



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS**



**Dissertação de mestrado**

**DIOVANI ANTÔNIO COUTO**

**CARACTERIZAÇÃO DA SUPERFÍCIE USINADA DO AÇO ABNT 4340  
ENDURECIDO POR MEIO DOS PROCESSOS DE TORNEAMENTO E  
RETIFICAÇÃO**

Belo Horizonte

2019

Diovani Antônio Couto

**CARACTERIZAÇÃO DA SUPERFÍCIE USINADA DO AÇO ABNT 4340  
ENDURECIDO POR MEIO DOS PROCESSOS DE TORNEAMENTO E  
RETIFICAÇÃO**

Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do CEFET-MG, na área de concentração de Ciência e Desenvolvimento de Materiais, na Linha de Pesquisa em Seleção, Processamento e Caracterização, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia e Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Roberto da Silva

Belo Horizonte

2019

C871c Couto, Diovani Antônio.  
Caracterização da superfície usinada do aço ABNT 4340 endurecido por meio dos processos de torneamento e retificação / Diovani Antônio Couto. – 2019.  
168 f. : il.  
Orientador: Leonardo Roberto da Silva

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, 2019.  
Bibliografia.

1. Aço - Superfícies - Análise. 2. Torneamento. 3. Retificação. 4. Usinagem. 5. Ferramentas para cortar metais. I. Silva, Leonardo Roberto da. II. Título.

CDD: 671.35



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS  
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

*DISSERTAÇÃO DE MESTRADO*

*“Caracterização da superfície usinada do aço ABNT 4340  
endurecido por meio dos processos de torneamento e  
retificação”*

Autor: Diovani Antonio Couto

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Roberto da Silva

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:

Prof. Dr. Leonardo Roberto da Silva (ORIENTADOR)  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof. Dr. Ernane Rodrigues da Silva  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof. Dr. Alexandre Mendes Abrão  
Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG

Prof. Dr. Luis Henrique Andrade Maia  
Pontifícia Universidade Católica - PUC

Belo Horizonte, 06 de Fevereiro de 2019.

Dedico este trabalho em primeiro lugar a Deus que me deu força e energia para enfrentar este desafio, aos meus filhos Guilherme e Leonardo que sempre me inspiraram, aos meus irmãos pelo apoio incondicional e aos meus pais Dirson e Irani pela paciência e compreensão.

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar agradeço à Deus, por ter me propiciado esta oportunidade de conhecimento e crescimento, me dando força, saúde, coragem e disposição para sempre seguir adiante. A Ele devo tudo!

Ao meu pai, Dirson José do Couto, minha mãe, Irani Lobato Couto e meus irmãos: Dilma Couto, Daniel Couto, Dalmo Couto, Denise Couto, David Couto e Dilson Couto, minha base familiar, sempre dispostos a me ajudar.

Aos meus queridos filhos, Guilherme Lobato de Ávila Couto e Leonardo Caldeira de Ávila Couto, fonte de inspiração, para ser sempre melhor, para fazer sempre o melhor, de forma ética e com muita fé.

Ao meu orientador Professor Dr. Leonardo Roberto da Silva pela orientação, disponibilidade e apoio, sempre me auxiliando na condução desta pesquisa.

Ao Engenheiro Paulo Maurício Martins Ribeiro, Diretor Técnico de Vendas da empresa Ferramentas Escândia Ltda - EPP, pela doação das ferramentas de corte e pelo apoio recebido.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do CEFET-MG.

Ao Departamento de Engenharia de Materiais DEMAT pela disponibilização dos laboratórios e a todos os funcionários e estagiários dos laboratórios pela atenção e contribuição para o desenvolvimento desta pesquisa.

Agradeço ao CEFET pela concessão da bolsa de mestrado que foi de fundamental importância para esta pesquisa.

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

Aos meus amigos Francisco Vieira dos Santos, Davi Alves da Silva, Fernando Júnio Duarte pelo grande apoio e contribuição dado à esta pesquisa.

A empresa Setormec por disponibilizar máquinas e profissionais para realização dos ensaios de torneamento.

A todos os professores e amigos que com conselhos e trocas de experiência contribuíram para realização desta pesquisa científica.

A todos que de forma direta ou indireta contribuíram para a execução desse trabalho meus sinceros agradecimentos.

## RESUMO

O desenvolvimento de materiais para ferramentas de corte tem favorecido o torneamento de aços endurecidos, que vem substituindo em alguns casos a retificação. Durante a usinagem de materiais endurecidos, altas temperaturas são geradas devido à remoção de material e também tensões residuais são induzidas próximo à superfície usinada afetando o comportamento mecânico do material. A caracterização da topografia de superfícies de engenharia é muito importante em aplicações envolvendo atrito, lubrificação, desgaste e fadiga. Apesar da grande maioria das superfícies ser especificada por parâmetros de superfície bidimensionais (2D), muitas vezes eles não são suficientes para caracterizar uma superfície. Este trabalho visa analisar a caracterização da superfície usinada do aço ABNT 4340 endurecido, por meio do processo de torneamento utilizando ferramentas de cerâmica mista e de nitreto cúbico de boro policristalino (PcBN), na operação de acabamento sob condição de corte a seco e com fluido de corte, e também pelo processo de retificação utilizando rebolo de óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ). A caracterização da superfície foi avaliada por meio dos parâmetros de superfície bidimensionais (2D) de amplitude: Ra, Rz Rt, dos parâmetros estatísticos: Rku e Rsk e dos parâmetros funcionais: Rk, Rpk, Rvk, Kp, por meio dos parâmetros de superfície tridimensionais (3D) de amplitude: Sa, Sq, Sz, Sp, Sv, St, dos parâmetros estatísticos: Ssk e Sku, dos índices funcionais: Sbi, Sci, Svi, dos parâmetros funcionais: Sk, Spk, Svk, Smr1, Smr2, Sa1, Sa2 e dos parâmetros funcionais de volume: Vmp, Vmc, Vvc, Vvv e também pela análise da tensão residual. Em relação aos parâmetros de superfície bidimensionais (2D) e tridimensionais (3D), de um modo geral o torneamento obteve melhor desempenho nos parâmetros avaliados. As tensões residuais apresentadas na retificação foram todas compressivas, já no torneamento obteve-se tensão residual de tração quando utilizou ferramentas de corte de cerâmica e tensões residuais compressivas quando utilizou ferramenta de corte de PcBN. As tensões residuais compressivas são benéficas para o componente usinado, atuando como inibidora à nucleação e propagação de trincas. Mediante resultados, conclui-se a possibilidade do torneamento em materiais endurecidos como alternativa a retificação.

**Palavras-chave:** Aço ABNT 4340 endurecido, torneamento, retificação, usinagem de aços endurecidos, ferramentas de corte, caracterização da superfície.

## ABSTRACT

The development of materials for cutting tools has favored the turning of hardened steels, which has been replacing in some cases the grinding. During machining of hardened materials, high temperatures are generated due to the removal of material and also residual stresses are induced near the machined surface affecting the mechanical behavior of the material. The characterization of topography of engineering surfaces is very important in applications involving friction, lubrication, wear and fatigue. Although the vast majority of surfaces are specified by two-dimensional (2D) surface parameters, they are often not sufficient to characterize a surface. This work aims at analyzing the characterization of the machined surface of the hardened ABNT 4340 steel by turning with mixed ceramics and polycrystalline boron nitride (PcBN) tools in the finishing operation under dry and fluid cutting conditions and also by the grinding process using aluminum oxide ( $Al_2O_3$ ) grinding wheel. The surface characterization was evaluated using the two-dimensional (2D) surface parameters: Ra, Rz, Rt, of the statistical parameters: Rku and Rsk and of the functional parameters: Rk, Rpk, Rvk, Kp, by means of the three-dimensional (3D) surface parameters Sa, Sq, Sz, Sp, Sv, St, of the statistical parameters: Ssk and Sku, of the functional indexes: Sbi, Sci, Svi, of the functional parameters: Sk, Spk, Svk, Smr1, Smr2, Sa1, Sa2 and the volume functional parameters: Vmp, Vmc, Vvc, Vvv and also by the residual stresses analysis. In relation to the two-dimensional (2D) and three-dimensional (3D) surface parameters, in general the turning obtained better performance in the parameters evaluated. The residual stresses presented in the grinding were all compressive, whereas in the turning process residual tensile stress was obtained when using ceramic cutting tools and residual compressive stresses when using a PcBN cutting tool. Residual compressive stresses are beneficial to the machined component, acting as inhibitor to the nucleation and propagation of cracks. By means of results, the possibility of turning in hardened materials as an alternative to grinding is concluded.

**Key words:** ABNT 4340 hardened steel, turning, grinding, machining of hardened steels, cutting tools, surface characterization.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classes de pastilhas de PcBN .....	26
Figura 2 - Torneamento do pinhão de direção e engrenagem de transmissão .....	31
Figura 3 - Distribuição do calor durante o processo de usinagem .....	32
Figura 4 - Estrutura do rebolo .....	37
Figura 5 - Variáveis do processo de retificação cilíndrica externa de megalho .....	40
Figura 6 - Esquema do processo de dressagem de rebolos .....	43
Figura 7 - Velocidades de corte convencional e HSC .....	48
Figura 8 - Desvio aritmético médio do perfil em avaliação (Ra) .....	51
Figura 9 - Altura total do perfil (Rt) .....	52
Figura 10 - Análise gráfica dos parâmetros Rz, Rmax, Ry .....	53
Figura 11 - Análise gráfica do parâmetro Rp .....	54
Figura 12 - Análise gráfica do parâmetro Rv .....	54
Figura 13 - Representação gráfica do parâmetro Rsk .....	55
Figura 14- Representação gráfica do parâmetro Rku .....	56
Figura 15 - Gráfico da Curva Abbott-Firestone e os parâmetros Rk .....	57
Figura 16 - Representação gráfica do parâmetro Rk .....	58
Figura 17 - Representação gráfica do parâmetro Rpk .....	59
Figura 18 - Representação gráfica do parâmetro Rvk .....	60
Figura 19 - Representação gráfica do parâmetro A1 e A2 .....	61
Figura 20 - Efeitos da rugosidade superficial sobre a reflexão da luz .....	62
Figura 21 - Assimetria de distribuição de alturas de uma superfície .....	65
Figura 22 - Curtose da curva de distribuição de amplitudes .....	66
Figura 23 - Parâmetros funcionais baseados na Curva de Abbott-Firestone .....	67
Figura 24 - Representação gráfica do parâmetros funcionais de volume .....	70
Figura 25 - Difração de raios-x em material isento de tensões (a) e com tensões de compressão (b) .....	75
Figura 26 - Distâncias interplanares em material (a) isento de tensões (b) sob tensão .....	76
Figura 27 - Esquema da medição da tensão residual por DRX .....	77
Figura 28 - Gráfico $2\theta \times \sin^2 \psi$ .....	80
Figura 29 - Influência do desgaste de flanco (VBc) e da velocidade de corte ( $v_c$ ) na tensão residual circunferencial na superfície do aço LH15 (AISI 52100) .....	81

