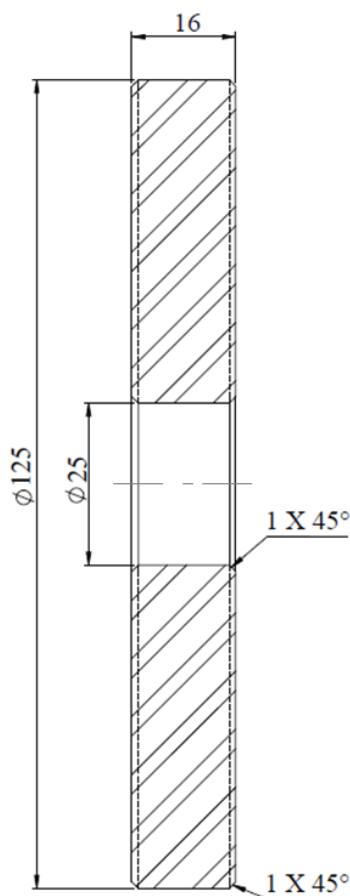
FONTE: Metals-Handbook [72] e Favorit e Villares Metals

Os materiais ensaiados foram caracterizados microscopicamente no Laboratório de Materiais (LABMAT) da UFSC, e cada material utilizado no experimento foi caracterizado. Os Anexos A, B e C apresentam as diferenças microestruturais dos três aços com as suas respectivas durezas.

### 3.4.1 Corpo de prova

O corpo de prova, definido com base nos estudos de Diniz, Oliveira e Ursolino [54] e de Oliveira, Boing e Schroeter [73], tem forma de um disco com um furo passante no centro, cujas dimensões estão dispostas na Figura 26. Tal geometria permite induzir maior rigidez ao sistema de usinagem em função dos pequenos comprimentos em balanço, além de permitir maior aproveitamento do volume do corpo de prova, reduzindo os custos com materiais.

Figura 26 - Dimensões do corpo de prova.

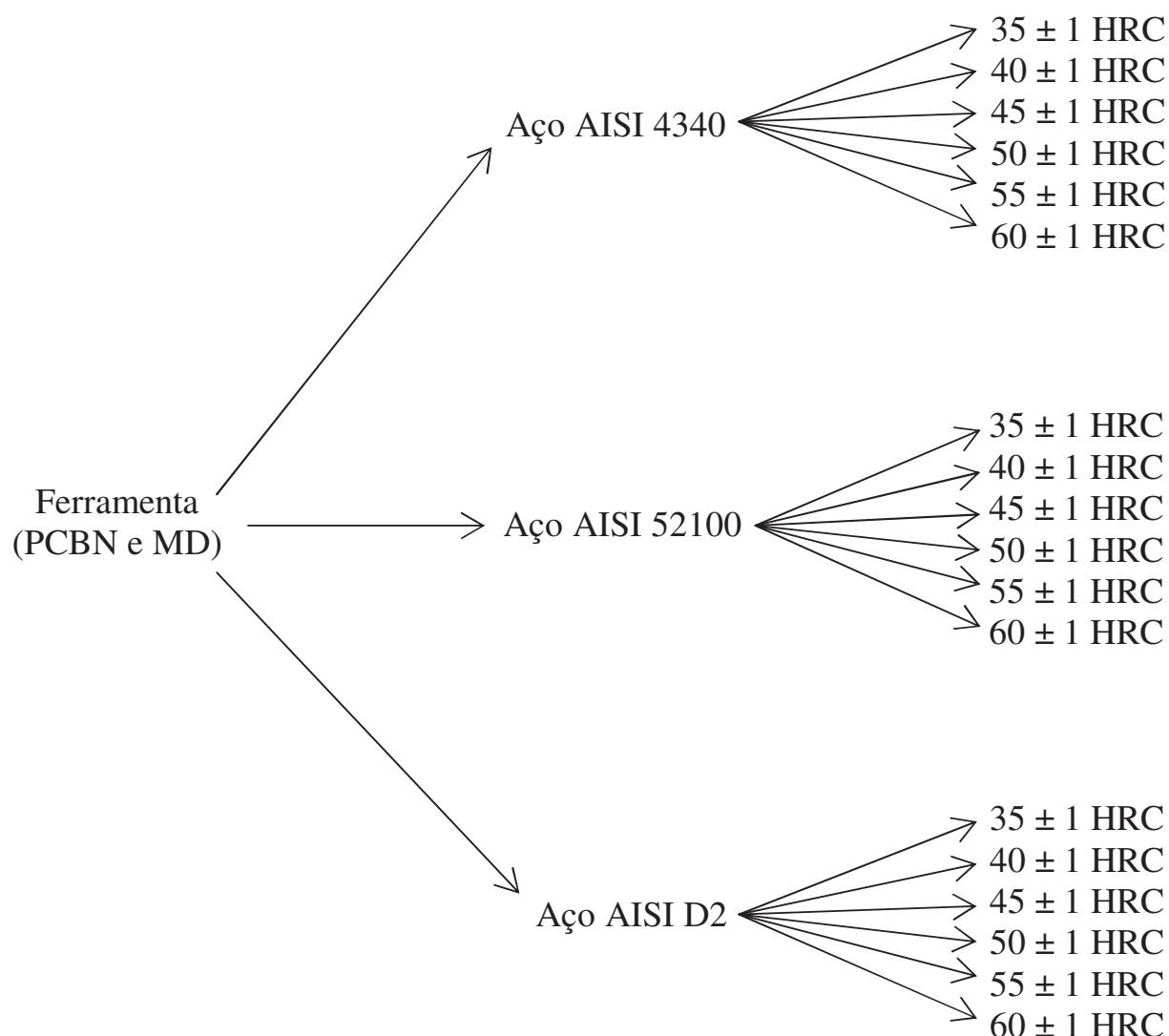


FONTE: Do autor

Outros fatores considerados no projeto do corpo de prova foram o tamanho da área a ser usinada para a captura dos dados de força mediante plataforma piezelétrica, e o diâmetro do furo no centro, pois permite a manutenção da velocidade constante através do aumento da rotação da árvore proporcionalmente à diminuição do raio da peça a ser usinado. Além disso, buscou-se minimizar os choques na entrada e na saída da ferramenta de corte, utilizando-se chanfros tanto no diâmetro externo, quanto no diâmetro interno de  $1 \times 45^\circ$ .

Os materiais usados para a construção dos corpos de prova foram submetidos a tratamento térmico de têmpera e de revenimento na empresa Tecno Têmpera, de modo que atingissem seis níveis de dureza para cada material, totalizando 18 combinações para os três materiais. Dessa maneira, cada ferramenta exigiu o emprego de 18 corpos de prova, resultando em 36 corpos de prova para atender às duas ferramentas. Na Figura 27 são apresentadas as combinações das ferramentas utilizadas no torneamento com os materiais empregados e suas respectivas durezas.

Figura 27 – Combinações de dureza para os aços torneados.



FONTE: Do autor

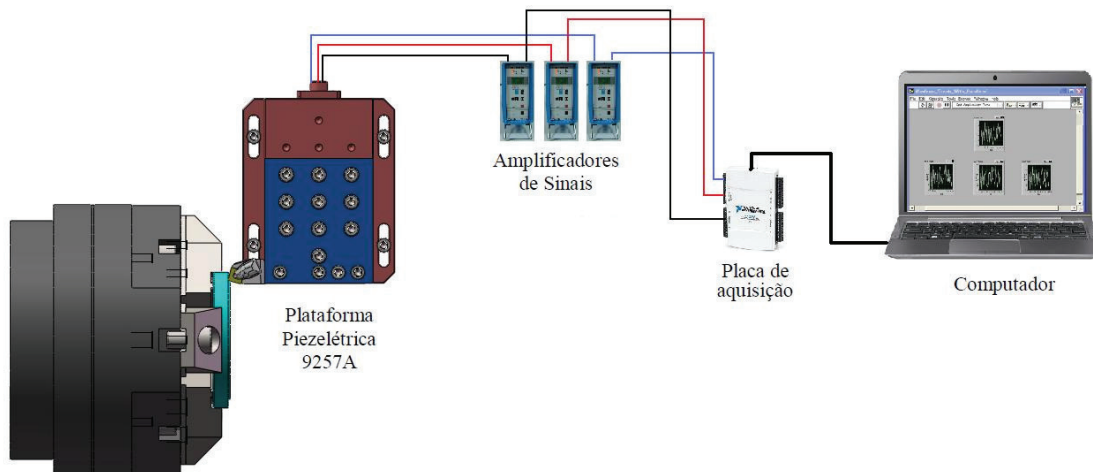
### 3.5 SISTEMA DE MEDIÇÃO DE FORÇA

A medição das componentes da força de usinagem no torneamento transversal de materiais endurecidos foi efetuada com a plataforma piezelétrica (dinamômetro) da marca Kistler Instrument AG, modelo 9257A. Esta possui três canais de aquisição de dados dispostos nos eixos cartesianos x, y e z, a qual foi montada na máquina-ferramenta de forma a coincidir com os eixos cartesianos.

Os sinais são transmitidos para os amplificadores de sinais da marca Kistler, modelo 5011 e 5006, e os dados foram transmitidos por cabos coaxiais blindados para a placa de aquisição do fabricante National Instruments, modelo NI USB 6218, na qual empregou-se uma taxa de aquisição de 1000 Hz. O processamento e a gravação dos dados

foram executados pelo *software* Labview e o tratamento dos sinais foi executado pelo *software* Matlab. A Figura 28 mostra a representação do procedimento de medição adotado no experimento.

Figura 28 - Representação do sistema de medição adotado no experimento.



FONTE: Do autor

Durante a operação de torneamento radial dos corpos de prova, a ferramenta sofre um esforço proveniente da ação da usinagem, a qual é transferida para os cristais da plataforma piezolétrica. A deformação dos cristais piezolétricos geram sinais na ordem de picocoulomb [pC], e são proporcionais à deformação elástica.

As cargas geradas pelos transdutores da plataforma piezolétrica foram transmitidas para os amplificadores, através de cabos coaxiais blindados com pequena capacitância (resistência elétrica da blindagem  $> 10^{14} \Omega/m$ ), com o intuito de impedir a perda de carga e a infiltração de ruídos, que podem prejudicar os resultados de medição.

As cargas elétricas oriundas dos cristais piezolétricos são transformados em uma tensão proporcional à carga pelos amplificadores de carga e posteriormente os valores de tensão são transmitidos para um sistema de aquisição de dados, onde são digitalizados e armazenados para posterior processamento. Assim, a leitura e a gravação dos dados foram processadas pelo *software* LabView e em seguida os dados foram tratados no *software* MatLab para a obtenção dos resultados.

Os resultados das componentes da forças de usinagem dos aços AISI 4340, AISI 52100 e AISI D2 são discutidos no tópico 4 que trata de resultados e discussões.



### 3.5.1 Plataforma piezométrica

A plataforma piezométrica é um transdutor comumente usado para a medição das componentes da força de usinagem em processo de torneamento. Seu funcionamento se dá através da deformação do cristal piezométrico ao longo dos eixos, de modo que as cargas positivas e negativas do cristal são deslocadas umas contra as outras, gerando um dipolo elétrico, ou seja, são polarizadas eletricamente quando se deformam elasticamente, e quando são submetidas a esforços mecânicos são polarizadas eletricamente [5]. A relação de força e tensão elétrica é normalmente linear, de maneira que permite correlacionar uma constante de proporcionalidade para converter a tensão elétrica em força e vice-versa [6].

A aquisição dos sinais de força foi efetuada por uma plataforma piezométrica do fabricante Kistler Instrument de modelo 9257A, conforme apresenta a Figura 29.

Figura 29 - Plataforma piezométrica Kistler de modelo 9257A.



FONTE: Kistler [74]

Este modelo de plataforma piezométrica foi selecionado por atender os seguintes requisitos: faixa de medição nos eixos Z, X e Y; elevada sensibilidade com esforços variáveis; alta linearidade e repetibilidade; e elevada precisão e rigidez. Os principais detalhes técnicos da plataforma piezométrica usada neste experimento são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Plataforma piezométrica Kistler de modelo 9257A.

Características	F <sub>x</sub>	F <sub>y</sub>	F <sub>z</sub>
Faixa de medição [N]	0 - 5000	0 - 5000	0 - 10000
Sensibilidade [pC/N]	7,82	7,85	3,72
Linearidade [ $\leq \pm$ %FSO]	0,3	0,3	0,3
Frequência de ressonância [kHz]	2,3	2,3	3,5

FONTE: Adaptado de Kistler [74]

### 3.5.2 Amplificadores de sinais

O sinal elétrico gerado na saída da plataforma piezométrica tem como característica baixa intensidade da carga elétrica, na ordem de picoCoulomb [pC]. A função do amplificador é converter o valor das cargas elétricas [C] em tensão elétrica [V] de maneira proporcional.

Para realizar a amplificação do sinal gerado na plataforma piezométrica, foram usados dois amplificadores de carga do fabricante Kistler Instrument, modelo 5011, e um amplificador do modelo 5006 do mesmo fabricante, conforme Figura 30.

Figura 30 - Amplificadores utilizados no experimento.



FONTE: Do autor

Os amplificadores de carga da Kistler AG apresentam a possibilidade de ajustar a escala e a sensibilidade, e esses foram ajustados conforme a necessidade dos valores de força e dos parâmetros da plataforma, respectivamente. O fator de escala (S) foi de  $S = 100$  N, e isso representa que 1 V de sinal equivale a 100 N.

Para o parâmetro de sensibilidade, foram selecionados valores referentes aos dados técnicos da plataforma piezelétrica, e utilizaram-se os dados de sensibilidade da Tabela 6.

Os amplificadores foram selecionados em função de alguns requisitos técnicos necessários para esta pesquisa, tais como: faixa de medição, tensão de saída, baixa incerteza de medição, e por estarem disponíveis no Laboratório de Mecânica de Precisão da UFSC. Detalhes técnicos do amplificador de carga são mostrados na Tabela 7.

Tabela 7 - Dados técnicos do amplificador de carga Kistler de modelo 5011 e modelo 5006.

<b>Características</b>	<b>Grandezas</b>
Faixa de medição [pC]	$\pm 10 \dots \pm 999000$
Sensibilidade mecânica [pC/unidade]	$\pm 0,01 \dots \pm 9990$
Escala [unidadeV]	0,001 ... 9990000
Tensão de saída [V]	$\pm 10$
Impedância de entrada [T]	100
Incerteza de medição [%]	$\pm 1$

FONTE: Adaptado de Kistler [75]

O funcionamento dos amplificadores e da plataforma piezelétrica foi verificado mediante ensaio estático realizado, conforme Apêndice A. Com o resultado do ensaio, foi possível confirmar a linearidade e a confiabilidade dos amplificadores e da plataforma piezelétrica. Além de legitimar o sistema de medição de força, o ensaio serviu para validar o programa desenvolvido no *software* LabView.

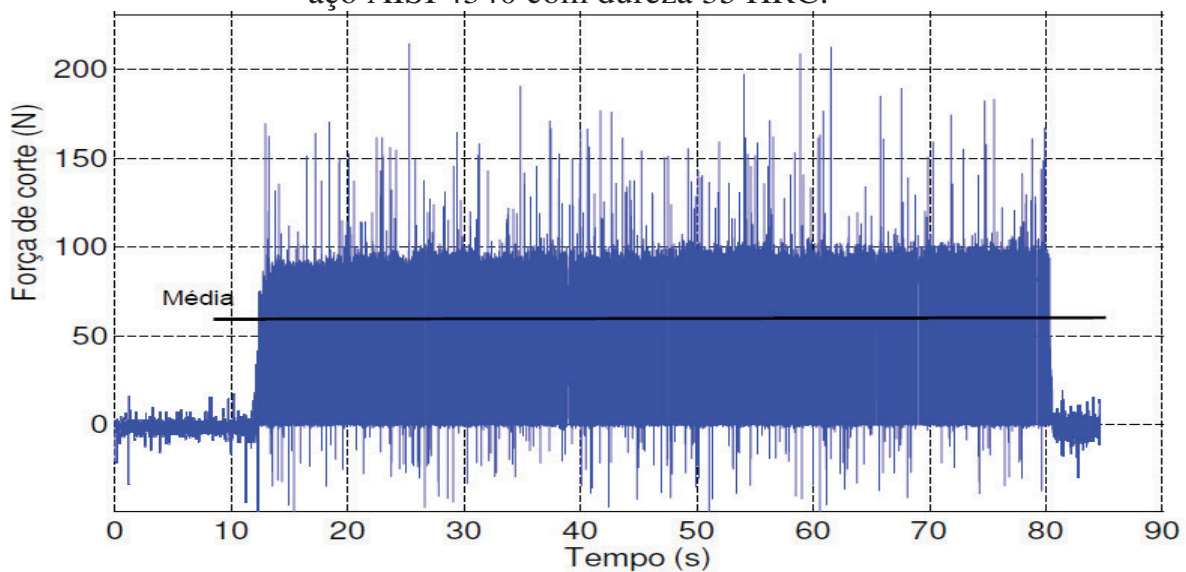
### 3.5.3 Características dos sinais e tratamento dos dados

O programa de aquisição de dados do sistema de medição de forças utilizado no experimento foi desenvolvido para gerar sinais brutos de força, a fim de mostrar o comportamento e as oscilações das componentes da força de usinagem ao longo do processo de usinagem. Dessa maneira, tal sinal bruto não representa necessariamente a força específica atuante sobre o gume da ferramenta. Mas sim, o comportamento das forças durante o processo, que são oriundas do deslocamento de discordâncias, da não homogeneidade dos materiais endurecidos usinados, das diferentes propriedades mecânicas, dos parâmetros de usinagem e das características das ferramentas utilizadas

[76]. Esses são os fatores que fazem com que os sinais de força durante o processo de usinagem tenham variações significativas durante a usinagem.

Em artigo sobre as componentes das forças de usinagem do torneamento do aço AISI 4340 de 35 HRC de dureza, Borba, Boing e Schroeter [77] apresentam o gráfico do processo da componente da força de corte para a ferramenta de PCBN, que pode ser visualizado na Figura 31.

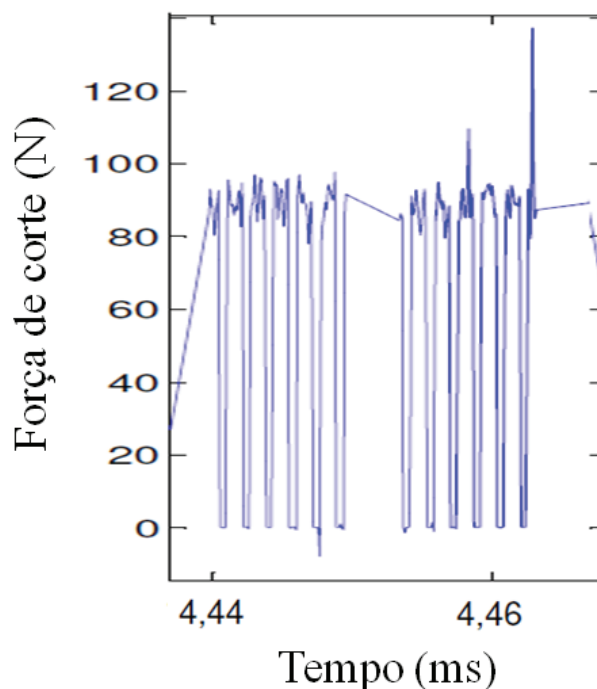
Figura 31 - Gráfico do processo de usinagem com a ferramenta de PCBN do aço AISI 4340 com dureza 35 HRC.



FONTE: Borba, Boing e Schroeter [77]

O gráfico do processo ou gráfico bruto de força mostra as oscilações do processo de torneamento, e estas podem ser evidenciadas na Figura 32 que é uma ampliação do gráfico da Figura 31.

Figura 32 - Recorte ampliado do gráfico do processo da Figura 31.



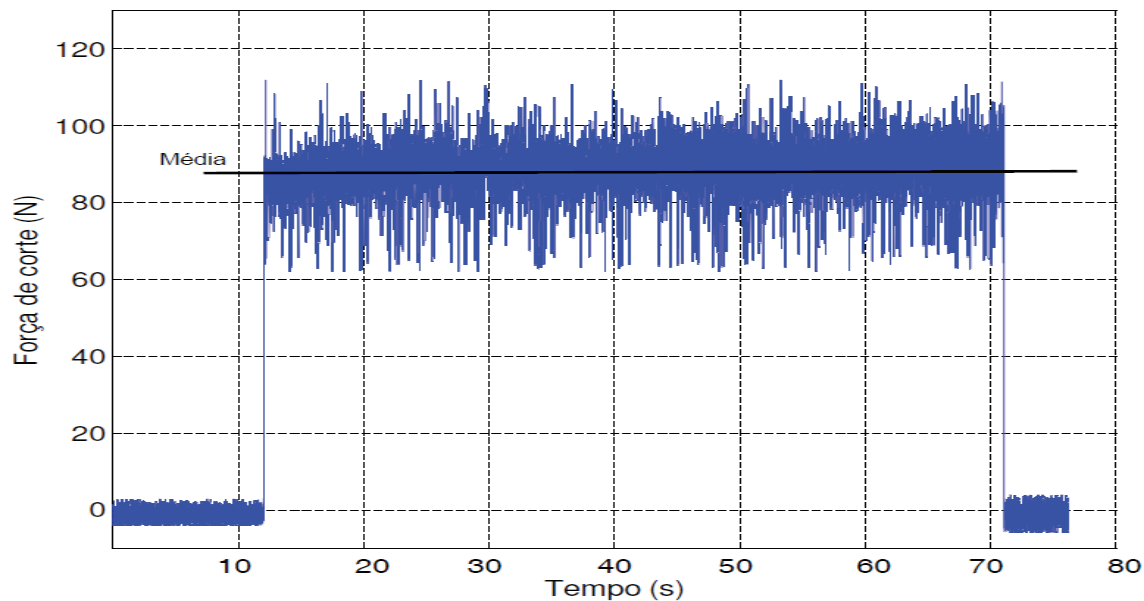
FONTE: Borba, Boing e Schroeter [77]

Na Figura 32 mostra o comportamento da força, bem como averigua a frequência de aquisição do sinal de força na operação de usinagem. Além disso, com auxílio do gráfico do processo é possível perceber uma possível quebra ou avarias do gume da ferramenta durante o processo de torneamento. No entanto, os sinais brutos de força não representam fisicamente a força que a ferramenta de corte sofre durante o processo de corte. Em função disso, foi necessário tratar os sinais com um filtro passa-faixa, de forma a obter os valores que a ferramenta de corte adquire efetivamente.

O tratamento dos sinais brutos de força foi realizado através de um programa (conforme Apêndice B) no *software* MatLab. Tal filtragem permitiu a captura de 95,46 % ou ( $2\sigma$ ) dos sinais brutos de força e, desse modo, eliminou-se os *outlier* do gráfico do processo. Com isso, foi possível determinar o limite superior e inferior do filtro passa-faixa, e por fim, determinar a média da força.

Borba, Boing e Schroeter [77] mostraram tratamento similar em seus estudos, como pode ser visualizado na Figura 33, que é o tratamento da Figura 31 com o filtro passa-faixa.

Figura 33 - Gráfico após aplicação do filtro passa-faixa.

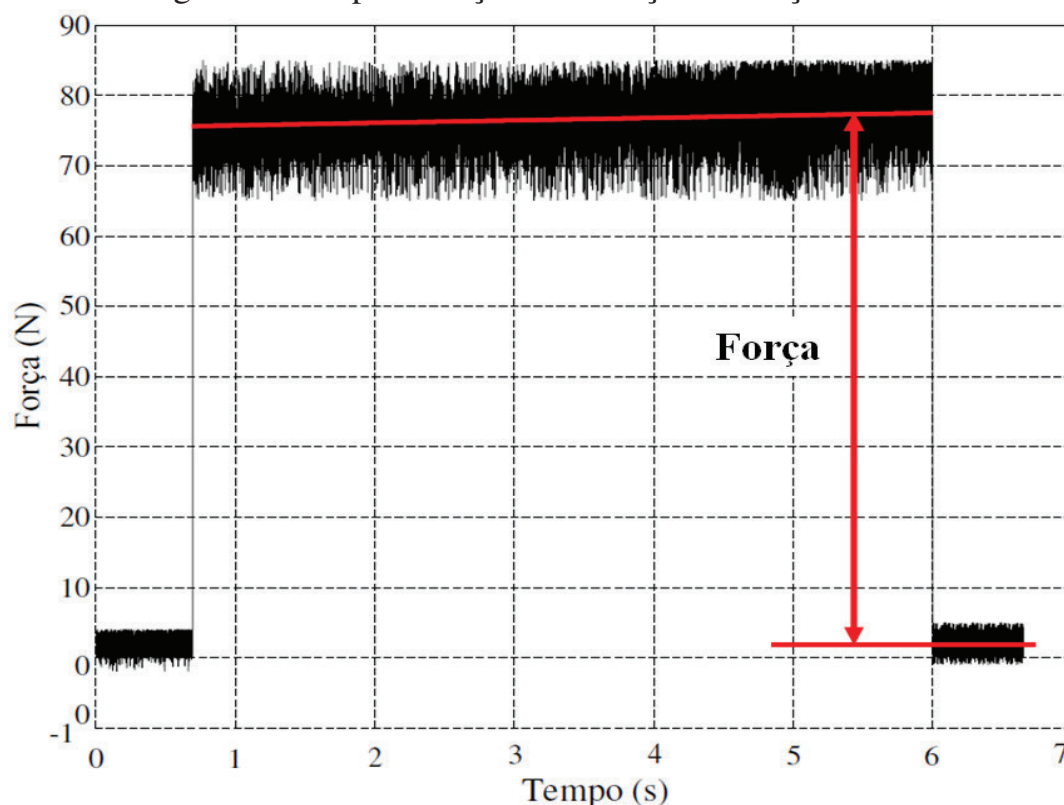


FONTE: Borba, Boing e Schroeter [77]

O processo de tratamento dos sinais de força bruta adquiridos no sistema de medição permitiu eliminar sinais oriundos de ruídos do processo, como os já mencionados. Esse tratamento foi realizado em todas as componentes da força de usinagem.

Além disso, foi adotado o sistema relativo para a medição das componentes da força de usinagem, ou seja, a medida das componentes da força de usinagem foi determinada pela diferença da média dos sinais durante o corte pela média dos sinais em vazio. Isso se deu em função dos sensores piezelétricos apresentarem perdas de carga ao longo do tempo de medição, que são comumente chamadas de *drift*. Tais perdas são um inconveniente para a determinação de valores absolutos de forças, de modo que se adotou a medição das forças com valores relativos. A Figura 34 representa o valor relativo da força adotado em todo o experimento.

Figura 34 - Representação da medição de força relativa.



FONTE: Do autor

Tanto o tratamento dos sinais quanto o sistema relativo de medida foram validados com o experimento preliminar realizado antes dos ensaios definitivos, no qual se determinaram as constantes de Kienzle para o aço AISI 4340, conforme Apêndice C. Além disso, no ensaio preliminar verificou-se o perfeito funcionamento dinâmico do sistema de medição de forças.

### 3.6 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

No experimento empregou-se o processo de torneamento radial ou faceamento para a usinagem dos materiais endurecidos. O torneamento radial tem como característica uma trajetória retilínea, perpendicular ao eixo de rotação da máquina.

Os corpos de prova do aço AISI 4340, do aço AISI 52100 e do aço AISI D2 com diferentes valores de durezas, conforme Figura 27, foram torneados transversalmente no torno CNC de modelo Heynumat 10U no Laboratório USICON da UFSC.

No processo de torneamento não foram empregados meios lubrificantes e foram utilizados os parâmetros de usinagem que estão dispostos da Tabela 8.

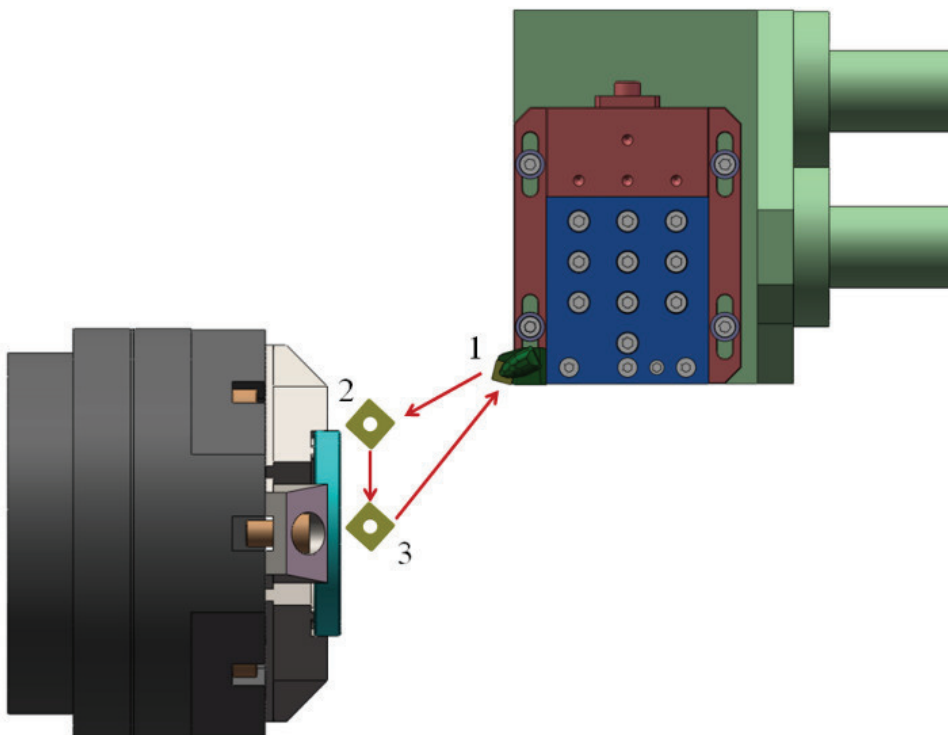
Tabela 8 - Parâmetros de usinagem empregados no experimento.

Parâmetro	Valores
Velocidade de corte ( $v_c$ )	150 m/min
Avanço (f)	0,08 mm
Profundidade de corte ( $a_p$ )	0,20 mm

Os parâmetros de usinagem foram selecionados de modo que abrangessem os intervalos dos parâmetros de corte de acabamento recomendados pelo fabricante de cada ferramenta, bem como os parâmetros de corte de materiais endurecidos para operações de acabamento.

Com os parâmetros de usinagem definidos e com o sistema de medição de forças funcionando, o torno CNC foi programado com o objetivo de realizar o torneamento radial dos corpos de prova, em um único passe no sentido radial da face da peça, tendo como sentido do avanço o maior para o diâmetro menor da peça. A Figura 35 mostra uma representação esquemática do experimento, ilustrando o percurso realizado pela ferramenta durante cada ensaio.

Figura 35 - Representação do percurso da ferramenta ao longo do ensaio.



FONTE: Do autor

Em cada ciclo de usinagem empregou-se uma nova ferramenta, pois não era objetivo do trabalho avaliar o comportamento das



componentes das forças de usinagem em função do desgaste das ferramentas. No experimento utilizaram-se 36 gumes de ferramenta de PCBN e 36 gumes de ferramenta de metal-duro de grãos ultrafinos.

Antes de cada ensaio, a superfície do corpo de prova foi faceada de modo que ficasse homogênea e que, deste modo, fosse minimizado o batimento radial do corpo de prova. Após a criação dessa superfície de referência no corpo de prova, a ferramenta empregada nesse processo de homogeneização era substituída por uma nova ferramenta.

Cada corpo de prova foi ensaiado duas vezes, ou seja, efetuou-se o torneamento em uma face do corpo de prova com uma ferramenta e sua réplica foi realizada na outra face com uma nova ferramenta. Em cada face do corpo de prova, mediu-se a força das componentes da força de usinagem.

A seguir são descritas as metodologias utilizadas para a medição da rugosidade da superfície.

### 3.7 MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE

A medição da rugosidade 2D dos corpos de prova foi realizada no Centro de Tecnologia e Inovação em Fabricação do Centro Universitário de Brusque (UNIFEBE), efetuada com o rugosímetro Mitutoyo® SJ-310, que pode ser visualizado na Figura 36.

Figura 36 – Rugosímetro utilizado nas medições.



FONTE: Acervo do Grupo GUME

O equipamento de medição de rugosidade transferia as grandezas dos resultados para o computador e, posteriormente, os dados foram tratados estatisticamente. O rugosímetro foi configurado com comprimento de amostragem (*cut-off*) de 0,25 mm de acordo com a norma ISO 4288/1998 [78], conforme mostra a Tabela 9.

Tabela 9 – Condições de medição de rugosidade.

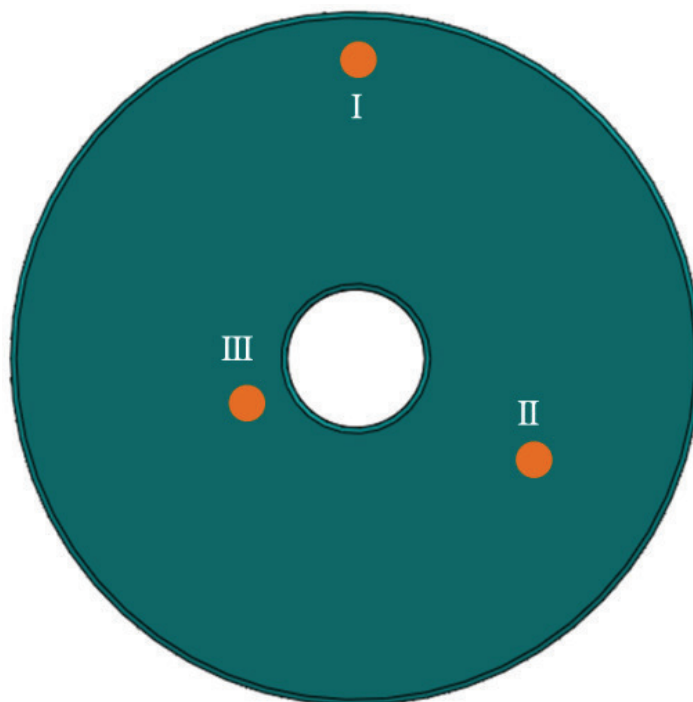
Perfis não periódicos		Perfis Periódicos	Condição de medição de acordo com a norma ISO 4288 e ISO 3274	
Brunimento, lapidação e retificação.		Torneamento, fresamento e aplainamento.	$I_r$ comprimento de amostragem (mm)	$I_n$ comprimento total da amostragem (mm)
Rt, Rz ( $\mu\text{m}$ )	Ra ( $\mu\text{m}$ )	RSm (mm)	$\lambda_c = I_r$	$I_n$
>0,025...0,1	>0,006...0,02	>0,013...0,04	0,08	0,4
>0,1...0,5	>0,02...0,1	>0,04...0,13	0,25	1,25
>0,5...10	>0,1...2	>0,13...0,4	0,8	4
>10...50	>2...10	>0,4...1,3	2,5	12,5
>50...200	>10...80	>1,3...4	8	40

FONTE: Adaptado da norma ISO 4288 [78]

A norma indica que o procedimento de seleção do comprimento de amostragem se dá em função do tipo do perfil (processo de usinagem) e do parâmetro de rugosidade. Diante dos resultados dos ensaios preliminares de comparações dos perfis e dos valores dos parâmetros RSm, constatou-se que o valor de *cut-off* que mais se adequou aos experimentos é o de 0,25 mm.

A medição da rugosidade nos corpos de prova foi realizada em 3 direções afastadas em 120° e em cada ponto mediu-se 1 vez, totalizando 3 medições para cada face do corpo de prova. A Figura 37 representa esquematicamente os pontos que foram medidos em cada face da peça.

Figura 37 - Representação dos pontos medidos com o rugosímetro.



FONTE: Do autor

Com o método de medida, buscou-se abranger os diversos fenômenos presentes na superfície da peça, sendo assim possível identificar diferenças de rugosidade da peça.