Figura 30 - Tensões residuais induzidas em aço rolamento temperado, 62 HRc, após processos de torneamento e retificação, ferramenta de corte: PcBN .....	82
Figura 31 - Desenho esquemático do corpo de prova .....	87
Figura 32 - Rugosímetro e dispositivos para medição dos parâmetros de superfície bidimensionais (2D) .....	89
Figura 33 - Perfilômetro ótico utilizado na medição dos parâmetros de superfície tridimensionais (3D) .....	90
Figura 34 - Difrátômetro de Raio X e montagem da amostra .....	91
Figura 35 - Operação de dressagem.....	95
Figura 36 - Desvio aritmético médio do perfil em avaliação ( $R_a$ ) em função das velocidades de mergulho ( $v_f$ ) e dos volumes de material retificado ( $Z_w$ ).....	98
Figura 37 - Desvio aritmético médio do perfil em avaliação ( $R_a$ ) em função das velocidades de corte ( $v_c$ ) utilizando ferramentas de corte de cerâmica mista (CC650 e CC6050) e PcBN (CB7115), S/R - à seco e C/R - com lubrificação.....	99
Figura 38 - Altura máxima do perfil ( $R_z$ ) em função das velocidades de mergulho ( $v_f$ ) e dos volumes de material retificado ( $Z_w$ ).....	101
Figura 39 - Altura máxima do perfil ( $R_z$ ) em função das velocidades de corte ( $v_c$ ) utilizando ferramentas de corte de cerâmica mista (CC650 e CC6050) e PcBN (CB7115), S/R - à seco e C/R - com lubrificação.....	102
Figura 40 - Altura total do perfil ( $R_t$ ) em função das velocidades de mergulho ( $v_f$ ) e dos volumes de material retificado ( $Z_w$ ).....	104
Figura 41 - Altura total do perfil ( $R_t$ ) em função das velocidades de corte ( $v_c$ ) utilizando ferramentas de corte de cerâmica mista (CC650 e CC6050) e PcBN (CB7115), S/R - à seco e C/R - com lubrificação.....	104
Figura 42 - Profundidade da rugosidade do núcleo ( $R_k$ ) em função das velocidades de mergulho ( $v_f$ ) e dos volumes de material retificado ( $Z_w$ ).....	107
Figura 43 - Profundidade da rugosidade do núcleo ( $R_k$ ) em função das velocidades de corte ( $v_c$ ) utilizando ferramentas de corte de cerâmica mista (CC650 e CC6050) e PcBN (CB7115), S/R - à seco e C/R - com lubrificação.....	107
Figura 44 - Altura reduzida do pico ( $R_{pk}$ ) em função das velocidades de mergulho ( $v_f$ ) e dos volumes de material retificado ( $Z_w$ ) .....	109
Figura 45 - Altura reduzida do pico ( $R_{pk}$ ) em função das velocidades de corte ( $v_c$ ) utilizando ferramentas de corte de cerâmica mista (CC650 e CC6050) e PcBN (CB7115), S/R - à seco e C/R - com lubrificação.....	110

Figura 46 - Profundidade reduzida dos vales ( $Rvk$ ) em função das velocidades de mergulho ( $v_f$ ) e dos volumes de material retificado ( $Z_w$ ) .....	112
Figura 47 - Profundidade reduzida dos vales ( $Rvk$ ) em função das velocidades de corte ( $v_c$ ) utilizando ferramentas de corte de cerâmica mista (CC650 e CC6050) e PcBN (CB7115), S/R - à seco e C/R - com lubrificação.....	112
Figura 48 - Fator de assimetria do perfil em avaliação ( $Rsk$ ) em função das velocidades de mergulho ( $v_f$ ) e dos volumes de material retificado ( $Z_w$ ).....	114
Figura 49 - Fator de assimetria do perfil em avaliação ( $Rsk$ ) em função das velocidades de corte ( $v_c$ ) utilizando ferramentas de corte de cerâmica mista (CC650 e CC6050) e PcBN (CB7115), S/R - à seco e C/R - com lubrificação.....	115
Figura 50 - Fator de achatamento do perfil em avaliação ( $Rku$ ) em função das velocidades de mergulho ( $v_f$ ) e dos volumes de material retificado ( $Z_w$ ).....	117
Figura 51 - Fator de achatamento do perfil em avaliação ( $Rku$ ) em função das velocidades de corte ( $v_c$ ) utilizando ferramentas de corte de cerâmica mista (CC650 e CC6050) e PcBN (CB7115), S/R - à seco e C/R - com lubrificação.....	118
Figura 52 - Coeficiente de vazios ( $K_p$ ) em função das velocidades de mergulho ( $v_f$ ) e dos volumes de material retificado ( $Z_w$ ).....	119
Figura 53 - Coeficiente de vazios ( $K_p$ ) em função das velocidades de corte ( $v_c$ ) utilizando ferramentas de corte de cerâmica mista (CC650 e CC6050) e PcBN (CB7115), S/R - à seco e C/R - com lubrificação.....	120
Figura 54 - Comparação do parâmetro $Ra$ x $Sa$ em função da velocidade de mergulho ( $v_f$ ) e velocidade de corte ( $v_c$ ) .....	128
Figura 55 - Curva de Abbott-Firestone com os parâmetros funcionais de superfície e de volume das amostras retificadas, utilizando velocidades de mergulho ( $v_f$ ) de 0,3;0,6 e 0,9mm/min e volume de material.....	129
Figura 56 - Curva de Abbott-Firestone com os parâmetros funcionais de superfície e de volume das amostras retificadas, utilizando velocidades de mergulho ( $v_f$ ) de 0,3;0,6 e 0,9mm/min e volume de material.....	130
Figura 57 - Curva Abbott-Firestone com os parâmetros funcionais de superfície e de volume das amostras torneadas, utilizando ferramentas de cerâmica mista (CC650 e CC6050) e PcBN (CB7115), velocidade de corte de 150m/min, .....	134
Figura 58 - Curva de Abbott-Firestone com os parâmetros funcionais de superfície e de volume das amostras torneadas, utilizando ferramentas de cerâmica mista	

(CC650 e CC6050) e PcBN (CB7115), velocidade de corte de 225m/min, S/R - à seco e C/R - com lubrificrefrigeração.....	135
Figura 59 - Curva de Abbott-Firestone com os parâmetros funcionais de superfície e de volume das amostras torneadas, utilizando ferramentas de cerâmica mista (CC650 e CC6050) e PcBN (CB7115), velocidade de corte de 300m/min, S/R - à seco e C/R - com lubrificrefrigeração.....	136
Figura 60 - Tensão residual em função das velocidades de mergulho de 0,3; 0,6 e 0,9mm/min, considerando os volumes de materiais retificados de .....	140
Figura 61 - Tensão residual em função das velocidades de corte de 150, 225 e 300m/min, utilizando ferramentas de cerâmica mista, classes CC650 e CC6050, e PcBN, classe CB7115, à seco (S/R) e com lubrificrefrigeração (C/R).....	142
Figura 62 - Topografia da superfície retificada e histograma de distribuição de material, utilizando velocidade de mergulho de 0,3mm/min e volume de material removido de $3,31 \times 10^3 \text{mm}^3$ .....	158
Figura 63 - Topografia da superfície retificada e histograma de distribuição de material, utilizando velocidade de mergulho de 0,6mm/min e volume de material removido de $3,31 \times 10^3 \text{mm}^3$ .....	159
Figura 64 - Topografia da superfície retificada e histograma de distribuição de material, utilizando velocidade de mergulho de 0,9mm/min e volume de material removido de $3,31 \times 10^3 \text{mm}^3$ .....	159
Figura 65 - Topografia da superfície retificada e histograma de distribuição de material, utilizando velocidade de mergulho de 0,3mm/min e volume de material removido de $6,47 \times 10^3 \text{mm}^3$ .....	160
Figura 66 - Topografia da superfície retificada e histograma de distribuição de material, utilizando velocidade de mergulho de 0,6mm/min e volume de material removido de $6,47 \times 10^3 \text{mm}^3$ .....	161
Figura 67 - Topografia da superfície retificada e histograma de distribuição de material, utilizando velocidade de mergulho de 0,9mm/min e volume de material removido de $6,47 \times 10^3 \text{mm}^3$ .....	161
Figura 68 - Topografia da superfície torneada e histograma de distribuição de material utilizando velocidade de corte de 150m/min, ferramenta de corte de cerâmica mista, classe CC650, à seco.....	162

Figura 69 - Topografia da superfície torneada e histograma de distribuição de material utilizando velocidade de corte de 150m/min, ferramenta de corte de cerâmica mista, classe CC650, com lubrificação por fluido refrigerante.....	163
Figura 70 - Topografia da superfície torneada e histograma de distribuição de material utilizando velocidade de corte de 150m/min, ferramenta de corte de cerâmica mista, classe CC6050, à seco.....	163
Figura 71 - Topografia da superfície torneada e histograma de distribuição de material utilizando velocidade de corte de 150m/min, ferramenta de corte de cerâmica mista, classe CC6050, com lubrificação por fluido refrigerante.....	164
Figura 72 - Topografia da superfície torneada e histograma de distribuição de material utilizando velocidade de corte de 150m/min, ferramenta de corte de PcBN, classe CB7115, à seco. ....	164
Figura 73 - Topografia da superfície torneada e histograma de distribuição de material utilizando velocidade de corte de 300m/min, ferramenta de corte de cerâmica mista, classe CC650, à seco.....	165
Figura 74 - Topografia da superfície torneada e histograma de distribuição de material utilizando velocidade de corte de 300m/min, ferramenta de corte de cerâmica mista, classe CC650, com lubrificação por fluido refrigerante.....	166
Figura 75 - Topografia da superfície torneada e histograma de distribuição de material utilizando velocidade de corte de 300m/min, ferramenta de corte de cerâmica mista, classe CC6050, à seco.....	166
Figura 76- Topografia da superfície torneada e histograma de distribuição de material utilizando velocidade de corte de 300m/min, ferramenta de corte de cerâmica mista, classe CC6050, com lubrificação por fluido refrigerante.....	167
Figura 77 - Topografia da superfície torneada e histograma de distribuição de material utilizando velocidade de corte de 300m/min, ferramenta de corte de PcBN, classe CB7115, à seco .....	167
Figura 78 - Topografia da superfície torneada e histograma de distribuição de material utilizando velocidade de corte de 300m/min, ferramenta de corte de PcBN, classe CB7115, com lubrificação por fluido refrigerante.....	168

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Classes de ferramentas de cerâmica aplicadas a usinagem dos aços endurecidos .....	25
Tabela 2 - Classes de ferramentas de PcBN.....	26
Tabela 3 - Principais propriedades das ferramentas de corte.....	27
Tabela 4 - Propriedades e aplicações de abrasivos .....	36
Tabela 5 - Principais características dos rebolos com ligantes vitrificado e resinóide .....	38
Tabela 6 - Parâmetros de processo de retificação .....	40
Tabela 7 - Classificação dos fluidos de corte .....	45
Tabela 8 - Parâmetros de superfície bidimensionais (2D) .....	50
Tabela 9 - Perfil de medição e parâmetros.....	51
Tabela 10 - Métodos de medição de tensão residual .....	73
Tabela 11 - Composição química (% em massa) do aço ABNT 4340 .....	86
Tabela 12 - Ferramentas de corte utilizadas no torneamento.....	87
Tabela 13 - Condições de cortes utilizadas no torneamento .....	93
Tabela 14 - Condições dos ensaios de retificação .....	94
Tabela 15 - Parâmetros utilizados na dressagem .....	95
Tabela 16 - Parâmetros de superfície bidimensionais (2D) avaliados .....	96
Tabela 17 - Parâmetros de superfície tridimensionais (3D) avaliados .....	97
Tabela 18 - Parâmetros de amplitudes e índices funcionais das amostras retificadas .....	122
Tabela 19 - Parâmetros de amplitudes e índices funcionais no processo de torneamento.....	125