No tratamento dos dados, foram utilizados os resultados das duas faces para determinar os valores das médias e das incertezas, e empregaram-se os parâmetros  $R_a$ ,  $R_z$  e  $R_t$  para análise da rugosidade no experimento. Na discussão dos resultados, por questão de simplificação, quando os três parâmetros de rugosidade apresentarem comportamento semelhante em função da rugosidade, será utilizado o parâmetro  $R_a$  para discutir os resultados. Caso ocorra alguma anomalia no fenômeno de corte ou na qualidade da superfície, serão discutidos também os parâmetros  $R_z$  e  $R_t$ .



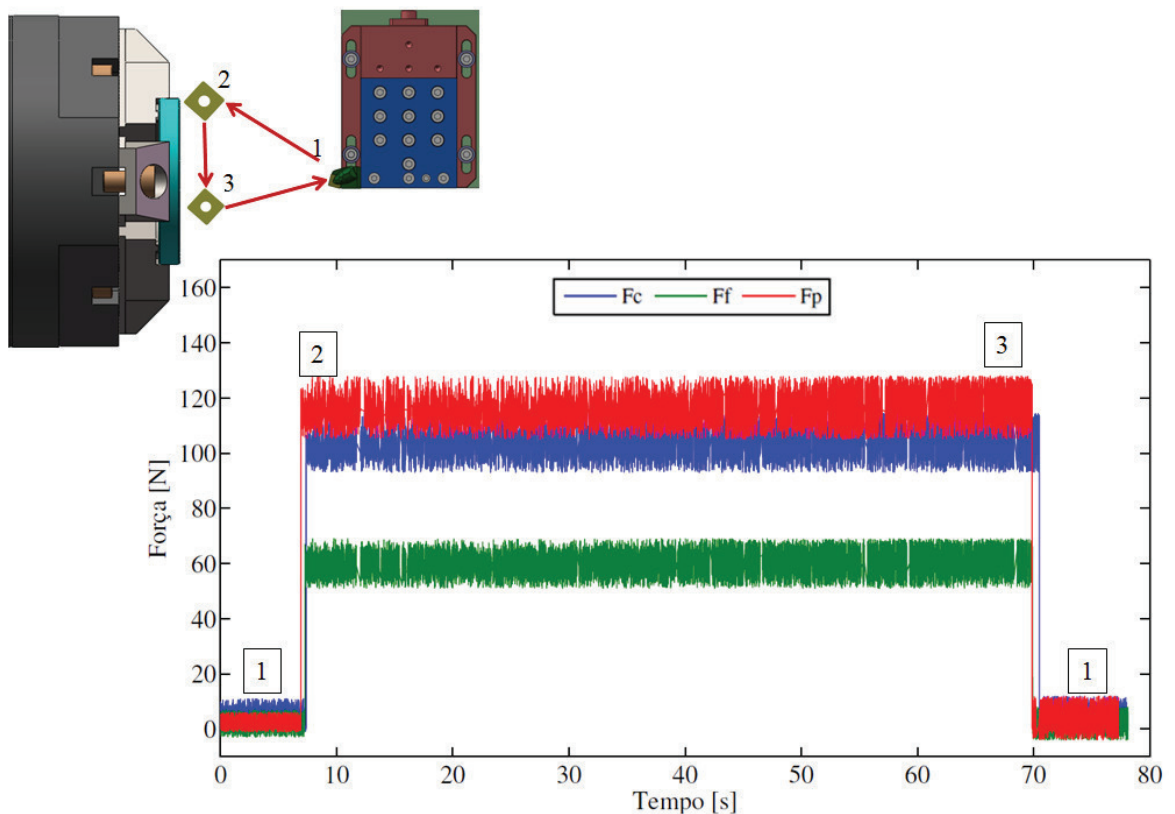
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os valores das componentes da força de usinagem e do acabamento da superfície. A discussão será realizada com base na dureza do material usinado, comparando as ferramentas de usinagem aplicadas (PCBN e metal-duro) com as diferentes classes de material torneado.

### 4.1 DUREZA DE 35 HRC

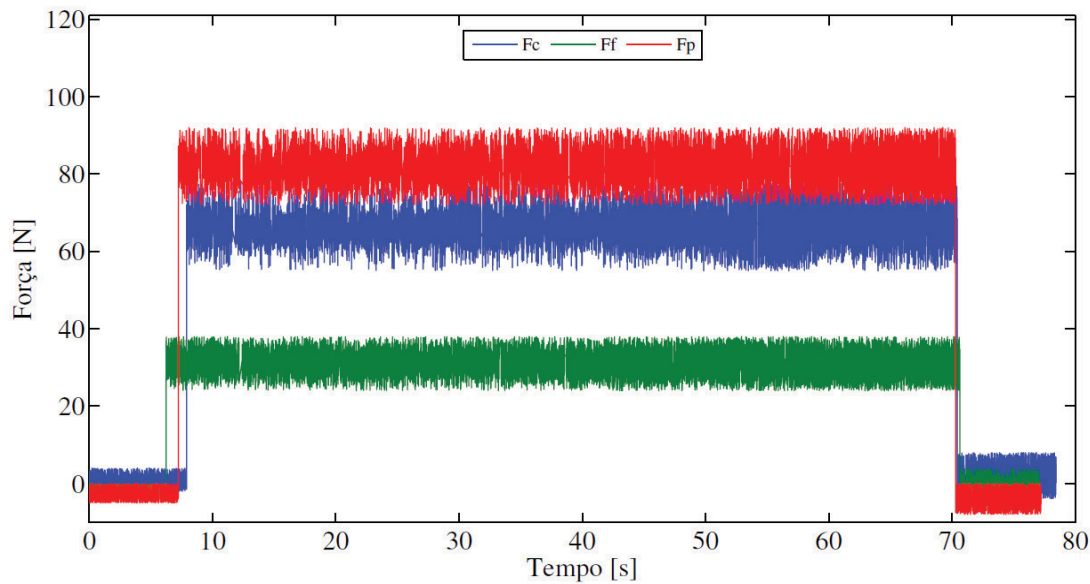
O comportamento da força de corte ( $F_c$ ), da força de avanço ( $F_f$ ) e da força passiva ( $F_p$ ) ao longo da operação de torneamento do aço AISI 4340 com 35 HRC de dureza, para as ferramentas de PCBN e metal-duro de grãos ultrafinos, é mostrado na Figura 38 e na Figura 39, respectivamente.

Figura 38 – Componentes da força de usinagem para aço AISI 4340 de 35 HRC de dureza com a ferramenta de PCBN.



FONTE: Do autor

Figura 39 – Componentes da força de usinagem do aço AISI 4340 de 35 HRC de dureza com a ferramenta de metal-duro de grãos ultrafinos.



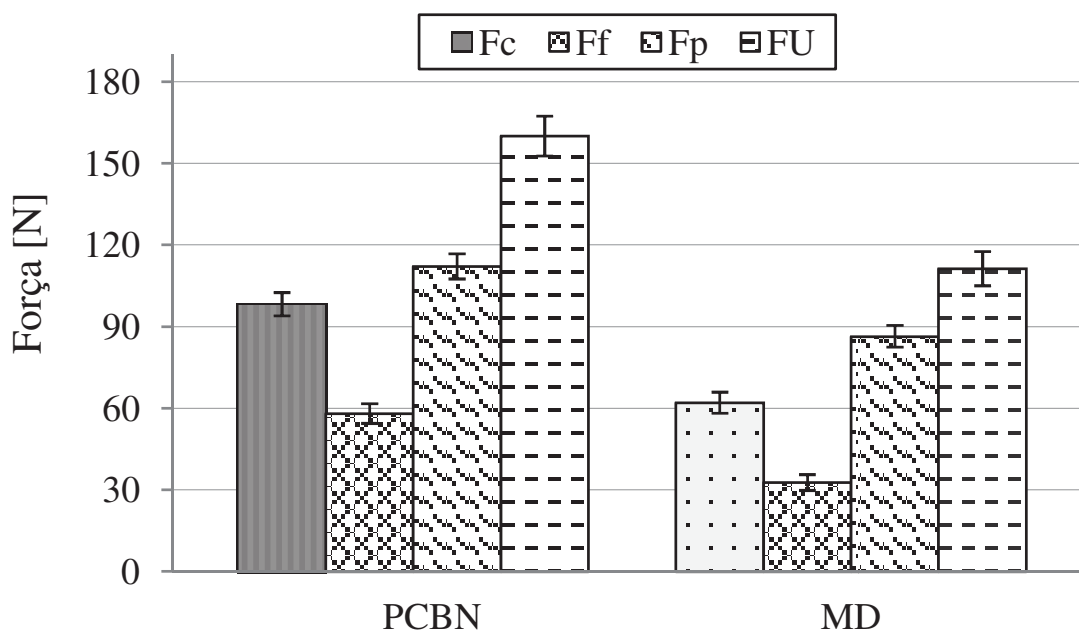
FONTE: Do autor

As Figura 38 e Figura 39 mostram que as componentes da força de usinagem tiveram comportamento homogêneo nos fenômenos dinâmicos de corte, apresentando apenas pequenas flutuações ao longo do tempo de corte, as quais podem ser causadas por diversos motivos, tais como: ruído, dinâmica da máquina-ferramenta, alterações da forma da ferramenta ao longo do tempo de corte, falta de contato da ferramenta com a peça e até mesmo pela característica do processo de corte propriamente dito, como a formação de lamelas dos cavacos [77].

Outra característica observada no torneamento do aço AISI 4340 de 35 HRC de dureza, refere-se ao fato de que a intensidade da componente da força passiva apresentou maior grandeza dentre as componentes da força de usinagem, para ambas as ferramentas. Essa situação é decorrente da elevada resistência mecânica que o aço AISI 4340 tem a 35 HRC de dureza.

A Figura 40 ilustra a comparação dos valores das componentes da força de usinagem do aço AISI 4340 de 35 HRC de dureza, com o emprego das ferramentas de PCBN e de metal-duro de grãos ultrafinos.

Figura 40 – Componentes da força de usinagem para as ferramentas de PCBN e de metal-duro de grãos ultrafinos (MD).



FONTE: Do autor

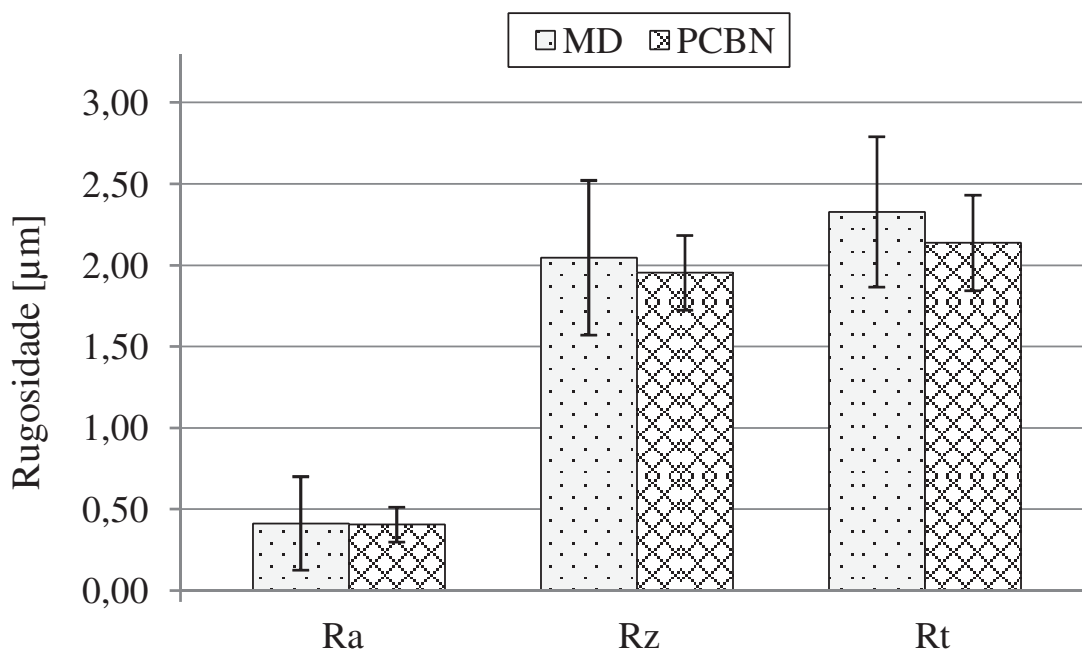
Na Figura 40, observa-se que os valores das componentes da força de usinagem para a ferramenta de metal-duro apresentaram intensidades menores do que da ferramenta de PCBN. Essa distinção de força ocorre em função, principalmente, da diferença do ângulo de saída da ferramenta, conforme dados da Tabela 3 e da Tabela 4. Tal situação já era esperada, pois a variação angular gera alterações nas componentes da força de usinagem.

Como a ferramenta de PCBN possui ângulo negativo, este ângulo, segundo Klocke [5], promove maior índice de deformação plástica do cavaco até o ponto de cisalhamento, o que eleva a força de usinagem durante o processo. Esse aumento da força de usinagem com a variação do ângulo de saída também foi estudada por Zhou *et al* [79] na usinagem do aço AISI 52100 (60-62 HRC de dureza) com a ferramenta de CBN com a variação do ângulo de saída de 0° a -30°. Assim os autores verificaram que as componentes da força de usinagem tendem a aumentar com o aumento do ângulo de saída.

Com a ferramenta de metal-duro de grãos ultrafinos foi necessária uma menor força de usinagem para remover o cavaco, conforme mostra a Figura 40. Esse comportamento pode favorecer o uso dessa ferramenta na aplicação industrial, pois o menor esforço no gume da ferramenta pode promover uma vida adequada da mesma, além de diminuição da potência necessária à realização da operação.

A rugosidade do aço AISI 4340 de 35 HRC de dureza também foi analisada, tendo em vista que em muitos processos de usinagem a rugosidade da peça é usada como parâmetro de saída do processo de produção e, com isso, torna-se uma variável fundamental na decisão da escolha da ferramenta. A Figura 41 mostra a variação dos parâmetros de rugosidade (Ra, Rt e Rz) em função das ferramentas de PCBN e de metal-duro. Para cada parâmetro de rugosidade, calculou-se a média e seu intervalo de confiança, para um nível de confiança de 95%.

Figura 41 – Parâmetros de rugosidade Ra, Rz e Rt em função da ferramenta de metal-duro e da ferramenta de PCBN.



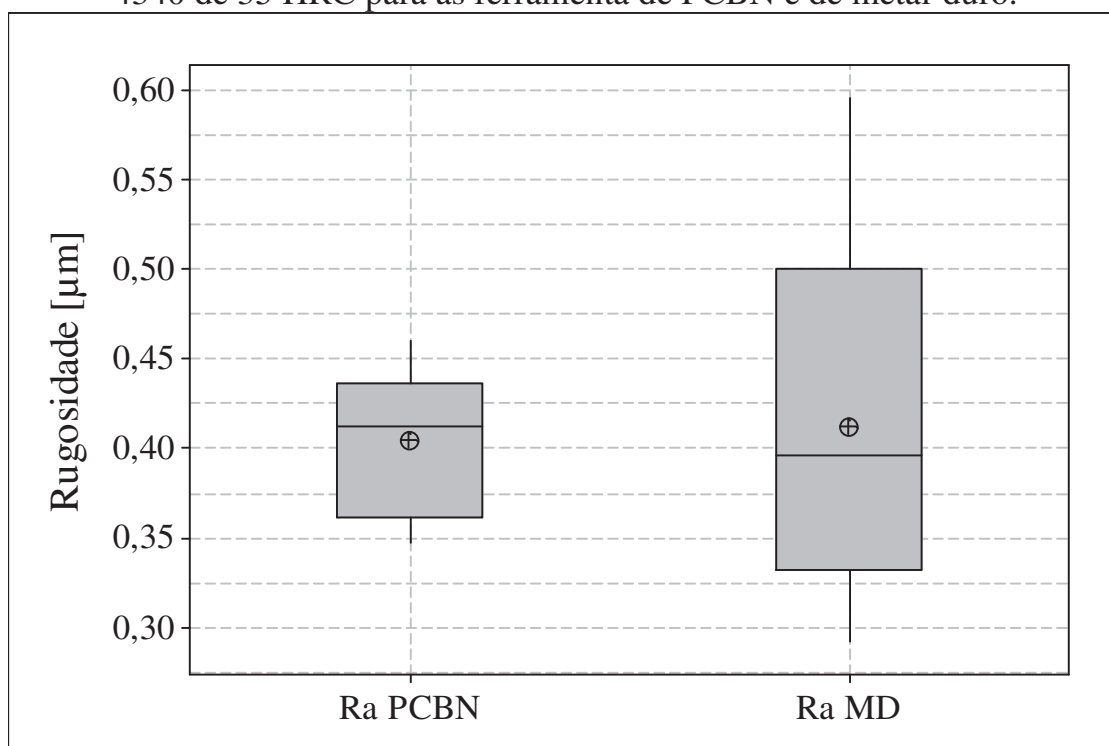
FONTE: Do autor

Observa-se no gráfico da Figura 41 que os resultados dos parâmetros de rugosidade Ra, Rz e Rt são muito próximos para as duas ferramentas. Desse modo, executou-se um teste de hipótese, conforme Montgomery e Runger [80], para verificar se existe diferença significativa entre os valores.

Dessa maneira, através do teste de hipótese para o parâmetro de rugosidade Ra ( $\mu_{PCBN} \neq \mu_{MD} \rightarrow P=0,891$ ) verificou-se que as médias não são diferentes entre as ferramentas, em função da dispersão dos resultados. A Figura 42 apresenta o *boxplot* dos dados obtidos dos erros dos parâmetros de rugosidade Ra do aço AISI 4340 de 35 HRC de dureza nos ensaios realizados com as ferramentas de PCBN e metal-duro.



Figura 42 – *Boxplot* dos erros dos parâmetros de rugosidade Ra do aço AISI 4340 de 35 HRC para as ferramenta de PCBN e de metal-duro.



FONTE: Do autor

Analisando os resultados dos erros dos parâmetros de rugosidade das duas ferramentas, é possível observar que as médias de rugosidade Ra foram semelhantes para as diferentes ferramentas e que a grande dispersão dos valores contribuíram para a similaridade entre as médias.

Aplicando o teste de hipótese para os parâmetros de rugosidade Rz ( $\mu_{\text{PCBN}} \neq \mu_{\text{MD}} \rightarrow P = 0,140$ ) e Rt ( $\mu_{\text{PCBN}} \neq \mu_{\text{MD}} \rightarrow P = 0,198$ ), também verificou-se que não existem diferenças significativas entre os parâmetros de rugosidade para as duas ferramentas.

Como as ferramentas do experimento foram utilizadas somente em um único passe, a rugosidade gerada no corpo de prova ocorreu em função da cinemática do torneamento, bem como das irregularidades do gume. Além disso, as incertezas geradas mostram a influência do sistema de medição e não apenas do processo.

Outra característica que pode ser observada é que as médias de Ra são de  $0,41 \pm 0,29 \mu\text{m}$  para a ferramenta de metal-duro de grãos ultrafinos e de  $0,40 \pm 0,11 \mu\text{m}$  para a ferramenta de PCBN. Isso indica que as superfícies torneadas com as ferramentas encaixam-se na mesma classe de rugosidade N6, de acordo com a norma NBR 8404 [67], o que

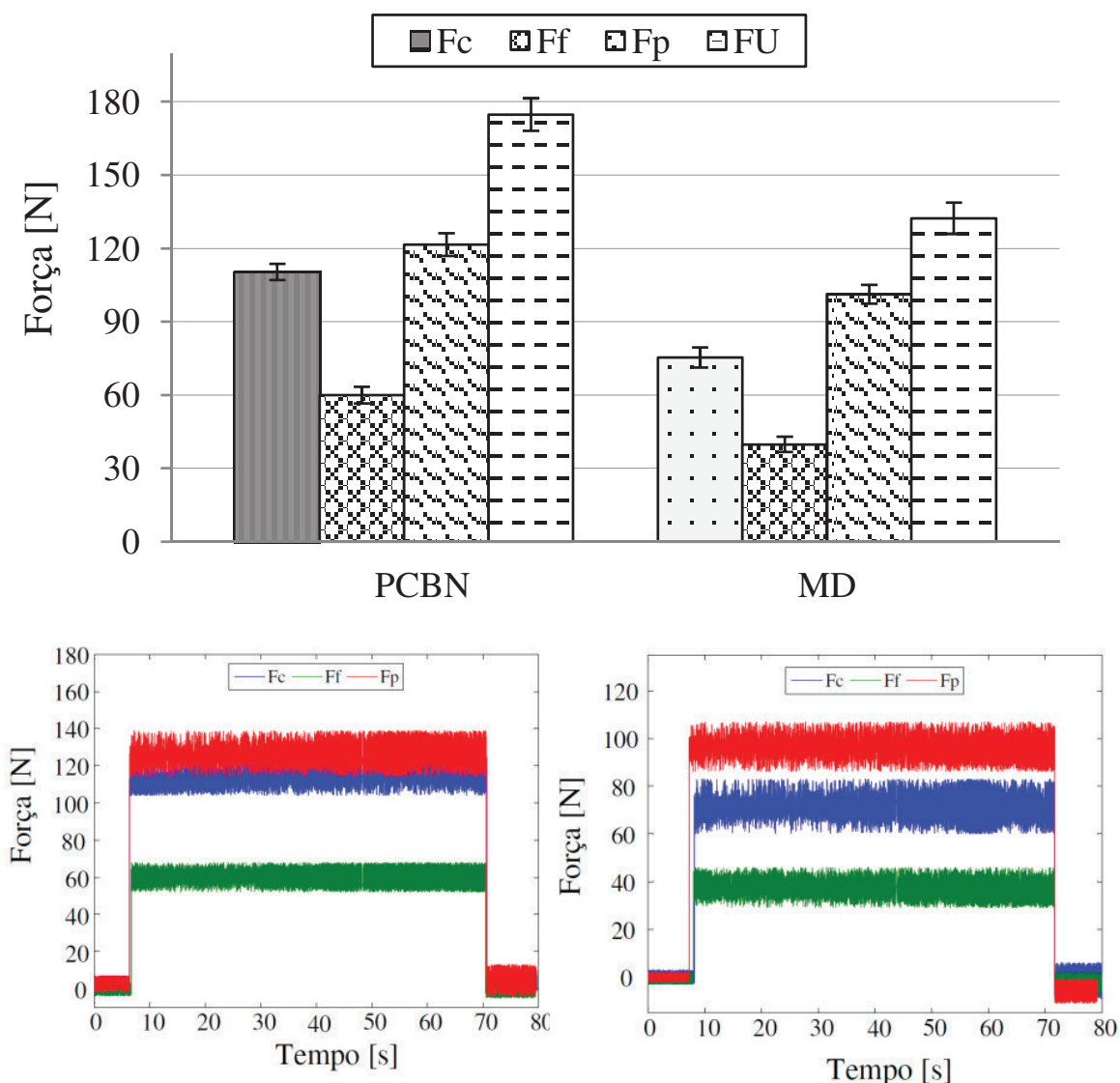
implica dizer que ambas possuem em princípio as mesmas características de aplicação.

Como os três parâmetros de rugosidade apresentaram comportamentos semelhantes para as duas ferramentas, por questão de simplificação, a análise da rugosidade foi baseada no parâmetro Ra.

Em função dos resultados da qualidade da superfície e das componentes de força de usinagem, a ferramenta de metal-duro de grãos ultrafinos apresentou condições satisfatórias e com potencial para substituir a ferramenta de PCBN na aplicação específica descrita.

A mudança da microestrutura do material usinado influencia as forças dinâmicas de usinagem e a qualidade da superfície durante o torneamento, e ambas foram avaliadas no torneamento do aço AISI 52100 com 35 HRC de dureza com as ferramentas de PCBN e de metal-duro. A Figura 43 mostra o comportamento das componentes da força de usinagem em função das ferramentas utilizadas na usinagem do aço AISI 52100 de 35 HRC.

Figura 43 – Força de corte, força de avanço, força passiva e força de usinagem no torneamento do aço AISI 52100 de 35 HRC.



FONTE: Do autor

O torneamento do aço AISI 52100 com 35 HRC de dureza apresentou o mesmo comportamento do aço AISI 4340 com 35 HRC de dureza, ou seja, a intensidade da força passiva foi maior que a intensidade das componentes da força de corte e da força de avanço. Além disso, os valores das componentes da força de usinagem são maiores para a ferramenta de PCBN, cujo principal motivo, como já relatado, pode ser considerado a diferença no ângulo de saída das duas ferramentas.

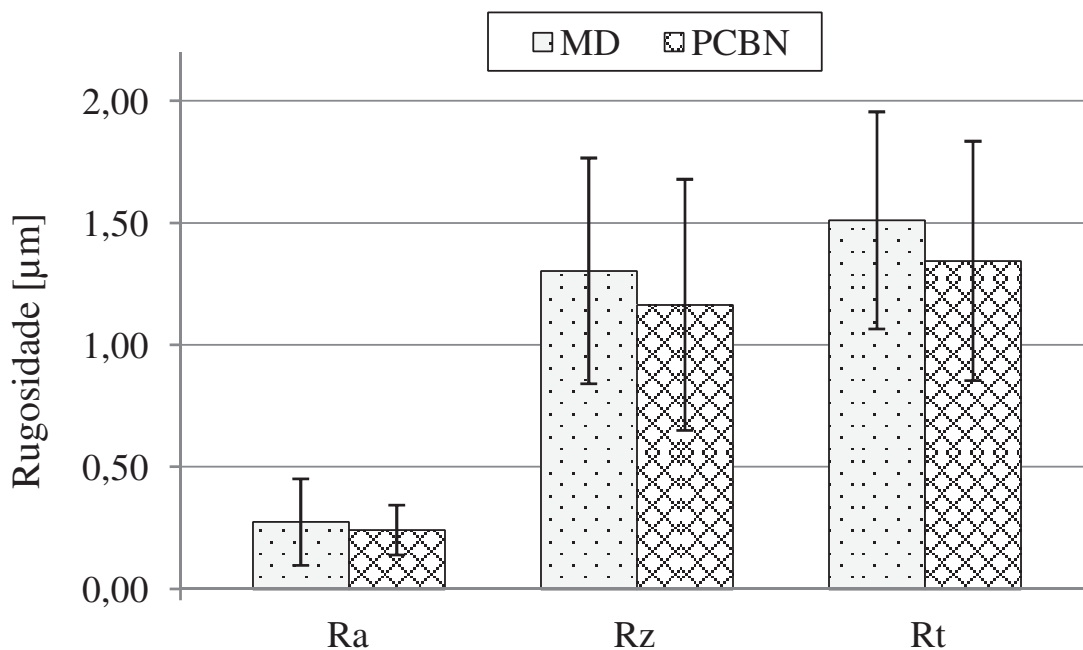
Outra questão a ser observada na Figura 43, se refere ao fato de que as intensidades das forças de usinagem foram maiores para o torneamento do aço AISI 52100 do que para o torneamento do aço AISI

4340. Como a microestrutura do material torneado é diferente, e o aço AISI 52100 tem carbonetos presentes em sua estrutura, essas partículas duras na microestrutura do material induzem à piora da usinabilidade do material. Além disso, os carbonetos dificultam a ação de corte na operação de torneamento [81], por conseguinte, as forças de usinagem aumentam. Já o aço AISI 4340 de 35 HRC de dureza não apresenta carbonetos em sua microestrutura, de modo que ele apresenta menores dificuldades no processo de corte, sendo exigido menor esforço na usinagem do material.

Conforme valores de forças ilustrado na Figura 43, a presença de carbonetos na estrutura do aço AISI 52100 não afetou o comportamento das forças de usinagem ao longo da operação de corte. Esta situação mostra a continuidade da estabilidade do processo com a evolução da classe de material do aço AISI 4340 para o aço AISI 52100.

Diante da influência dos carbonetos nas componentes da força de usinagem, pode haver mudanças no comportamento da qualidade da superfície, cujos efeitos podem ser visualizados através dos resultados dos parâmetros de rugosidade. Nesse sentido, a Figura 44 mostra os resultados dos parâmetros de rugosidade em função das ferramentas de PCBN e de metal-duro para o aço AISI 52100 com 35 HRC de dureza.

Figura 44 – Parâmetros de rugosidade Ra, Rz e Rt em função da ferramenta de metal-duro e da ferramenta de PCBN.



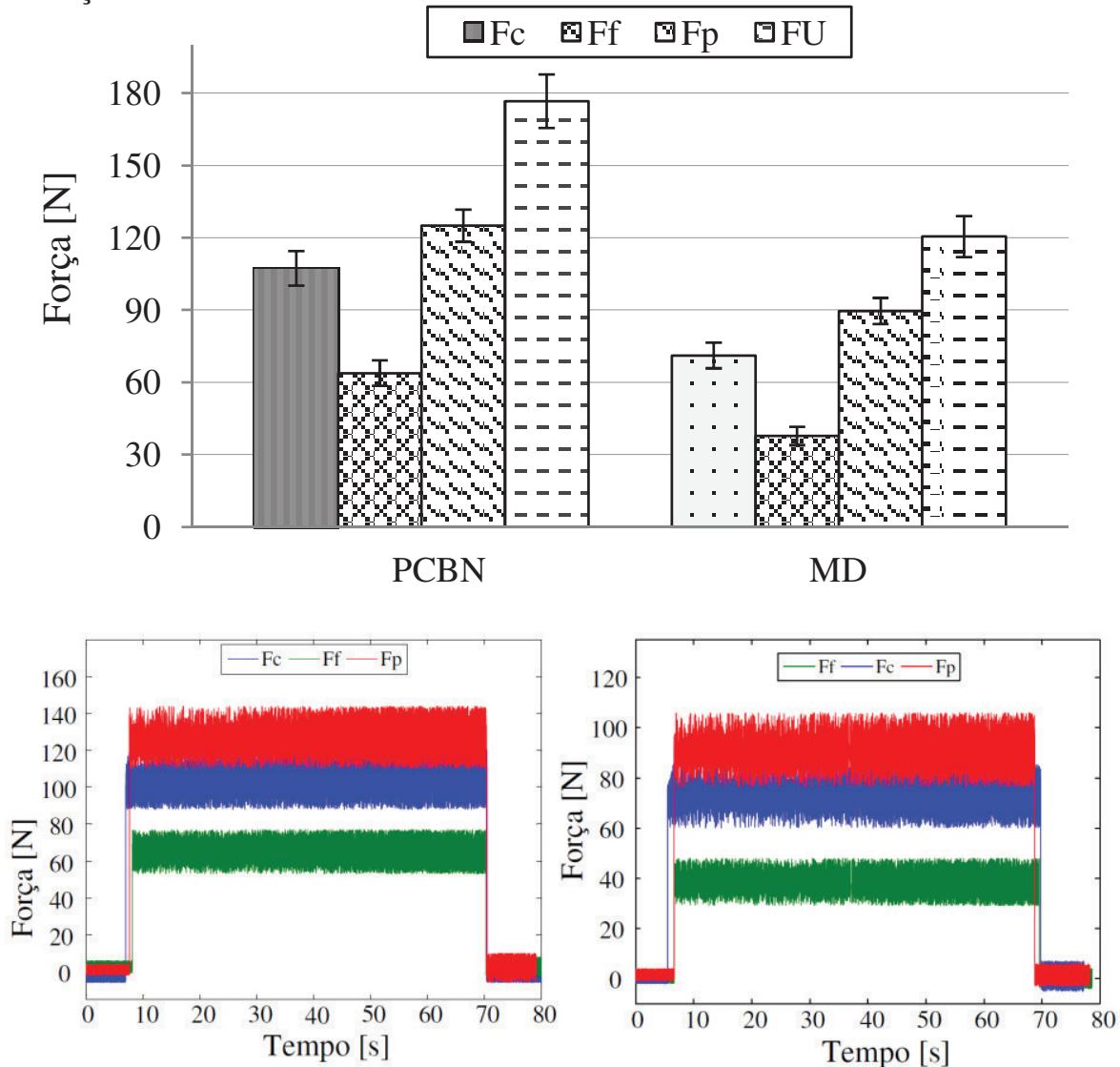
FONTE: Do autor

Os valores dos parâmetros de rugosidade Ra ( $\mu_{\text{PCBN}} \neq \mu_{\text{MD}} \rightarrow P=0,383$ ), Rz ( $\mu_{\text{PCBN}} \neq \mu_{\text{MD}} \rightarrow P=0,188$ ) e Rt ( $\mu_{\text{PCBN}} \neq \mu_{\text{MD}} \rightarrow P=0,114$ ) para as duas ferramentas são estatisticamente similares, conforme teste de hipótese realizado em cada parâmetro. Tal igualdade estatística é resultante do fato das médias estarem próximas e da grande dispersão dos valores. Dessa maneira, a superfície gerada no corpo de prova das duas ferramentas teve a mesma aplicação de acordo com a classe de rugosidade, sendo que ambas tiveram classificação N5 conforme NBR 8404 [67].

Na comparação dos resultados de acabamento entre a Figura 41 e a Figura 44, observa-se que as intensidades das médias dos três parâmetros de rugosidade, para ambas as ferramentas, são menores no torneamento do corpo de prova do aço AISI 52100 do que do aço AISI 4340.

O estudo propõe a avaliação do comportamento das componentes da força de usinagem em três materiais distintos. Até o momento, foram discutidos os aços AISI 4340 e o AISI 52100, restando o AISI D2. Neste sentido, a Figura 45 mostra o comportamento e o resultado das forças de usinagem na operação de torneamento do aço AISI D2 de 35 HRC de dureza com o emprego das ferramentas de PCBN e de metal-duro de grãos ultrafinos.

Figura 45 – Valores das componentes da força de usinagem no torneamento do aço AISI D2 de 35 HRC com as ferramentas de PCBN e de metal-duro.

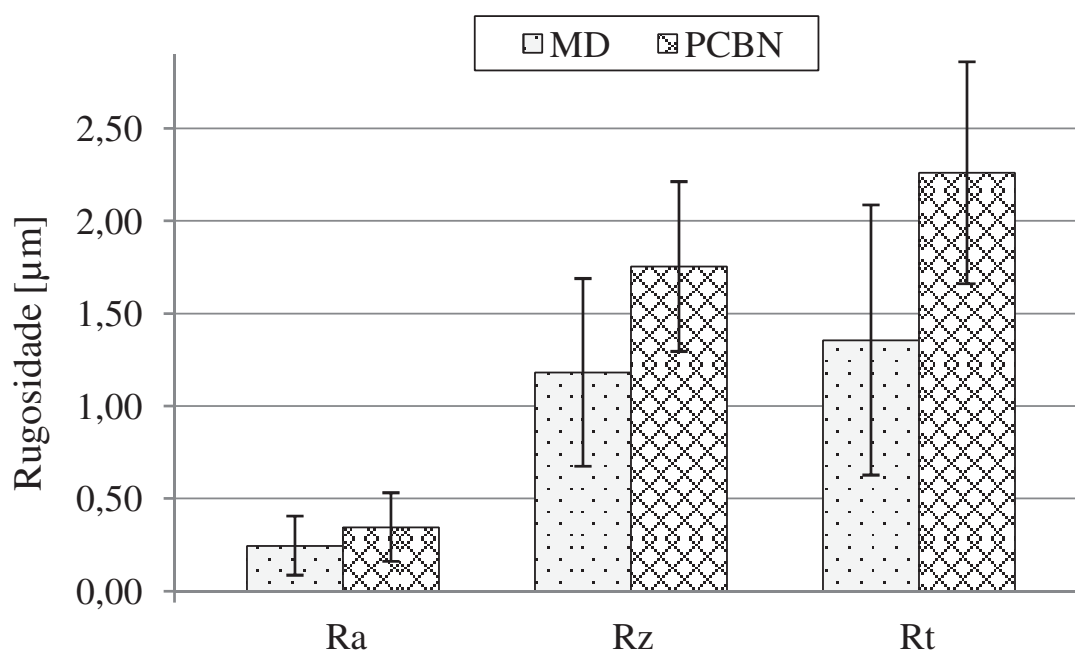


FONTE: Do autor

Apesar do aço AISI D2 apresentar uma matriz martensítica revenida e maior volume de carbonetos primários na matriz em comparação ao aço AISI 52100, o comportamento das componentes da força de usinagem foram semelhantes. Essa presunção de similaridade das componentes da força de usinagem é proveniente da baixa dureza a quente que o aço AISI D2 apresenta [82].