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AFM	<i>Atomic Force Microscope</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CNC	Comando Numérico Computadorizado
f.	folha
HRc	Indicação de escala "c" de dureza Rockwell
HPM	High performance machining
HSC	High speed cutting
HSM	<i>High speed machine</i>
HV	Indicação de escala de dureza Vickers
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
p.	página
PcBN policristalino)	<i>Polycrystalline Cubic Boron Nitride</i> (nitreto cúbico de boro)
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i> (Sociedade de Engenheiros Automotiva)
SFM	<i>Scanning Force Microscope</i>
T	Vida útil de ferramenta

## LISTA DE NOMENCLATURAS E SÍMBOLOS

$a_e$	[mm]	Penetração de trabalho
$a_f$	[mm]	Penetração de avanço
$Al_2O_3$	-	Óxido de alumínio
$a_p$	mm	profundidade de usinagem
Cr	-	Cromo
$d$	[mm]	Diâmetro da peça
$d$	-	Parâmetro do reticulado
$d_s$	[mm]	Diâmetro do rebolo
$d_w$	[mm]	Diâmetro da peça a ser retificado
$d\Phi\psi$		Espaçamento interplanar da família de planos (h, k, l)
E		Módulo de elasticidade
f	mm/rev	Avanço
$F_c$	N	Força de corte
$F_f$	[N]	Força de avanço
$F_p$	[N]	Força passiva
$F_t$	[N]	Força de usinagem
$K_p$		Coeficiente de vazio
$l_m$		Comprimento de avaliação
$l_n$	[mm]	Comprimento da amostra
$l_r$	[mm]	Comprimento de contato
m		Coeficiente angular
mA		Miliampere
MPa		Mega Pascal
$Mr_1$	[%]	Porção de material da zona de pico
$Mr_2$	[%]	Porção de material na zona de vale
$n_w$	[rpm]	Rotação da peça
$P_c$	[W]	Potência de corte
$P_c''$	[W/mm <sup>2</sup> ]	Potência de corte específica
pH		Potencial Hidrogeniônico
Pr	[-]	Plano de referencia
$R_a$	[ $\mu$ m]	Desvio aritmético médio do perfil em avaliação
$R_k$	[ $\mu$ m]	Profundidade de rugosidade do núcleo
$R_{ku}$	[-]	Fator de achatamento do perfil em avaliação
$R_p$	[ $\mu$ m]	Altura máxima do pico do perfil
$R_{pk}$	[ $\mu$ m]	Altura reduzida do pico
$R_q$	[ $\mu$ m]	Desvio médio quadrático do perfil em avaliação
$R_{sk}$	[-]	Fator de assimetria do perfil em avaliação
$R_{sm}$	[ $\mu$ m]	Largura média de um elemento do perfil
$R_t$	[ $\mu$ m]	Altura total do perfil
$R_v$	[ $\mu$ m]	Profundidade máxima do vale do perfil

Rvk	[ $\mu\text{m}$ ]	Profundidade reduzida dos vales
Rz	[ $\mu\text{m}$ ]	Altura máxima do perfil
Sa	[ $\mu\text{m}$ ]	Desvio médio aritmético da superfície
Sbi	[-]	Índice de apoio da superfície
Sci	[-]	Índice de retenção de fluido no núcleo
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	[-]	Nitreto de silício
Sk	[ $\mu\text{m}$ ]	Profundidade da rugosidade do núcleo
Sku	[-]	Curtose da distribuição das alturas da topografia
Smc	[ $\mu\text{m}$ ]	Relação de área do material inverso
Smr1	[%]	Porção de material na zona de pico
Smr2	[%]	Porção de material na zona de vale
Sp	[ $\mu\text{m}$ ]	Altura máxima do pico
Spc	[1/mm]	Média aritmética da curvatura do pico
Spk	[ $\mu\text{m}$ ]	Altura reduzida do pico
Sq	[ $\mu\text{m}$ ]	Desvio médio quadrático da superfície
Ssk	[-]	Assimetria da distribuição das alturas da topografia
St	[ $\mu\text{m}$ ]	Altura total
Sv	[ $\mu\text{m}$ ]	Profundidade máxima do vale
Svi	[-]	Índice de retenção de fluido no vale
Svk	[ $\mu\text{m}$ ]	Profundidade reduzida do vale
Sz	[ $\mu\text{m}$ ]	Altura máxima
VB	[mm]	Desgaste de flanco
v <sub>c</sub>	[m/min]	Velocidade de corte
v <sub>f</sub>	[mm/min]	Velocidade de avanço
v <sub>j</sub>		Velocidade do jato de fluido
Vm	[mm <sup>3</sup> /mm <sup>2</sup> ]	Volume do material
Vmc	[mm <sup>3</sup> /mm <sup>2</sup> ]	Volume de material no núcleo
Vmp	[mm <sup>3</sup> /mm <sup>2</sup> ]	Volume de material na zona de pico
v <sub>s</sub>	[m/min]	Velocidade de corte do rebolo
Vv	[mm <sup>3</sup> /mm <sup>2</sup> ]	Volume de vazio
Vvc	[mm <sup>3</sup> /mm <sup>2</sup> ]	Volume de vazio no núcleo
Vvv	[mm <sup>3</sup> /mm <sup>2</sup> ]	Volume de vazio na zona de vale
v <sub>w</sub>	[m/min]	Velocidade da peça
$\alpha$	[ ° ]	Ângulo de incidência
$\beta$	[ ° ]	Ângulo de cunha
$\lambda$	[mm]	Comprimento de amostragem ou <i>cut-off</i>
$\nu$	[-]	Coefficiente de Poisson
$\chi_r$	[°]	Ângulo de posição da ferramenta
$\gamma_0$	[°]	Ângulo de saída da ferramenta
$\lambda_s$	[°]	Ângulo de inclinação da ferramenta

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>19</b>
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	<b>21</b>
<b>2.1 Geral</b> .....	<b>21</b>
<b>2.2 Específicos</b> .....	<b>21</b>
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>22</b>
<b>3.1 Ferramentas de corte para usinagem de materiais endurecidos</b> .....	<b>22</b>
3.1.1 <i>Ferramentas de corte de cerâmicas</i> .....	22
3.1.1.1 Cerâmica à base de $Al_2O_3$ .....	24
3.1.1.2 Cerâmica à base de $Si_3N_4$ .....	24
3.1.2 <i>Ferramentas de corte de PcBN</i> .....	25
<b>3.2 Torneamento de materiais endurecidos</b> .....	<b>27</b>
<b>3.3 Processo de retificação</b> .....	<b>33</b>
3.3.1 <i>Ferramentas abrasivas</i> .....	35
3.3.2 <i>Retificação cilíndrica de mergulho</i> .....	39
3.3.3 <i>Dressagem do rebolo</i> .....	41
<b>3.4 Fluidos de corte</b> .....	<b>43</b>
<b>3.5 Usinagem com altas velocidades</b> .....	<b>45</b>
<b>3.6 Caracterização da superfície usinada</b> .....	<b>49</b>
3.6.1 <i>Parâmetros de superfície bidimensionais (2D)</i> .....	49
3.6.2 <i>Parâmetros de superfície tridimensionais (3D)</i> .....	61
3.6.2.1 Parâmetros de amplitude .....	63
3.6.2.2 Parâmetros funcionais.....	66
3.6.2.3 Índices funcionais.....	68
3.6.2.4 Parâmetros funcionais de volume .....	69
3.6.3 <i>Tensão residual</i> .....	71
3.6.3.1 Métodos de medição da tensão residual .....	72
3.6.3.2 Tensões residuais nos processos de usinagem .....	80
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>85</b>
<b>4.1 Corpo de prova</b> .....	<b>86</b>
<b>4.2 Ferramentas de corte</b> .....	<b>87</b>
<b>4.3 Máquinas operatrizes utilizadas nos ensaios</b> .....	<b>88</b>
<b>4.4 Equipamentos para caracterização da superfície</b> .....	<b>88</b>

4.4.1 Parâmetros de superfície bidimensionais (2D) .....	88
4.4.2 Parâmetros de superfície tridimensionais (3D) .....	90
4.4.3 Tensão residual.....	91
<b>4.5 Procedimento experimental dos ensaios .....</b>	<b>93</b>
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>98</b>
<b>5.1 Caracterização da superfície-Parâmetros de superfície bidimensionais (2D)</b> .....	<b>98</b>
5.1.1 Desvio aritmético médio do perfil de avaliação ( $R_a$ ).....	98
5.1.2 Altura máxima do perfil ( $R_z$ ).....	101
5.1.3 Altura total do perfil ( $R_t$ ) .....	104
5.1.4 Profundidade da rugosidade do núcleo ( $R_k$ ) .....	106
5.1.5 Altura reduzida do pico ( $R_{pk}$ ) .....	109
5.1.6 Profundidade reduzida do vale ( $R_{vk}$ ) .....	111
5.1.7 Fator de assimetria do perfil em avaliação ( $R_{sk}$ ).....	114
5.1.8 Fator de achatamento do perfil em avaliação ( $R_{ku}$ ) .....	117
5.1.9 Coeficiente de vazão ( $K_p$ ) .....	119
<b>5.2 Caracterização da superfície-Parâmetros de superfície tridimensionais (3D)</b> .....	<b>121</b>
5.2.1 Parâmetros de amplitude e índices funcionais .....	121
5.2.2 Curva de Abbott-Firestone com os parâmetros funcionais de superfície e de volume .....	128
5.2.3 Textura superficial.....	139
<b>5.3 Tensão residual.....</b>	<b>140</b>
<b>6 CONCLUSÃO .....</b>	<b>145</b>
<b>7 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>147</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>148</b>
<b>APÊNDICES .....</b>	<b>158</b>
<b>APÊNDICE A - Imagens topográficas das superfícies retificadas e histogramas de distribuição de material utilizando <math>v_f</math> de 0,3; 0,6 e 0,9mm/min e <math>Z_w</math> de <math>3,31 \times 10^3 \text{mm}^3</math>.....</b>	<b>158</b>
<b>APÊNDICE B - Imagens topográficas das superfícies retificadas e histogramas de distribuição de material utilizando <math>v_f</math> de 0,3; 0,6 e 0,9mm/min e <math>Z_w</math> de <math>6,47 \times 10^3 \text{mm}^3</math>.....</b>	<b>160</b>

<b>APÊNDICE C - Imagens topográficas das superfícies torneadas e histogramas de distribuição de material utilizando <math>v_c</math> de 150m/min, ferramentas de cerâmica mista e PcBN, sob condições de lubrificação e à seco. ....</b>	<b>162</b>
<b>APÊNDICE D - Imagens topográficas das superfícies torneadas e histogramas de distribuição de material utilizando <math>v_c</math> de 300m/min, ferramentas de cerâmica mista e PcBN, sob condições de lubrificação e à seco. ....</b>	<b>165</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O mundo corporativo busca sempre por melhorias em seus processos, garantindo a sua competitividade e sustentabilidade. Neste sentido estão sempre buscando pelo desenvolvimento de novos materiais e novos processos de fabricação, visando aumento de produtividade e qualidade, com conseqüente redução de custo.