A Figura 45 mostra ainda que não ocorreram anomalias ao longo do tempo de corte do aço AISI D2 com 35 HRC para ambas as ferramentas. Finalizando a análise, a rugosidade da superfície gerada no corpo de prova do aço AISI D2 com 35 HRC de dureza está ilustrada na Figura 46.

Figura 46 – Valores dos parâmetros de rugosidade do aço AISI D2 de 35 HRC com as ferramentas de PCBN e de metal-duro.



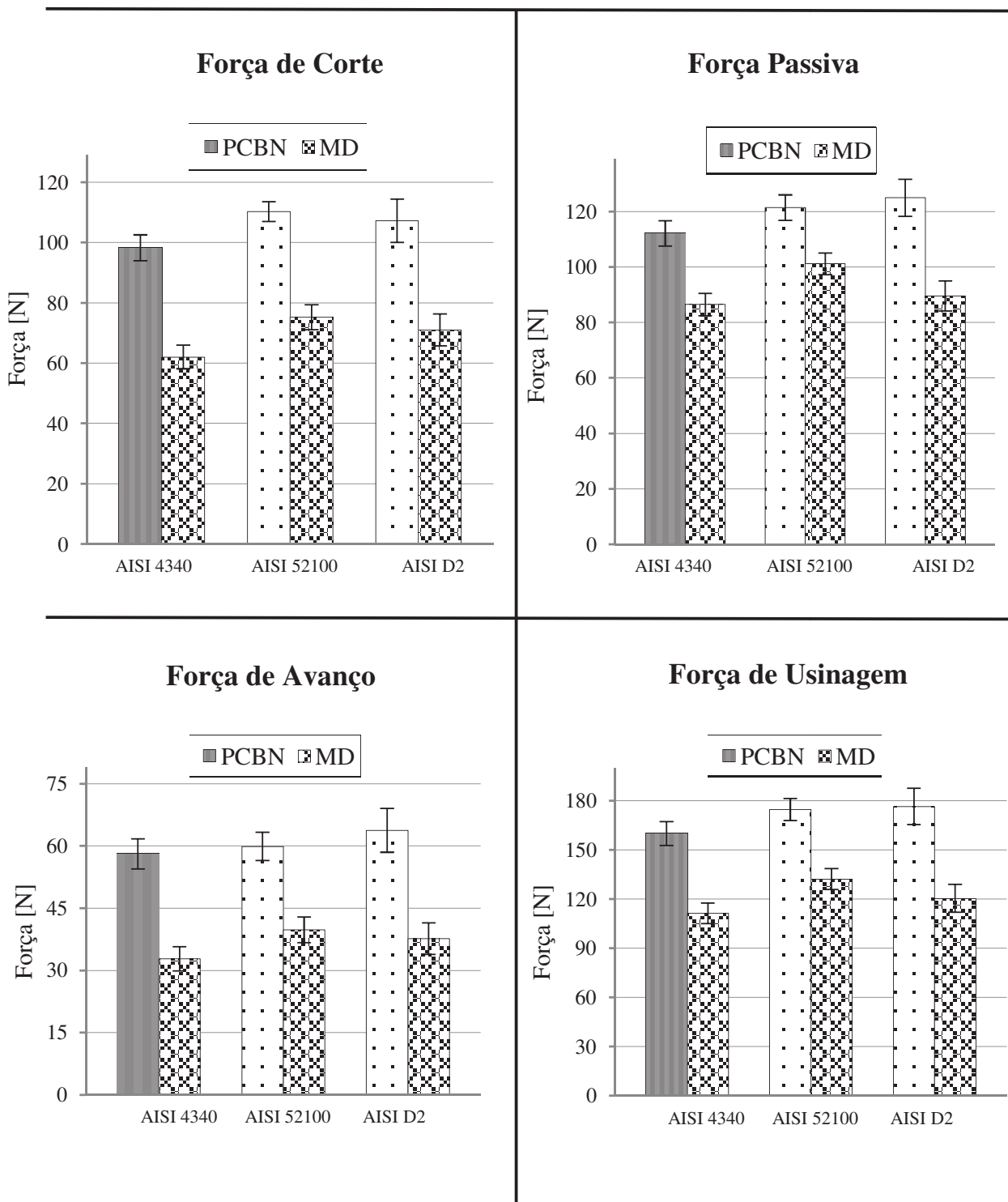
FONTE: Do autor

As magnitudes dos valores de rugosidade Ra da Figura 46 são de  $0,25 \pm 0,16 \mu\text{m}$  para a ferramenta de metal-duro e de  $0,35 \pm 0,19 \mu\text{m}$  para a ferramenta de PCBN. Esta situação indica que ambas pertencem à mesma classe de rugosidade N5, conseqüentemente pode-se considerar que ambas as ferramentas tenham as mesmas características de aplicação de acordo com a norma NBR 8404 [67].

Outra característica verificada nos valores dos parâmetros de rugosidade é que os valores dos parâmetros Ra ( $\mu_{\text{PCBN}} \neq \mu_{\text{MD}} \rightarrow P=0,427$ ), Rz ( $\mu_{\text{PCBN}} \neq \mu_{\text{MD}} \rightarrow P=0,178$ ) e Rt ( $\mu_{\text{PCBN}} \neq \mu_{\text{MD}} \rightarrow P=0,593$ ) são similares entre as duas ferramentas, conforme teste de hipótese executado para cada parâmetro. Esse comportamento também foi observado nos corpos de prova dos aços AISI 4340 e AISI 52100.

A geometria da ferramenta e a alteração da microestrutura do aço influenciam nas componentes da força de usinagem, e a Figura 47 mostra a comparação entre as componentes da força de usinagem em relação aos materiais usinados.

Figura 47 – Comparação dos valores da força de corte, da força passiva, da força de avanço e da força de usinagem na usinagem dos aços AISI 4340, AISI 52100 e AISI D2.



FONTE: Do autor

A aplicação da ferramenta de PCBN na usinagem dos aços de 35 HRC de dureza (conforme Figura 47) mostra uma tendência de aumento das componentes da força de usinagem com o incremento da fração



volumétrica de carbonetos e com sua distribuição microestrutural. Essa situação é mais evidente para a transição do aço AISI 4340 para o aço AISI 52100, e com menor intensidade do aço AISI 52100 para o aço AISI D2. Esse comportamento da diferença da força de usinagem para a ferramenta de PCBN foi apresentado na pesquisa de Qian e Hossan [49] para a usinagem dos aços AISI 52100, AISI H13, AISI D2 e AISI 4340. Os autores relacionaram essa diferença de força de usinagem com a microestrutura de cada material, com a temperatura na interface ferramenta-cavaco, bem como com a diferença da região elástica de cada material, tendo em vista que cada material tem um comportamento específico.

Já o uso da ferramenta de metal-duro de grãos ultrafinos também tendeu ao aumento das componentes da força de usinagem com o incremento da fração volumétrica de carbonetos e com a distribuição microestrutural, na transição do aço AISI 4340 para o aço AISI 52100, porém com intensidades diferentes.

A Figura 47 mostra nitidamente que a ferramenta de metal-duro permitiu a obtenção de menores valores para a força de usinagem e suas componentes para as três classes de materiais estudados com dureza de 35 HRC. Além das componentes de força, os ótimos resultados atingidos quanto aos parâmetros de acabamento da superfície indicam potencial aplicação da ferramenta de metal-duro de grãos ultrafinos em situações industriais.

Ainda com relação à qualidade da superfície, tanto a ferramenta de metal-duro quanto a ferramenta de PCBN produziram valores de rugosidade semelhantes para cada aço estudado, sendo que ambas geraram a mesma classe de rugosidade para cada material utilizado. Isso faz com que a ferramenta de metal-duro tenha aplicabilidade em operações de acabamento de materiais de média dureza. Combinado a essas vantagens, a ferramenta de metal-duro tem menor custo quando comparada com a ferramenta de PCBN.

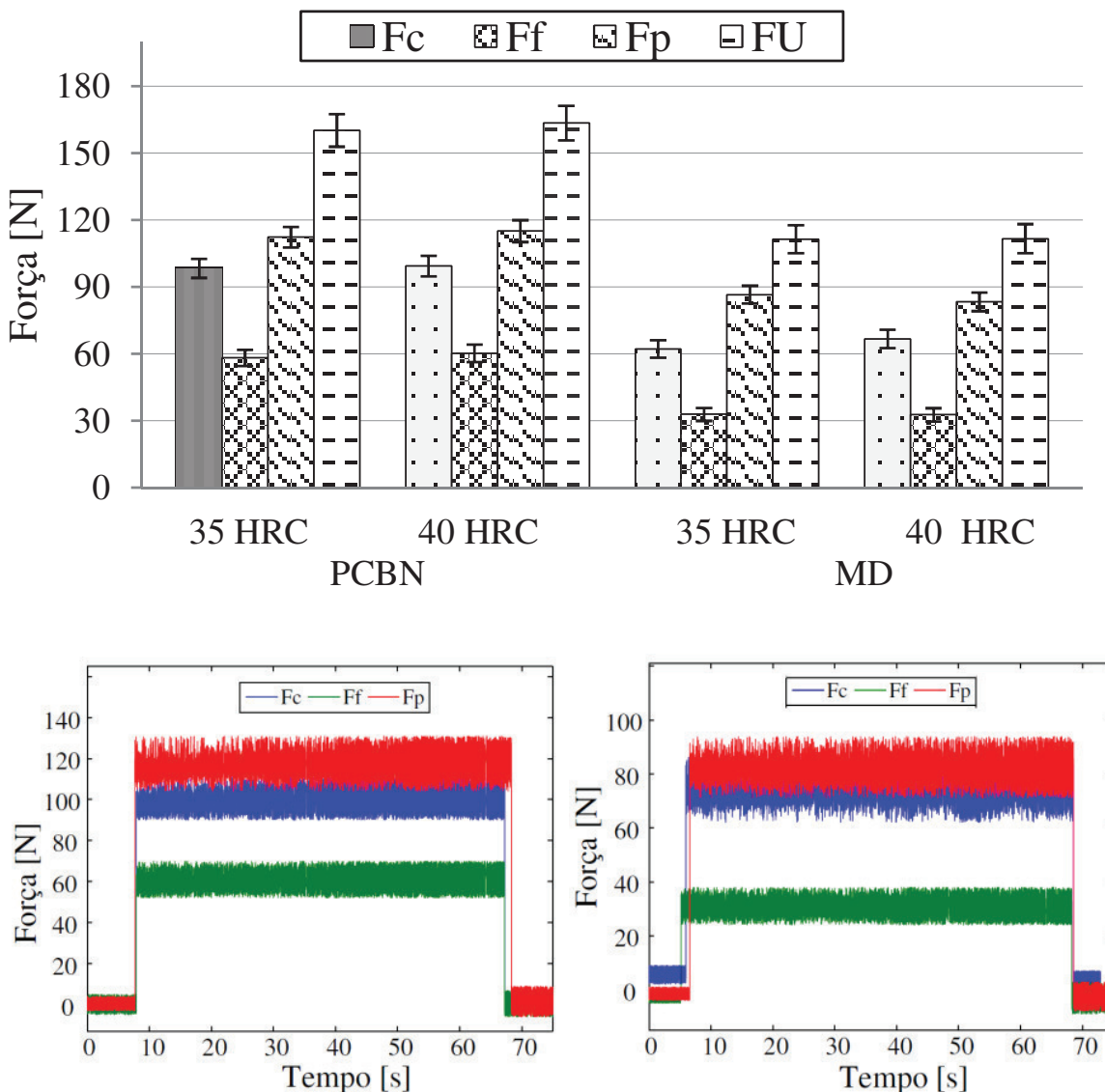
Na próxima seção será discutido o comportamento da força de usinagem e a qualidade da superfície para a dureza de 40 HRC nas três classes de materiais com as ferramentas de PCBN e de metal-duro de grãos ultrafinos.

## 4.2 DUREZA DE 40 HRC

O comportamento das componentes da força de usinagem em função das ferramentas de PCBN e de metal-duro de grãos ultrafinos com o aumento da dureza de 35 HRC para 40 HRC do aço AISI 4340 é

mostrado na Figura 48. Além disso, a figura ilustra o comportamento das componentes da força de usinagem ao longo do processo de usinagem das duas ferramentas na operação de torneamento do aço AISI 4340 de 40 HRC de dureza.

Figura 48 – Componentes da força de usinagem com o incremento da dureza para as ferramentas de PCBN e de metal-duro, e comportamento das forças durante o torneamento do aço AISI 4340 de 40 HRC de dureza.



FONTE: Do autor

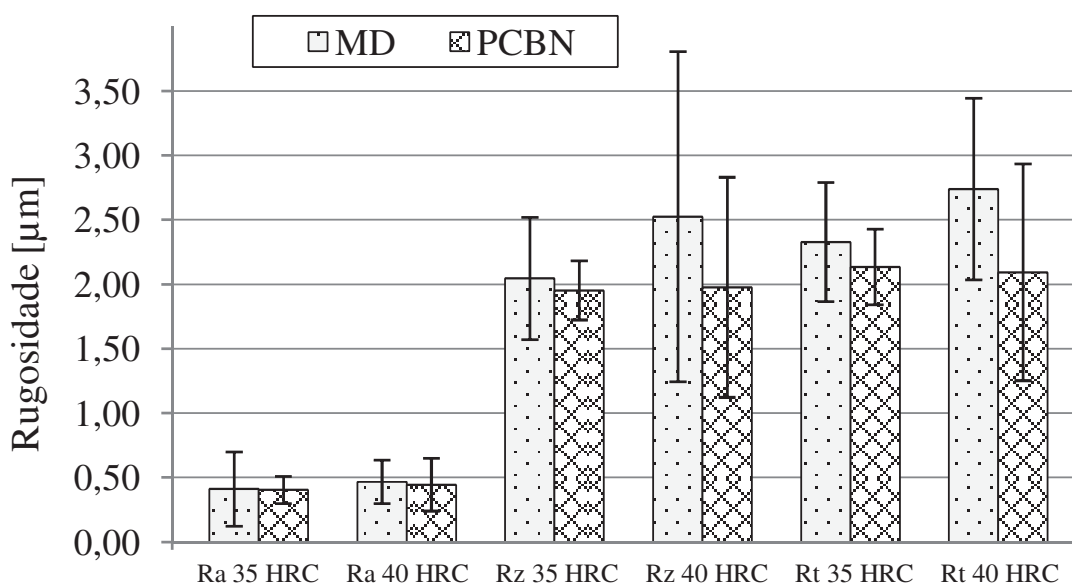
Com o incremento da dureza de em 5 HRC do aço AISI 4340 observa-se que a ferramenta de metal-duro continuou com menores valores de força na operação de torneamento do que a ferramenta de PCBN. Tal comportamento está vinculado à diferença entre o ângulo de saída das duas ferramentas, conforme explicado no subitem 4.1. Outra

característica verificada na Figura 48 é que para as duas ferramentas não houve aumento significativo das forças de usinagem, condição esta que pode estar relacionada à pequena área de corte utilizada no experimento. Esse comportamento está detalhado no subitem 4.3.

O gráfico de aquisição das componentes da força de usinagem da Figura 48 ilustra que o comportamento das componentes da força de usinagem, para as duas ferramentas, é homogêneo quanto aos fenômenos dinâmicos de corte durante o experimento, pois não se verificou nenhuma anomalia no gráfico de aquisição durante o torneamento desse aço. As pequenas flutuações dos sinais de força ao longo do tempo de corte são parecidas com as do aço AISI 4340 de 35 HRC de dureza.

A Figura 49 ilustra a variação dos resultados de rugosidade na operação de torneamento do aço AISI 4340 de 35 HRC e de 40 HRC de dureza com a ferramenta de PCBN e com a ferramenta de metal-duro de grãos ultrafinos.

Figura 49 – Valores dos parâmetros de rugosidade para as durezas de 35 HRC e de 40 HRC para as ferramentas de PCBN e de metal-duro.



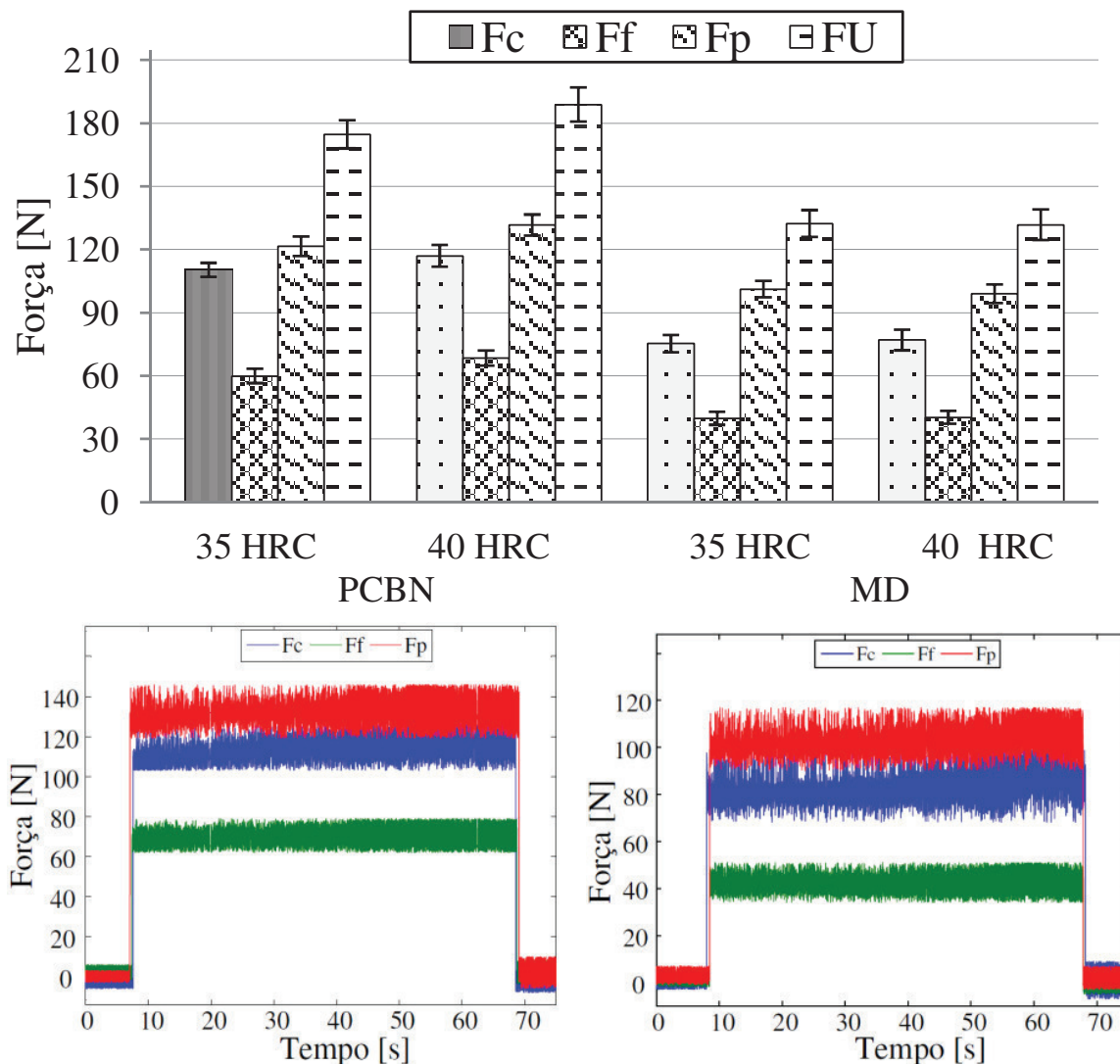
FONTE: Do autor

Aplicando o teste de hipótese para os valores dos parâmetros de rugosidade Ra ( $\mu_{PCBN} \neq \mu_{MD} \rightarrow P=0,357$ ) do aço AISI 4340 de 40 HRC de dureza, verificou-se que as intensidades são estatisticamente iguais para as duas ferramentas, situação semelhante ao ocorrido na dureza de 35 HRC, conforme subitem 4.1.

Executando um novo teste de hipótese, pode-se afirmar com um nível de confiança de 95% que o parâmetro de rugosidade Ra ( $\mu_{PCBN35} \neq \mu_{PCBN40} \rightarrow P=0,515$  e  $\mu_{MD35} \neq \mu_{MD40} \rightarrow 0,356$ ) dos corpos de prova do aço AISI 4340 de 35 HRC e de 40 HRC de dureza não podem ser considerados diferentes. Dessa maneira, o processo pode conferir à peça as mesmas características de aplicação, conforme norma NBR 8404 [67].

A Figura 50 mostra a comparação das forças de usinagem em função do aumento da dureza do aço AISI 52100 de 35 para 40 HRC.

Figura 50 – Componentes da força de usinagem com o incremento da dureza para as ferramentas de PCBN e de metal-duro, e comportamento das forças ao longo do torneamento aço AISI 52100 de 40 HRC de dureza.



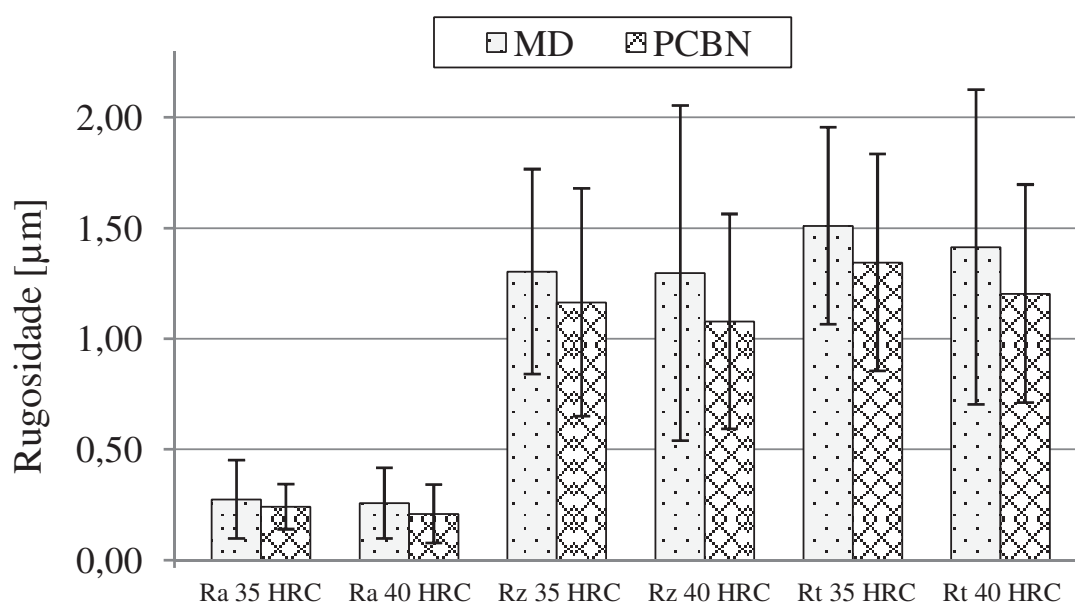
FONTE: Do autor

Conforme ilustra a Figura 50, os valores das forças de usinagem são semelhantes entre as duas durezas (35 e 40 HRC), tanto para a

ferramenta de PCBN quanto para a ferramenta de metal-duro. Esse comportamento também foi observado no torneamento do aço AISI 4340 de 40 HRC de dureza e será discutido com mais detalhes no item 4.3.

A rugosidade gerada pela operação de torneamento do aço AISI 52100 de 40 HRC não sofreu alterações significativas com o aumento da dureza do material, conforme mostra a Figura 51.

Figura 51 – Valores dos parâmetros de rugosidade para as durezas de 35 HRC e de 40 HRC para as ferramentas de PCBN e de metal-duro.



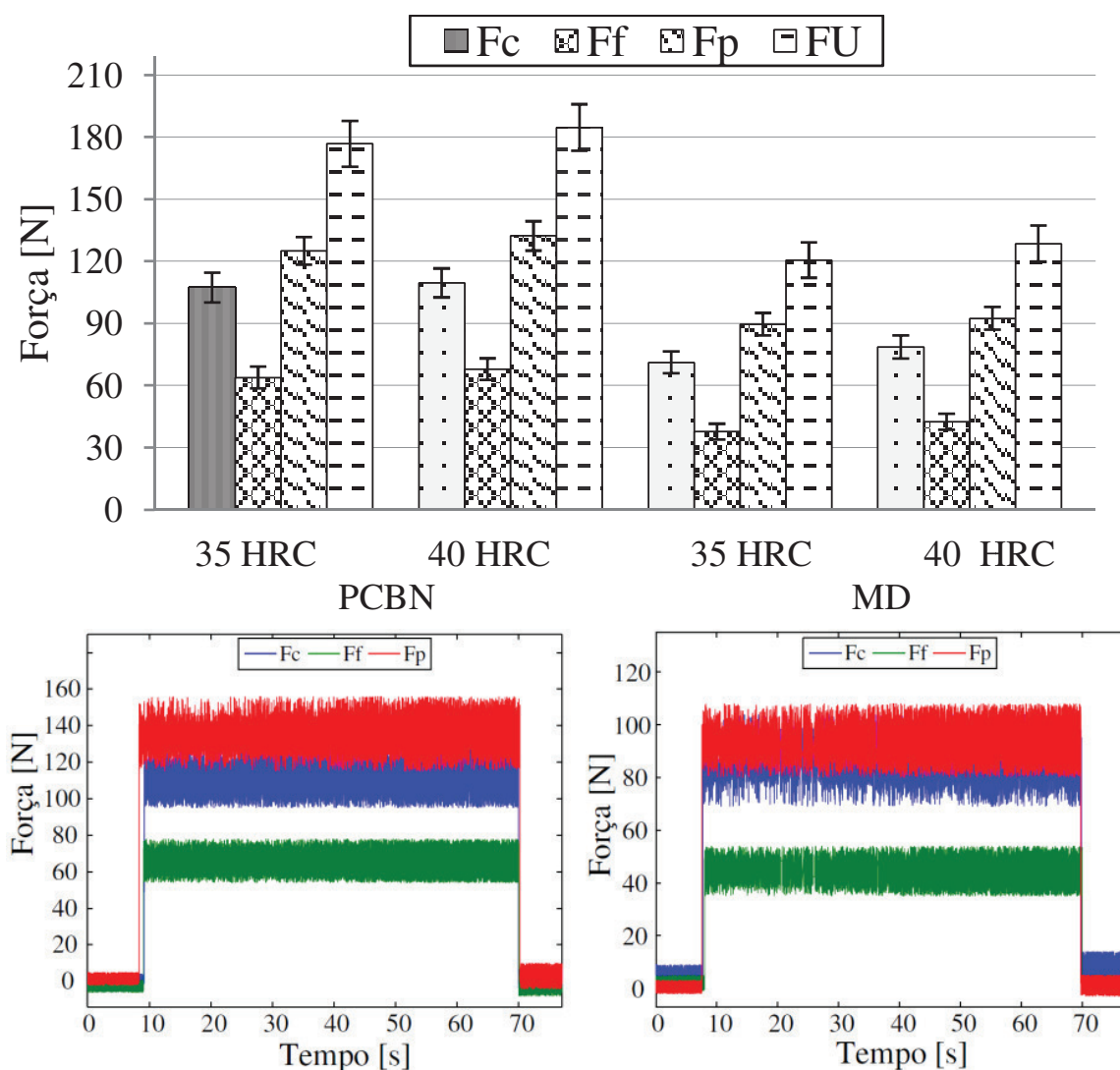
FONTE: Do autor

Com base nos resultados apresentados na Figura 51, efetuou-se um teste de hipótese no parâmetro de rugosidade Ra ( $\mu_{PCBN} \neq \mu_{MD} \rightarrow P=0,176$ ) e verificou-se que os valores dos parâmetros Ra não podem ser considerados diferentes entre as duas ferramentas para a dureza de 40 HRC. Além disso, constatou-se que as intensidades dos parâmetros de rugosidade não sofreram alterações estatísticas com o aumento de 5 HRC de dureza do aço AISI 52100, pois os resultados do teste de hipótese realizado para o parâmetro Ra ( $\mu_{PCBN35} \neq \mu_{PCBN40} \rightarrow P=0,225$  e  $\mu_{MD35} \neq \mu_{MD40} \rightarrow 0,683$ ), em ambas as ferramentas, indicam que os parâmetros não são diferentes entre as duas durezas. Desse modo, a operação de torneamento do aço AISI 52100 de 40 HRC gerou uma superfície semelhante à do torneamento do aço AISI 52100 de 35 HRC nos parâmetros de rugosidade estudados. Esta situação indica que o

processo foi capaz de gerar superfície com a mesma classe de rugosidade N5, para as duas ferramentas.

A Figura 52 mostra os resultados das componentes da força de usinagem para a operação de torneamento do aço AISI D2. Pode-se observar que o incremento da dureza do aço de 35 para 40 HRC, não geraram mudanças significativas nas componentes da força de usinagem para ambas as ferramentas. Além disso, a ferramenta de metal-duro de grãos ultrafinos apresentou menor esforço em função de sua geometria.

Figura 52 – Componentes da força de usinagem com o incremento da dureza para as ferramentas de PCBN e de metal-duro, e comportamento das forças durante o torneamento do aço AISI D2 de 40 HRC de dureza.



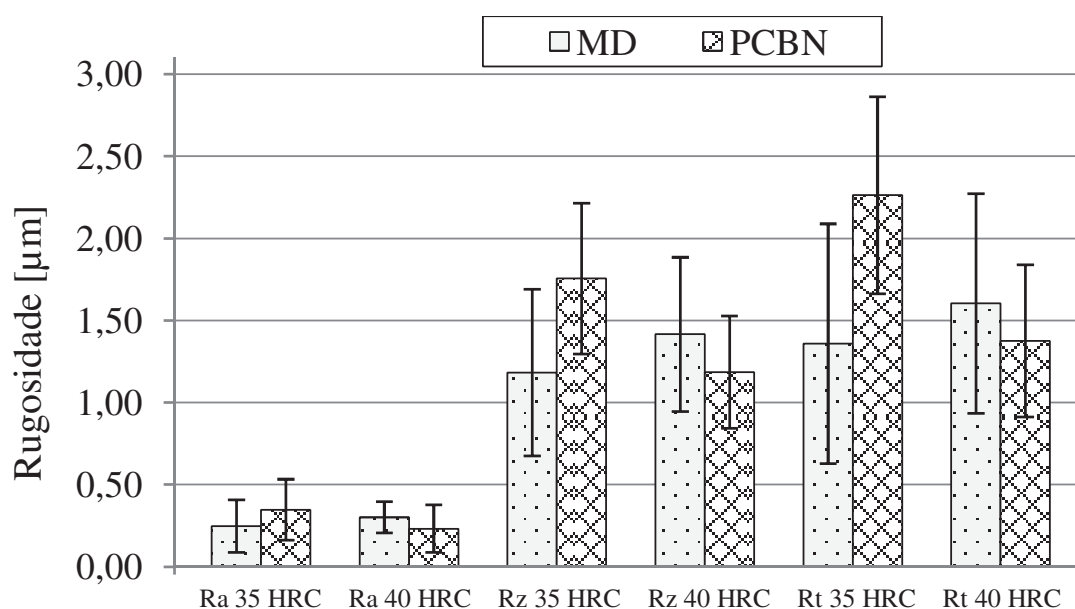
FONTE: Do autor

Os valores das componentes da força de usinagem para as duas durezas são semelhantes, tanto para a ferramenta de PCBN, quanto para

a ferramenta de metal-duro de grãos ultrafinos. Tal comportamento também foi observado no torneamento do aço AISI 4340 de 40 HRC de dureza e no torneamento do aço AISI 52100 de 40 HRC de dureza. Além disso, não se observou anomalia na aquisição dos dados de força das duas ferramentas, conforme mostra o comportamento das componentes da força de usinagem apresentado na Figura 52.

Com o incremento da dureza do aço AISI D2, observa-se que o comportamento da superfície gerada no corpo de prova tem semelhança com o do processo de torneamento do aço AISI 52100, conforme ilustram os resultados apresentados pela Figura 53.

Figura 53 – Parâmetros de rugosidade para as durezas de 35 HRC e de 40 HRC para as ferramentas de PCBN e de metal-duro.



FONTE: Do autor

Na Figura 53, é possível observar que os valores dos parâmetros de Ra ( $\mu_{PCBN} \neq \mu_{MD} \rightarrow P=0,067$ ) não são considerados estatisticamente diferentes entre as ferramentas de PCBN e de metal-duro para a dureza de 40 HRC, de acordo com o teste de hipótese realizado. Isso se deu em função das médias do parâmetro Ra ser próxima e da dispersão dos resultados. Também verificou-se, pelo teste de hipótese, que os parâmetros de rugosidade são estatisticamente similares entre as durezas de 35 HRC e de 40 HRC, situação que classifica as superfícies torneadas como N5 de acordo com a norma NBR 8404 [67].

Como visto nessa seção, o incremento da dureza de 35 HRC para 40 HRC não alterou significativamente os valores das componentes da força de usinagem para ambas as ferramentas com os três aços

utilizados. Além disso, verifica-se que as forças de usinagem e suas componentes para os três materiais ensaiados com dureza de 40 HRC são menores para a operação de torneamento com a ferramenta de metal-duro de grãos ultrafinos em função da geometria da ferramenta.

Outra característica observada nessa seção, foi que a classe de rugosidade não mudou com o incremento da dureza. Tais condições favorecem o uso da ferramenta de metal-duro de grãos ultrafinos nessa faixa de dureza para os três aços estudados, o que oportuniza o emprego desse tipo de material de ferramenta na fabricação de componentes mecânicos de média resistência mecânica empregadas nos setores industriais.

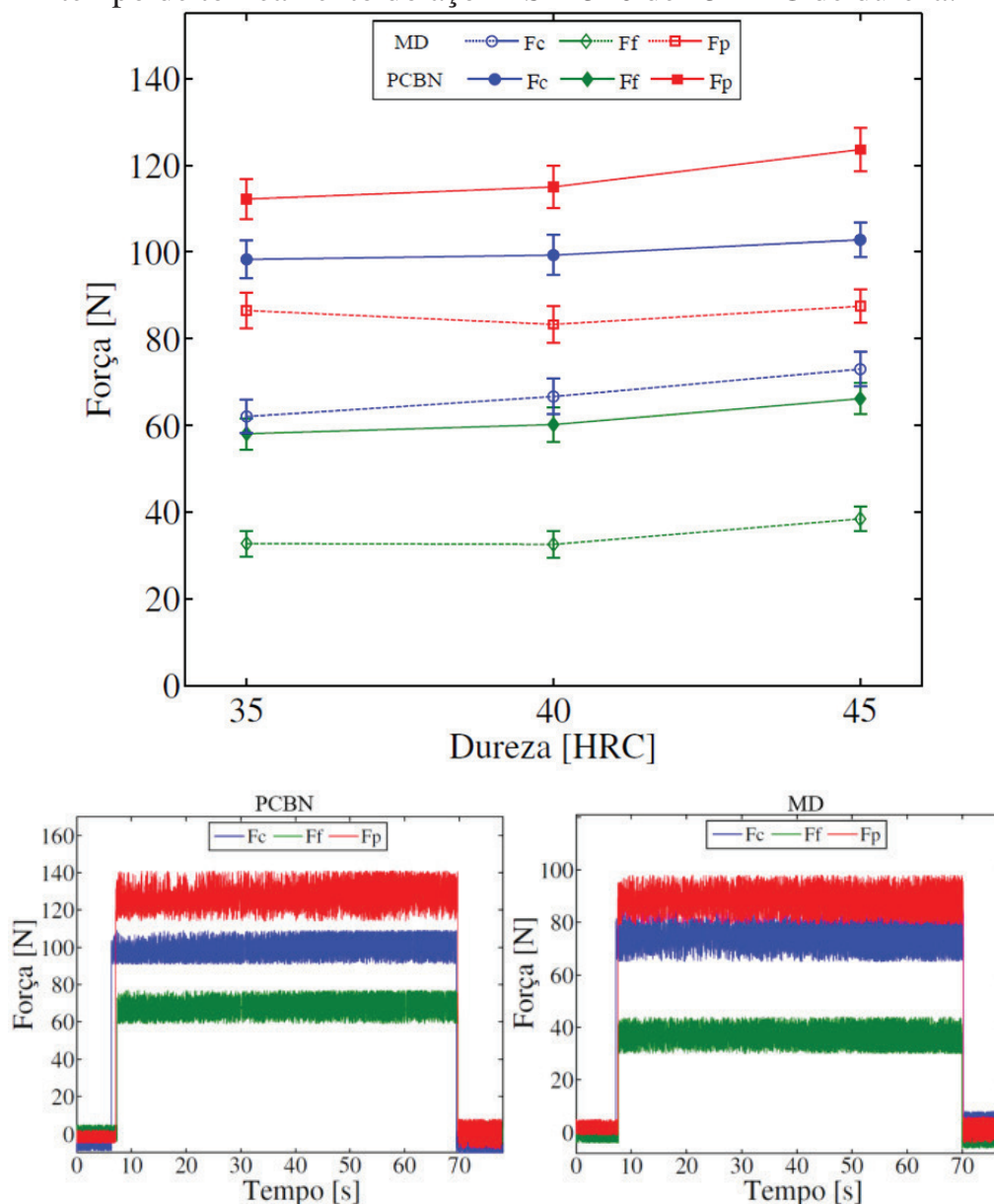
Com o intuito de ampliar a discussão sobre os fenômenos de força e da qualidade da superfície com o aumento da dureza, será discutido o torneamento dos aços AISI 4340, AISI 52100 e AISI D2 com a dureza de 45 HRC utilizando as ferramentas de PCBN e de metal-duro.