De acordo com Costa (2003) o surgimento das novas ferramentas de corte, permitiu aliar dureza com tenacidade. Nos processos de usinagem, utiliza-se como ferramenta de corte um material que possua dureza superior à dureza do material da peça. Desde o surgimento das primeiras ferramentas de corte até hoje, os materiais das ferramentas de corte vêm sofrendo inovações tecnológicas que permitem melhorar suas propriedades mecânicas, principalmente dureza e tenacidade, propriedades fundamentais para a eficiência do processo. A conciliação dessas duas propriedades, que são antagônicas, proporciona aumento de produtividade e diminuição dos custos de produção, uma vez que se consegue diminuir o desgaste das ferramentas de corte. Dentre a enorme gama de materiais utilizados na fabricação de ferramentas de corte com geometria definida para a usinagem de aços endurecidos destacam-se o metal duro (liga de carboneto de tungstênio-cobalto), a cerâmica e o nitreto cúbico de boro policristalino. Portanto, é necessário um amplo conhecimento por parte dos engenheiros, técnicos e especialistas de processo, visando definir e aplicar a melhor ferramenta, para atender os elevados padrões de qualidade e produtividade exigidos em uma economia de escala.

Alinhado com esta busca, Paula (2012) relata que a produtividade tem sido melhorada com a substituição do processo de retificação pelo torneamento dos materiais endurecidos, ou seja, peças temperadas antes eram acabadas somente pelo processo de retificação, hoje são acabadas pelo processo de torneamento, tendo em vista a grande evolução ocorrida no desenvolvimento de ferramentas de corte e máquinas ferramentas.

O principal objetivo nas operações de acabamento executados pelos processos de retificação e torneamento dos materiais endurecidos é obter baixa rugosidade, estreitas tolerâncias dimensionais e geométricas (PUERTO et al., 2013).

A tensão residual é um dos mais importantes fatores para garantir a integridade superficial das peças usinadas por meio dos processos de retificação e

torneamento dos materiais endurecidos (PALA; GANEV, 2008; HENRIKSEN, 1951, apud DING et al., 2017), porque uma distribuição imprópria das tensões residuais irá influenciar na vida útil e confiabilidade do componente usinado (MALKIN; GUO, 2008; ZUBAIROVA; SVIRSHCHEV, 2014; LAAMOURI; SIDHOM; BRAHAM, 2013 apud DING et al., 2017).

De acordo com Lima e Corrêa (2002), o desenvolvimento da usinagem dos aços endurecidos partiu das indústrias automobilística, aeroespacial e metalúrgica, utilizando ferramentas de PcBN e cerâmica, reduzindo o custo e melhorando a qualidade. Em algumas situações, o processo de torneamento tem substituído o processo de retificação nas operações de acabamento, principalmente na produção de peças seriadas.

Principalmente na indústria automobilística, onde a produção é altamente seriada, a busca por inovações de processos é uma constante, visando reduzir os tempos ciclos e melhoria do padrão de qualidade. Neste caso, o processo de usinagem, considerado de alto custo de investimento na aquisição de máquinas e ferramentas, é objeto de constantes buscas por inovações tecnológicas.

De acordo com Momper (2000 apud LIMA; CORRÊA, 2002), a redução de custo de uma peça de aço endurecido produzida pelo processo de torneamento, em relação ao processo de retificação, chega a mais de 60%. Além disto, ocorrem outros benefícios tais como, possibilidade de não utilizar fluido de corte, otimização dos parâmetros de usinagem, execução de todo o processo de fabricação em uma única máquina ferramenta, resultando uma melhor flexibilização do processo e do *lay out* industrial.

Com o desenvolvimento dos materiais ultraduros para ferramentas de corte, principalmente os cerâmicos e PcBN, aliado a disponibilidade de máquina com alta velocidade de corte, tornou-se uma realidade a produção de peças e componentes (automobilísticas, moldes, matrizes e outros) diretamente do aço endurecido. As ferramentas de corte tem evoluído rapidamente em resposta às mudanças da demanda e do maior desafio proporcionado pelos novos materiais das peças de trabalho.

Tendo em vista os benefícios e a novas tendências mencionados acima, este trabalho visa um estudo comparativo da caracterização das superfícies usinadas do aço ABNT 4340 endurecido, por meio dos processos de torneamento e retificação.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Geral

Este trabalho tem como objetivo geral elaborar estudo comparativo da caracterização da superfície usinada, na operação de acabamento, do aço ABNT 4340 endurecido, faixa de  $52 \pm 2$  HRc, por meio dos processos de torneamento e retificação. Esta caracterização foi executada através do levantamento de informações qualitativas e quantitativas, por meio da análise dos parâmetros de superfície bidimensionais (2D) e tridimensionais (3D) e tensão residual, permitindo assim uma melhor orientação na escolha do processo de usinagem, tendo em vista os altos padrões de qualidade, produtividade e custo dos produtos usinados exigidos pelas empresas de manufatura em geral.

### 2.2 Específicos

- ✓ avaliar a influência dos parâmetros de corte ( $v_c$  e  $v_f$ ) na caracterização das superfícies usinadas;
- ✓ analisar quantitativamente e qualitativamente, os parâmetros de superfície bidimensionais (2D) e tridimensionais (3D);
- ✓ analisar as tensões residuais induzidas nos processos de usinagem;
- ✓ avaliar a aplicação e benefícios da usinagem com alta velocidade de corte;
- ✓ verificar a viabilidade dos fluidos de corte na operação de acabamento utilizando ferramentas de corte de cerâmica e PcBN;
- ✓ analisar o comportamento das ferramentas de cerâmica e de PcBN na caracterização da superfície usinada.

### **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Esta revisão bibliográfica apresenta os conceitos relevantes e importantes, necessários ao entendimento e compreensão do estudo da caracterização da superfície usinada do aço endurecido, através dos processos de torneamento e de retificação.

#### **3.1 Ferramentas de corte para usinagem de materiais endurecidos**

Há algumas décadas, os profissionais de processo vem substituindo algumas operações de retificação em peças fabricadas com aço endurecido por operações de torneamento e fresamento. Esta substituição se tornou possível graças ao surgimento e desenvolvimento de máquinas mais potentes e rígidas e, principalmente, devido ao desenvolvimento de novos materiais para ferramentas de corte com alta resistência ao desgaste, alta dureza à altas temperaturas e grande estabilidade química, destacando-se as ferramentas de cerâmicas e PcBN (MATSUMOTO; PEDROSA; DINIZ, 2002).

Os materiais das ferramentas de corte passam por constantes inovações tecnológicas, visando melhorias em suas propriedades mecânicas, principalmente dureza e tenacidade. Conciliar estas duas propriedades implica em propiciar aumento de produtividade e redução dos custos operacionais, visto que consegue-se reduzir o desgaste das ferramentas de corte (COSTA, 2003).

Dentre as ferramentas mais utilizadas para usinagem dos materiais endurecidos, pode-se citar:

- ✓ metal duro;
- ✓ cerâmica;
- ✓ nitreto cúbico de boro policristalino (PcBN)

##### **3.1.1 Ferramentas de corte de cerâmicas**

Conforme Machado et al. (2015), não existe uma definição clássica para os materiais cerâmicos, sendo mais conhecidos pelas suas propriedades. As cerâmicas são compostas por elementos metálicos e não metálicos, normalmente, na forma de óxidos, carbonetos ou nitretos. Possuem em sua maioria estrutura cristalina e as

ligações entre seus elementos são iônicas ou covalentes. Algumas de suas principais propriedades são:

- ✓ suportam altas temperaturas, sem perder resistência mecânica, tendo grande aplicação como materiais refratários;
- ✓ baixa condutividade térmica;
- ✓ boa resistência a fluência;
- ✓ baixa resistência a tração;
- ✓ apresentam baixa resistência ao choque;
- ✓ são duros e frágeis em relação à tração;
- ✓ são resistentes em relação à compressão;
- ✓ o módulo de elasticidade é alto:  $\sim 45.500 \text{kgf/mm}^2$  (aço:  $20.000 \text{kgf/mm}^2$ );
- ✓ têm alta dureza e alta resistência ao desgaste, sendo bastante utilizado em processos de usinagem.

Foram introduzidas no mercado de ferramentas somente no ano 1950, tendo em vista a sua fragilidade. Atualmente são aplicadas na usinagem de materiais endurecidos e de superligas, devido à sua alta dureza e resistência ao desgaste. São indicadas em operações de corte contínuo, em aços com dureza acima de 45 HRc, porém em cortes interrompidos possuem grandes limitações (MACHADO et al., 2015).

A introdução no mercado de ferramentas de cerâmicas mistas, de cerâmicas reforçadas com SiC (*whiskers*), de cerâmicas à base de nitreto de silício, de metais duros revestidos e dos materiais ultraduros (PcBN), causaram um grande avanço tecnológico neste segmento no início dos anos 1980, sendo este ano considerado como referência da época do terceiro grande impulso no desenvolvimento de ferramentas de corte (após os aços rápidos como primeiro e os metais duros como segundo) (MACHADO et. al, 2015).

As ferramentas de cerâmica podem ser divididas em dois grandes grupos:

- ✓ cerâmica à base de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (alumina);
- ✓ cerâmica à base de  $\text{Si}_3\text{N}_4$  (nitreto de silício).

### 3.1.1.1 Cerâmica à base de $\text{Al}_2\text{O}_3$

São constituídas basicamente de finos grãos de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  com adição de  $\text{MgO}$  para inibir o crescimento dos grãos. Também são adicionados óxido de cromo, titânio e níquel visando aumentar a resistência mecânica. Possuem alto grau de dureza, resistência ao desgaste, estabilidade química, porém baixa tenacidade. São utilizadas na usinagem de materiais endurecidos, e exigem máquinas rígidas e não permitem vibrações excessivas (MACHADO et al., 2015).

De acordo com Machado et. al. (2015) e Sandvik (2018), as ferramentas de corte de cerâmica possuem excelente resistência ao desgaste com altas velocidades de corte. Existe uma variedade de classes de cerâmica destinadas as diversas aplicações, sendo que as principais classes de cerâmicas a base de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  são:

- ✓ cerâmicas com óxidos: as adições de  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{TiC}$ ,  $\text{TiN}$ ,  $\text{TiO}_2$  e  $\text{WC}$  conferem a matriz de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  maior tenacidade, melhores propriedades térmicas para suportar maiores impactos mecânicos e choques térmicos, situações estas que são comuns aos processos de corte;
- ✓ cerâmica mista ou preta: compreende a adição de  $\text{TiC}$ , na matriz  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , visando melhorar as propriedades de tenacidade e condutividade térmica, dando ótimos resultados em acabamento na operação de torneamento dos aços endurecidos;
- ✓ cerâmica reforçada com *Whisker*: é a cerâmica  $\text{Al}_2\text{O}_3$  reforçada com *Whisker*, onde são usados *whisker* de carboneto de silício ( $\text{SiC}$ ) para aumentar drasticamente a tenacidade, maior resistência ao choque térmico, permitindo o uso de fluido de corte, tendo ótima aplicação na usinagem dos aços endurecidos.

### 3.1.1.2 Cerâmica à base de $\text{Si}_3\text{N}_4$

De acordo com Machado et. al. (2015) e Sandvik (2018) as principais classes são:

- ✓ cerâmica de nitreto de silício ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ): surgiu no ano 1980, sendo composto de  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , com uma fase integranular de  $\text{SiO}_2$  (cristais de vidro), sendo sinterizados com outros componentes de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$  e outros. Possui boa aplicação na usinagem dos ferros fundidos cinzentos. Porém, possui grande interação química

com o ferro a elevadas temperaturas, portanto esta classe de cerâmica não tem tido sucesso na usinagem de aços (BULJAN; SARIN, 1985 apud MACHADO et al., 2015; SANDVIK, 2018).

- ✓ cerâmica Sialon (SiAlON): é comercializado com a marca registrada SIALON (nome que tem origem nos símbolos dos elementos que contém: Si, Al, O e N), mostra bons resultados na usinagem de aços e superligas de níquel. A adição de Al e O nesta classe de cerâmica diminui as interações com o ferro e, assim, permite aplicações em aços.

A Tabela 1 mostra os principais tipos de ferramentas de corte de cerâmicas recomendadas pelo fornecedor Sandvik (2018) e indicadas por Machado et al. (2015) para usinagem dos aços endurecidos com dureza variando na faixa de 50 - 60 HRc e com exigência de acabamento superficial moderada.

**Tabela 1- Classes de ferramentas de cerâmica aplicadas a usinagem dos aços endurecidos**

<b>Material</b>	<b>Classe</b>	<b>Composição</b>	<b>Aplicação</b>
Cerâmica à base de $Al_2O_3$	Cerâmica mista ou preta	71% $Al_2O_3$ , 28% TiC e 1% outros	Para semiacabamento e acabamento com alta velocidade em condições estáveis, considerando corte contínuo.
Cerâmica à base de $Al_2O_3$	Cerâmica reforçada com <i>whisker</i>	$Al_2O_3$ + 25% SiC ( <i>whiskers</i> )	Desbaste à semiacabamento, em operações de cortes interrompidos.
Cerâmica à base de $Si_3N_4$	Cerâmica SiAlON	$Si_3N_4$ + Al + O	Usinagem dos aços endurecidos

Fonte: Sandvik (2018) e Machado et al. (2015)

### 3.1.2 Ferramentas de corte de PcBN

De acordo com Sandvik (2018), as ferramentas de nitreto cúbico de boro policristalino (PcBN) são consideradas como melhor opção de material de

ferramenta de corte para as operações de torneamento de peças fabricadas com aços endurecidos. Porém, devem ser usadas em peças com dureza acima de 48 HRC, não sendo recomendado a sua aplicação abaixo deste valor. Na Tabela 2 são demonstradas as principais classes de ferramentas de PcBN.

**Tabela 2 - Classes de ferramentas de PcBN**

Material	Classe	Composição	Aplicação
PcBN	Baixo % de PcBN	50% de PcBN + ligante de cerâmica	Cortes contínuos e levemente interrompidos.
PcBN	Médio % de PcBN	60% de PcBN + ligante de cerâmica	Cortes interrompidos pesados e leves.
PcBN	Alto % de PcBN	90% de PcBN + ligante de cerâmica	Cortes pesados interrompidos e condições instáveis

Fonte: Sandvik (2018).

Na Figura 1 são demonstradas as classes de ferramentas de PcBN, comercializadas pela Sandvik, aplicadas na usinagem dos materiais endurecidos, em função da aplicação (corte contínuo, corte interrompido médio e corte interrompido pesado), tenacidade e velocidade de corte.

**Figura 1 - Classes de pastilhas de PcBN**



Fonte: Sandvik (2018).

Abrão, Aspinwall e Wise (1995) evidenciam que as ferramentas de PcBN e cerâmica foram introduzidas na usinagem de materiais endurecidos devido as suas elevadas durezas a quente e relativamente baixa solubilidade no ferro.

Os fabricantes de ferramentas de corte tem trabalhado exaustivamente no desenvolvimento de novos materiais e novas geometrias das ferramentas para usinagem de materiais endurecidos. Na Tabela 3 são demonstradas as principais propriedades das ferramentas de corte de cerâmica e PcBN.

**Tabela 3 - Principais propriedades das ferramentas de corte**

PROPRIEDADES	Cerâmica mista	Cerâmica reforçada com whisker	PcBN alto percentual	PcBN baixo percentual
Dureza à temperatura ambiente (HV)	1900	2000	4000	2850
Dureza à 1.000°C (HV)	800	900	1800	-
Tenacidade à fratura (Mpa m <sup>1/2</sup> )	3	8	10	3,7
Condutividade térmica (W/m°C)	12-18	32	100	44
Módulo de elasticidade (kN/mm <sup>2</sup> )	420	390	680	587
Coefficiente de expansão térmica (x10 <sup>6</sup> /K)	8	4,5	4,9	4,7

Fonte: Abrão (1995, adaptado); ASM International (1995).

### 3.2 Torneamento de materiais endurecidos

O torneamento é considerado um processo de fabricação, com remoção de cavaco, por usinagem, convencional. É realizado através das operações de desbaste e acabamento. No desbaste, a principal preocupação é garantir elevada taxa de remoção de material, e no acabamento esta taxa é baixa e a qualidade final do componente é prioritária.

O torneamento de materiais endurecidos envolve a usinagem de materiais com dureza superior à 45 HRc, onde as pressões específicas de corte são altas (podendo gerar ou não altas forças de corte dependendo dos parâmetros de corte utilizados) e é necessária a aplicação de uma ferramenta com alta dureza e resistência à altas temperaturas (ROSA, 2017).

A usinagem dos materiais endurecidos tornou-se um método aceito para alcançar o aumento da qualidade do produto em ramos industriais líderes como automotivo, rolamentos, hidráulico e indústria de moldes e matrizes. Engrenagens da

transmissão, anéis de rolamento, eixo pinhão da direção e outras peças de transmissão são aplicações típicas para torneamento de alta precisão, enquanto o fresamento de alta velocidade é uma tecnologia líder na indústria de moldes e matrizes (GRZESIK; WANAT, 2006).

A substituição das operações de retificação dispendiosas e prejudiciais ao meio ambiente por processos de torneamento ou fresamento dos materiais endurecidos precisa de investigações adicionais e relevantes relacionadas à qualidade de obtenção de peças usinadas. É necessário conhecer a textura das superfícies geradas por estes processos, pois podem afetar as propriedades de serviço exigidas pelas peças e componentes em suas aplicações (GRZESIK; ZAK; KISZKA, 2014).

O torneamento dos aços endurecidos como alternativa ao processo de retificação tem sido empregado cada vez mais devido às diversas vantagens que oferece, como a flexibilidade, possibilidade de corte à seco, produtividade e outros. Os principais materiais de ferramenta utilizados para este fim são o PcBN e a cerâmica devido à suas elevadas durezas a quente, resistências ao desgaste e, no caso de alguns tipos destes materiais, elevadas estabilidades química com o ferro, propiciando suportarem as altas cargas térmicas e mecânicas provenientes do processo. O PcBN tem uma dureza maior do que as ferramentas de cerâmica, tanto em baixas quanto em altas temperaturas. Outras propriedades do PcBN, como alta condutividade térmica e baixo coeficiente de expansão térmica, também são importantes e fundamentais em suas aplicações no torneamento dos aços endurecidos (GODOY; DINIZ, 2011).

A usinagem do aço endurecido deu-se início na década de 70, utilizando principalmente ferramentas de corte de PcBN no torneamento, em substituição a retificação tradicional. Porém, a velocidade de corte era no máximo de 120m/min, mudando para 180m/min à partir da década de 90 (TOMITA, 1999). De acordo com Chou (1994) o desenvolvimento de novos materiais para ferramentas de corte, resultou em um rápido avanço na tecnologia de usinagem de materiais endurecidos, propiciando padrões de qualidade similares ao processo de retificação, porém com produtividade superior.

Grande parte das peças utilizadas em elementos mecânicos necessita de tratamento térmico para melhorar suas propriedades mecânicas. Algumas dessas peças também precisam ser usinadas após o tratamento para garantir

características como bom acabamento superficial, baixa rugosidade, tolerância dimensional e geométrica (ROSA, 2017).

O surgimento das ferramentas de corte de PcBN e cerâmica tornou possível um novo processo de usinagem como alternativa à tradicional rota de usinagem dos aços endurecidos. Até então, a peça ou componente era usinada até tornar-se um produto semiacabado, estando o material da peça na condição recozido, em seguida a mesma era tratada termicamente para atingir dureza desejada, finalmente era usinada para as dimensões e tolerâncias finais por meio de retificação. Utilizando as ferramentas de PcBN e cerâmica é possível tornear e fresar os aços no estado endurecido, nas operações de semiacabamento e acabamento, eliminando a operação adicional de retificação e, conseqüentemente, os problemas associados a distorção da peça e uso de fluido refrigerante ( ABRÃO; ASPINWALL; WISE, 1995).

De acordo com Sandvik (2018), o torneamento de peças endurecidas é definido como o torneamento de peças fabricadas em aços endurecidos, com durezas variando na faixa de 50 a 60 HRc . Este processo vem gradativamente tornando-se uma excelente alternativa técnica para os tradicionais processos de retificação, além de propiciar uma boa relação custo/benefício. Os exemplos típicos de aços que podem ser endurecidos atingindo altos níveis de dureza são: aços carbonos, aços liga, aços ferramentas, aços para rolamentos e outros. Os processos mais comuns utilizados para promover o endurecimento dos aços são a têmpera e cementação. O torneamento de peças endurecidas é normalmente executado nas operações de semiacabamento e acabamento, onde são exigidos alto padrão de tolerância dimensional, geométrica e acabamento superficial.

Segundo Sandvik (2018) e Momper (2000 apud LIMA;CORRÊA, 2002) são vários os benefícios propiciados pela usinagem dos materiais endurecidos, destacando-se os seguintes:

- ✓ redução no tempo de usinagem;
- ✓ economia de aproximadamente 70%;
- ✓ melhor flexibilidade do processo;
- ✓ melhor prazo de entrega;
- ✓ melhor qualidade;
- ✓ o processo de produção é mais simples, semelhante ao torneamento convencional;
- ✓ maior produtividade;

- ✓ peças com formatos complexos usinados em um único *set up* de máquina;
- ✓ benefícios ao meio ambiente, pois normalmente é sem fluido de corte;
- ✓ evita doenças ocupacionais ao operador da máquina, por não utilizar o fluido de corte na maioria das aplicações.

De acordo com Lima e Corrêa (2002), a usinagem dos aços endurecidos iniciou-se nas indústrias automobilística, aeroespacial e metalúrgica. Nestes três ramos industriais as ferramentas de Nitreto Cúbico de Boro Policristalino (PcBN) e cerâmica são as mais utilizadas devido ao fato de reduzirem o custo de produção e melhorarem a qualidade do produto. Considerando estes benefícios, em determinadas aplicações, o torneamento com estes tipos de ferramentas pode substituir o processo de retificação nas operações de acabamento, principalmente em produções seriadas.

Conforme mencionado por Costa (2003), a usinagem dos materiais endurecidos têm sido bastante utilizada, tendo em vista as suas enormes vantagens. Este processo está cada vez mais sendo implantado, devido ao desenvolvimento de novos materiais de ferramentas de corte. Antes do advento de ferramentas ultraduras, como o PcBN e cerâmica, a usinagem de materiais com dureza superior a 45 HRc só era realizada através do processo de usinagem por retificação. Atualmente, os processos de usinagem de materiais endurecidos têm proporcionado diversos benefícios ambientais (não utilização de fluido de corte), econômicos (redução dos tempos de usinagem), segurança (evita doenças ocupacionais ao operador provocadas pelo fluido de corte), além de garantir qualidade de acabamento compatível com a do processo de retificação.

Alguns exemplos das principais peças torneadas à partir do aço endurecido na indústria automobilística são:

- ✓ rotores de freios;
- ✓ engrenagens de transmissão;
- ✓ pinhão de transmissão e de direção;
- ✓ pinhão de direção;
- ✓ assentos de válvulas;
- ✓ pistões;
- ✓ camisas dos cilindros;
- ✓ alojamento da embreagem.