### 4.3 DUREZA DE 45 HRC

A Figura 54 mostra os resultados das componentes da força de usinagem em função do aumento da dureza do aço AISI 4340 com o emprego das ferramentas de PCBN e de metal-duro de grãos ultrafinos. Além disso, ilustra o comportamento da força de usinagem ao longo do tempo para o aço AISI 4340 com 45 HRC de dureza.



Figura 54 – Componentes da força de usinagem com o incremento da dureza de 35 para 45 HRC no aço AISI 4340, e comportamento das forças ao longo do tempo de torneamento do aço AISI 4340 de 45 HRC de dureza.



FONTE: Do autor

Com o incremento da dureza, observa-se a tendência de aumento das componentes da força de usinagem para o torneamento do aço AISI 4340. A transição de dureza de 35 HRC para 40 HRC teve menor tendência de aumento das forças de usinagem, do que para a transição de 40 HRC para 45 HRC. A tendência de aumento das componentes da força de usinagem tem relação com o aumento da resistência mecânica do aço em função do aumento da dureza, conforme comentado no item 4.1.

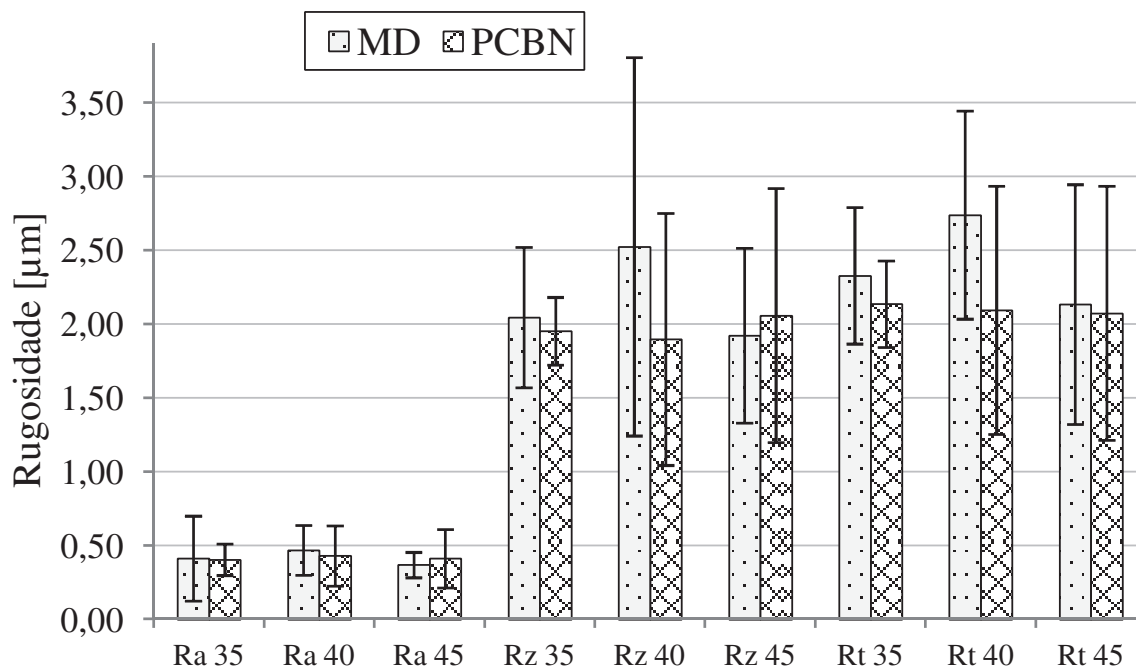
Pode-se verificar também na Figura 54, que no intervalo de dureza de 35 a 45 HRC as componentes da força de usinagem apresentaram uma tendência de aumento com o incremento da dureza. Tais resultados são diferentes do que foi relatado nos estudos de Matsumoto, Barash e Liu [46] e Luo, Liao e Tsai [11] ilustrados na Figura 8 e Figura 9, respectivamente, os quais mostraram uma diminuição das forças de usinagem nesse intervalo de dureza. Essa diferença de comportamento pode estar relacionada com a área de corte do material, tendo em vista que as componentes da força de usinagem são influenciadas pelos fenômenos que ocorrem na região de corte [5,6].

No estudo de Matsumoto, Barash e Liu [46], conforme Figura 8, a área de corte utilizada no torneamento do aço AISI 4340 é de  $0,135 \text{ mm}^2$  e a seção de corte empregada no torneamento do aço AISI 4340 na pesquisa de Luo, Liao e Tsai [11], conforme Figura 9, é de  $0,02 \text{ mm}^2$ . Com a redução da área de corte de aproximadamente 85%, no estudo de Matsumoto, Barash e Liu [46] em relação à pesquisa de Luo, Liao e Tsai [11], verifica-se que a intensidade das forças de usinagem diminuiu severamente no intervalo de dureza de 30 a 45 HRC, ou seja, quanto menor a área de corte, menor a força de usinagem. Se comparar a área de corte da pesquisa de Luo, Liao e Tsai [11] com a deste estudo, verifica-se uma diminuição de 20% da área de corte, o que pode justificar o aumento das intensidades das componentes da força de usinagem no intervalo de 35 a 45 HRC de dureza do aço AISI 4340.

Como a área de corte utilizada nesta pesquisa é pequena, isso faz com que a geração de calor seja menor em função dessa região de corte. Essa hipótese faz com que a temperatura na zona da interface cavaco-ferramenta não seja alta o suficiente para que ocasione o amolecimento térmico do aço usinado, o que facilitaria a deformação e o cisalhamento do material durante a formação do cavaco.

No torneamento do corpo de prova do aço AISI 4340 de 45 HRC de dureza utilizando as ferramentas de PCBN e de metal-duro de grãos ultrafinos, observou-se que a topografia da superfície gerada pelas duas ferramentas são estatisticamente similares em relação ao parâmetro de rugosidade  $R_a$  ( $\mu_{\text{PCBN}} \neq \mu_{\text{MD}} \rightarrow P=0,248$ ), de acordo com o resultado do teste de hipótese realizado. A Figura 55 mostra os resultados dos valores de rugosidade gerados na superfície do aço AISI 4340 com a evolução da dureza.

Figura 55 – Variação dos parâmetros de rugosidade com a variação da dureza do aço AISI 4340 para as ferramentas de PCBN e de metal-duro.



FONTE: Do autor

Com base nos valores de rugosidade, pode-se afirmar que a qualidade da superfície sofreu mudanças com o aumento da dureza de 40 HRC para 45 HRC, para ambas as ferramentas. Uma tendência de queda nas intensidades dos parâmetros de rugosidade com o aumento da dureza foi verificada, e isso se deve, principalmente, pela alteração do comportamento plástico do material sofrido com o incremento da dureza [44], o que melhora a superfície da peça.

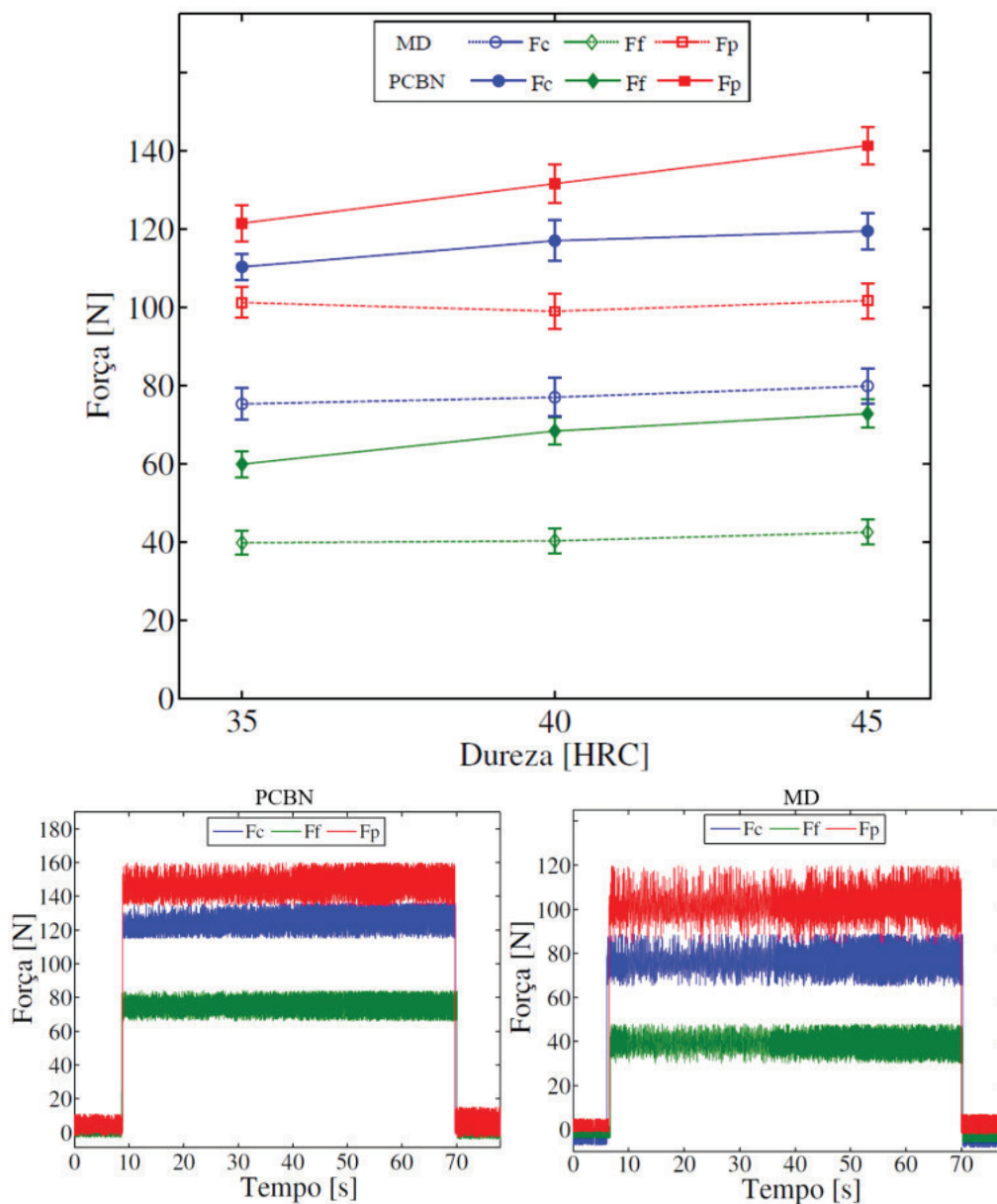
A melhora da qualidade da superfície do aço AISI 4340 de 45 HRC de dureza foi superior para a ferramenta de metal-duro de grãos ultrafinos do que para a ferramenta de PCBN, pois houve uma maior queda nos parâmetros de rugosidade para a ferramenta de metal-duro com o aumento da dureza. Isso pode ser observado pelo resultado da média do parâmetro de Ra de  $0,37 \pm 0,09 \mu\text{m}$  para a dureza de 45 HRC e de  $0,47 \pm 0,17 \mu\text{m}$  para a dureza de 40 HRC. Além disso, o teste de hipótese realizado no parâmetro de rugosidade Ra ( $\mu_{\text{MD}40} \neq \mu_{\text{MD}45} \rightarrow P=0,002$ ) mostra que as médias são estatisticamente diferentes entre as durezas para a ferramenta de metal-duro. Conforme resultados, também se observou uma queda na classe de rugosidade para a ferramenta de metal-duro de grãos ultrafinos, passando de N6 na dureza de 40 HRC para N5 na dureza de 45 HRC.

A mudança de classe não foi verificada para a ferramenta de PCBN com o aumento da dureza, pois houve uma pequena tendência de queda do parâmetro de rugosidade Ra com o aumento da dureza e a média do parâmetro Ra ( $\mu_{\text{PCBN40}} \neq \mu_{\text{PCBN45}} \rightarrow P=0,689$ ) não é estatisticamente diferente entre as duas durezas, de acordo com o teste de hipótese realizado.

No torneamento do aço AISI 4340 de 45 HRC de dureza, é possível afirmar que a ferramenta de metal-duro de grãos ultrafinos apresentou menores intensidades de força e melhor classificação em função da classe de rugosidade em comparação com a ferramenta de PCBN. Esta constatação favorece o uso dessa ferramenta na operação de torneamento do aço AISI 4340 de 45 HRC de dureza.

A Figura 56 mostra os resultados das componentes da força de usinagem na operação de torneamento do aço AISI 52100 para as duas ferramentas em função da evolução da dureza do aço, e o comportamento das componentes da força de usinagem durante a operação de corte.

Figura 56 – Componentes da força de usinagem com o aumento da dureza do aço AISI 52100, e o comportamento das forças durante a usinagem do aço AISI 52100 de 45 HRC de dureza.



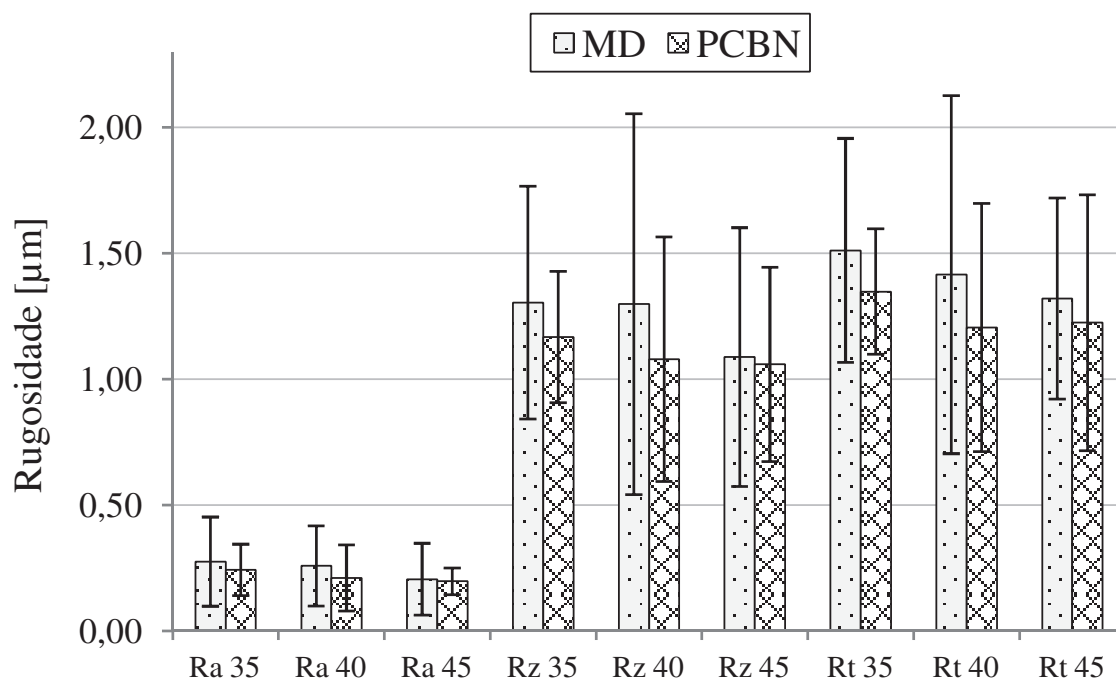
FONTE: Do autor

O comportamento das componentes das forças de usinagem no torneamento do aço AISI 52100 com as duas ferramentas utilizadas foi similar ao do torneamento do aço AISI 4340 de 45 HRC de dureza, ou seja, não se observou uma queda das componentes das forças no intervalo de dureza de 35 a 45 HRC. Esse comportamento ocorre em função da área de usinagem utilizada que não gera calor suficiente para amolecer o material, como explicado no torneamento do aço AISI 4340 de 45 HRC.

Também pode-se verificar no gráfico de força da Figura 56, que as intensidades da força nas duas ferramentas são diferentes para todas as componentes de força. Tal fenômeno é atribuído, principalmente, à diferença da geometria das ferramentas, conforme explanado no item 4.1.

O perfil da superfície torneada pelas ferramentas de PCBN e de metal-duro de grãos ultrafinos no aço AISI 52100 com o aumento da dureza é expresso pelos três parâmetros de rugosidade utilizados na pesquisa, que são mostrados na Figura 57.

Figura 57 – Parâmetros de rugosidade com a variação da dureza do aço AISI 52100 para as ferramentas de PCBN e de metal-duro.



FONTE: Do autor

Para a dureza de 45 HRC, os valores do parâmetro Ra ( $\mu_{PCBN} \neq \mu_{MD} \rightarrow P=0,223$ ) não são considerados estatisticamente diferentes entre as duas ferramentas empregadas na operação de torneamento do aço AISI 52100, conforme teste de hipótese realizado no parâmetro de rugosidade Ra. Tal fenômeno também ocorreu para as durezas de 35 e 40 HRC conforme visto nos item 4.1 e 4.2.

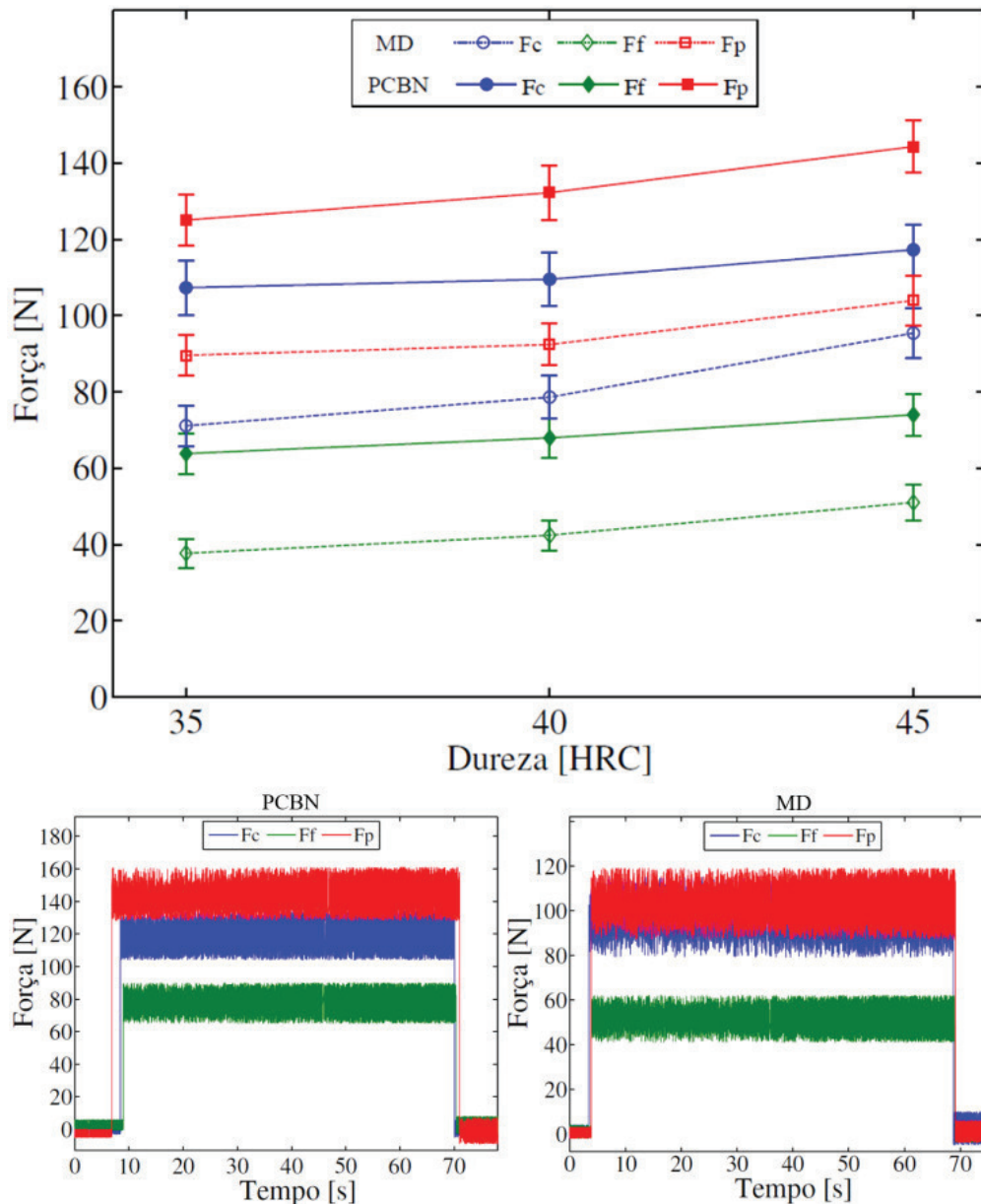
Com os dados da Figura 57, observa-se que com o incremento da dureza do aço AISI 52100 há uma tendência de diminuição dos parâmetros de rugosidade. Apesar disso a classe de rugosidade, determinada com o parâmetro Ra, continuou sendo N5 para as duas

ferramentas. Desse modo, as duas ferramentas produziram superfícies com funcionalidades similares, de modo que tanto a ferramenta de PCBN quanto a de metal-duro de grãos ultrafinos podem ser utilizadas para a mesma aplicação de acordo com a classe de rugosidade.

No torneamento do aço AISI 52100 de 45 HRC de dureza, observou-se que o uso da ferramenta de metal-duro de grãos ultrafinos apresentou menores valores de força e a mesma classificação em função da classe de rugosidade. Tal situação favorece o uso dessa ferramenta no torneamento do aço AISI 52100 de 45 HRC.

A Figura 58 mostra os resultados da operação de torneamento do aço AISI D2 com a ferramenta de PCBN e com a ferramenta de metal-duro de grãos ultrafinos com o incremento da dureza.

Figura 58 – Componentes da força de usinagem com a evolução da dureza do aço AISI D2, e o comportamento das forças durante o processo de torneamento do aço AISI D2 de 45 HRC de dureza.



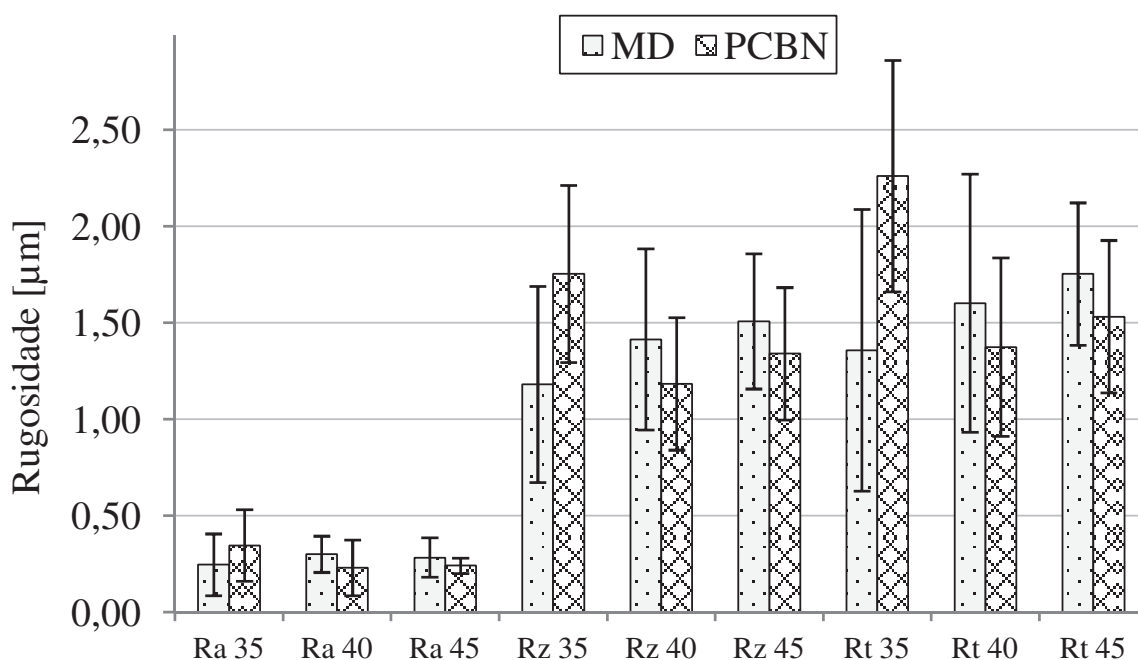
FONTE: Do autor

Os resultados mostrados na figura acima apresentam comportamento similar ao dos aços AISI 4340 e AISI 52100 no intervalo de dureza de 35 a 45 HRC de dureza, ou seja, não se verificou uma queda dessas componentes nesse intervalo de dureza e sim uma tendência de aumento com a evolução da dureza.

A qualidade da superfície gerada na operação de torneamento do aço AISI D2 de 45 HRC com as duas ferramentas não sofreu severas alterações com o aumento da dureza do material, conforme mostra Figura 59.



Figura 59 – Parâmetros de rugosidade com a variação da dureza do aço AISI D2 para as ferramentas de PCBN e de metal-duro.



FONTE: Do autor

Apesar da diferença de material dos aços AISI 52100 e AISI D2, os resultados do parâmetro de rugosidade Ra apresentaram valores semelhantes para as duas ferramentas, o que classifica a qualidade da superfície gerada nos corpos de prova do aço AISI D2 como sendo N5, de acordo com a classe de rugosidade.

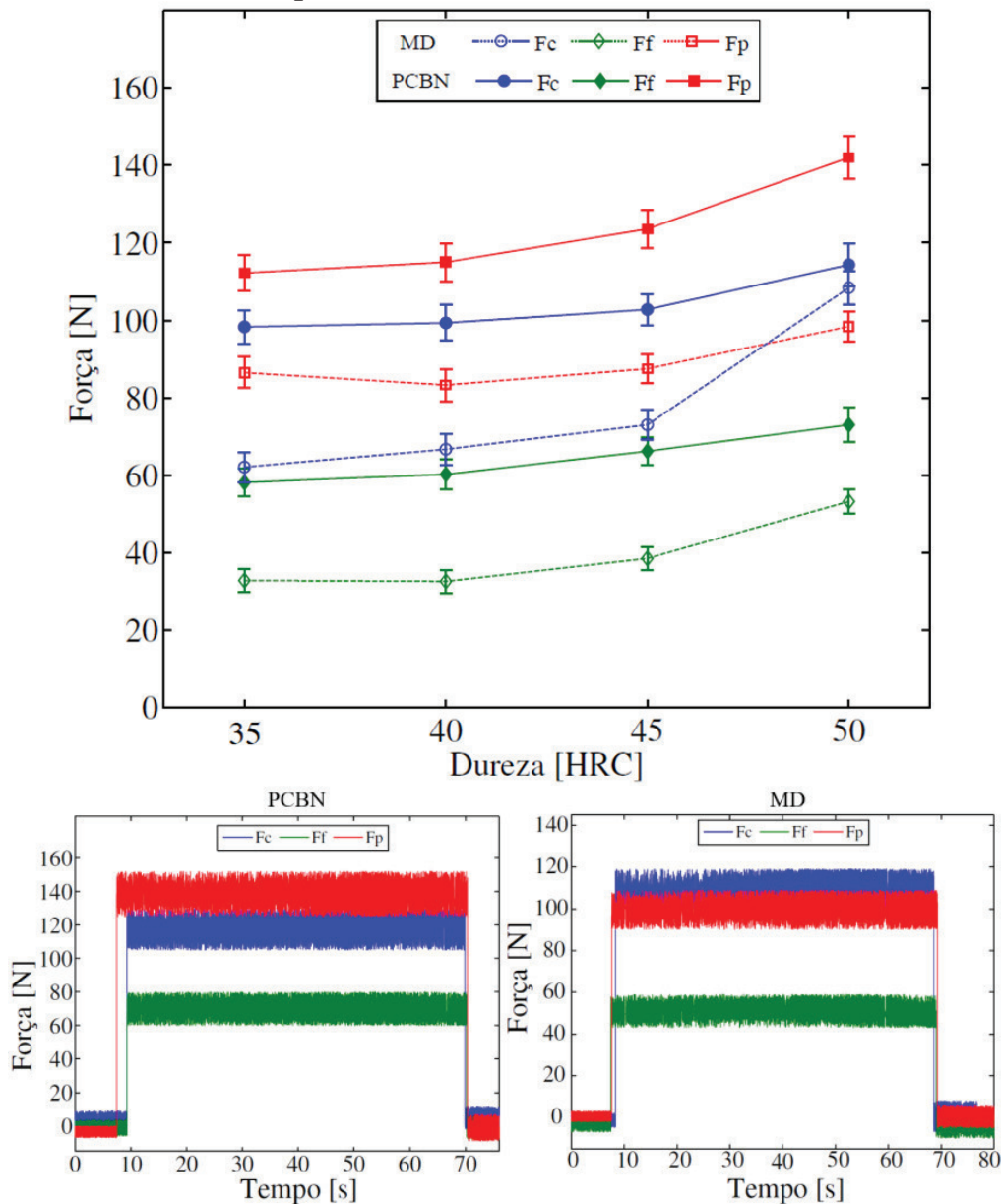
No torneamento do aço AISI D2 de 45 HRC de dureza com as ferramentas de PCBN e de metal-duro de grãos ultrafinos, verificou-se que a ferramenta de metal-duro apresentou a vantagem de necessitar menor esforço durante a operação de torneamento e teve a mesma classificação de aplicação em função da superfície gerada. Esta situação pode favorecer o uso dessa ferramenta no torneamento do aço AISI D2 de 45 HRC de dureza.

Os resultados obtidos e as discussões realizadas na operação de torneamento dos aços até a dureza de 45 HRC são em relação ao torneamento de materiais de média dureza. A partir desta dureza, entretanto, é que se pode considerar o processo como de torneamento de materiais endurecidos, de acordo com o conceito difundido por Astakhov [3], Chinchankar, Satish e Choudhury [9], Grzesik [12], Davim [25] e Griffiths [27]. Dessa maneira, a próxima seção analisará os resultados das componentes da força de usinagem e da qualidade da superfície para os aços endurecidos utilizados nesta pesquisa.

#### 4.4 DUREZA DE 50 HRC

O comportamento de forças no processo de torneamento do aço AISI 4340, com o emprego das ferramentas de PCBN e de metal-duro de grãos ultrafinos e com sua evolução de dureza, é ilustrado na Figura 60.

Figura 60 – Força de usinagem com o aumento da dureza do aço AISI 4340, e comportamento das componentes da força de usinagem do aço AISI 4340 de 50 HRC de dureza para as ferramenta de PCBN e de metal-duro.



FONTE: Do autor

Comparando-se as intensidades das componentes da força de usinagem para as duas ferramentas na operação de torneamento do aço

AISI 4340 com dureza de 50 HRC, observa-se que são maiores para a ferramenta de PCBN. Tal fenômeno tem relação com a diferença do ângulo de saída das duas ferramentas, conforme discutido no item 4.1.

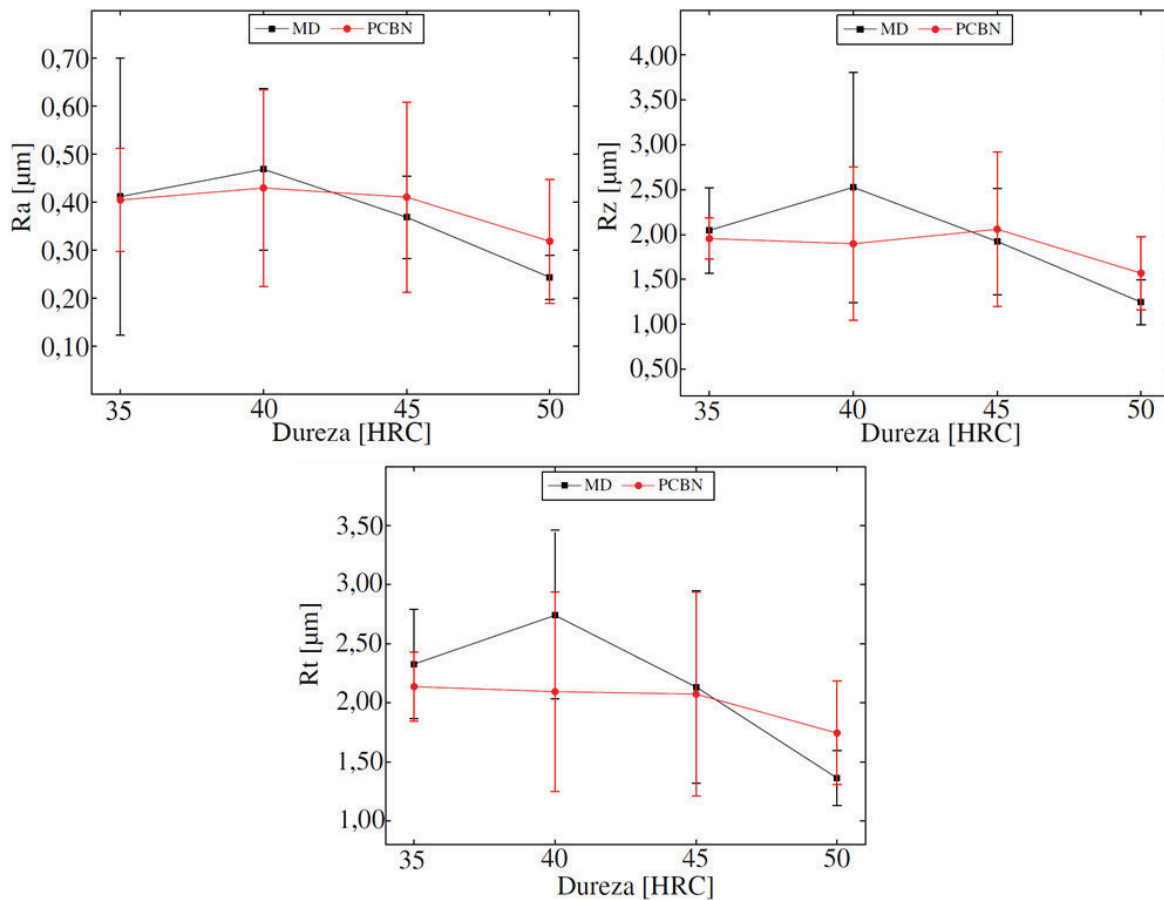
No gráfico da Figura 60, que relaciona força *versus* dureza, observa-se que as componentes da força de usinagem para as duas ferramentas apresentam um aumento expressivo na transição de dureza de 45 para 50 HRC. Para esse intervalo de dureza, esse aumento é similar ao que ocorreu nos estudos de Matsumoto, Barash e Liu [46] e Luo, Liao e Tsai [11]. Os autores justificam tal aumento em função do aumento da resistência mecânica do material, do aumento da força de atrito na região de corte e da redução da tensão de escoamento devido à geração de calor, tendo como resultado um aumento significativo das componentes da força de usinagem para o aço AISI 4340.

Ainda com relação à Figura 60, destaca-se que no intervalo de dureza de 35 a 45 HRC a intensidade da componente da força passiva é maior do que das outras componentes. Já para a dureza de 50 HRC, a componente da força de corte da ferramenta de metal-duro apresenta intensidade maior, conforme mostra o gráfico de forças *versus* dureza e o gráfico de aquisição de força.