Na Figura 2 são apresentados exemplos de peças automotivas que utilizam o processo de torneamento de materiais endurecidos.

**Figura 2 - Torneamento do pinhão de direção e engrenagem de transmissão**



Fonte: Sandvik (2018).

De acordo com Sandvik (2018) no torneamento de materiais endurecidos é importante que técnicos e engenheiros atentem para algumas recomendações específicas e importantes a serem seguidas no estágio da peça semi-acabada, tais como:

- ✓ evitar rebarbas;
- ✓ manter as tolerância dimensionais reduzidas;
- ✓ fazer os chanfros e raios;
- ✓ não entre ou saia do corte de forma abrupta;

Principais recomendações a serem seguidas durante o *set up* da máquina:

- ✓ a máquina ferramenta deverá ter alta estabilidade, rigidez e acuracidade;
- ✓ sistema de fixação e alinhamento da peça também deverão ser rígidos e precisos;
- ✓ como referência, a proporção entre comprimento/diâmetro da peça deverá ser até 2:1, considerando peças com fixação somente em uma extremidade e utilizando contra-ponta esta proporção pode ser aumentada;
- ✓ minimizar todos os balanços visando maximizar a rigidez do sistema.

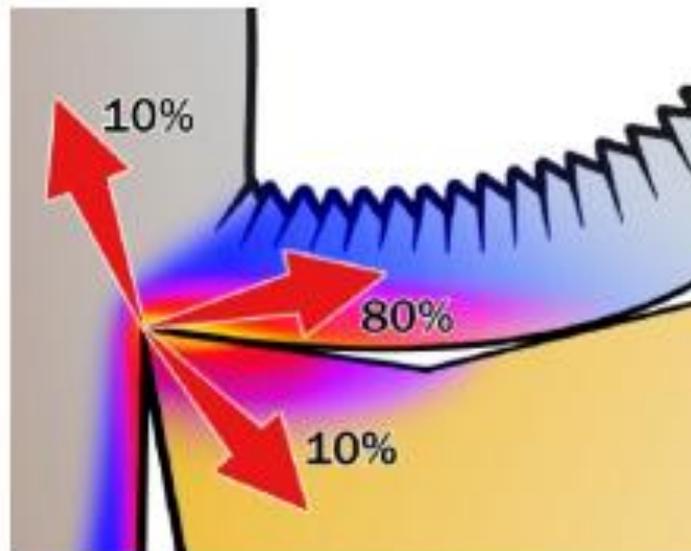
O torneamento de materiais endurecidos permite que seja executado sem lubrificação, sendo considerado uma condição viável. Tanto as pastilhas de PcBN quanto as de cerâmica suportam altas temperaturas de corte, permitindo a realização da usinagem sem fluido de corte, reduzindo-se o custo e problemas associados ao fluido de corte (meio ambiente e doenças ocupacionais) (SANDVIK, 2018).

Em determinadas aplicações pode-se aplicar o uso da lubrificação:

- ✓ quando é necessário controlar a estabilidade térmica da peça;
- ✓ para facilitar a quebra de cavaco;
- ✓ ao usinar peças grandes (para remover o calor).

Nestes casos, a lubrificação deverá ser eficiente, com fluxo contínuo durante toda a operação de torneamento. É conhecido que o calor gerado durante a usinagem é distribuído conforme Figura 3.

**Figura 3 - Distribuição do calor durante o processo de usinagem**



Fonte: Sandvik (2018).

O torneamento dos aços endurecidos utilizando máquinas CNC convencionais é aplicável para se obter tolerâncias dimensionais IT6 e IT7 e rugosidades Ra variando de 0,2 à 0,6 $\mu$ m. Este padrão de qualidade corresponde ao padrão normalmente obtido na retificação em geral. Já utilizando tornos de alta precisão (alta rigidez, mancais hidrostáticos, etc), ferramentas com geometria e

acabamento superficial especial e parâmetros de corte otimizados, consegue-se obter peças com qualidades equivalentes às obtidas na retificação fina (IT3 à IT5 e  $Ra < 0,1\mu\text{m}$ ) (KLOCKE et al., 1995)

### 3.3 Processo de retificação

De acordo com Ferraresi (1970), a retificação é considerada um processo de fabricação, com remoção de cavaco, por usinagem por abrasão. É destinado a obtenção de superfícies com auxílio de ferramenta abrasiva de revolução, denominada rebolo. Durante o processo, a ferramenta gira e a peça ou a ferramenta se desloca segundo uma trajetória determinada, conforme o tipo de operação, podendo a peça girar ou não.

Conforme Soares e Oliveira (2002) o objetivo principal do processo de retificação é melhorar o acabamento superficial e garantir a integridade da peça. É considerado um processo de grande importância e precisão, pois é executado normalmente em uma etapa final do processo de fabricação da peça, momento em que o valor agregado do produto já está muito elevado.

De acordo com Bianchi et al. (2011) as principais características do processo de retificação são:

- ✓ é considerado um dos mais complexos processos de usinagem devido ao grande número de variáveis englobadas, e também pelos riscos operacionais que o operador fica sujeito, principalmente pelas altas velocidades de corte do rebolo e utilização do fluido de corte em abundância;
- ✓ é aplicado nas operações de acabamento superficial de peças e componentes mecânicos, normalmente fabricados com aço, visando: o aumento da qualidade da superfície usinada, a redução dos erros dimensionais e geométricos, garantir as tolerâncias de acabamento exigidas pelo projeto, minimizar as rugosidades e irregularidades superficiais;
- ✓ a ferramenta de corte é o rebolo, o qual é constituído de partículas não metálicas extremamente duras e possui elevado número de arestas de corte (sem geometria definida) agindo simultaneamente. O desgaste destas arestas e da superfície de corte do rebolo é causada, principalmente, por fatores mecânicos e físico-químicos. Este desgaste está diretamente relacionado à usinabilidade do material, principal propriedade ligada à vida útil do rebolo;

- ✓ deve-se conhecer em detalhes as especificações do material da peça a ser trabalhada, afim de especificar corretamente as condições e parâmetros de usinagem, assim como das especificações do rebolo, para otimização da vida útil da ferramenta e alta capacidade de remoção de material. O conhecimento destes fatores e variáveis é de fundamental importância para garantir a eficiência do processo de retificação;
- ✓ a quantificação da capacidade de remoção de material pelo rebolo é definido como agressividade superficial de corte.

Outras definições e conceitos complementares do processo de retificação:

- ✓ segundo Malkin e Guo (2008) o processo de retificação requer uma quantidade significativa de energia para remoção do material. Esta energia é transformada em calor, o qual é concentrado dentro da região de corte, sendo dissipada através da peça, e é causadora de vários danos a peça: queima, tensões residuais de tração, transformação de fase, trincas, redução de resistência a fadiga, expansão térmica da peça que contribui para erros dimensionais e geométricas da peça acabada;
- ✓ de acordo com Malkin e Guo (2008) a queima superficial da peça influencia na alteração da microestrutura do material retificado, devido a ocorrência do processo de re-austenitização do material. Em aços temperados retificados com a queima ocorre a retempera do material, conseqüência da re-austenitização, seguida da formação de martensita não revenida, o que é constado com análise metalográfica, constando o aumento da microdureza superficial;
- ✓ o processo de retificação gera tensões residuais na superfície usinada afetando o comportamento mecânico do material, sendo que, as tensões de compressão são consideradas benéficas nas propriedades mecânicas dos materiais, aumento da resistência a fadiga, enquanto as tensões de tração são prejudiciais para a resistência mecânica, a corrosão e o desgaste (abrasão a altas temperaturas);
- ✓ segundo Ebbrell et al. (2000), a lubrificação e refrigeração dependem fundamentalmente da entrada do fluido na região de corte peça/ferramenta, necessitando de grandes volumes. A função dos fluidos de corte é remover o calor excessivo gerado pelo processo de corte, lubrificar a região do corte,

remover o excesso de cavacos gerados, limpar o rebolo e minimizar a corrosão dos materiais envolvidos;

- ✓ a velocidade de avanço (mergulho) determina a faixa de remoção volumétrica do material da peça trabalhada, sendo que maiores velocidades de avanço implicam em: maiores forças de corte e níveis de ruídos, menores tempos de usinagem e maior produtividade, assim como maiores danos superficiais na peça (NGUYEN; ZHANG, 2003).

### 3.3.1 Ferramentas abrasivas

Na retificação a usinagem dos materiais é feita por meio de uma ferramenta abrasiva denominada de rebolo, cuja forma é de um disco, composto basicamente de grãos abrasivos e material ligante (também chamado aglomerante). Dentre os principais grãos abrasivos utilizados industrialmente na fabricação de rebolos pode-se citar o óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ), o carboneto de silício (SiC), o diamante (D) e o nitreto cúbico de boro (CBN).

Conforme Machado et al. (2015), o tamanho médio dos grãos abrasivos é o principal responsável para garantir a rugosidade da peça a ser retificada, cujos valores típicos para o parâmetro de superfície  $R_a$  variam de 0,15 a 2,5 $\mu$ m. Quanto menor o tamanho do grão abrasivo menor será a rugosidade da peça em processo de retificação. Já a dureza do rebolo está associada a capacidade do ligante de manter o abrasivo unido ao corpo do rebolo, e não à dureza dos seus grãos abrasivos. Rebolo duro é aquele capaz de manter o grão abrasivo sob condições severas de serviço, enquanto o rebolo macio é aquele que permite o desprendimento dos grãos abrasivos com relativa facilidade.

Na Tabela 4 são apresentadas as principais propriedades dos abrasivos e suas respectivas aplicações na usinagem dos materiais mais aplicados na engenharia.

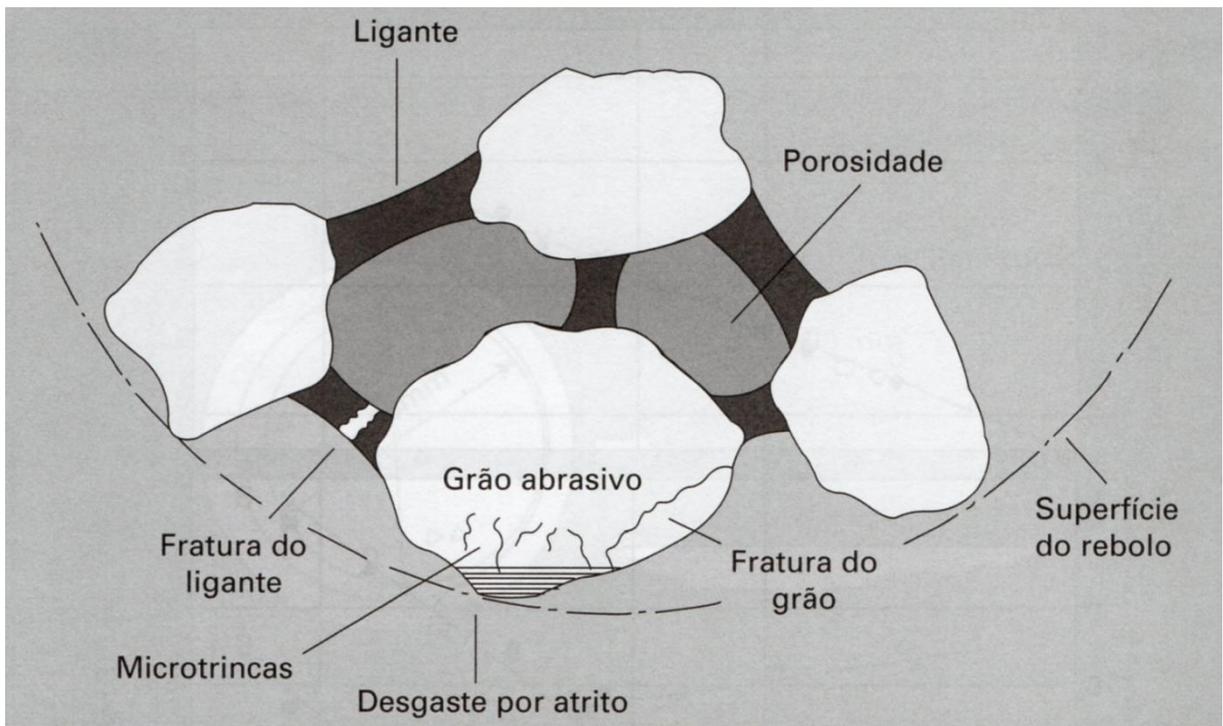
Tabela 4 - Propriedades e aplicações de abrasivos