Uma hipótese para essa inversão de grandeza das componentes da força de usinagem pode estar relacionada ao incremento da dureza do aço AISI 4340. Dessa maneira, o desgaste do gume da ferramenta ocasiona modificações na geometria da ferramenta [6], devido à maior área de contato com a peça, situação que explicaria a inversão das componentes da força de usinagem.

A Figura 61 mostra os resultados dos parâmetros de rugosidade em função da evolução da dureza do aço AISI 4340 na operação de torneamento com a ferramenta de PCBN e com a ferramenta de metal-duro de grãos ultrafinos.

Figura 61 – Parâmetros de rugosidade com a variação da dureza do aço AISI 4340 no torneamento com as ferramentas de PCBN e de metal-duro.



FONTE: Do autor

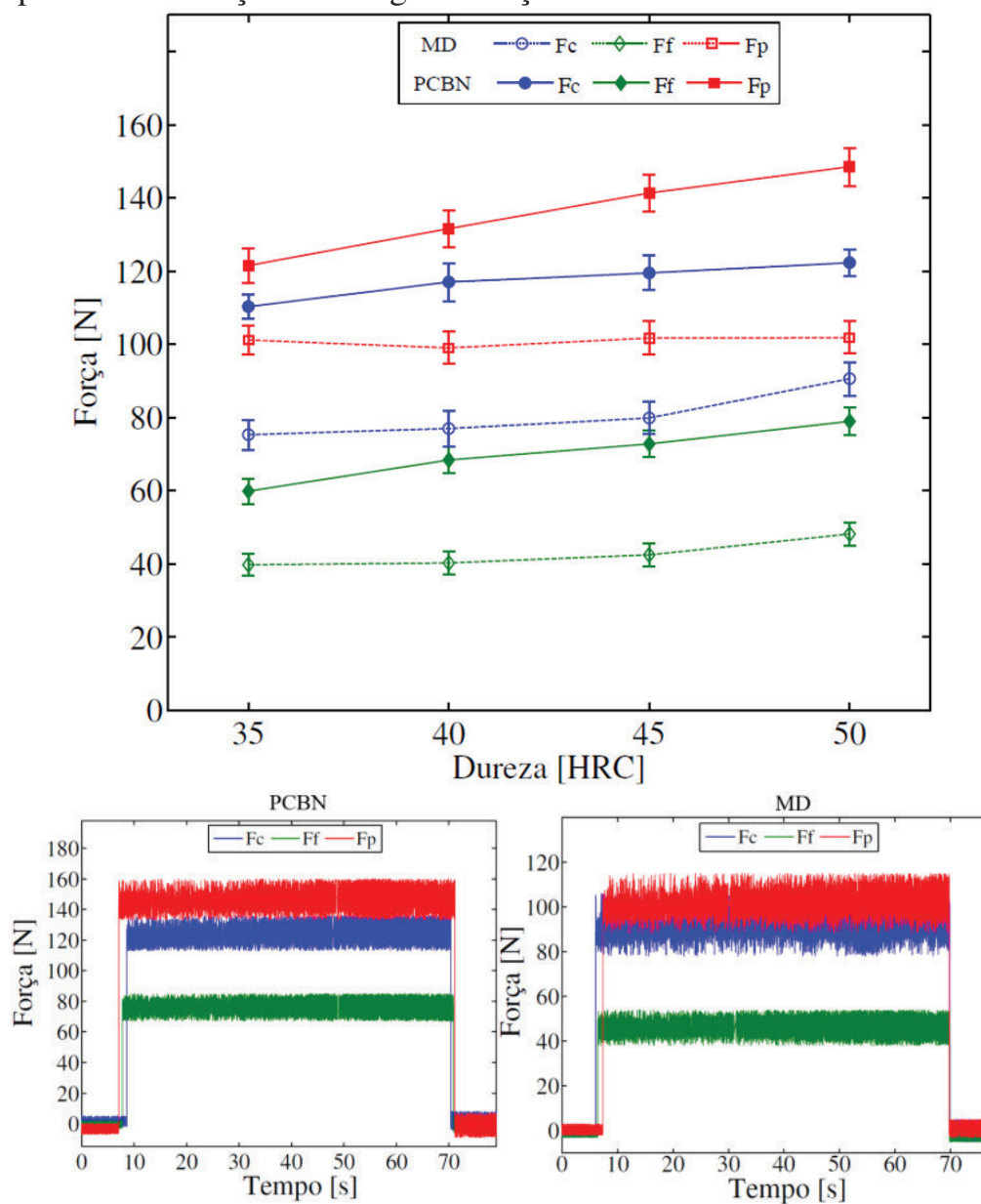
Com a evolução da dureza no torneamento do aço AISI 4340, observa-se que os parâmetros de rugosidade diminuem com o aumento da dureza do aço, tanto para a ferramenta de PCBN, quanto para a ferramenta metal-duro. Isso se deve ao comportamento plástico do material [44], bem como pelo aumento do atrito na região de corte, que promove o aumento da temperatura na interface da ferramenta-peça e que amolece a pequena área de corte, o que acarreta por sua vez uma melhoria na superfície da peça.

Outra característica observada é que as médias dos parâmetros de rugosidade  $Ra$  ( $\mu_{PCBN} \neq \mu_{MD} \rightarrow P=0,013$ ) entre as duas ferramentas são estatisticamente diferentes, de acordo com o teste de hipótese. Além disso, a ferramenta de metal-duro apresentou menor valor de rugosidade na dureza de 50 HRC, do que a ferramenta de PCBN. Essa diferença pode ser justificada pela diferença do ângulo de saída entre as duas ferramentas, visto que a ferramenta de metal-duro possui ângulo de saída positivo, o que favorece a penetração do gume na peça e facilita o escoamento do cavaco [10].

De acordo com a norma NBR 8404, a qualidade da superfície para ambas as ferramentas se classifica como N5, ou seja, as duas ferramentas geraram superfície com características semelhantes de aplicação através do processo de usinagem.

A Figura 62 mostra os resultados das componentes da força de usinagem na operação de torneamento do aço AISI 52100 com a ferramenta de PCBN e com a ferramenta de metal-duro de grãos ultrafinos.

Figura 62 – Componentes da força de usinagem com o incremento da dureza para as ferramentas de PCBN e de metal-duro, e comportamento das componentes da força de usinagem do aço AISI 52100 de 50 HRC de dureza.

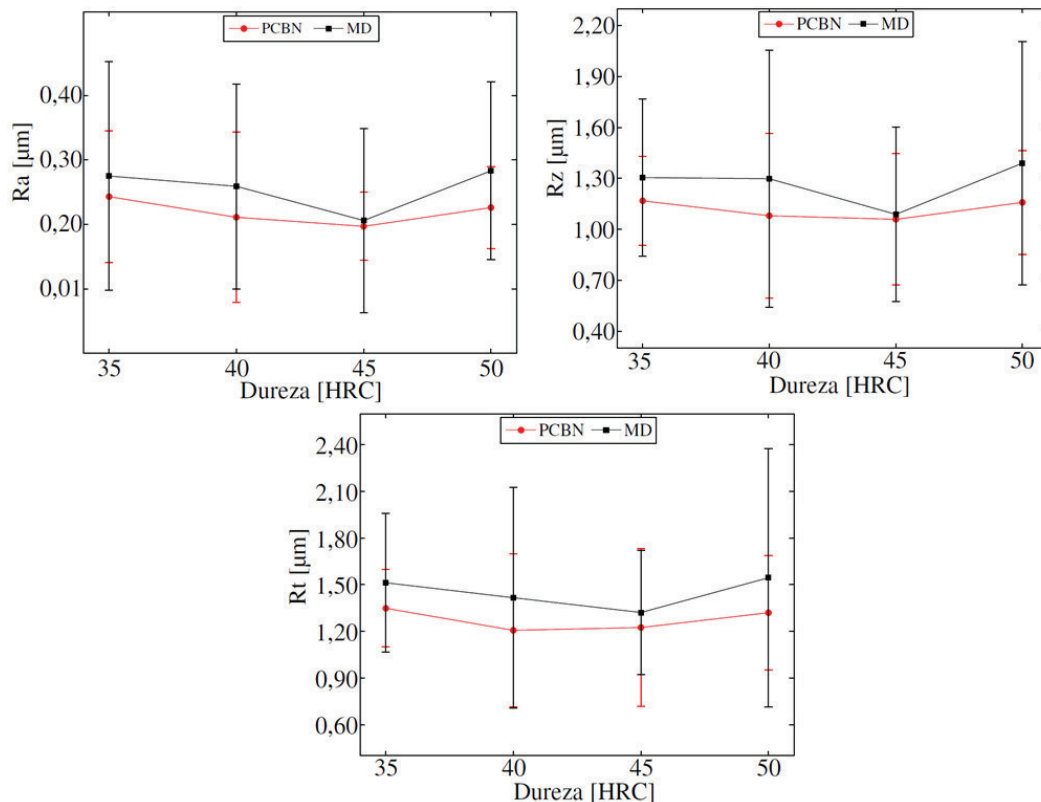


FONTE: Do autor

No gráfico de força *versus* dureza para ambas as ferramentas da Figura 62, observa-se uma pequena tendência de aumento das componentes da força de usinagem na transição de 45 HRC para 50 HRC, situação diferente do que ocorreu com o torneamento do aço AISI 4340, para o qual verificou-se um aumento considerável nas forças. Tal diferença pode ser considerada em função da presença de carbonetos presentes na estrutura do aço AISI 52100, as quais acarretam dificuldades na operação de corte deste aço, contribuindo conseqüentemente para o aumento das componentes da força de usinagem.

Outra característica observada nas componentes da força de usinagem da ferramenta de metal-duro, é que a componente da força de corte foi a que teve maior aumento e sua grandeza se aproximou da componente da força passiva. Tal comportamento pode estar associado à irregularidade do gume devido ao desgaste da ferramenta de metal-duro, o que ocasionou modificações na geometria da ferramenta, conseqüentemente alterando as intensidades das componentes da força de usinagem. Essa hipótese pode ser evidenciada pelo aumento dos valores dos parâmetros de rugosidade no torneamento do aço AISI 52100 para a dureza de 55 HRC, conforme mostra a Figura 63.

Figura 63 – Parâmetros de rugosidade com a variação da dureza do aço AISI 52100 no torneamento com as ferramentas de PCBN e de metal-duro.



FONTE: Do autor

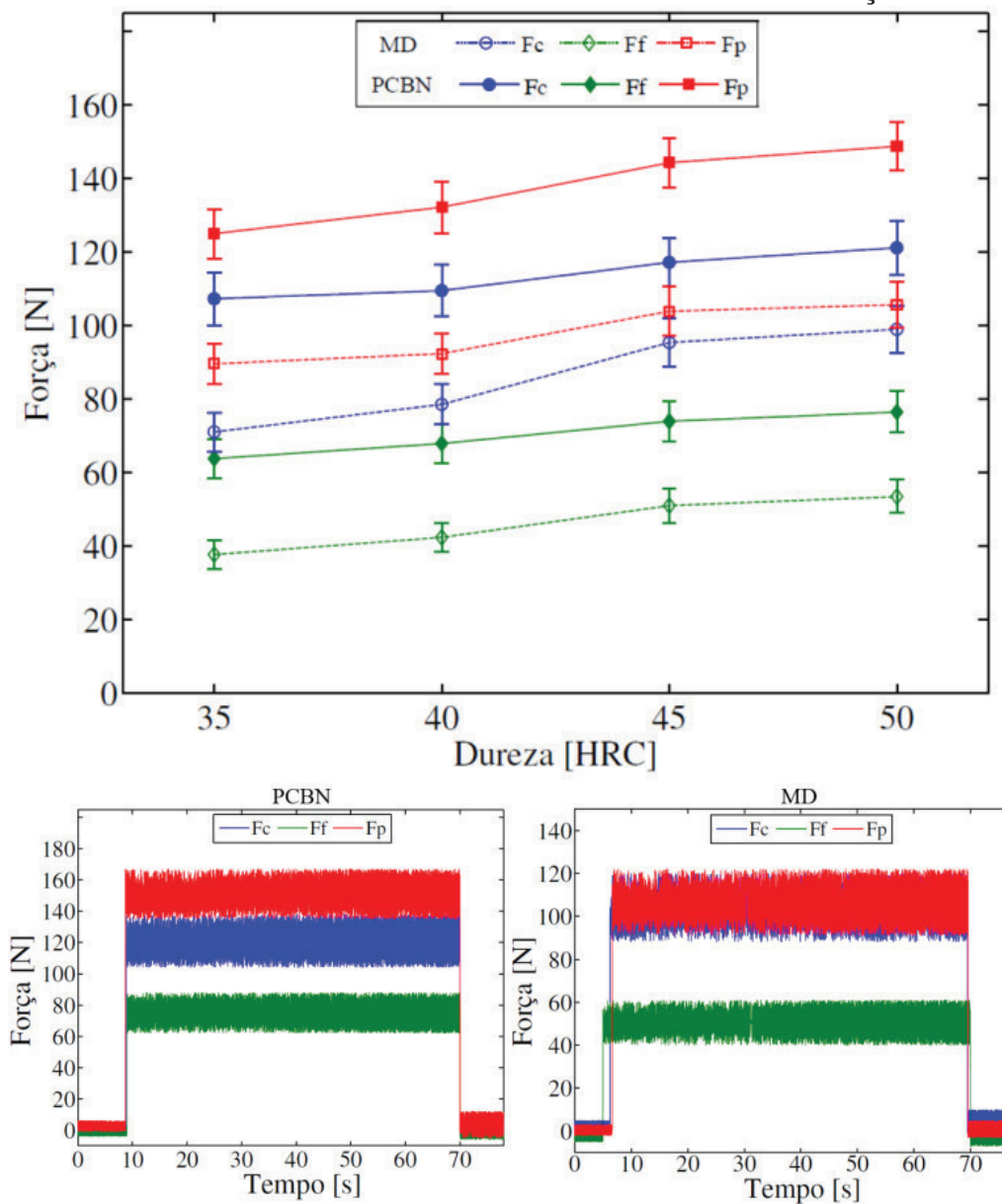
Os parâmetros de rugosidade Ra, Rz e Rt para as duas ferramentas apresentaram uma tendência de aumento na transição de dureza de 45 HRC para 50 HRC, conforme mostram os gráficos da Figura 63. A maior tendência foi para a ferramenta de metal-duro de grãos ultrafinos, em comparação com a ferramenta de PCBN.

Dentre os parâmetros de rugosidade usados na Figura 63, o parâmetro Ra é empregado normalmente na indústria como sendo parâmetro de controle de processo, e sua alteração pode representar um desgaste da ferramenta de corte [6]. A tendência de aumento do parâmetro de rugosidade Ra para a ferramenta de metal-duro de grãos ultrafinos, juntamente com a alteração das componentes da força de usinagem, evidencia o desgaste como sendo a principal causa dessas alterações. Além disso, o parâmetro de rugosidade Rt apresentou alta incerteza de medição, o que pode ser outro indicador de anomalia no gume da ferramenta de metal-duro de grãos ultrafinos.

Mesmo com esse aumento da rugosidade, os resultados obtidos com as duas ferramentas mantiveram-se na classe N5, de acordo com a norma NBR 8404 [67]. Nesse caso, cabe destacar que os valores do parâmetro de rugosidade Ra ( $\mu_{\text{PCBN}} \neq \mu_{\text{MD}} \rightarrow P=0,050$ ) são estatisticamente diferentes entre as ferramentas de PCBN e de metal-duro para a dureza de 50 HRC, de acordo com o teste de hipótese realizado para as duas ferramentas. Essa diferença estatística tem relação com a pequena dispersão dos resultados de Ra, principalmente no caso da ferramenta de PCBN.

A Figura 64 mostra os resultados das componentes da força de usinagem na operação de torneamento do aço AISI D2 com as ferramentas de PCBN e de metal-duro de grãos ultrafinos, considerando o incremento da dureza desse aço.

Figura 64 – Componentes da força de usinagem com a evolução da dureza para as ferramentas de PCBN e de metal-duro no torneamento do aço AISI D2.



FONTE: Do autor

Os resultados das componentes da força de usinagem do aço AISI D2 da Figura 64 mostram uma pequena tendência de aumento nas forças de usinagem com a transição da dureza de 45 HRC para a dureza de 50 HRC, para ambas as ferramentas. Situação semelhante ocorreu com o aço AISI 52100, e que pode ser explicada em função do material utilizado, combinado com os parâmetros de corte empregados.

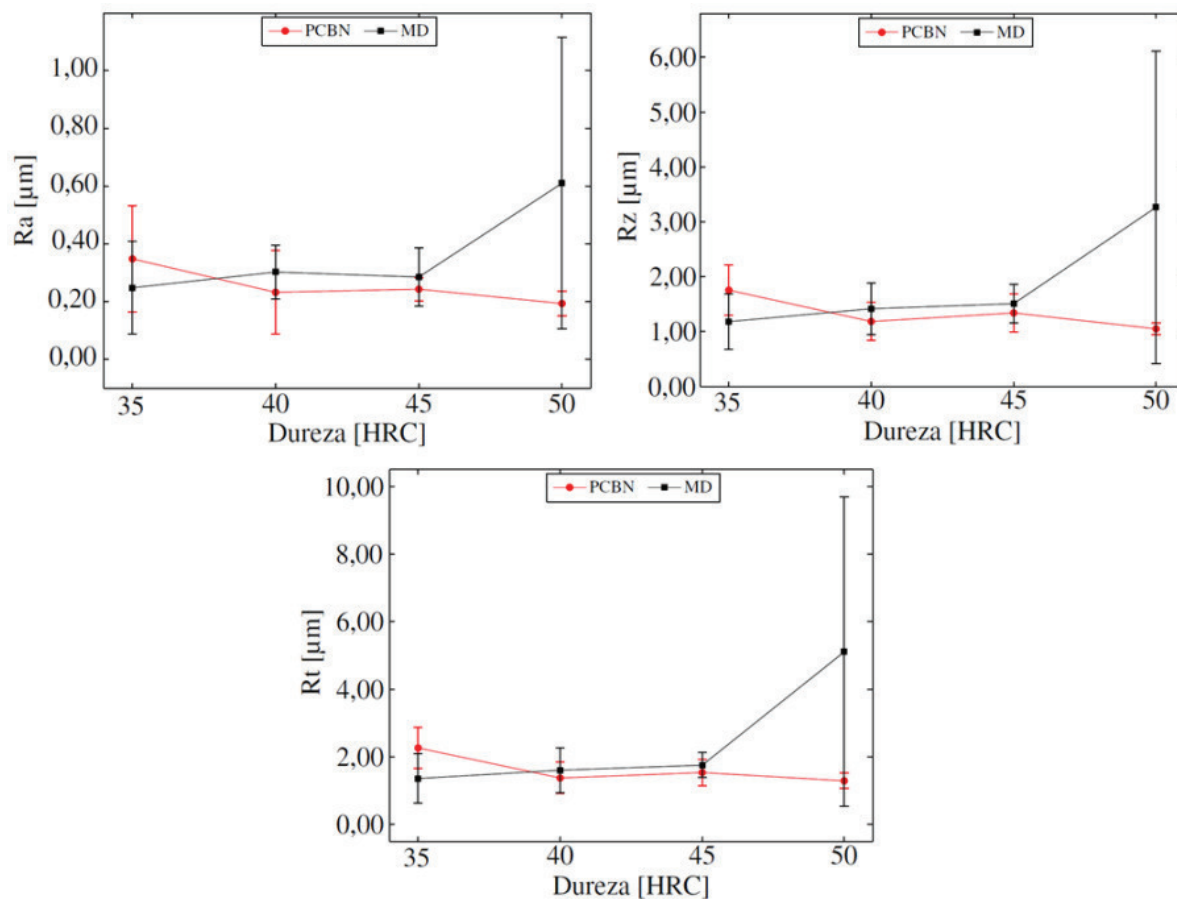
Outra característica observada, é que as componentes da força passiva e da força de corte para a ferramenta de metal-duro de grãos ultrafinos apresentaram intensidades semelhantes para a operação de torneamento de 50 HRC de dureza. Essa similaridade entre as duas



componentes ocorre em função da componente da força de corte ter promovido maior intensidade do que da força passiva no intervalo de dureza de 40 a 50 HRC. Essa maior intensidade da componente da força de corte pode estar associada à alteração da forma do gume da ferramenta durante o ensaio. Essa hipótese pode ser evidenciada pelo aumento dos parâmetros de rugosidade da ferramenta de metal-duro no intervalo de 45 a 50 HRC, conforme mostra a Figura 65.

A Figura 65 mostra a variação dos parâmetros de rugosidade Ra, Rz e Rt em função do aumento da dureza do aço AISI D2 na operação de torneamento com o emprego das ferramentas de metal-duro e de PCBN.

Figura 65 – Parâmetros de rugosidade com a variação da dureza do aço AISI D2 na operação de torneamento com as ferramentas de PCBN e de metal-duro.



FONTE: Do autor

Para a dureza de 50 HRC do aço AISI D2, os valores dos parâmetros de rugosidade das ferramentas de PCBN e de metal-duro são diferentes estatisticamente para os parâmetros de rugosidade Ra ( $\mu_{\text{PCBN}} \neq \mu_{\text{MD}} \rightarrow P=0,001$ ), Rz ( $\mu_{\text{PCBN}} \neq \mu_{\text{MD}} \rightarrow P=0,002$ ) e Rt ( $\mu_{\text{PCBN}} \neq \mu_{\text{MD}} \rightarrow$

$P=0,008$ ), de acordo com teste de hipótese realizado. Essa diferença ocorre em função da diferença das médias e da grande dispersão dos valores de rugosidade entre as duas ferramentas para cada parâmetro analisado.

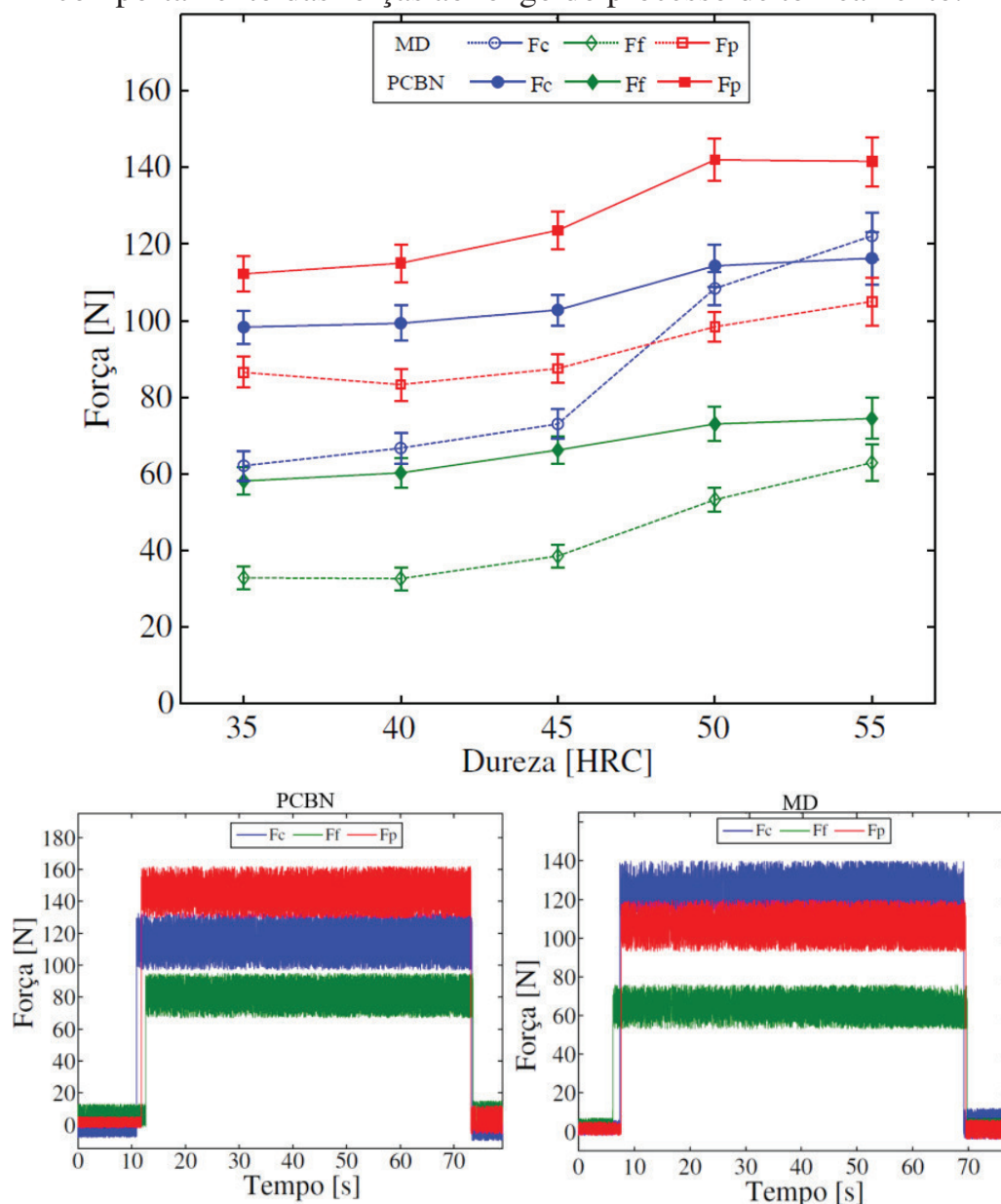
Com relação ao parâmetro  $R_a$ , verifica-se uma queda no valor desse parâmetro para a ferramenta de PCBN, o que contribui para a melhora da qualidade da superfície, de modo que sua classe de rugosidade seja N4, de acordo com a norma NBR 8404 [67]. Esta situação confirma e consolida o emprego dessa ferramenta no torneamento do aço AISI D2 nessa faixa de aplicação. Já para a ferramenta de metal-duro de grãos ultrafinos, não houve mudança em sua classe de rugosidade, mesmo com o aumento do valor do parâmetro  $R_a$  ocasionado pela desgaste do gume da ferramenta.

Outra característica observada na Figura 65, é que os parâmetros de rugosidades  $R_a$ ,  $R_z$  e  $R_t$  para a dureza de 50 HRC do aço AISI D2, aumentaram para a ferramenta de metal-duro e sua incerteza teve um súbito aumento, o que indica alterações na geometria inicial do gume ao longo da operação de torneamento. Combinado a isso, ocorreu uma similaridade da componente da força de corte com a força passiva, o que pode ser mais um indício da alteração da geometria. Tais indícios podem ser um indicativo da falha da ferramenta, o que pode inviabilizar o seu emprego no torneamento do aço AISI D2 com 50 HRC de dureza. Tais vestígios puderam ser confirmados com a quebra da ferramenta de metal-duro na operação de torneamento do aço AISI D2 com 55 HRC, que não resistiu às severas condições de usinagem impostas por esse aço, e que será discutida na próxima seção.

#### 4.5 DUREZA DE 55 HRC

A Figura 66 mostra o comportamento das componentes da força de usinagem para as ferramentas de PCBN e de metal-duro de grãos ultrafinos com o aumento da dureza do aço AISI 4340. Além disso, a figura ilustra o gráfico de aquisição de força das duas ferramentas durante o processo de torneamento do aço AISI 4340 de 55 HRC de dureza.

Figura 66 – Componentes da força de usinagem com o aumento da dureza do aço AISI 4340 de 55 HRC de dureza para as duas ferramentas, e comportamento das forças ao longo do processo de torneamento.

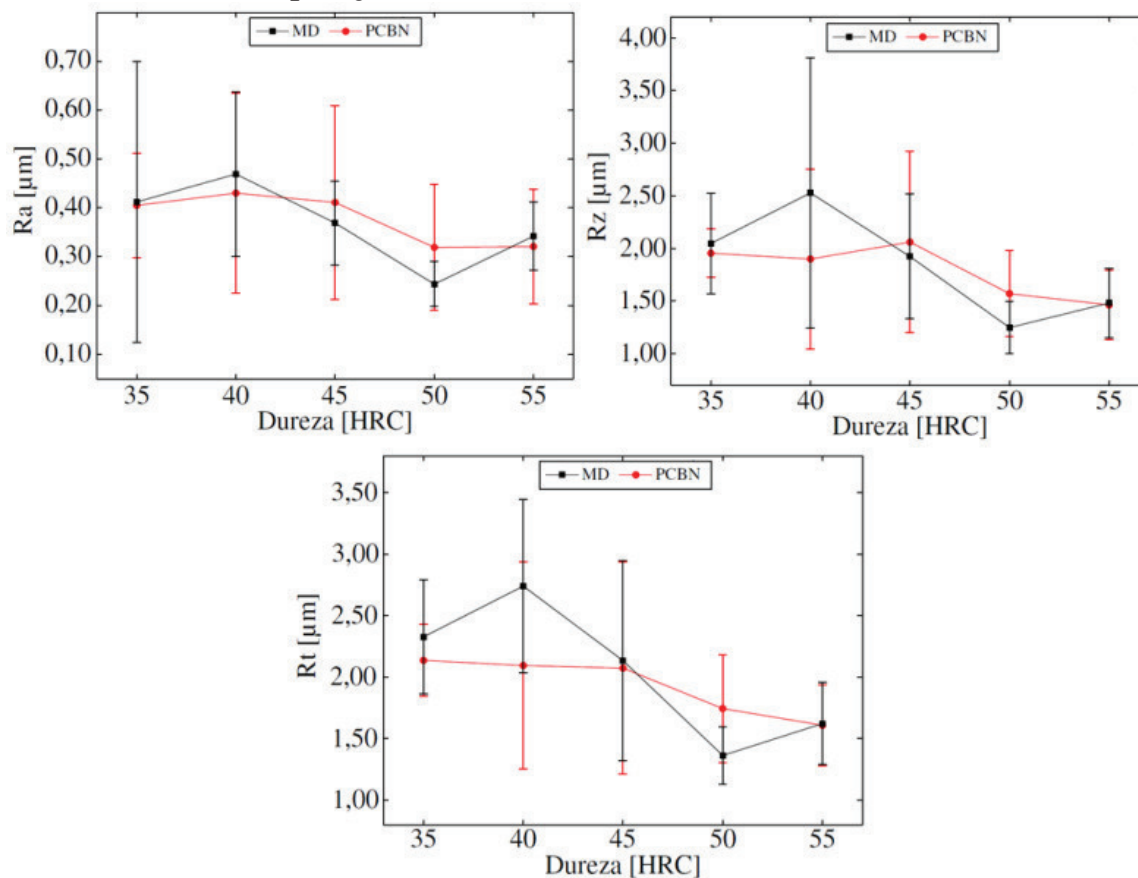


FONTE: Do autor

Analisando as componentes da força de usinagem da ferramenta de metal-duro de grãos ultrafinos, verifica-se que a componente da força de corte teve um aumento no intervalo de dureza de 45 a 55 HRC, e que a componente da força passiva estabilizou-se no intervalo de dureza de 50 a 55 HRC.

Além das mudanças das componentes da força de usinagem, o desgaste da ferramenta de metal-duro de grãos ultrafinos influenciou na qualidade da superfície, de acordo com os resultados de rugosidades do corpo de prova, conforme mostra a Figura 67.

Figura 67 – Parâmetros de rugosidade com a variação da dureza do aço AISI 4340 na operação de torneamento com as duas ferramentas.

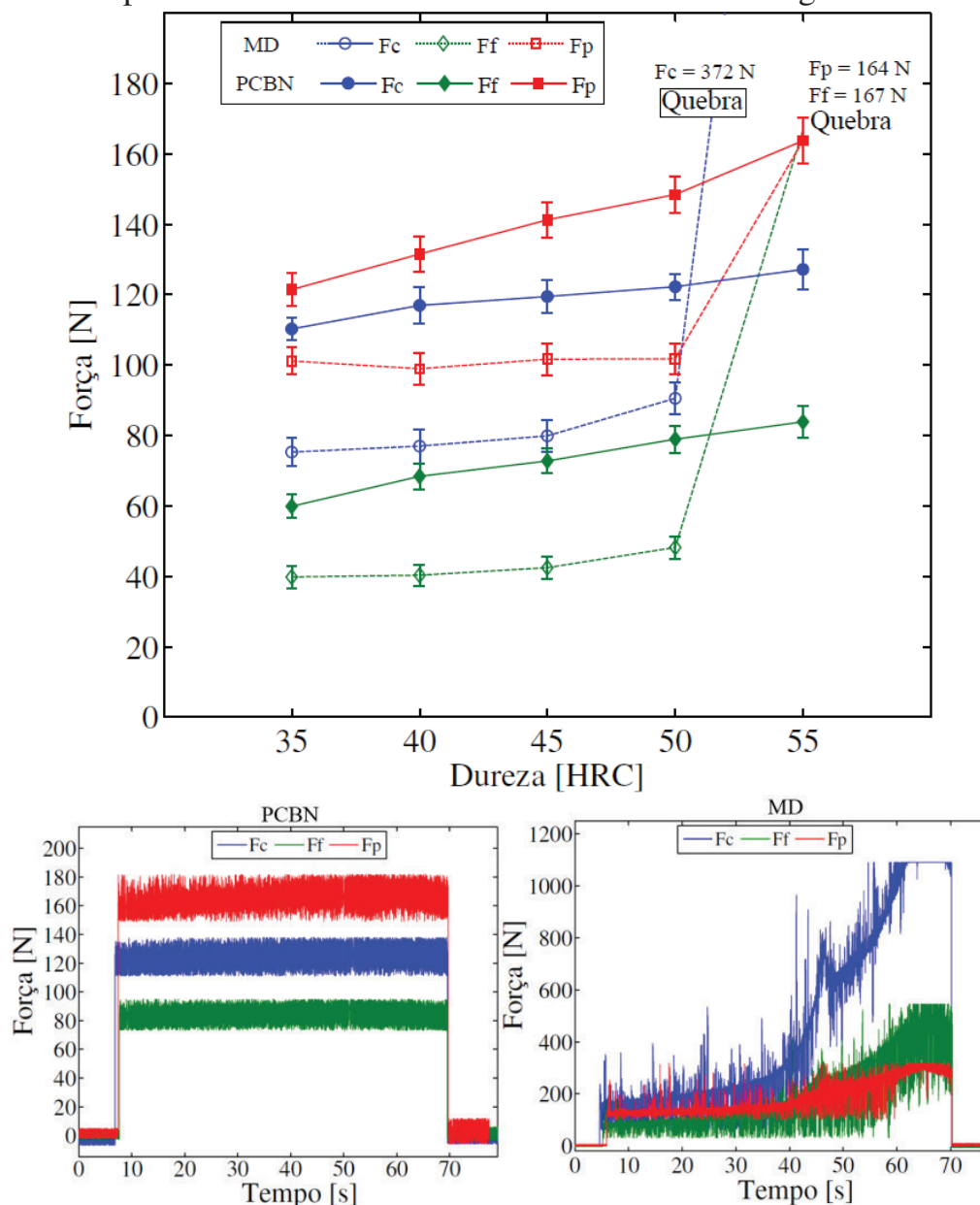


FONTE: Do autor

Com o aumento da dureza de 50 HRC para 55 HRC, observa-se que ocorre um aumento da rugosidade para a ferramenta de metal-duro e um decréscimo da rugosidade para a ferramenta de PCBN, conforme mostram os valores de rugosidade. Essa inversão de intensidade de rugosidade não alterou a classe de rugosidade para ambas as ferramentas, e elas continuam sendo classificadas como N5, de acordo com a norma.

A Figura 68 ilustra os resultados das componentes da força de usinagem no torneamento do aço AISI 52100 com a ferramenta de PCBN e com a ferramenta de metal-duro de grãos ultrafinos.

Figura 68 – Componentes da força de usinagem com o aumento da dureza do aço AISI 52100, e comportamento das forças do aço AISI 52100 de 55 HRC de dureza para as ferramentas de PCBN e de metal-duro de grãos ultrafinos.