Abrasivo	Estrutura cristalina	Dureza Knoop (Kgf/mm <sup>2</sup> )	Condutividade térmica relativa	Estabilidade térmica (°C)	Afinidade química	Aplicação
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Hexagonal	2100	1	1750	Cerâmicas, óxidos, vidros, rocha	Aços em geral, aço rápido, aços temperados e cementados, aços inox e ligas aeronáuticas
cBN	Cúbica	4.700	35-120	1.400	Nenhuma	Aços temperados, ligas aeronáuticas, ferrosos de alta dureza
SiC	Hexagonal	2.400	10	1.500	Materiais que assimilam carbono	Não metálicos, vidro, ferros fundidos, carboneto de tungstênio
Diamante	Cúbica	8.000	100-350	800	Materiais que assimilam carbono	Cerâmicas duras, não metálicos, não ferrosos, metal duro brasado

Fonte: Machado et al. (2015).

Para um melhor entendimento e visualização na Figura 4 é demonstrado esquematicamente a estrutura do rebolo com os grãos abrasivos, ligante (formando pontes entre os grãos abrasivos) e os poros.

**Figura 4 - Estrutura do rebolo**



Fonte: Machado et al. (2015).

A agressividade de um rebolo está relacionado com o tipo de ligante utilizado em sua fabricação, e conforme Malkin e Guo (2008) existem 6 (seis) tipos de materiais ligantes aplicados na fabricação dos rebolos convencionais, conforme segue:

- ✓ B : resinóide
- ✓ BF: resinóide reforçado
- ✓ E : goma laca
- ✓ O : oxiclureto de magnésio
- ✓ R : borracha
- ✓ RF: borracha reforçada
- ✓ S : silicato
- ✓ V : vitrificado

Já os rebolos superabrasivos são produzidos com 3 (três) tipos de materiais ligantes:

- ✓ B: resinóide
- ✓ V: vitrificado
- ✓ M: metálico

Segundo Malkin e Guo (2008), os materiais ligantes são responsáveis também para garantir os esforços do processo de retificação, as altas temperaturas, assim como resistir ao ataque químico dos fluidos de corte. Rebolos vitrificados representam 50% (cinquenta por cento) dos rebolos abrasivos convencionais, embora a tendência para velocidades de corte mais altas tenha levado à substituição por rebolos resinóides, especialmente para retificação pesada. Na Tabela 5 são demonstradas as principais características dos rebolos fabricados com ligantes vitrificado e resinóide.

**Tabela 5 - Principais características dos rebolos com ligantes vitrificado e resinóide**

<b>Ligante vitrificado</b>	<b>Ligante resinóide</b>
Vida longa	–
Facilidade de avivar e afiar	Boa qualidade de corte
Boa resistência a abrasão	–
Boa capacidade de manutenção da forma geométrica	–
Ligante mais frágil ao impacto	Ligante mais dúctil
Renovam mais facilmente o grão abrasivo	Melhor retenção do grão abrasivo
–	Grande número de formas e tamanhos
É o mais utilizado em função do seu custo reduzido	Aplicado em desbaste pesado, podendo ser utilizado em processos refrigerado e à seco
$v_s = 30 \text{ m/s}$	$v_s = 100 \text{ m/s}$

Fonte: Bianchi et al. (2011) e Machado et al. (2015).

Segundo Nailor (1989 apud BIANCHI et al., 2011) os rebolos superabrasivos apresentam um menor desgaste em sua superfície de corte, comparado com o

rebolos convencionais, além de apresentar um custo de produção unitária inferior na faixa de 30 a 50%. Neste caso, deve-se atentar para as variáveis de saída inerentes ao processo de retificação, para que sejam controladas de forma a obter a máxima eficiência. As principais variáveis são:

- ✓ tolerâncias dimensionais e geométricas;
- ✓ rugosidade;
- ✓ danos metalúrgicos (modificações na microestrutura do material do tipo: encruamento, tensões residuais e outras).

Conforme Guo (2007, apud BIANCHI et al., 2011) o rebolo superabrasivo de cBN possui grande eficiência na retificação de metais ferrosos e endurecidos (superligas de cobalto e níquel). Possui alta resistência ao desgaste, proporciona menores temperaturas de operação, o que resulta em menores danos térmicos e redução nas indesejáveis tensões residuais. Possui, também, grande condutividade térmica, resultando em uma menor quantidade de calor transmitida à peça, aproximadamente 20%, contra 60 a 70% utilizando o rebolo de óxido de alumínio. Isto contribui positivamente na qualidade final da peça usinada.

Finalmente, Machado et. al (2015) evidencia que a especificação de um rebolo deve apresentar os seguintes dados técnicos:

- ✓ tipo de material abrasivo;
- ✓ tamanho dos grãos abrasivos (granulometria);
- ✓ dureza;
- ✓ estrutura (ou porosidade);
- ✓ tipo de ligante.

### **3.3.2 Retificação cilíndrica de mergulho**

A retificação cilíndrica de mergulho consiste no contato do rebolo em alta velocidade periférica contra a superfície da peça a ser retificada, a qual gira à uma baixa velocidade, porém em sentido contrário (MALKIN; CHIU, 1993). Este processo é usado quando a espessura do rebolo é maior que o comprimento da peça a ser retificada e, também, quando não se utiliza o movimento da mesa, trabalhando somente com o avanço do rebolo sobre a peça de forma contínua (MELLO, 2011).

Na Tabela 6 são demonstrados os principais parâmetros do processo de retificação.

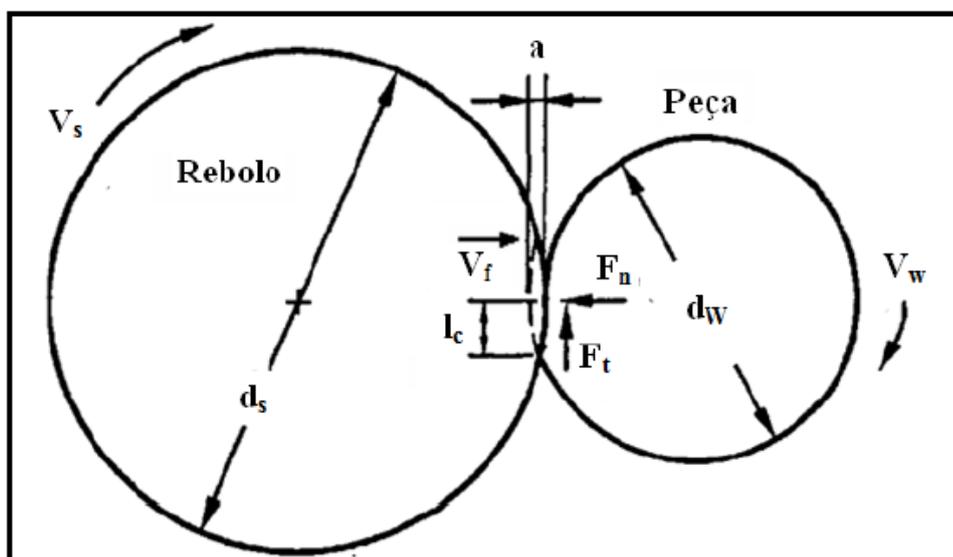
**Tabela 6 - Parâmetros de processo de retificação**

Símbolo	Descrição	Unidade	Valores	Complemento
$v_s$	Velocidade periférica do rebolo	m/s	10 a 45 90 a 120	Rebolo convencional Rebolo superabrasivo
$v_w$	Velocidade periférica da peça	m/min	10 a 25	–
$a_e$	Penetração de trabalho	mm	décimo de mm centésimo de mm milésimo de mm	Os baixos valores são necessários para obtenção de tolerâncias estreitas (IT4 ou IT3)

Fonte: Machado et al. (2015).

Na Figura 5 é apresentado o processo de retificação cilíndrica externa de mergulho, o qual é composto por: penetração de trabalho ( $a_e$ ), comprimento de contato ( $l_c$ ), velocidade periférica do rebolo ( $v_s$ ), velocidade de mergulho ( $v_f$ ), velocidade periférica da peça ( $v_w$ ), força normal à superfície de contato peça/rebolo ( $F_n$ ), força tangencial à superfície de contato ( $F_t$ ).

**Figura 5 - Variáveis do processo de retificação cilíndrica externa de mergulho**



Fonte: Malkin e Chiu (1993).

Alguns destes parâmetros influenciam diretamente nos parâmetros de caracterização da superfície, dentre os quais pode-se destacar o acabamento superficial e tensão residual.

Segue abaixo a conceituação destes parâmetros principais:

- ✓ penetração de trabalho ( $a_e$ ): representa o quanto a ferramenta penetra em relação ao plano de trabalho e é medida perpendicularmente à direção de avanço do rebolo ou peça. Elevados valores de penetração do trabalho implica em aumentar a área de contato entre peça e rebolo, aumentando o número de grãos do rebolo em contato com a superfície da peça (DINIZ et al., 2003);
- ✓ velocidade de mergulho ( $v_f$ ): taxa de remoção de material, sendo influenciado pelos seguintes fatores: rigidez da retificadora, quantidade de material a ser usinado, acabamento desejado, quantidade de fluido de corte e material da peça (DINIZ et al., 2003);
- ✓ velocidade do rebolo ( $v_s$ ): é dado em m/s, tendo influência na força tangencial de corte e no acabamento superficial. Altas velocidades de corte estão ligadas aos rebolos superabrasivos e retificadoras mais rígidas, sendo possível reduzir a espessura do cavaco, redução das forças de retificação, menores taxas de desgastes do rebolo e baixas rugosidades (DAMASCENO, 2010).

### 3.3.3 Dressagem do rebolo

A operação de dressagem do rebolo tem como finalidade executar a afiação da ferramenta abrasiva (rebolo), eliminando a superfície desgastada e restabelecendo a sua capacidade de corte (WANG, 2008). Ela é de suma importância, pois a retificação com o rebolo desgastado gera danos a integridade da peça (MACHADO et al., 2015). A temperatura na interface rebolo-peça aumenta com a perda da agressividade (perda de afiação), provocando transformações na estrutura da peça, aparecimento de queimas ou trincas na sua superfície, assim como, elevação de tensões residuais (BIANCHI et al., 1996).