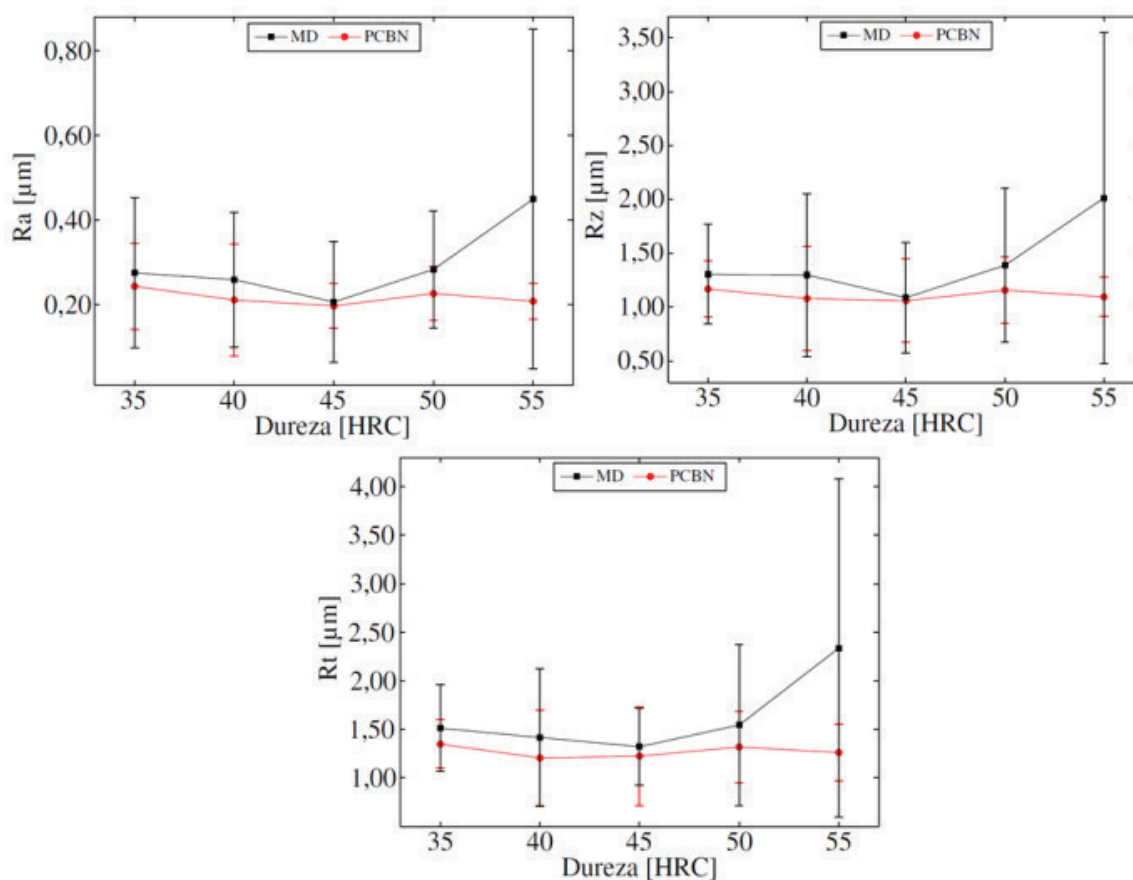


FONTE: Do autor

Durante a operação de torneamento do aço AISI 52100 de 55 HRC de dureza com a ferramenta de PCBN, observou-se que com a ferramenta foi possível torner o corpo de prova e que as componentes da força de usinagem se mantiveram estáveis ao longo do torneamento, comportamento semelhante ao do estudo de Bouacha *et al* [48] e de Qian e Hossan [49]. Porém, a ferramenta de metal-duro de grãos ultrafinos não suportou as severas condições de usinagem geradas durante o torneamento do aço AISI 52100 e quebrou, conforme ilustra o gráfico de aquisição de força da ferramenta de metal-duro.

A quebra da ferramenta se deu durante a operação de torneamento, e fez com que a força de corte aumentasse drasticamente e progressivamente até o término do processo, tendo sido este comportamento provocado pela irregularidade do gume da ferramenta. Tal situação pode ser verificada na Figura 68. Além de danificar a ferramenta, sua quebra também pode causar avarias no porta-ferramenta e na qualidade da superfície [34]. No experimento, a quebra da ferramenta de metal-duro avariou somente a superfície do corpo de prova, conforme mostram os resultados de rugosidade na Figura 69.

Figura 69 – Parâmetros de rugosidade com a variação da dureza do aço AISI 52100 no torneamento com as ferramentas de PCBN e de metal-duro.



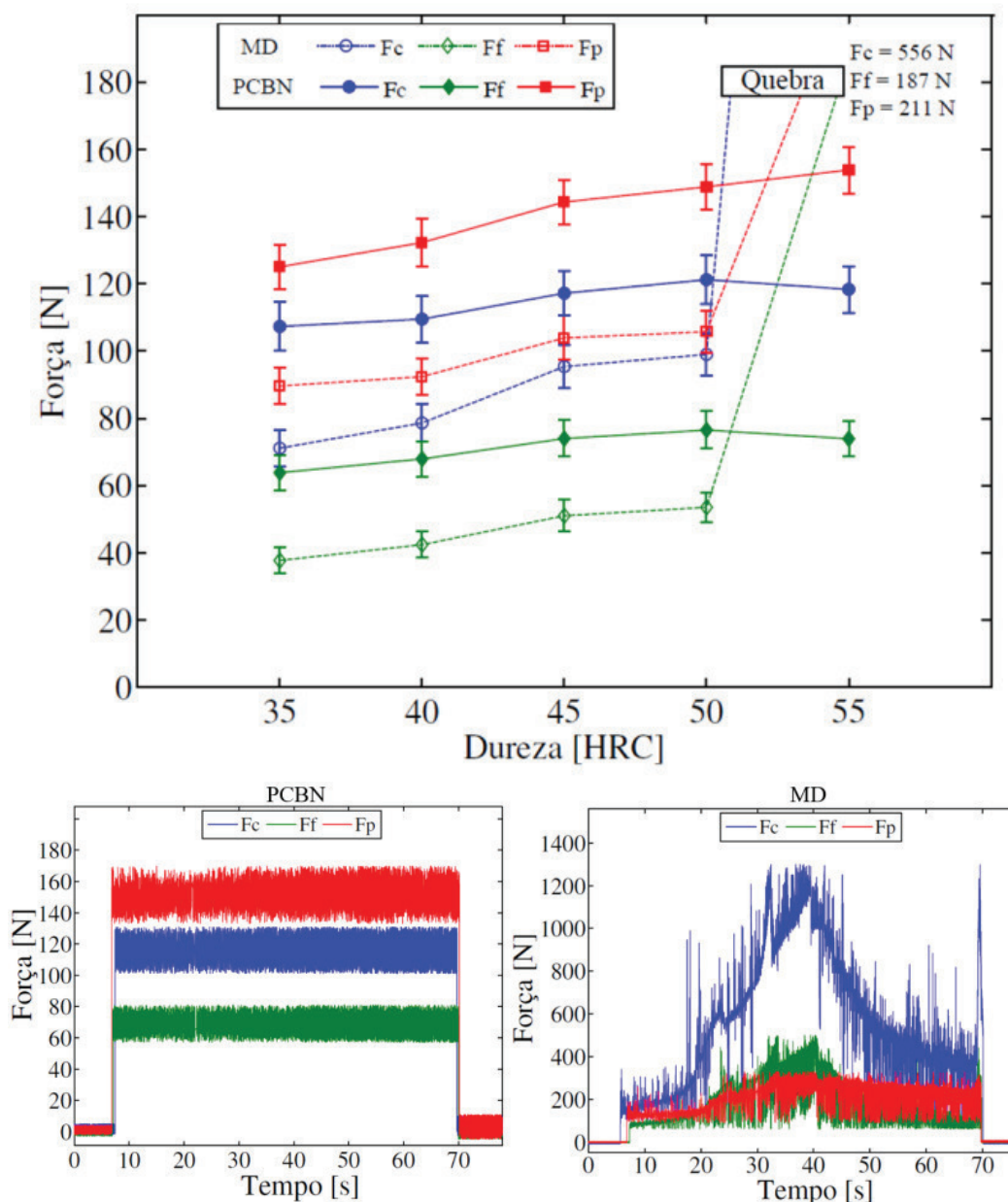
FONTE: Do autor

A quebra da ferramenta de metal-duro afetou a qualidade da superfície provocando um súbito aumento das médias dos parâmetros de rugosidades Ra, Rz e Rt, uma grande dispersão das incertezas, bem como um corte descontínuo durante o torneamento do corpo de prova. Assim, o emprego dessa ferramenta pode ser considerado inviável nessa faixa de aplicação. Porém, a qualidade da superfície produzida pela ferramenta de PCBN teve uma pequena tendência de queda com base nos parâmetros de rugosidade, embora tal comportamento não tenha

alterado sua classe de rugosidade. Assim, esta situação favorece o uso da ferramenta PCBN para o torneamento do aço AISI 52100 de 55 HRC de dureza.

A Figura 70 mostra os resultados das forças na operação de torneamento do aço AISI D2 de 55 HRC de dureza.

Figura 70 – Componentes da força de usinagem com o aumento da dureza do aço AISI D2, e comportamento da força de usinagem no torneamento do aço AISI D2 de 55 HRC de dureza com as duas ferramentas.



FONTE: Do autor

A ferramenta de metal-duro de grãos ultrafinos também não suportou as severas condições de usinagem do aço AISI D2 com 55 HRC de dureza, e o comportamento das componentes da força de

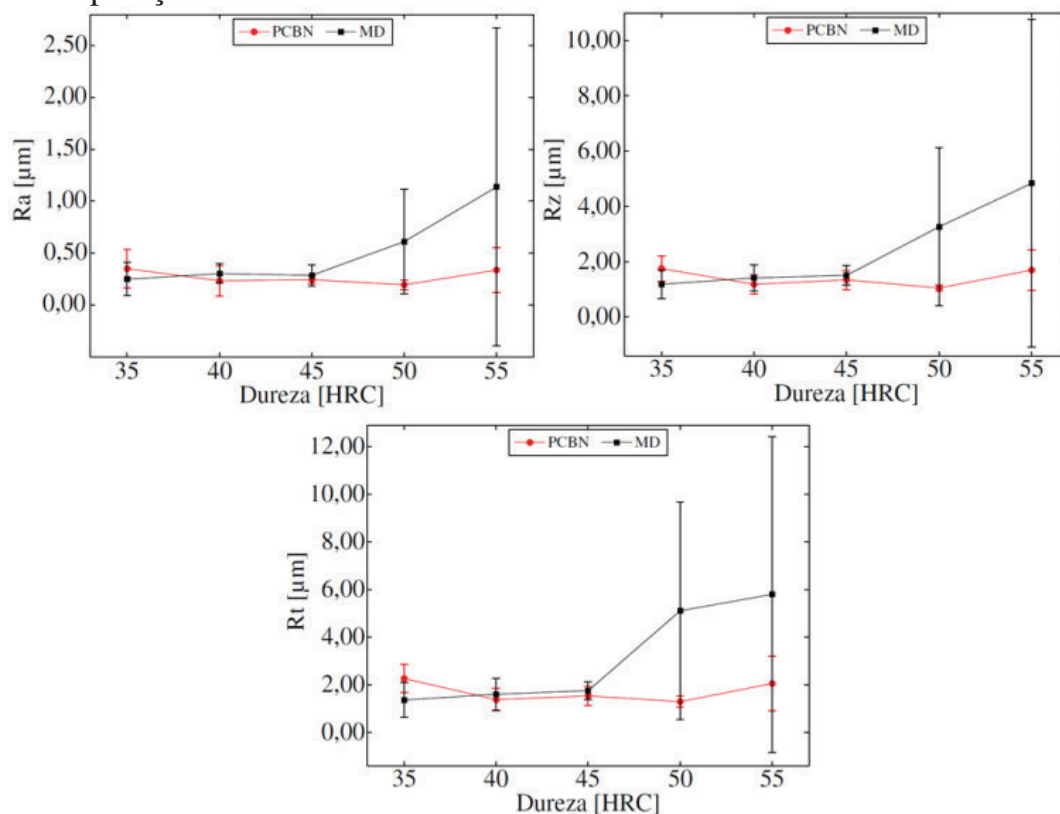
usinagem com a quebra da ferramenta pode ser visto no gráfico de aquisição de força da Figura 70.

A quebra da ferramenta faz com que as componentes da força de usinagem aumentem drasticamente e linearmente até um determinado ponto, situação provocada pela irregularidade do gume da ferramenta e pelo aumento do atrito da ferramenta contra a peça [83]. A queda das componentes da força de usinagem pode ser justificada pela adequação do gume da ferramenta, devido à afiação forçada do gume da ferramenta durante o processo.

Já o processo de torneamento desse aço com a ferramenta de PCBN teve comportamento estável, como já demonstrado nos estudos de Tang *et al* [50]. Além disso, seu comportamento foi semelhante ao do aço AISI 52100 com 55 HRC de dureza.

Os valores de rugosidade gerados durante o torneamento do aço AISI D2 com a ferramenta de PCBN e com a ferramenta de metal-duro são apresentados na Figura 71.

Figura 71 – Parâmetros de rugosidade com a variação da dureza do aço AISI D2 na operação de torneamento com as ferramentas de PCBN e de metal-duro.



FONTE: Do autor

No intervalo de dureza de 45 até 55 HRC, houve um aumento dos parâmetros de rugosidade para a ferramenta de metal-duro de grãos ultrafinos. Esse aumento da intensidade dos parâmetros de rugosidade



na transição de 45 HRC para 50 HRC foi um indicativo de uma anomalia no processo de torneamento, configurando-se como um desgaste da ferramenta, conforme mencionado no item 4.4.

O ângulo de saída positivo da ferramenta de metal-duro de grãos ultrafinos também pode ter contribuído para a quebra da ferramenta, pois sua característica de forma pode fragilizar a integridade do gume em severas condições de usinagem, como neste experimento. O ângulo de saída positivo da ferramenta de metal-duro favorece a penetração da ferramenta na peça, proporciona um maior ângulo de cisalhamento e facilita o escoamento do cavaco [5,6], conseqüentemente, reduz a força de usinagem. A resistência do gume, entretanto, é reduzida por esta situação. Em materiais de alta resistência, como por exemplo os aços AISI 52100 e AISI D2 de 55 HRC de dureza, priorizam-se ângulos de saída negativos da ferramenta [10], pois estes aumentam a resistência do gume.

Já na operação de torneamento desse aço com a ferramenta de PCBN não ocorreram mudanças consideráveis, tanto nas componentes da força de usinagem quanto na qualidade da superfície. Esta situação evidencia e consolida a aplicação dessa ferramenta no torneamento do aço AISI D2 e dos aços endurecidos [31,32]. Além disso, mostra que os aços AISI 52100 e AISI D2 com 55 HRC de dureza estão nitidamente em uma área de aplicação da ferramenta de PCBN, em função dos resultados apresentados.

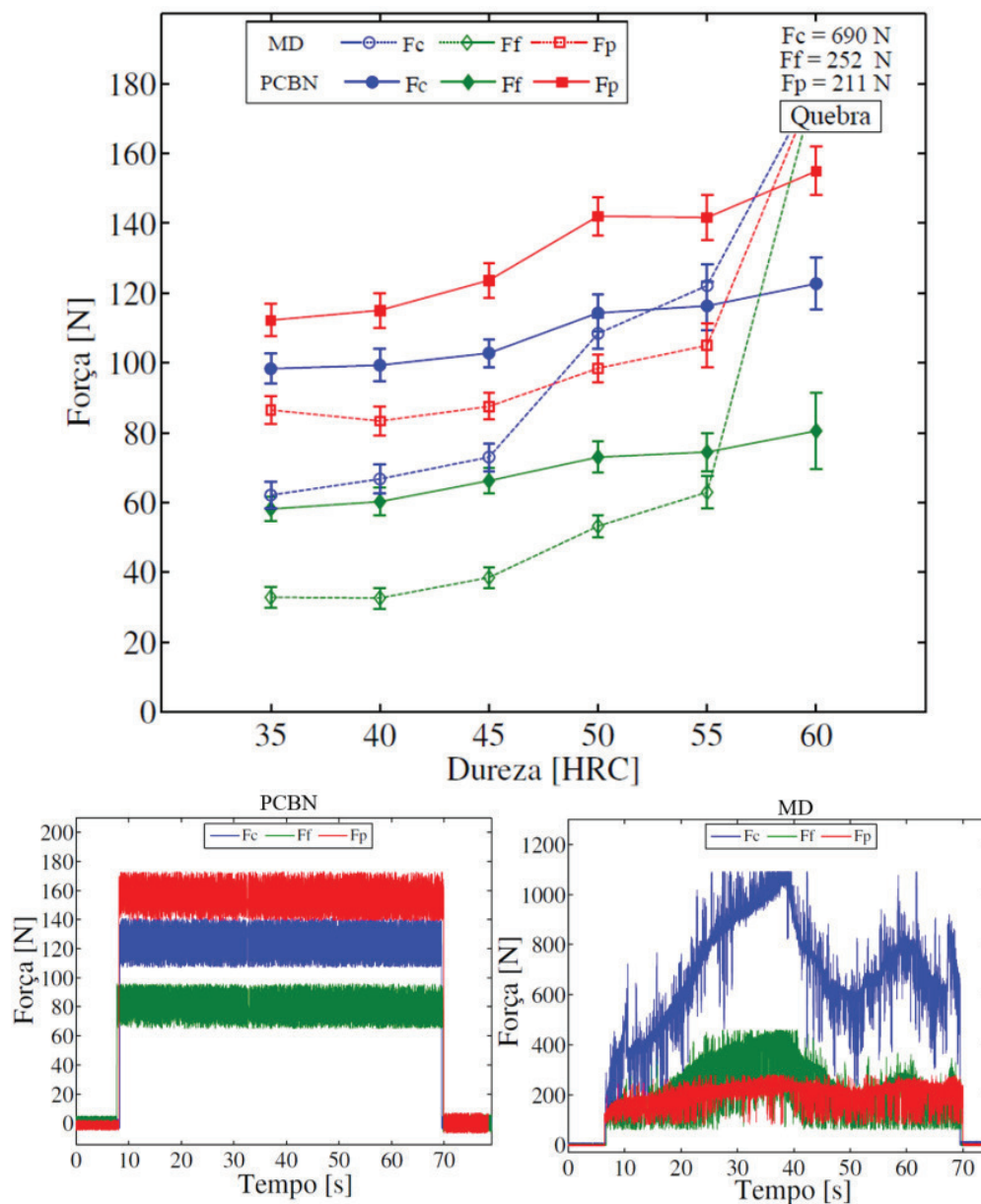
A seguir serão apresentados e discutidos os dados do torneamento dos três aços para a dureza de 60 HRC utilizando a ferramenta de PCBN e de metal-duro de grãos ultrafinos.

#### 4.6 DUREZA DE 60 HRC

A dureza de 60 HRC foi o último valor de dureza utilizado no experimento, sendo considerada a pior condição de usinagem estudada nessa pesquisa com as ferramentas de PCBN e de metal-duro de grãos ultrafinos.

A Figura 72 ilustra o comportamento das componentes da força de usinagem no torneamento do aço AISI 4340 de 60 HRC de dureza com ambas as ferramentas.

Figura 72 – Componentes da força de usinagem com o aumento da dureza do aço AISI 4340, e comportamento da força de usinagem no torneamento do aço AISI 4340 de 60 HRC de dureza.



FONTE: Do autor

Através dos gráficos da Figura 72, verifica-se que a ferramenta de metal-duro de grãos ultrafinos não suportou as severas condições de usinagem provocadas pelo corpo de prova. A quebra da ferramenta foi decorrente do seu desgaste e da sua geometria, situação semelhante à que ocorreu com os aços AISI 52100 e AISI D2 com 55 HRC de dureza e discutida no item 4.5.

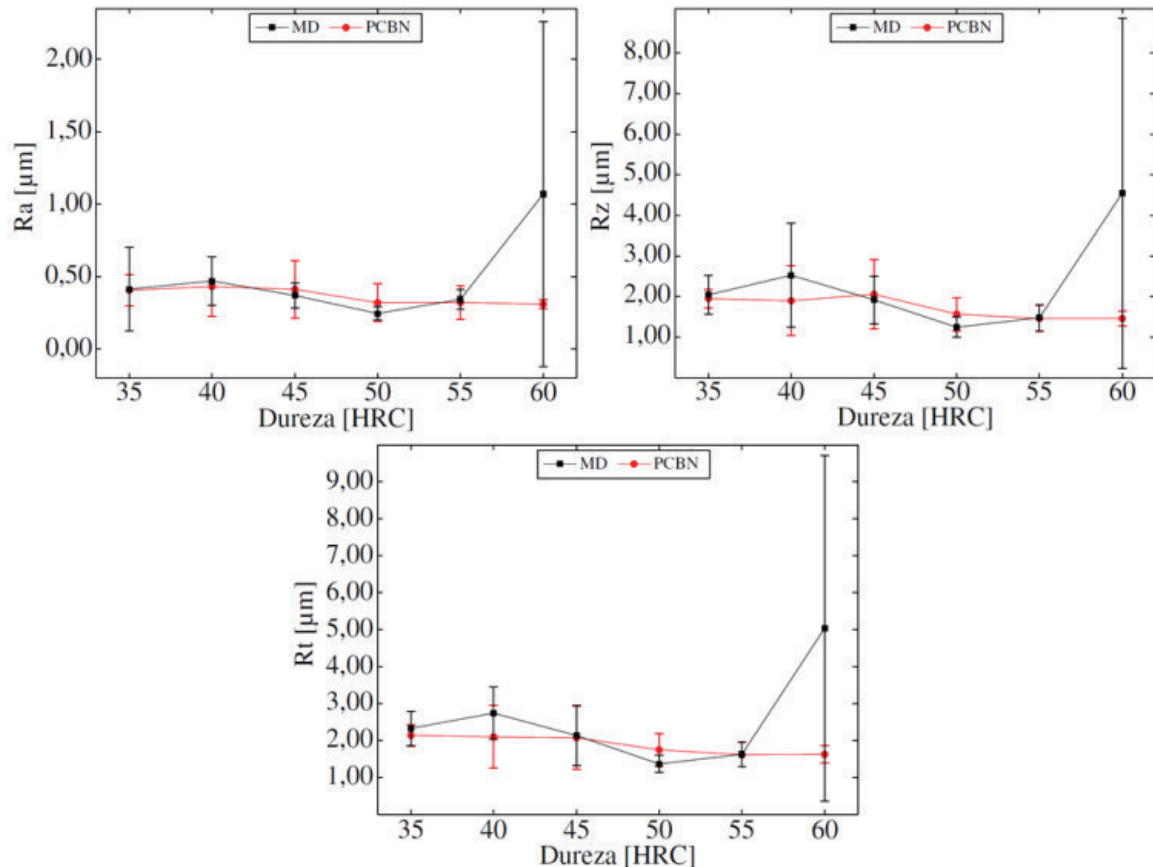
A variação na intensidade das componentes da força de usinagem, mostrada no gráfico de força com a ferramenta de metal-duro, revela que a ferramenta quebrou no início do processo de

torneamento, provocando irregularidades no gume da ferramenta, e que as intensidades das componentes da força de usinagem foram sendo alteradas com a mudança da geometria da ferramenta ao longo do processo de usinagem.

Os resultados das componentes da força de usinagem para a ferramenta de PCBN, conforme gráfico de força *versus* dureza da Figura 72, indicam um aumento das componentes da força de usinagem, que está associado ao aumento da dureza do aço, que por sua vez aumenta a resistência de tração do aço, tendo em vista que a dureza e a resistência estão interrelacionadas [10].

Já no gráfico de aquisição de forças da Figura 72, observa-se uma homogeneidade dos fenômenos dinâmicos de corte durante a usinagem do aço AISI 4340 de 60 HRC de dureza. Tal homogeneidade pode ser comprovada pela tendência de diminuição das intensidades dos parâmetros de rugosidade, conforme mostra a Figura 73, que ilustra os resultados da qualidade da superfície na operação de torneamento do aço AISI 4340 com a dureza de 60 HRC.

Figura 73 – Parâmetros de rugosidade com a variação da dureza do aço AISI 4340 no torneamento com as ferramentas de PCBN e de metal-duro.



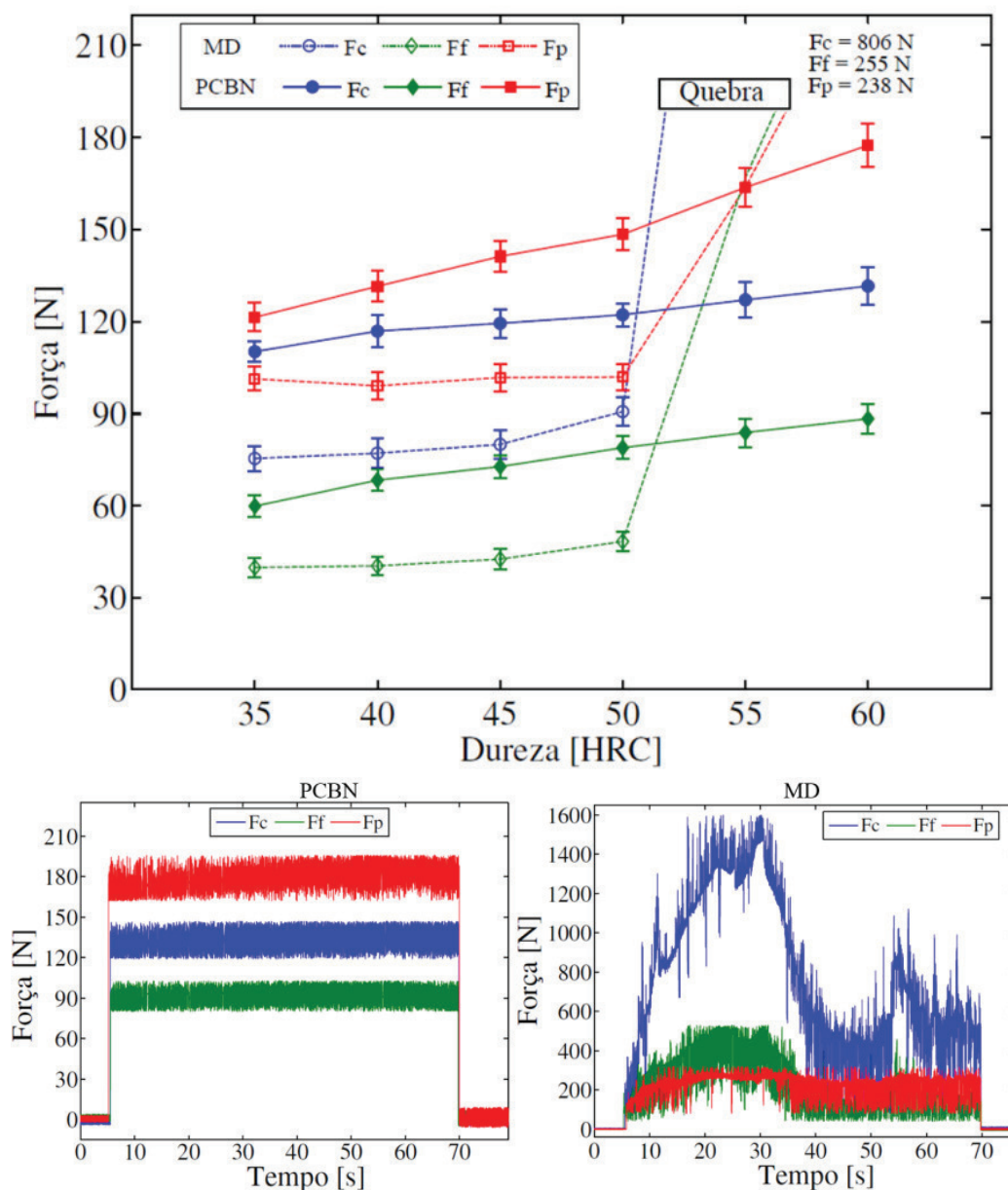
FONTE: Do autor

Com os resultados dos parâmetros de rugosidades, verifica-se um drástico aumento de rugosidade no intervalo de 55 a 60 HRC de dureza para a ferramenta de metal-duro de grãos ultrafinos, ocasionado pela quebra da ferramenta, e causando irregularidade e falhas visíveis no corpo de prova do aço.

Já para a ferramenta de PCBN, observa-se uma mínima tendência de queda para os três parâmetros de rugosidade analisados. De acordo com o parâmetro Ra, a ferramenta de PCBN atingiu sua menor rugosidade, de  $0,31 \pm 0,03 \mu\text{m}$ , o que mantém a qualidade da superfície na categoria N5, segundo a classe de rugosidade. Isso evidencia e consolida seu uso na operação de torneamento do aço AISI 4340 com 60 HRC de dureza.

Com o incremento de 5 HRC na dureza do aço AISI 52100, observa-se que a ferramenta de metal-duro de grãos ultrafinos também não suportou as severas condições de usinagem para esse aço. A Figura 74 ilustra o comportamento dessa ferramenta, e também mostra o comportamento da ferramenta de PCBN no torneamento do aço AISI 52100.

Figura 74 – Componentes da força de usinagem com o aumento da dureza do aço AISI 52100, e comportamento das componentes no torneamento do aço AISI 52100 de 60 HRC de dureza para as ferramentas de PCBN e de metal-duro.



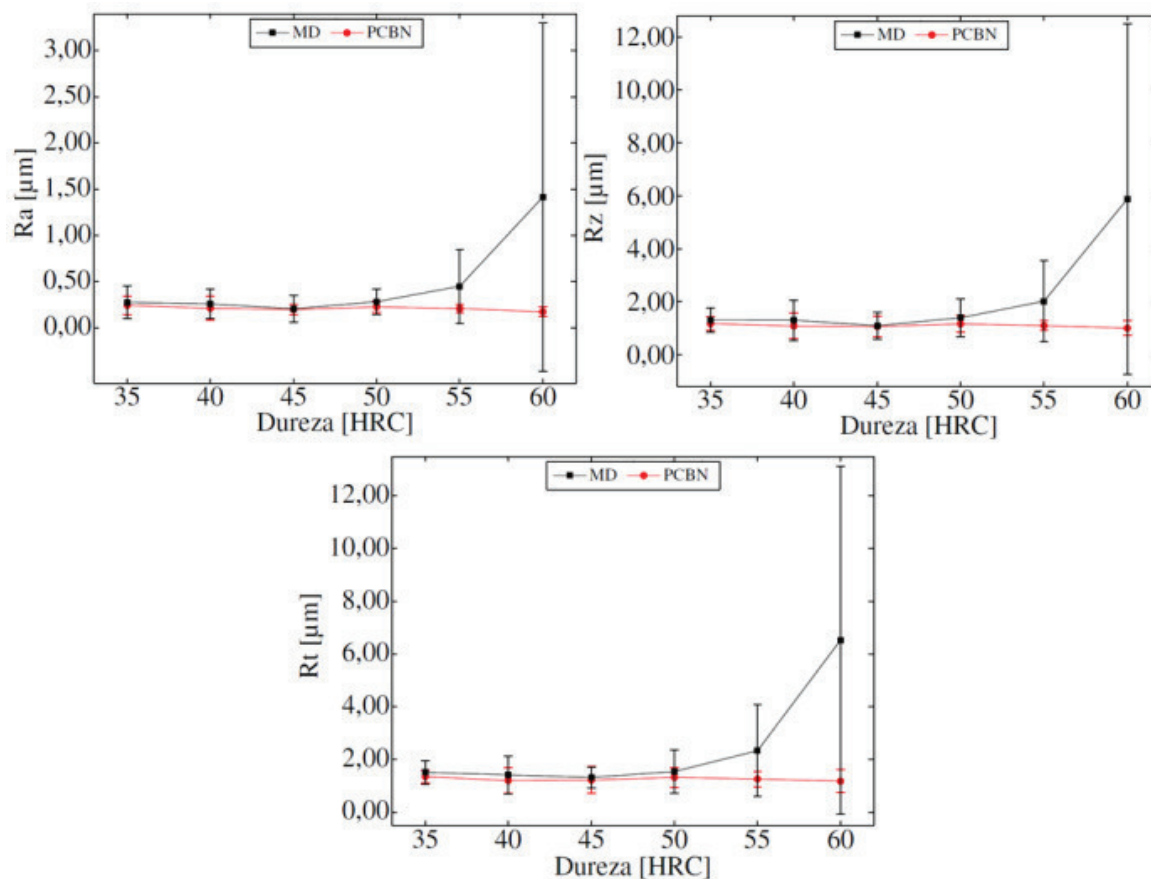
FONTE: Do autor

A ferramenta de metal-duro também quebrou na operação de torneamento do corpo de prova do aço AISI 52100 de 60 HRC de dureza, e sua quebra foi provocada pelo desgaste excessivo e pela sua característica de forma, situação semelhante à ocorrida com o aço AISI 52100 com 55 HRC de dureza, conforme explicitado no item 4.5.

Já com a ferramenta de PCBN, conforme ilustra a Figura 74, ocorreu um aumento nas componentes de força provocado pelo incremento da dureza do material. Além disso, o gráfico de aquisição de força não mostrou nenhuma anomalia durante o processo de usinagem.

Essa regularidade do processo de corte pode ser observada pela tendência de queda dos resultados dos parâmetros de rugosidade, conforme ilustra a Figura 75.

Figura 75 – Parâmetros de rugosidade com a variação da dureza do aço AISI 52100 na operação de torneamento com as ferramentas de PCBN e de metal-duro.

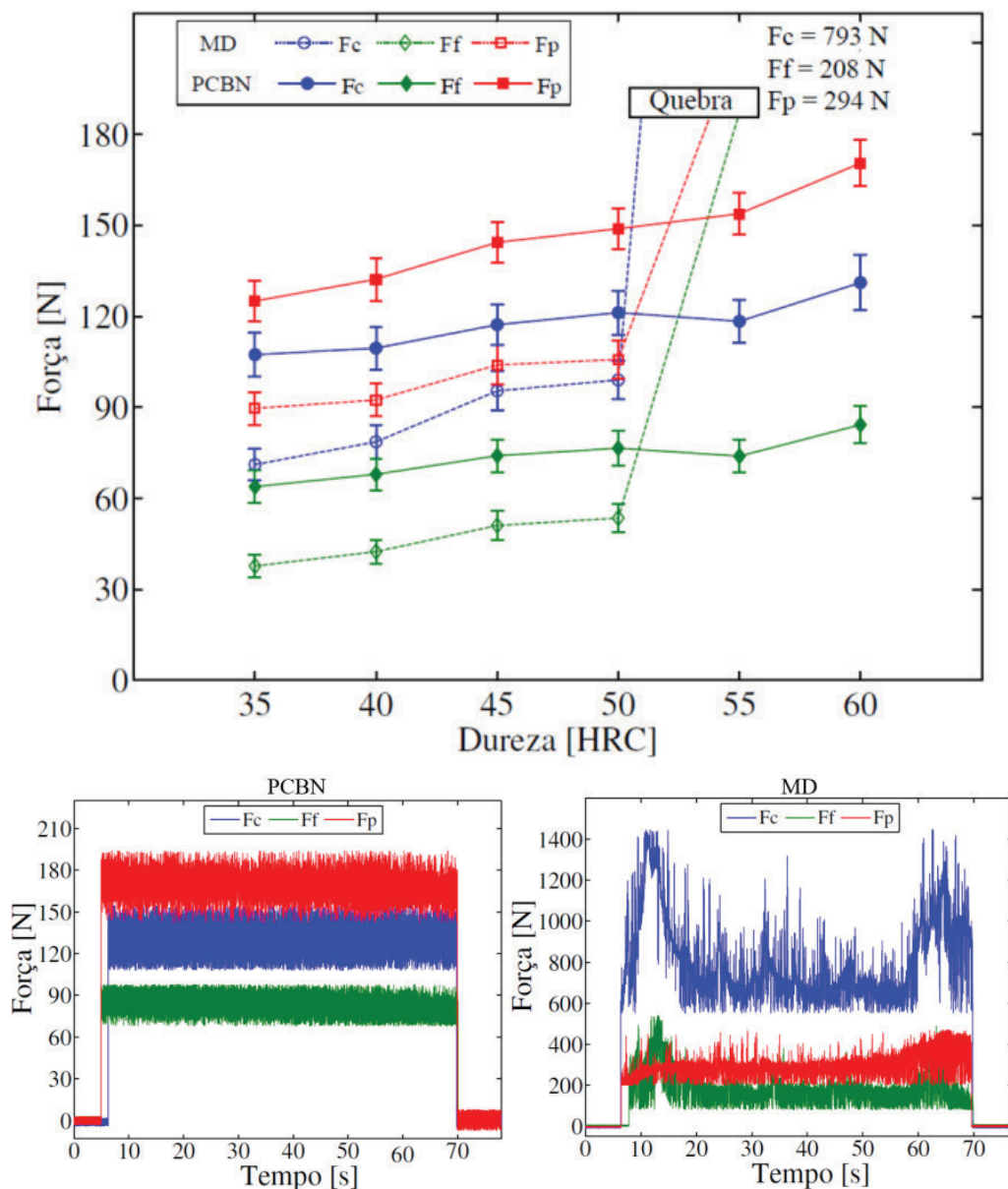


FONTE: Do autor

Os resultados da rugosidade Ra para a ferramenta de PCBN indica uma melhora na qualidade da superfície para a dureza de 60 HRC, pois seu valor é de  $0,17 \pm 0,05 \mu\text{m}$ , o que classifica sua qualidade da superfície como N4, segundo a norma NBR 8404 [67]. Uma justificativa para essa melhora da qualidade da superfície tem relação com a geometria da ferramenta e com a dureza do material, pois na usinagem de materiais endurecidos exige-se um menor ângulo de saída [10]. Se o ângulo de saída da ferramenta for pequeno (ângulo de saída positivo), ela fica fragilizada em função das severas solicitações mecânica que atuam durante o processo de corte. Desse modo, a geometria da ferramenta favorece tanto a qualidade da superfície, quanto a característica mecânica do gume.

Já com a ferramenta de metal-duro de grãos ultrafinos ocorreram grandes valores de rugosidade devido a sua quebra, situação que desaconselha seu emprego nessas condições de usinagem no torneamento do aço AISI 52100 com 60 HRC de dureza. Além disso, essa ferramenta não suportou as severas condições de usinagem no torneamento do aço AISI D2, conforme mostram os resultados das componentes da força de usinagem no torneamento do aço AISI D2 ilustrados na Figura 76.

Figura 76 – Componentes da força de usinagem com o aumento da dureza do aço AISI D2, e comportamento das componentes no torneamento aço AISI D2 de 60 HRC de dureza para as ferramenta de PCBN e de metal-duro .



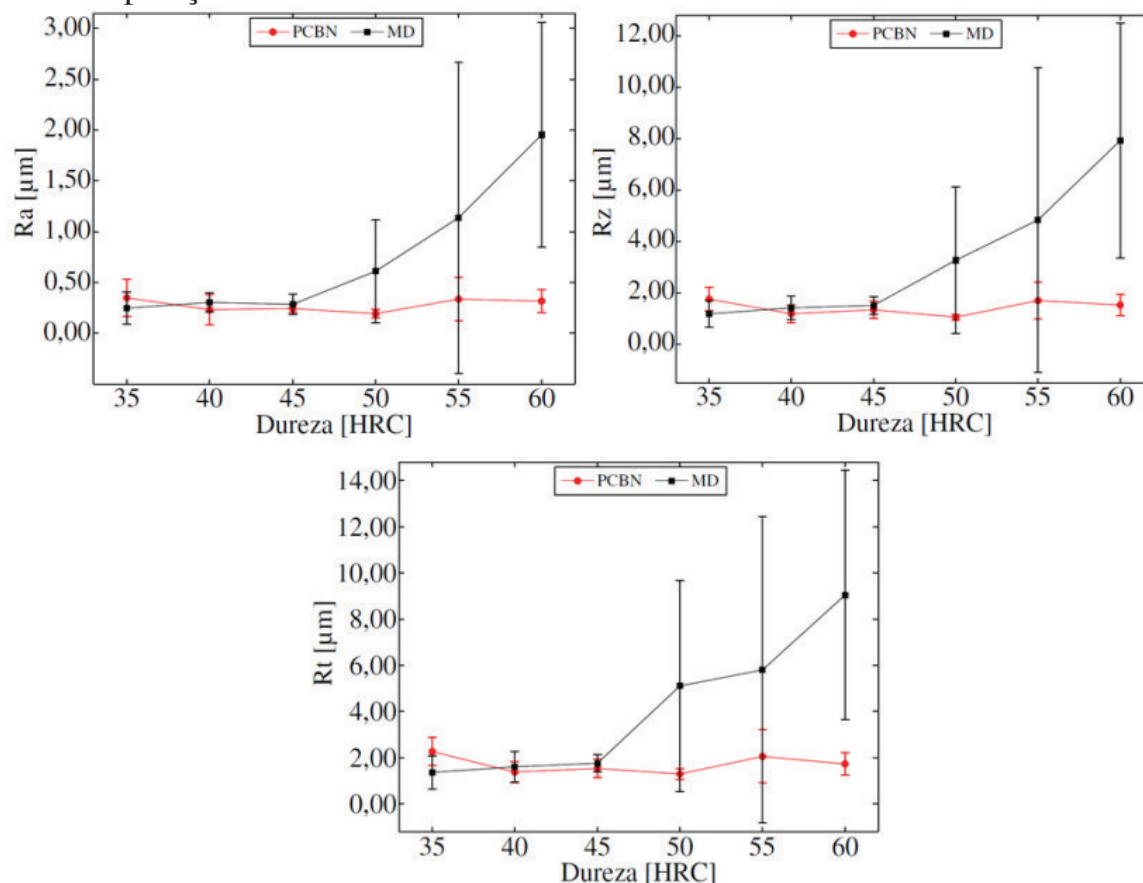
FONTE: Do autor

O gráfico de aquisição de força da ferramenta de metal-duro ilustra uma variação das componentes da força de usinagem ao longo do tempo, ocasionada pela quebra do gume e pela adequação do gume durante a operação de torneamento. Esta situação fez com que as componentes da força de usinagem aumentassem drasticamente.

Com relação ao gráfico de aquisição de força da ferramenta de PCBN, pode-se observar uma regularidade das componentes da força de usinagem durante o torneamento do aço AISI D2. Além disso, as componentes de força apresentaram um aumento com o incremento da dureza, devido ao aumento da resistência mecânica do material, conforme comentado no item 4.5 e que tratou do torneamento do aço AISI D2 com 55 HRC de dureza.

A Figura 77 ilustra os resultados de rugosidade com o incremento da dureza do aço AISI D2.

Figura 77 – Parâmetros de rugosidade com a variação da dureza do aço AISI D2 na operação de torneamento com as ferramentas de PCBN e de metal-duro.



FONTE: Do autor



A ferramenta de metal-duro gerou defeitos visíveis na superfície do corpo de prova do aço e acarretou altos valores dos parâmetros de rugosidade medidos, decorrentes da quebra dessa ferramenta.

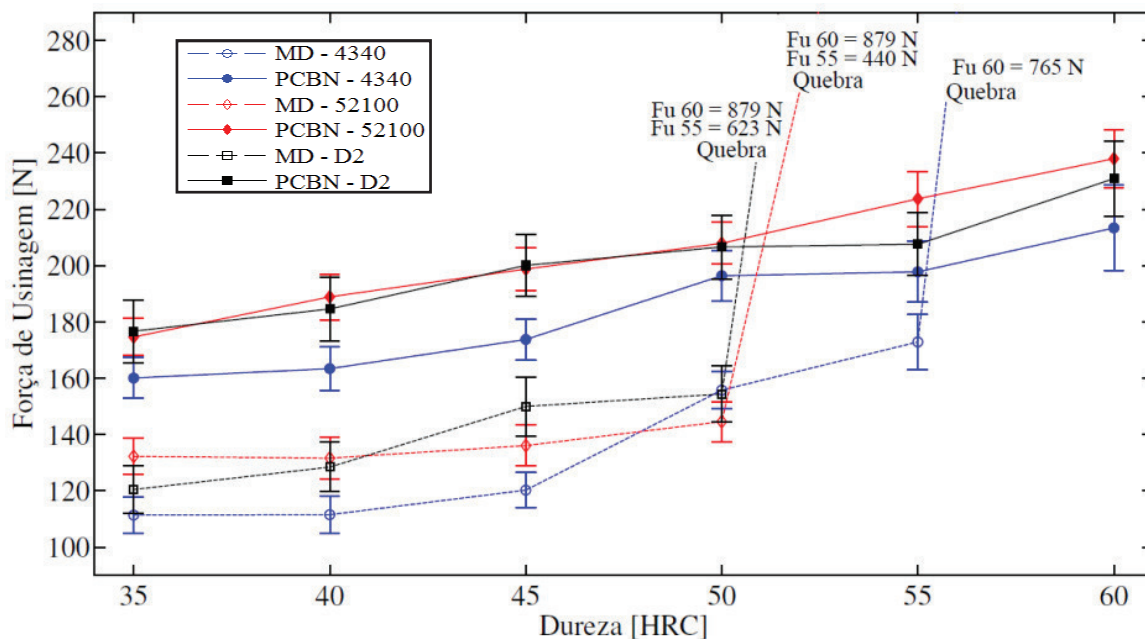
Com relação ao parâmetro Ra para a ferramenta de PCBN, verificou-se que sua classe de rugosidade manteve-se como N5 de acordo com a norma, o que evidencia e consolida essa ferramenta no torneamento do aço AISI D2 com 60 HRC de dureza.

A seguir serão discutidos de maneira ampla as variações de dureza em função da força de usinagem para os três aços pesquisados.

#### 4.7 VARIAÇÃO DA DUREZA DE 35 A 60 HRC

O comportamento da força de usinagem, em função da dureza, dos aços AISI 4340, AISI 52100 e AISI D2 no processo de torneamento utilizando as ferramentas de PCBN e de metal-duro de grãos ultrafinos é mostrado na Figura 78.

Figura 78 – Força de usinagem em função da variação da dureza.



FONTE: Do autor

As magnitudes da força de usinagem foram menores para a ferramenta de metal-duro de grãos ultrafinos do que para a ferramenta de PCBN, exceto nos ensaios em que ocorreu a quebra da ferramenta de metal-duro. Essa distinção de força ocorre em função da diferença de geometria das ferramentas, principalmente com relação ao ângulo de saída. Tendo em vista que o ângulo de saída da ferramenta de metal-

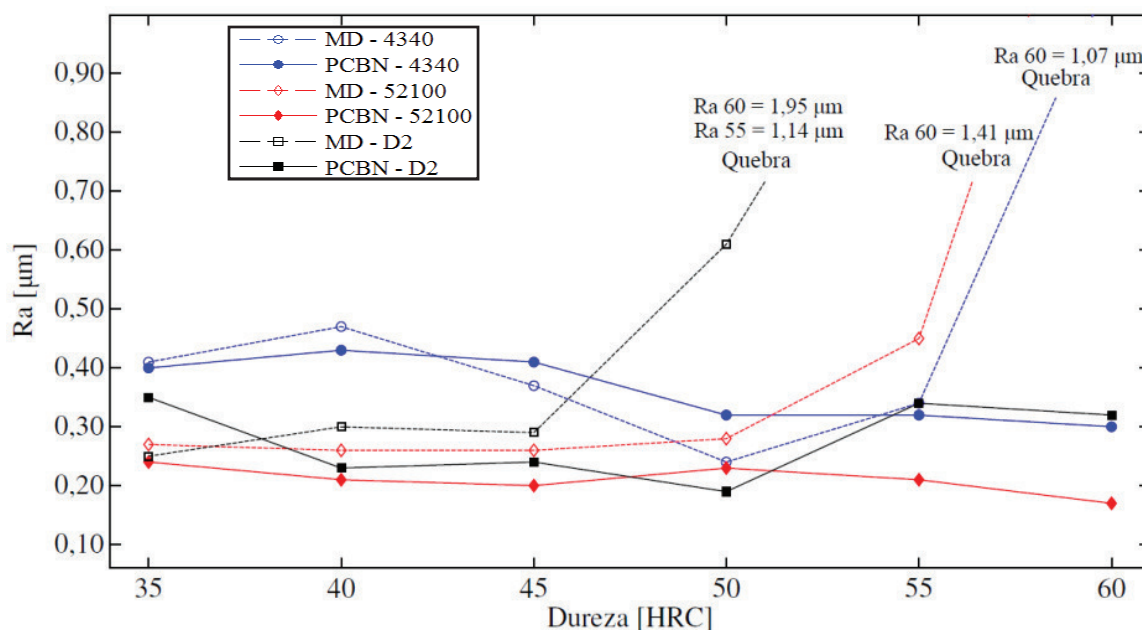
duro é positivo, isso faz com que provoque uma diminuição do gume da ferramenta, pois fragiliza a integridade dimensional do gume em severas condições de usinagem. O desgaste acentuado e irregular do gume promoveu a quebra da ferramenta de metal-duro de grãos ultrafinos no torneamento do aço AISI 4340 de 60 HRC de dureza, do aço AISI 52100 de 55 e 60 HRC de dureza e do aço AISI D2 de 55 e 60 HRC de dureza.

Já a ferramenta de PCBN apresentou maiores valores de força de usinagem no torneamento dos três aços, porém ela suportou as severas condições de usinagem impostas pelos aços, o que consolida sua aplicação no torneamento de materiais endurecidos.

Ainda com relação à Figura 78, pode-se destacar que a magnitude da força de usinagem para o aço AISI 4340 foi menor do que para os outros aços, para ambas as ferramentas utilizadas. Isso ocorre em função da ausência de carbonetos em sua microestrutura, e por conseguinte ocorre menor dificuldade no processo de corte, pois os carbonetos dificultam a ação de corte na operação de torneamento [81], ocasionando o aumento da força de usinagem. No entanto, o carboneto não é a única característica que influencia na força de usinagem, pois o aço AISI D2 apresenta maior fração volumétrica de carbonetos do que o aço AISI 52100, porém não apresenta maiores intensidades de força em função da sua baixa dureza a quente [82].

A qualidade da superfície também mudou com a variação da dureza. A Figura 79 mostra a variação do parâmetro de rugosidade  $R_a$  com o aumento da dureza dos aços AISI 4340, AISI 52100 e AISI D2 na operação de torneamento com o emprego das ferramentas de PCBN e de metal-duro de grãos ultrafinos.

Figura 79 – Variação da rugosidade Ra com a variação da dureza para os aços AISI 4340, AISI 52100 e AISI D2.



FONTE: Do autor

A qualidade da superfície na operação de torneamento do aço AISI 4340 (conforme Figura 79), no intervalo de dureza de 35 a 60 HRC, com a ferramenta de PCBN, apresentou uma tendência de melhoria com o incremento da dureza. Dessa maneira, o menor valor de rugosidade Ra foi de  $0,31 \pm 0,03 \mu\text{m}$  no ensaio com 60 HRC de dureza, o que permitiu a manutenção na classe N5, de acordo com a classe de rugosidade. Seu maior valor foi de  $0,43 \pm 0,20 \mu\text{m}$  no ensaio com a dureza de 40 HRC e classe N6. Já nos ensaios com a ferramenta de metal-duro de grãos ultrafinos, observou-se também uma tendência de diminuição da rugosidade Ra com o aumento da dureza até 50 HRC, e a partir dessa dureza houve um aumento dos valores de rugosidade com o aumento da dureza, devido às irregularidades da ferramenta provocadas pelo desgaste. O menor valor de rugosidade Ra ocorreu no ensaio com a dureza de 50 HRC, com rugosidade Ra de  $0,24 \pm 0,05 \mu\text{m}$ , e classificou a superfície gerada como N5, de acordo com a classe de rugosidade. A maior rugosidade Ra foi de  $0,47 \pm 0,17 \mu\text{m}$  para o ensaio com a dureza de 40 HRC, resultando uma classe de N6 (neste caso não se considerou o ensaio no qual ocorreu quebra da ferramenta).

No torneamento do aço AISI 52100, como mostra a Figura 79, a qualidade da superfície também teve uma tendência de melhoria com o aumento da dureza para a ferramenta de PCBN. Além disso, é possível verificar que o menor valor de rugosidade Ra ocorreu no experimento com a dureza de 60 HRC, o que gerou intensidade de rugosidade de

$0,17 \pm 0,05 \mu\text{m}$ , classificando-a como N4. Em contrapartida, o maior valor de rugosidade Ra desse aço foi de  $0,24 \pm 0,10 \mu\text{m}$  para a dureza de 35 HRC, proporcionando uma classe de rugosidade de N5. Para a ferramenta de metal-duro, também verificou-se uma tendência de diminuição da rugosidade Ra com o aumento da dureza no intervalo de dureza de 35 a 45 HRC. A partir dessa dureza, a rugosidade teve uma tendência de aumento para a dureza de 50 HRC, e no intervalo de 55 a 60 HRC ocorreu uma drástica piora dos valores de rugosidade, decorrente da quebra da ferramenta. Ademais, a ferramenta de metal-duro de grãos ultrafinos gerou sua menor intensidade de rugosidade Ra de  $0,26 \pm 0,01 \mu\text{m}$  no ensaio de 45 HRC de dureza o que propiciou classificar a superfície gerada como N5. Seu maior valor de rugosidade Ra foi de  $0,28 \pm 0,14 \mu\text{m}$  no torneamento com 50 HRC de dureza, o que lhe conferiu uma classificação de N5 de acordo com a classe de rugosidade. Cabe salientar que não se utilizou os dados de rugosidade nos ensaios em que a ferramenta quebrou.

Ainda com relação à Figura 79, observou-se que a qualidade da superfície na operação de torneamento do aço AISI D2 com a ferramenta de PCBN apresentou oscilações com o aumento da dureza. Essa ferramenta gerou sua menor intensidade de rugosidade Ra de  $0,19 \pm 0,04 \mu\text{m}$  no experimento com a dureza de 50 HRC, o que gerou uma classe N4 para a superfície de acordo com a classe de rugosidade. Já seu maior valor de rugosidade Ra foi de  $0,35 \pm 0,18 \mu\text{m}$  no ensaio com a dureza de 35 HRC, o que proporcionou uma classificação N5. A ferramenta de metal-duro de grãos ultrafinos apresentou menores valores de rugosidade no intervalo de dureza de 35 a 45 HRC, e posteriormente a qualidade da superfície apresentou uma piora em função do desgaste da ferramenta e da quebra da mesma. O menor valor de rugosidade Ra gerado pela a ferramenta de metal-duro no torneamento do aço AIS D2 foi no experimento com 35 HRC de dureza, gerando  $0,25 \pm 0,16 \mu\text{m}$  e classificando-a como N5. Já no ensaio com a dureza de 50 HRC a superfície teve seu maior valor de rugosidade Ra, de  $0,61 \pm 0,50 \mu\text{m}$  e classe N6. Destaca-se que não foram utilizados os valores em que a ferramenta quebrou.

Considerando-se a rugosidade, as componentes da força de usinagem e o custo, indica-se o emprego da ferramenta de metal-duro de grãos ultrafinos na aplicação de torneamento dos aços nos seguintes intervalos de dureza: para o aço AISI 4340 no intervalo de dureza de 35 a 55 HRC, para o aço AISI 52100 no o intervalo de dureza de 35 a 50 HRC e para o aço AISI D2 no o intervalo de dureza de 35 a 45 HRC. Para uma aplicação definitiva dessa ferramenta no setor industrial,

considerando as faixas de aplicação explicitadas, é necessário avaliar o desgaste da ferramenta ao longo da operação de torneamento, a vida da ferramenta e a sua adequação tribológica.



## **5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões decorrentes da análise dos resultados, bem como sugestões para futuros trabalhos de pesquisa na área de materiais endurecidos.

### **5.1 CONCLUSÕES**

Neste trabalho foram analisadas as componentes da força de usinagem e a rugosidade da superfície resultantes dos ensaios de torneamento dos aços AISI 4340, AISI 52100 e AISI D2 (em seis níveis de dureza) com as ferramentas de PCBN e de metal-duro de grãos ultrafinos.

Com relação às componentes da força de usinagem no torneamento dos aços AISI 4340, AISI 52100 e AISI D2, verificou-se o aumento das componentes da força de usinagem com o incremento da dureza dos aços para as duas ferramentas utilizadas. Além disso, os comportamentos das forças de usinagem tiveram relação com a microestrutura de cada aço usinado. Dessa maneira, averiguou-se que os valores de intensidade de força de usinagem do aço AISI 4340 foram menores do que dos outros aços, para ambas as ferramentas utilizadas. Tal situação ocorreu em função da ausência de carbonetos em sua microestrutura.

Os resultados relativos ao comportamento da força de usinagem para os três aços no intervalo de dureza de 35 a 45 HRC foram diferentes do comportamento descrito em pesquisas com variação da dureza. Tal fenômeno ocorreu em função da presunção da pequena área de corte, que não gerou calor suficiente para o amolecimento do material.

Quanto à geometria, a ferramenta de PCBN apresentou maiores intensidades de força do que a ferramenta de metal-duro de grãos ultrafinos para os três aços utilizados. Isso se deu em função da diferença, principalmente, entre os ângulos de saída das duas ferramentas. Entretanto, a ferramenta de metal-duro de grãos ultrafinos não suportou as severas condições de usinagem nos seguintes ensaios de torneamento: no aço AISI 4340 de 60 HRC de dureza, no aço AISI 52100 de 55 e 60 HRC de dureza e no aço AISI D2 de 55 e 60 HRC de dureza.

Os resultados com relação à qualidade da superfície melhoraram com o incremento da dureza, para ambas as ferramentas no torneamento

dos três aços. De modo geral, a rugosidade foi estatisticamente semelhante para ambas as ferramentas, exceto nos ensaios em que a ferramenta de metal-duro quebrou.

Na análise da qualidade da superfície na operação de torneamento dos aços AISI 4340 e AISI 52100, na dureza de 60 HRC, a ferramenta de PCBN gerou os menores valores de rugosidade e a menor rugosidade do aço AISI D2 foi para a dureza de 50 HRC para esta ferramenta. Já a ferramenta de metal-duro de grãos ultrafinos permitiu o melhor acabamento da superfície na dureza de 50 HRC no torneamento do aço AISI 4340, na dureza de 45 HRC, para a usinagem do aço AISI 52100 e, na dureza de 35 HRC, para o processo de torneamento do aço AISI D2.

## 5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A seguir são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros relacionados ao torneamento de materiais endurecidos com o emprego das ferramentas de PCBN e de metal-duro de grãos ultrafinos:

- Avaliar a influência do desgaste da ferramenta de metal-duro de grãos ultrafinos ao longo do processo de torneamento.
- Analisar os mecanismos de desgastes atuantes nas ferramentas.
- Investigar e medir as tensões residuais na superfície dos corpos de prova torneados com as duas ferramentas.
- Examinar a integridade da superfície gerada nos corpos de prova usinados com as ferramentas de metal-duro de grãos ultrafinos e de PCBN.
- Investigar o tempo de vida da ferramenta de metal-duro de grãos ultrafinos no torneamento desses aços na faixa de dureza indicada nesta pesquisa.
- Examinar a influência dos meios lubrificantes nas componentes da força de usinagem e a qualidade da superfície na operação de torneamento com materiais endurecidos com o emprego da ferramenta de metal-duro de grãos ultrafinos.



## REFERÊNCIAS

1. SRITHAR, A.; PALANIKUMAR, K.; DURGAPRASAD, B. Experimental Investigation and Surface roughness Analysis on Hard turning of AISI D2 Steel using Coated Carbide Insert. **Procedia Engineering**, v. 97, p. 72-77, 2014.
2. KLOCKE, F.; BRINKSMEIER, E.; WEINERT, K. Capability Profile of Hard Cutting and Grinding Processes. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**. v. 45, p. 22 - 45, 2005.
3. ASTAKHOV, V. P. Machining of Hard Materials - Definitions and Industrial Applications. In: DAVIM, J. D. **Machining of Hard Materials**. Springer-Verlag London Limited, 2011. p. 211.
4. KLOCKE, F.; BRINKSMEIER, E.; WEINERT, K. Capability Profile of Hard Cutting and Grinding Processes. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 54, p. 22-45, 2005.
5. KLOCKE, F. **Manufacturing Processes 1 - Cutting**. Aachen: Springer, 2011.
6. MACHADO, Á. R; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; SILVA, M. B. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 1ª. ed. São Paulo: Blucher, 2009.
7. KÖNIG, W.; KLOCKE, F. **Tecnologia da usinagem com ferramentas de corte de geometria definida I - Parte I**. Traduzido e adaptado do livro “Fertigungsverfahren Drehen, Bohren, Fresen”. Florianópolis. 2002.
8. CHINCHANIKAR, S.; CHOUDHURY, S. K. Investigations on machinability aspects of hardened AISI 4340 steel at different levels of hardness using coated carbide tools. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, v. 38, p. 124-133, May 2013.

9. CHINCHANIKAR, S.; CHOUDHURY, S. K. Machining of hardened steel-Experimental investigations, performance modeling and cooling techniques: A review. **International journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 89, p. 95-109, 2015.
10. STEMMER, C. E. **Ferramenta de corte I**. 7<sup>a</sup>. ed. Florianópolis: UFSC, 2007. 314 p.
11. LUO, S. Y.; LIAO, Y. S.; TSAI, Y. Y. Wear characteristics in turning high hardness alloy steel by ceramic and CBN tools. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 88, p. 114-121, 1999.
12. GRZESIK, W. Machining - Fundamentals and Recent Advances. In: DAVIM, J. P. **Machining of Hard Materials..**: Springer-Verlag London Limited, 2008. Cap. 4, p. 361.
13. ARSECULARATNE, J. A. et al. On machining of hardened AISI D2 steel with PCBN tools. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 171, p. 244-252, 2006.
14. BOING, D. **Análise da vida de ferramentas de pcbn no torneamento de ferro fundido branco com alto teor de cromo**. 2010. 149 f. Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica) - Instituto Superior Tupy. Joinville. 2010.
15. METALS-HANDBOOK. **Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys**. American Society form Metals, v. 1, 1993.
16. HANDBOOK. **Metallography and Microstructures**. American Society form Metals, v. 9, 2004.
17. HAZAN, E.; SADIA, Y.; Y.GELBSTTEIN. Characterization of AISI 4340 Corrosion Products Using Raman Spectroscopy. **Corrosive Science**, v. 74, p. 414-418, 2013.

18. VILLARES. **Aço ABNT 4340**. Disponível em: <[http://www.villaresmetals.com.br/portuguese/files/FT\\_15\\_V4340T.pdf](http://www.villaresmetals.com.br/portuguese/files/FT_15_V4340T.pdf)>. Acesso em: 14 outubro 2014.
19. BESWICK, J. M. The effect of chromium in high carbon bearing steels. **Metall Mater Trans**, p. 1897-1906, 1987.
20. BERTOLDO, J. J.; PINTO, P. M.; OLIVEIRA, A. J. Determinação da curva de revenimento do aço liga 52100. **Revista Ciências Exatas**, v. 20, p. 2, 2015.
21. VILLARES. **Aços especiais para aplicações mecânicas - V52100**. Disponível em: <[http://www.villaresmetals.com.br/portuguese/files/FT\\_15\\_V52100.pdf](http://www.villaresmetals.com.br/portuguese/files/FT_15_V52100.pdf)>. Acesso em: 27 out. 2014.
22. VILLARES. **Aço para trabalho a frio - VD2**. Disponível em: <[http://www.villaresmetals.com.br/portuguese/files/FT\\_13\\_VD2.pdf](http://www.villaresmetals.com.br/portuguese/files/FT_13_VD2.pdf)>. Acesso em: 27 out. 2014.
23. MEI, P. R.; SILVA, A. L. C. E. **Aços e Ligas Especiais**. 3. ed. São Paulo: Edgard Bluncher, 2011.
24. BOING, D. **Análise da adequação do sistema tribológico do par ferramenta-peça por meio da avaliação do desgaste da microgeometria de ferramentas de metal-duro e pcbn no torneamento de materiais endurecidos**. 2015. 89 f. Qualificação de tese. (Doutoramento em Engenharia Mecânica). Florianópolis. 2015.
25. DAVIM, J. **Surface Integrity in Machining**. 1ª. ed. Londres: Springer, 2010.
26. SANDVIK. **Torneamento de peças duras**, 2014. Disponível em: <[http://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/general\\_turning/how-to-achieve-good-component-quality/turning-in-different-materials/hard-part-turning/pages/default.aspx](http://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/general_turning/how-to-achieve-good-component-quality/turning-in-different-materials/hard-part-turning/pages/default.aspx)>. Acesso em: 10 out. 2014.

27. GRIFFITHS, B. **Manufacturing Surface Technology: Surface Integrity & Functional Performance**. London: Penton Press, 2001.
28. POULACHON, G.; MOISAN, A.; JAWAHIR, I. S. Tool-wear mechanisms in hard turning with polycrystalline cubic boron nitride tools. **Wear**, v. 250, p. 576-586, 2001.
29. BARTARYA, G.; CHOUDHURY, S. K. State of the art in hard turning. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 53, p. 1-14, 2012.
30. SURESH, R. et al. Machinability investigations on hardened AISI 4340 steel using coated carbide insert. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, v. 33, p. 75-86, 2012.
31. ANEIRO, F. M.; COELHO, R. T.; BRANDÃO, L. C. Turning hardened steel using coated carbide at high cutting speeds. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, Rio de Janeiro, v. 30, p. 104-109, 2008.
32. KÖNIG, W.; KLINGER, M.; LINK, R. Machining Hard Materials with Geometrically Defined Cutting Edges - Field of Applications and Limitations. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 39, p. 61-64, 1990.
33. TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. **Metal Cutting**. 4. ed.: Butterworth-Heinemann, 2000.
34. DINIZ, A. E.; MARCONDES, C. F.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 6ª. ed. São Paulo: Artliber, 2008.
35. WYEN, C. F.; WEGENER, K. Influence of cutting edge radius on cutting forces in machining titanium. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 59, p. 93-96, 2010.

36. NAKAYAMA, K.; ARAI, M.; KANDA, T. Machining Characteristics of Hard Materials. **Annals of the CIRP**, v. 37, n. 1, 1988.
37. SHAW, M. C.; VYAS, A. The Mechanism of Chip Formation with Hard Turning Steel. **Annals of the CIRP**, v. 47, p. 77-82, 1998.
38. GRZESIK, W. Mechanics of Cutting and Chip Formation. In: DAVIM, J. P. **Machining of Hard Materials**. Springer-Verlag London Limited, 2011.
39. G. POULACHON, A. M. A Contribution to the Study of the Cutting Mechanisms During High Speed Machining of Hardened Steel. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 47, p. 73-76, 1988.
40. FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo: Edgar Blücher Ltda, 2003.
41. ISAKOV, E. **Engineering Formulas for Metalcutting**. 1. ed. New York: Industrial Press, 2003.
42. MANGONI, C. **Determinação teórico-experimental de forças e análise dinâmica**. 2004. 103 f. Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica) Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2004.
43. BOEIRA, A. M. **Modelagem e simulação das forças de furação com brocas helicoidais a partir de dados obtidos no torneamento de segmentos cilíndricos**. 2010. 192 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2010.
44. TÖNSHOFF, H. K.; ARENDT, C.; AMOR, R. B. Cutting of Hardened Steel. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 49, p. 547-566, 2000.

45. YALLESE, M. A. et al. Hard machining of hardened bearing steel using cubic boron nitride tool. **Jornal of Materials Processing Technology**, v. 209, p. 1092-1104, 2009.
46. MATSUMOTO, Y.; BARASH, M. M.; LIU, C. R. Cutting mechanism during machining of hardened steel. **Material science and technology**, v. 3, p. 299-305, 1987.
47. BARTARYA, G.; CHOUDHURY, S. K. State of the art in hard turning. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 53, p. 1-14, 2012.
48. BOUACHA, K. et al. Statistical analysis of surface roughness and cutting forces using response surface methodology in hard turning of AISI 52100 bearing steel with CBN tool. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, v. 28, p. 349-361, 2010.
49. QIAN, L.; HOSSAN, M. R. Effect on cutting force in turning hardened tool steels with cubic boron nitride inserts. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 191, p. 274-278, 2007.
50. TANG, L. et al. Experimental investigation of the three-component forces in finish dry hard turning of hardened tool steel at different hardness levels. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 70, p. 1721-1729, 2014.
51. DINIZ, A. E.; OLIVEIRA, A. J. D. Hard turning of interrupted surfaces using CBN tools. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 195, p. 275-281, 2008.
52. SOUZA, D. J. A. D.; SCHROETER, R. B; WEINGAERTNER, W. L.; TEIXEIRA, C. R. Estudo da influência da geometria do gume no desgaste. **6º Congresso Brasileiro de Engenharia e Fabricação - COBEM 2011**, Caxias do Sul - RS, 2011.

53. SANDVIK. Torneamento de peças duras com CBN, 2016. Disponível em:  
<<http://www.sandvik.coromant.com/sitecollectiondocuments/downloads/global/catalogues/pt-pt/c-2940-137.pdf>>. Acesso em: 12 jan 2016.
54. OLIVEIRA, A. J. D.; DINIZ, A. E.; URSOLINO, D. J. Hard turning in continuous and interrupted cut with PCBN and whisker-reinforced cutting tools. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 209, p. 5262-5270, 2009.
55. RODRIGUES, A. R. **Estudo da geometria de arestas de corte aplicadas em usinagem com altas velocidades de corte**. 2005. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade de São Paulo, 249 p. São Carlos, 2005.
56. SANDVIK-COROMANT. Understanding metal carbide. **Sandvik Hard Materials**, 2016. Disponível em:  
<[http://www2.sandvik.com/sandvik/0130/Hi/SE03411.nsf/a0de78d35676d88d412567d900294747/4c7827530abfa4e1c1256b0a0034cc36/\\$FILE/ATTYN87R/9100%20eng.pdf](http://www2.sandvik.com/sandvik/0130/Hi/SE03411.nsf/a0de78d35676d88d412567d900294747/4c7827530abfa4e1c1256b0a0034cc36/$FILE/ATTYN87R/9100%20eng.pdf)>. Acesso em: 12 jan 2016.
57. DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 6. ed. São Paulo: Artiber, 2008.
58. DOGRA, M.; SHARMAB, V. S.; DUREJAC, J. Effect of tool geometry variation on finish turning – A Review. **Journal of Engineering Science and Technology Review**, v. 1, p. 1-13, 2011.
59. DENKENA, B.; BIERMANN, D. Cutting edge geometries. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 63, p. 631-653, 2014.
60. COSTA, D. D. D. **Análise dos parâmetros de torneamento de aços endurecidos**. 1993. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Universidade Estadual de Campinas. São Paulo. 1993.

61. TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. **Metal cutting**. 4. ed. ed. Butterworth-Heinemann, 2000.
62. BYRNE, G.; DORNFELD, D.; DENKENA, B. Advancing Cutting Technology. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 52, p. 483-507, 2003.
63. WYEN, C.; KNAPP, W.; WEGENER, K. A new method for the characterization of rounded cutting edges. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 59, p. 899-914, 2012.
64. WYEN, C. **Rounded cutting edges and their influence in machin-ing titanium**. 2011. Dissertation (Doctor of Science), ETH, Zurique, 2011.
65. GONÇALVES, D. A. Análise teórico-experimental dos esforços no brochamento helicoidal, 2014. 234 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade de Santa Catarina. Florianópolis. 2014.
66. ASTAKHOV, V. P. Surface Integrity – Definition and Importance in Functional Performance. In: DAVIM, J. P. **Surface Integrity in Machining**. Spring, 2010. Cap. 1, p. 1-32.
67. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMASTÉCNICAS. **NBR 8404**: 1984. Indicações do estado de superfícies em desenhos técnicos. Rio de Janeiro. 1984.
68. MATSUMOTO, H.; PEDROSA, E. A.; DINIZ, A. E. Análise do torneamento de aços endurecidos utilizando ferramentas de PCBN. **II Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**, João Pessoa - PB, Agosto 2002.
69. KLOCKE, F. et al. Torneamento de precisão: uma opção para o acabamento de peças de aço temperado. **Máquinas e Metais**, p. 56-67, outubro 1995.



70. SANDVIK. **Tools**, 2016. Disponível em:  
<<http://www.sandvik.coromant.com/en-us/products/pages/productdetails.aspx?c=SNMG%2012%2004%2008-MF%201125&m=5750256>>. Acesso em: 24 jan 2016.
71. SANDVIK. **Tools for PCBN**, 2016. Disponível em:  
<<http://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/products/pages/productdetails.aspx?c=SNGA120408S01030A%207025&m=5749717>>. Acesso em: 24 Jan 2016.
72. METALS-HANDBOOK. **Properties and Selection**. Irons, Steels, and High-Performance Alloys. American Society for Metals, v. 1, 1993.
73. OLIVEIRA, A. J.; BOING, D.; SCHROETER, R. B. Effect of PCBN tool grade and cutting type on hard turning of high-chromium white cast iron. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, p. 1-11, 2015.
74. KISTLER. **Multicomponent dynamometer up to 5 kN**. Disponível em: <[www.kistler.com/br\\_en-br/13\\_Productfinder/App.9257A\\_BP/Product-finder.html](http://www.kistler.com/br_en-br/13_Productfinder/App.9257A_BP/Product-finder.html)>. Acesso em: 20 de mar. 2015.
75. KISTLER. **Piezoresistive Amplifier**. Disponível em:  
<[http://www.kistler.com/br/en/suche/?tx\\_kesearch\\_pi1%5Bsword%5D=Amplifier+5011&tx\\_kesearch\\_pi1%5Bpage%5D=1&tx\\_kesearch\\_pi1%5BresetFilters%5D=0&tx\\_kesearch\\_pi1%5BsortByField%5D=&tx\\_kesearch\\_pi1%5BsortByDir%5D=>](http://www.kistler.com/br/en/suche/?tx_kesearch_pi1%5Bsword%5D=Amplifier+5011&tx_kesearch_pi1%5Bpage%5D=1&tx_kesearch_pi1%5BresetFilters%5D=0&tx_kesearch_pi1%5BsortByField%5D=&tx_kesearch_pi1%5BsortByDir%5D=>)>. Acesso em: 03 de mar. 2015.
76. SCHROETER, R. B. **Usinagem de ultraprecisão de elementos ópticos transmissivos no espectro infravermelho**. 1997. 243f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1997.

77. BORBA, V. R.; BOING, D.; SCHROETER, R. B. Avaliação das componentes da força de usinagem no torneamento do aço 4340 - 35 HRC com ferramentas de metal-duro e PCBN. **XIX Colóquio de Usinagem**, Natal, 2015.
78. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 4288**: 1998. Especificações geométricas de produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Regras e procedimentos para avaliação de rugosidade. Rio de Janeiro. 1998.
79. ZHOU, J. M.; H WALTER, M. A. J. E. S. Effect of chamfer angle on wear of PCBN cutting tool. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 43, p. 301-305, 2003.
80. MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
81. COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 6. ed. São Paulo: Artliber, 2008.
82. MESQUITA, R. A.; LEIVA, D. R.; BARBOSA, C. A. Efeito das condições de tratamento térmico na. Disponível em: <[http://villaresmetals.us/english/files/Falhas\\_Trat\\_Termico.pdf](http://villaresmetals.us/english/files/Falhas_Trat_Termico.pdf)>. Acesso em: 23 novembro 2015.
83. SOUZA, A. J. D. **Processos de Fabricação por Usinagem - Parte 1**. 2011. Apostila.
84. ALBERTAZZI, A.; SOUSA, A. R. **Fundamentos de metrologia científica e industrial**. Barueri: Manole, 2008.
85. LMP. **Manual para calibração da plataforma de torneamento Kislter 9257A**. Florianópolis. 2008. (Apostila).
86. SOUZA, A. J. D. **Aplicação de multisensores no prognóstico da vida da ferramenta de corte em torneamento**. 2004. 226 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) Universidade Federal

- de Santa Catarina. Florianópolis, 2004.
87. MONMA, A. C. **Bancada para ensaios com vistas à modelagem e simulação de forças no brochamento.** Dissertação. 2013. 126 f. (Mestrado em Engenharia Mecânica) Universidade Federal de Santa Catarina, 2013
  88. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 3.** Números preferenciais - Séries de números preferenciais. Rio de Janeiro. 2006. 5 p.
  89. GARANT. **Hoffmann Group**, 2015. Disponível em: <https://www.hoffmann-group.com/MY/en/hmy/service/downloads/zerspanungshandbuch> >. Acesso em: 2 julho 2015.



## APÊNDICE A – Verificação estática dos instrumentos de medição de força

Os instrumentos de medição de força (plataforma piezométrica, amplificadores, cabos coaxiais e placa de aquisição de dados) serviram para medir as componentes da força de usinagem, e estas foram submetidas a uma verificação para examinar se os valores indicados pelos instrumentos de medição correspondiam às grandezas estabelecidas por padrões. Dessa maneira, verificou-se a precisão e a confiabilidade dos instrumentos de medição, bem como sua linearidade e repetibilidade.

Segundo Albertazzi e Sousa [84], verificação nada mais é do que uma calibração simplificada usada para testar se um sistema de medição está em conformidade com uma dada especificação técnica. O objetivo de realizar uma verificação foi a obtenção de confiabilidade nos resultados, por ser de fácil aplicação, por ser eficaz e pelo fato da plataforma piezométrica estar dentro do intervalo de calibração, tendo em vista que a plataforma piezométrica foi calibrada para realizar os ensaios de forças da Tese de Gonçalves [42].

O processo de verificação estática dos instrumentos de medição de força validou os resultados de medição das forças, bem como confirmou a linearidade e a repetibilidade dos instrumentos de medição de força.

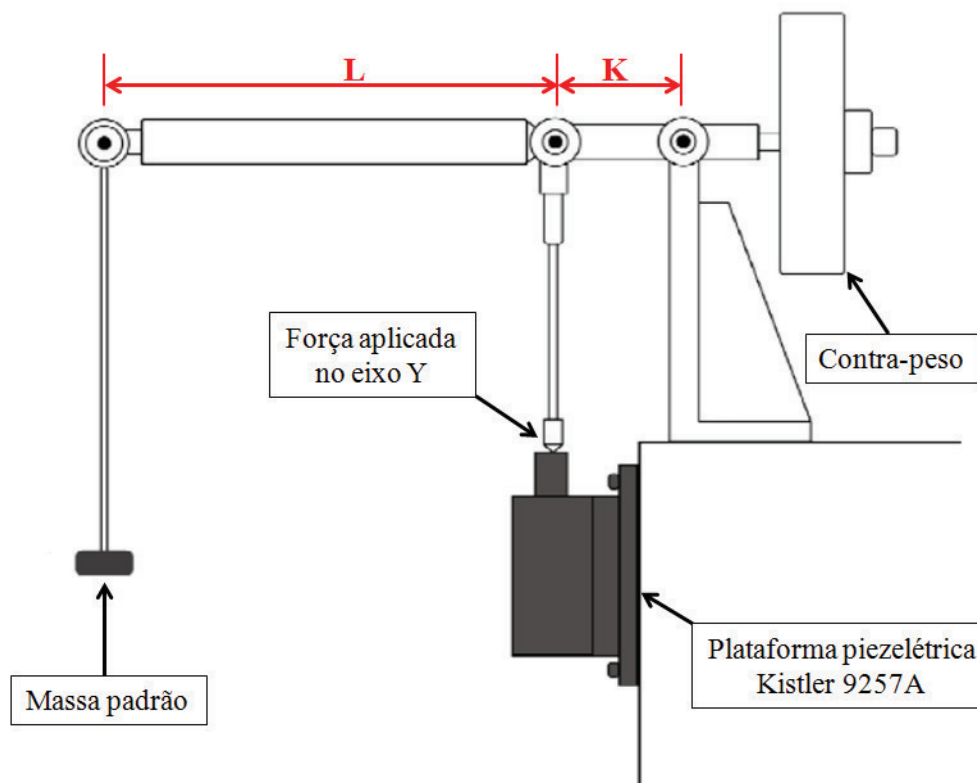
O sistema de verificação foi efetuado no Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP) da UFSC, e baseou-se no princípio de uma balança, onde a Força Teórica ( $F_T$ ) é proporcional ao produto da massa-padrão aplicada ( $m_p$ ) vezes a relação dos braços de alavanca ( $L/K$ ) vezes a aceleração da gravidade ( $g = 9,796 \text{ m/s}^2$ ) [85,86]. Assim, a força teórica foi determinada matematicamente pela equação (3).

$$F_T = m_p \cdot g \cdot \frac{L}{K} \quad (3)$$

A verificação foi realizada nos três eixos de medição da plataforma piezométrica, e aplicou-se um carregamento de 1 kgf até 10 kgf, com incremento de 1 kgf. Para minimizar os erros, efetuou-se uma réplica e uma tréplica desse carregamento para todos os eixos.

A Figura 80 apresenta uma representação esquemática do procedimento de verificação estático do eixo Y na plataforma piezométrica Kistler de modelo 9257A.

Figura 80 - Sistema de balança utilizado para realizar a verificação da força estática no eixo Y.



FONTE: Adaptado de Monma [87]

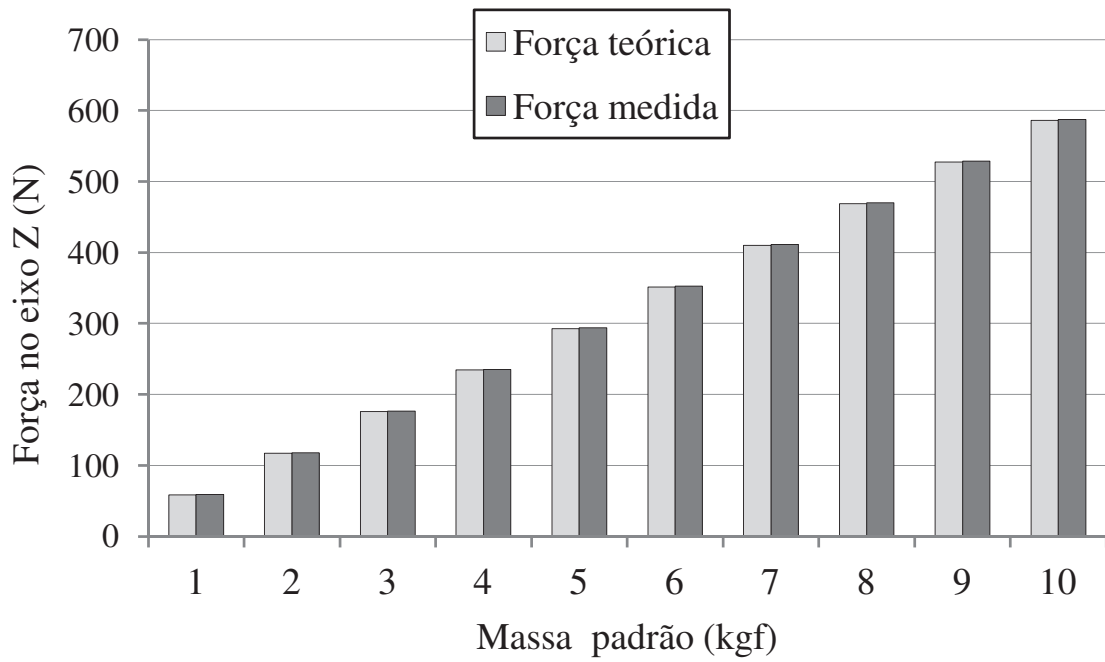
Com o valor da força resultante e o valor da força medida ( $F_m$ ), calculou-se o erro percentual ( $E$ ) do valor experimental por meio da equação (4).

$$E(\%) = \frac{F_T - F_m}{F_T} \cdot 100 \quad (4)$$

Com o sistema de verificação estático, constatou-se uma média de erros de 0,3% no eixo Z, 0,1% no eixo Y e 0,9% no eixo X, e foi possível confirmar a linearidade e a confiabilidade do instrumento da plataforma piezoeletrica, pois os erros mativeram-se dentro dos limites característicos para o sistema de medição baseados no princípio de sensores piezoeletricos. Além disso, os erros encontrados são muito similares aos encontrados na calibração realida por Gonçalves [65].

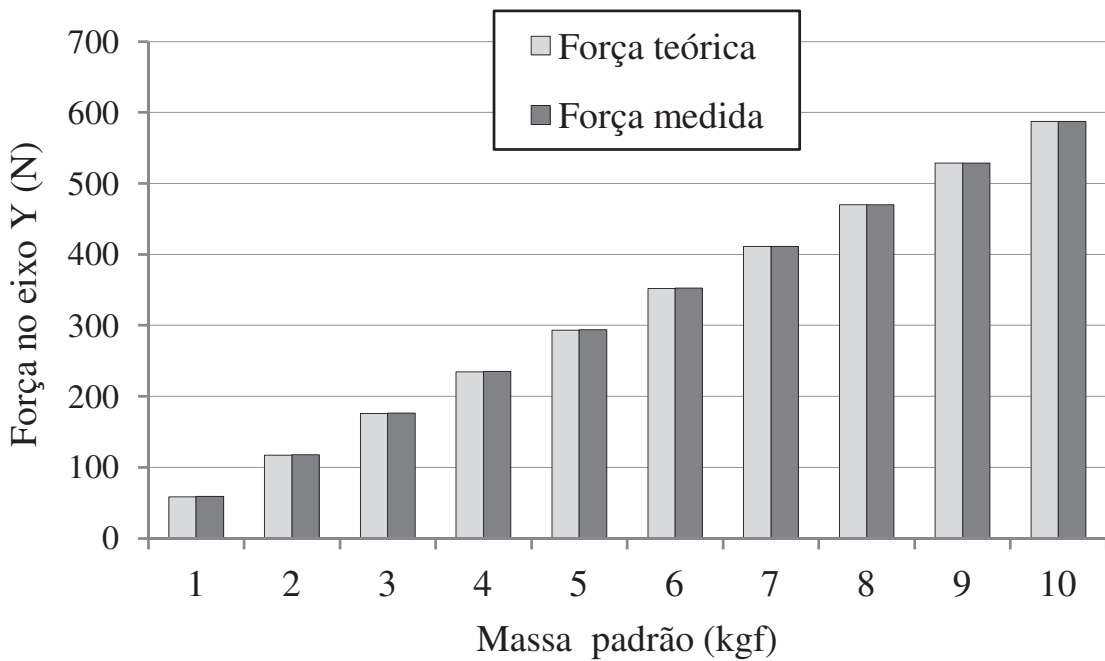
As figuras a seguir mostram os resultados da verificação estática de comparação da força teórica *versus* a força medida para os eixos Z, Y e X, respectivamente, Figura 81, Figura 82 e Figura 83.

Figura 81 - Dados de verificação para o eixo Z.



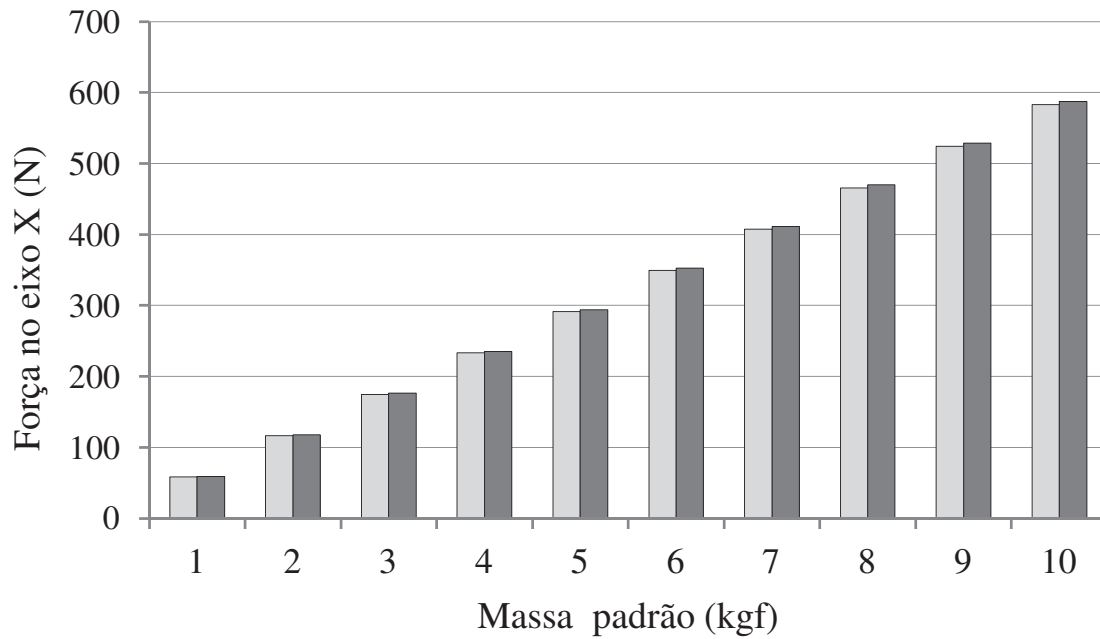
FONTE: Do autor

Figura 82 - Dados de verificação para o eixo Y.



FONTE: Do autor

Figura 83 - Dados de verificação para o eixo X.



FONTE: Do autor

Com o processo de verificação estático realizado na plataforma piezelétrica, validaram-se os dados medidos e foi possível legitimar o sistema de medição de força, bem como o programa elaborado no *software* LabView.



## **APÊNDICE B – Algoritmo utilizado no *software* MatLab para o tratamento dos sinais de força.**

---

Algoritmo: Filtro passa-faixa

---

```
1: f    % Variável dos dados de força
2: for i: intervalo inicial : intervalo final    % Intervalo de aplicação
3:     if x(i) >= LI & x(i) <= LS    % Condição dos limites de força
4:         a(i) = x(i);    % Cria um vetor com os dados tratados
5:     end
6: End
```

---

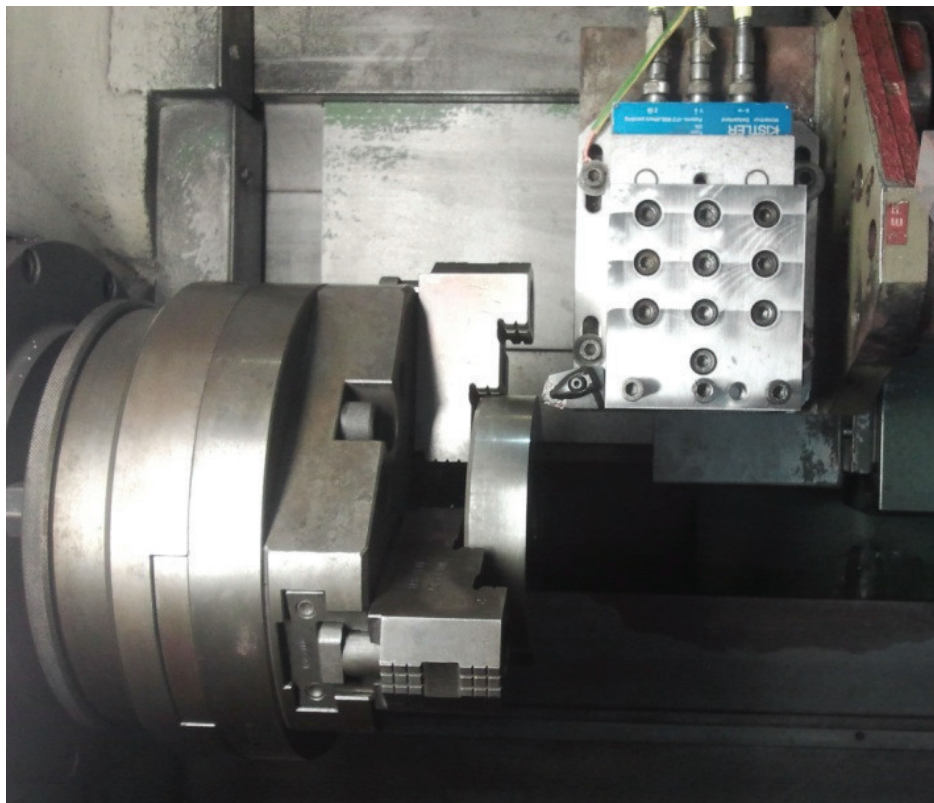


## APÊNDICE C – Ensaio preliminar

O ensaio preliminar foi efetuado com o intuito de verificar o funcionamento dinâmico do sistema de medição de forças, de detectar possíveis imprevistos, bem como de auxiliar no planejamento experimental dos ensaios definitivos. Além disso, teve como objetivo determinar as constantes de Kienzle, pois tal modelo tem confiabilidade para os cálculos que envolvem forças em operações de torneamento [42].

O ensaio preliminar e os ensaios definitivos foram realizados com o mesmo equipamento de medição, que pode ser visualizado na Figura 84. Porém, no ensaio preliminar utilizou-se uma ferramenta de metal-duro de código ISO SNMG 12 04 08 MF 1125 da fabricante Sandvik Coromant®, e não o jogo de castanhas projetado para os ensaios definitivos, pois estes estavam em fase de fabricação.

Figura 84 – Equipamento de medição de forças durante o torneamento do aço AISI 4340 de 35 HRC de dureza.



FONTE: Do autor

O ensaio preliminar consistiu no torneamento do aço AISI 4340 de 35 HRC de dureza, e a usinagem ocorreu em um único passe no

sentido radial, do diâmetro maior para o menor, sem uso de meios lubrificantes. Foram empregados os seguintes parâmetros de usinagem:

Tabela 10 - Parâmetro de corte dos ensaios preliminares.

Parâmetros	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5
$v_c$ [m/mim]	150	150	150	150	150
$f$ [mm]	0,020	0,032	0,050	0,080	0,126
$a_p$ [mm]	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20

Os valores de avanço são oriundos da série de números normalizados R5 pela Norma ABNT ISO 3:2006 [88], a qual foi dividida por 50, de modo que os valores de avanço ficassem dentro do intervalo empregado nas operações de acabamento de materiais endurecidos.

Para que fosse possível comprovar a precisão (repetitividade) e a exatidão (tendência) dos resultados de forças, foram executadas réplicas e tréplicas para cada ensaio, totalizando-se 15 ensaios de medição das componentes da força de corte na operação de torneamento do aço AISI 4340.

Os resultados das componentes da força de corte foram adquiridos pelo sistema de medição de forças, e foram tratados pelo filtro passa-faixa (ver subitem 3.8.1). Com os dados da força de corte em relação à variação do avanço, determinaram-se os coeficientes de Kienzle pela equação (2). Os resultados dos valores da constante de Kienzle são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Valores das constantes de Kienzle.

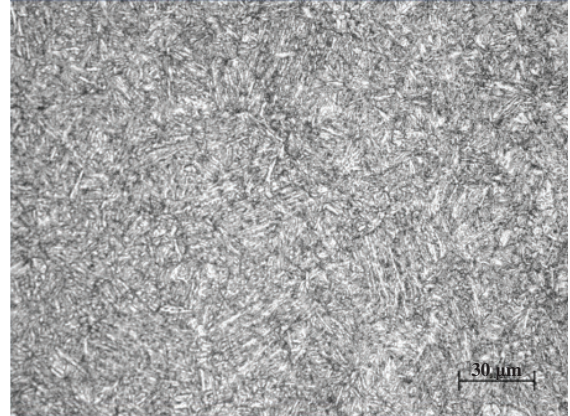
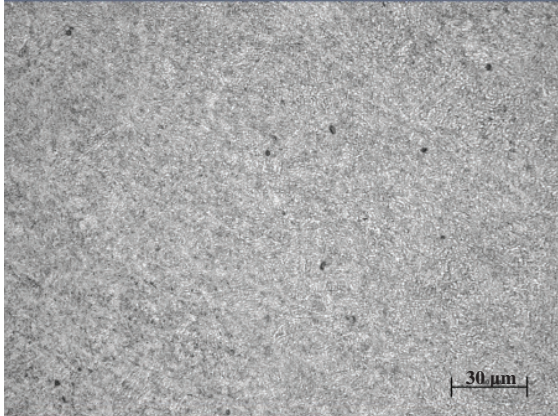
Coeficientes	Valores
$k_{c1.1}$	1715 N/mm <sup>2</sup>
$(1-m_c)$	0,64

A força específica de corte determinada nesse ensaio apresenta resultado similar ao do catálogo do fabricante Garant [89], cujo valor de força específica de corte para o aço AISI 4340 é de 1800 N/mm<sup>2</sup>.

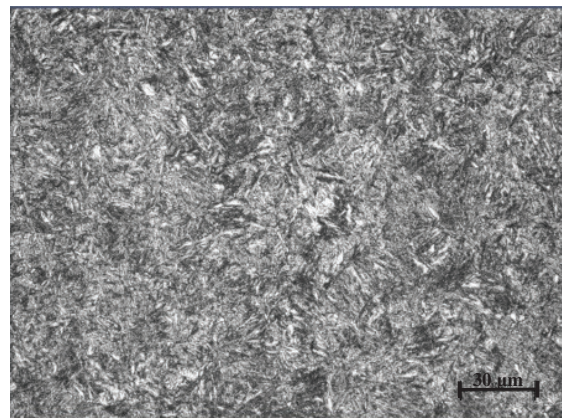
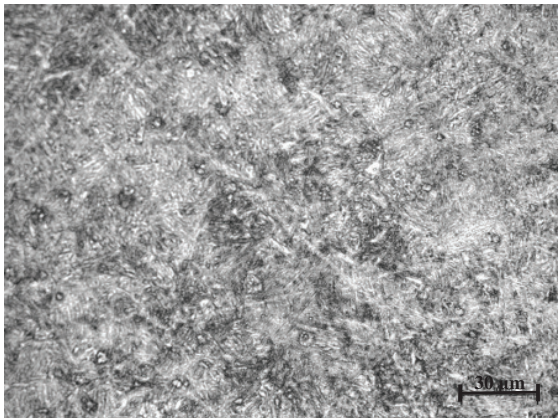
O ensaio preliminar possibilitou validar os resultados dinâmicos do sistema de medição de forças, e além disso, auxiliou no planejamento dos ensaios definitivos.

## **ANEXO A – Microestruturas do aço AISI 4340 de 35 a 60 HRC de dureza com 500 vezes de ampliação**

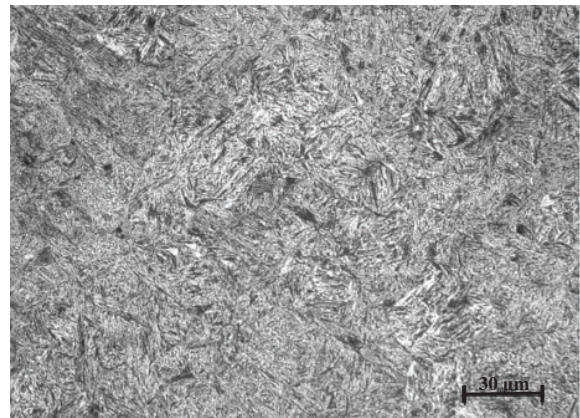
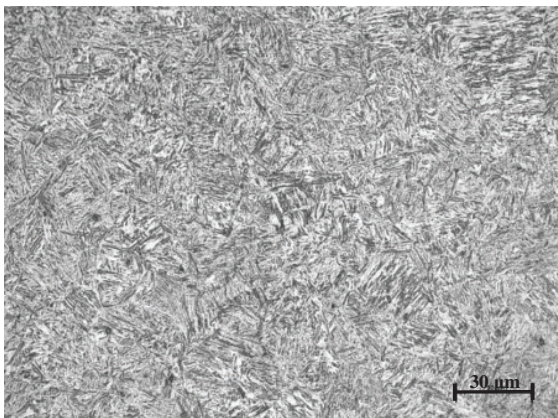
Microestrutura do aço 4340 com 35 e 40 HRC de dureza.



Microestrutura do aço 4340 com 45 e 50 HRC de dureza.



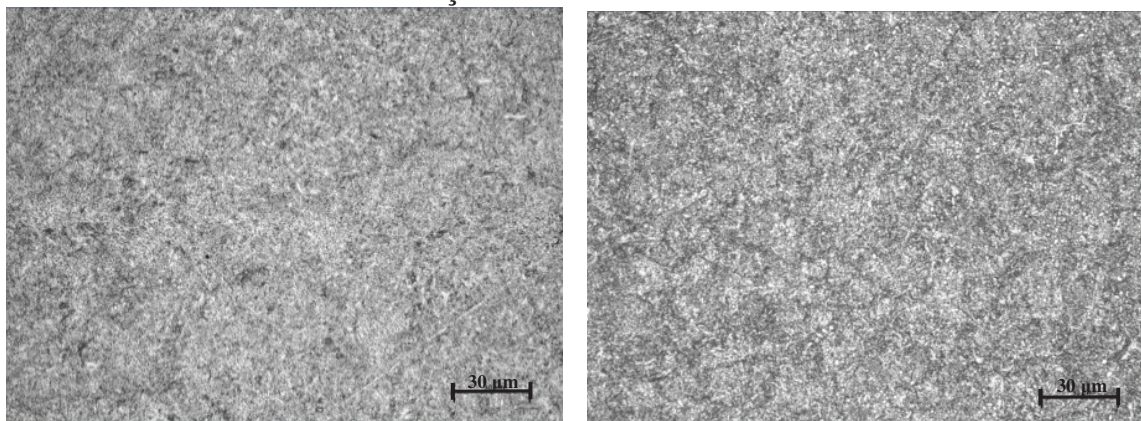
Microestrutura do aço 4340 com 55 e 60 HRC de dureza.



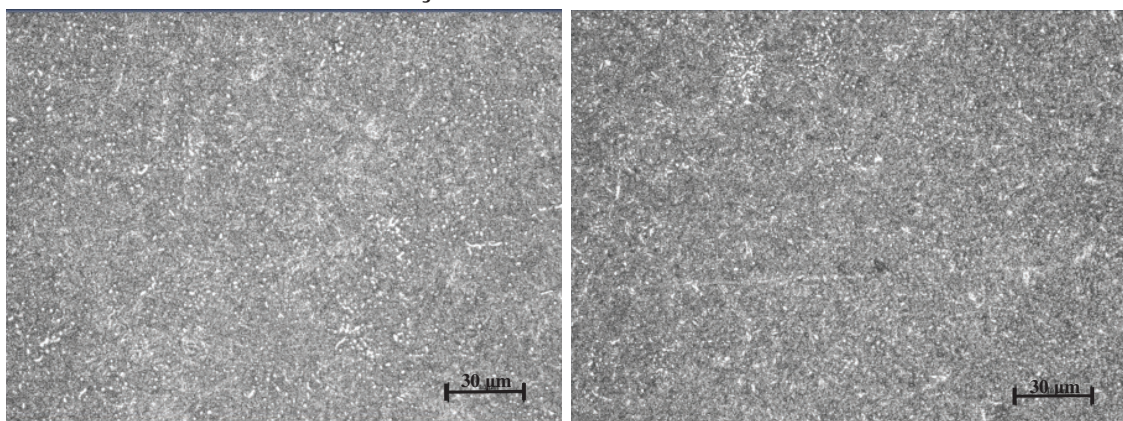


## ANEXO B – Microestruturas do aço AISI 52100 de 35 a 60 HRC de dureza com 500 vezes de ampliação

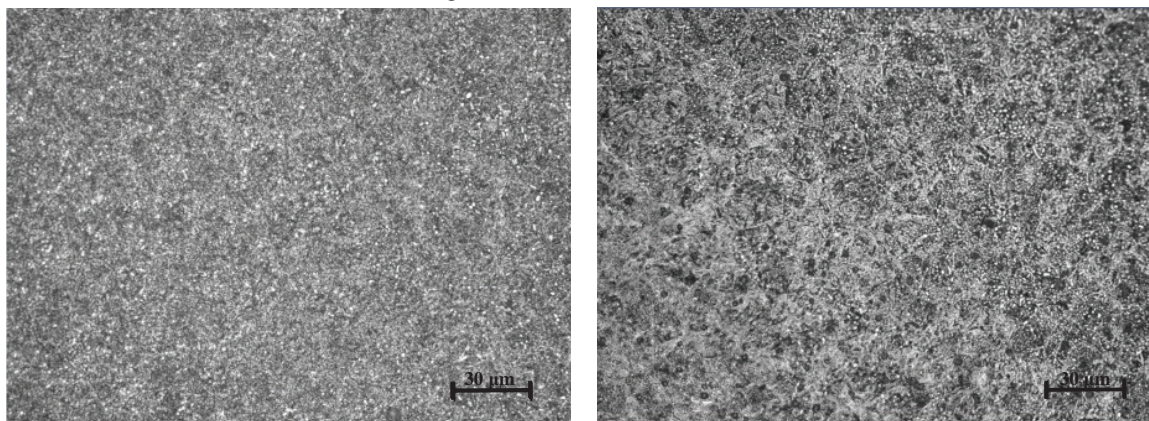
Microestrutura do aço 52100 com 35 e 40 HRC de dureza.



Microestrutura do aço 52100 com 45 e 50 HRC de dureza.



Microestrutura do aço 52100 com 55 e 60 HRC de dureza.

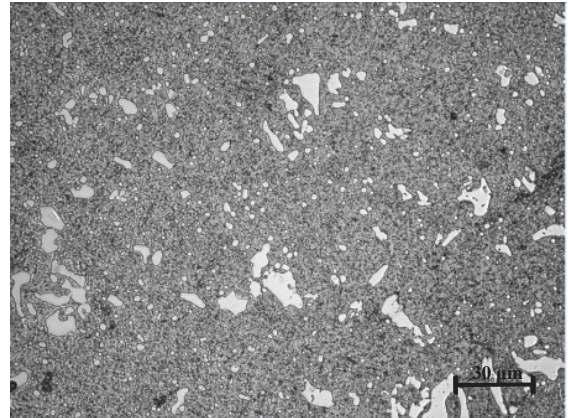
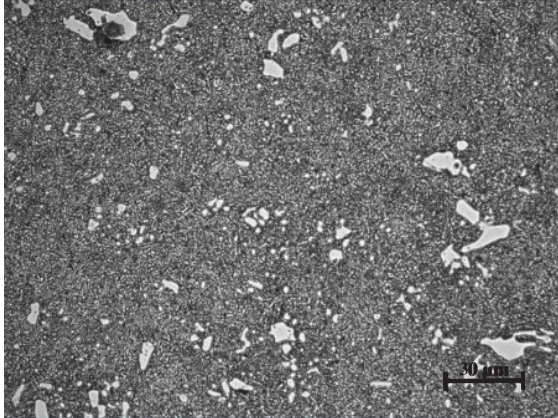




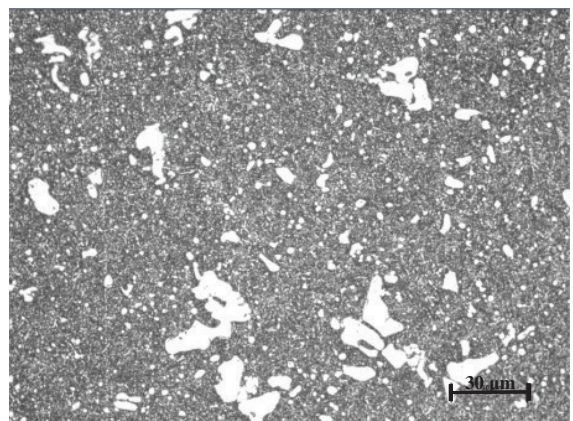
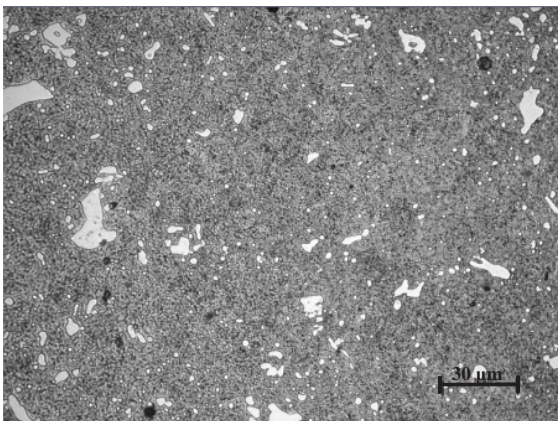


## ANEXO C – Microestruturas do aço AISI D2 de 35 a 60 HRC de dureza com 500 vezes de ampliação

Microestrutura do aço D2 com 35 e 40 HRC de dureza.



Microestrutura do aço D2 com 45 e 50 HRC de dureza



Microestrutura do aço D2 com 55 e 60 HRC de dureza.