A execução da operação de dressagem depende da sensibilidade e habilidade do operador, pois quando esta é executada após o momento ideal, possibilita o surgimento de trincas, queimas superficiais, ou ainda peças com elevados índices de rugosidade. Caso contrário, quando é executada previamente,

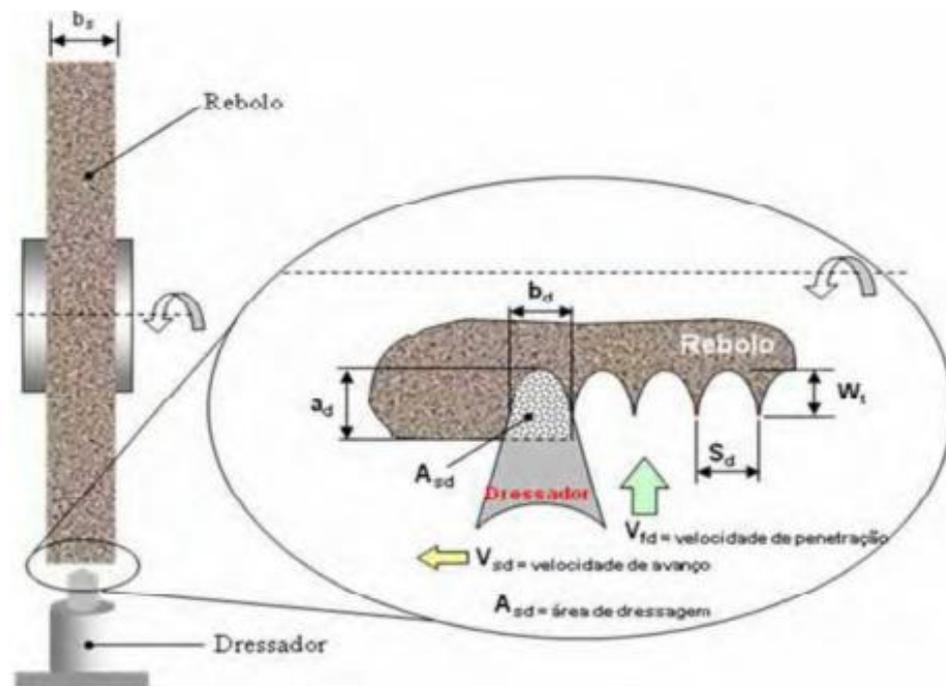
causa desgaste desnecessário do rebolo, já que este ainda possuía condições de produzir peças dentro dos limites especificados pelo projeto, reduzindo o tempo útil de produção e elevando o custo da peça (BIANCHI, 1992).

A dressagem ou afiação consiste em preparar o rebolo, previamente a sua aplicação, através da usinagem da sua superfície de trabalho, geralmente utilizando uma ferramenta de diamante, denominada dressador. As finalidades da dressagem são:

- ✓ manter a agressividade do rebolo por meio de remoção dos grãos abrasivos desgastados e os cavacos de material incrustados entre os grãos;
- ✓ obtenção de concentricidade entre a superfície de trabalho e o eixo de rotação do rebolo;
- ✓ manter as formas geométricas (perfis) do rebolo;
- ✓ produzir peças dentro das dimensões e rugosidades exigidas;
- ✓ evitar a ocorrência de altas temperaturas na interface peça/rebolo.

O grau de recobrimento  $U_d$  é um parâmetro importante na retificação, por ser um excelente caracterizador das condições de afiação de um rebolo, pois engloba todas as condições de dressagem (MINKE, 1999). A operação de dressagem, executada pelo dressador de ponta única, é quantificada pelo grau de recobrimento do rebolo ( $U_d$ ), onde  $U_d=1$  produz na superfície do rebolo uma rosca com largura igual ao passo de dressagem ( $S_d$ ),  $U_d<1$  o dressador não atua sobre toda a superfície de trabalho, deixando grãos abrasivos gastos no rebolo e  $U_d>1$  produz uma superfície com um número elevado de grãos abrasivos, aumentando a agressividade do rebolo com melhoria do acabamento da peça (MACHADO et al., 2015). A Figura 6 representa a operação de dressagem com um dressador de ponta única.

**Figura 6 - Esquema do processo de dressagem de rebolos**



Fonte: Bianchi (1990), adaptado

### 3.4 Fluidos de corte

Os fluidos de corte são normalmente utilizados para melhorar o desempenho do processo de usinagem, tendo como funções básicas lubrificar e refrigerar a região de interface da ferramenta-peça. A eficiência do fluido de corte vai depender da sua aplicação correta, da velocidade do fluido, quantidade do fluxo, direção da aplicação, projeto do bocal e da seleção adequada do fluido de corte, o qual deve possuir composição química e propriedades corretas para atender as necessidades de um processo de usinagem específico (SILVA; BIANCHI; OLIVEIRA, 2001; MACHADO et al., 2015).

De acordo com Machado et al. (2015) as principais funções dos fluidos de corte são:

- ✓ lubrificar à baixas velocidades de corte;
- ✓ refrigerar à altas velocidades de corte;
- ✓ remover os cavaco à altas velocidades de corte;
- ✓ proteger a máquina, a ferramenta e a peça contra oxidação;
- ✓ beneficiar o acabamento superficial da peça;
- ✓ diminuir o desgaste da ferramenta.

Segundo Machado et al. (2015), os fluidos de corte são encontrados na forma gasosa, sólida e líquida, sendo os fluidos líquidos os mais comuns, e são classificados de acordo com a sua categoria: óleos, emulsões e soluções. Os óleos, de origem vegetal e animal, foram os primeiros lubrificantes a serem utilizados na usinagem, tendo caído em desuso devido ao seu alto custo e rápida deteriorização, sendo atualmente empregados como aditivos nos fluidos minerais, com objetivo de melhorar suas propriedades lubrificantes.

Os óleos minerais são hidrocarbonetos obtidos a partir do refino do petróleo, sendo que os óleos integrais, são óleos minerais puros ou com aditivos. Sua aplicação tem sido substituída pelos óleos emulsionáveis devido ao seu alto custo, baixo ponto de fulgor, ineficiência a altas velocidades de corte, baixo poder refrigerante, formação de fumos, além de oferecer riscos à saúde do operador (MACHADO et al., 2015)

As emulsões são classificadas em fluidos emulsionáveis e semissintéticos, sendo os emulsionáveis compostos por óleos minerais ou vegetais adicionados à água na proporção de 1:10 a 1:100, mais agentes emulsificantes ou surfactantes que garantem a homogeneidade da mistura. Os fluidos semissintéticos caracterizam por apresentar entre 5% a 50% de óleo vegetal ou mineral, além de aditivos e compostos químicos que se dissolvem na água (MACHADO et al., 2015).

As soluções são compostos monofásicos de óleos que se dissolvem completamente em água, sem necessidade de adição de agentes emulsificantes. As soluções, também chamadas de fluidos sintéticos, caracterizam por apresentar óleo mineral ou vegetal em sua composição. São compostos de sais orgânicos e inorgânicos, aditivos de lubricidade, biocidas, inibidores de corrosão, os quais são adicionados à água, apresentando vida longa e reduzem o número de trocas de máquina (MACHADO et al., 2015).

De acordo com Marinescu et al. (2016), a seleção do fluido de corte é de fundamental importância para se obter as condições favoráveis de lubrificação e refrigeração. Tipo, base do óleo, aditivos e concentração são fatores importantes para a obtenção de uma eficiente refrigeração e lubrificação. Os requerimentos de refrigeração e lubrificação são reunidos de diferentes formas para cada necessidade particular de lubri-refrigeração para um determinado processo de usinagem. Dependendo das condições de contato no processo, as propriedades de

refrigeração e lubrificação do fluido de corte tem impacto substancial no processo e no resultado do trabalho.

Na Tabela 7 é apresentada a classificação dos fluidos de corte de base líquida.

**Tabela 7 - Classificação dos fluidos de corte**

<b>Classes</b>	<b>Sub-classes</b>	<b>Grupos</b>
Óleos Integrais (óleos não miscíveis em água)	Óleos Naturais	Óleos animais, óleos vegetais e óleos de peixe
	Óleos Minerais	Óleos parafínicos, óleos olefínicos e óleos aromáticos
	Óleos Sintéticos	Óleos de hidrocarbonetos saturados e óleos de estrutura complexa
Fluidos de corte a base de água	Soluções	Soluções de sais minerais e soluções sintéticas
	Emulsões	Emulsões de óleo (óleos solúveis) e emulsões sintéticas

Fonte: Marinescu et al. (2016).

### **3.5 Usinagem com altas velocidades**

A participação da usinagem no custo final dos componentes mecânicos é significativa, pois envolve aquisição de máquinas e ferramentas com avançada tecnologia. Devido à esse motivo, nos últimos anos a usinagem com alta velocidade (HSM - *High Speed Machining*) tem ganhado importância e, assim, tem sido dada uma maior atenção ao desenvolvimento e à disponibilização no mercado das tecnologias para velocidades de avanço e rotações muito elevadas. Mas, antes que a tecnologia HSM possa ser empregada de uma forma econômica, todos os componentes envolvidos no processo de usinagem, incluindo a estrutura da

máquina, o eixo-árvore, a ferramenta e as pessoas envolvidas precisam estar afinados com as peculiaridades desse novo processo, visando a obtenção máxima dos benefícios desta tecnologia, assim como atender os requisitos de segurança exigidos. As máquinas devem satisfazer requisitos particulares de segurança e as ferramentas também devem estar à altura das condições severas exigidas pelas altas velocidades de corte. O corte com altas velocidades pode ser usado para todo processo de usinagem de metais leves, não-ferrosos e plásticos. Para aço, ferro fundido e ligas de difícil usinabilidade, é adequado apenas para a etapa de usinagem final (acabamento) (SILVA; COELHO; CATAI, 2004) .

O fresamento é a operação em que a HSM/HSC ganhou maior destaque, mas não está restrito a essa operação. Altas velocidades de corte também são empregadas no torneamento de ferros fundidos, alumínio ou outros não ferrosos, superligas resistentes ao calor e em especial no torneamento de materiais endurecidos. A HSM/HSC é utilizada, sobretudo para a produção de componentes automotivos e componentes das indústrias de engenharia em geral e tem como vantagem principal a alta produtividade e, em algumas aplicações, o acabamento da superfície também aparece como fator extremamente positivo, como no caso do torneamento de materiais endurecidos (LANDI, 2003; DUAN; DOU; WANG, 2010).

Os termos mais aplicados a usinagem com altas velocidades são HSM (*high speed machining*) e HSC (*high speed cutting*). Conforme Coelho et al. (2009), quando ocorrem aumentos simultâneos da velocidade de corte e do avanço, com significativo impacto no desempenho do processo de usinagem, a técnica é denominada como HPM (*high performance machining*).

Segundo Oliveira (2003) a velocidade que caracteriza a usinagem em altas velocidades ainda é discutida entre os pesquisadores porque depende diretamente do material a ser usinado e existem diferenças muito grandes nos valores, especialmente quando se trata da usinagem dos materiais pertencentes ao grupo de aços temperados e ligas termorresistentes.

Para Brandão e Coelho (2011), a usinagem a altas velocidades pode variar em função do material a ser usinado, como no caso do fresamento ou torneamento de ligas de titânio, nos quais as velocidades de corte entre 100 e 500m/min são consideradas altas. Por outro lado, para ligas de alumínio, essa faixa de velocidade é considerada convencional, pois para este material a velocidade de corte pode atingir 10.000m/min. Com relação ao processo de retificação, a faixa de velocidade

de corte convencional varia de 1200 a 3600 m/min, porém quando é aplicado a usinagem com alta velocidade essa faixa aumenta significativamente entre 12.000 e 36.000m/min.

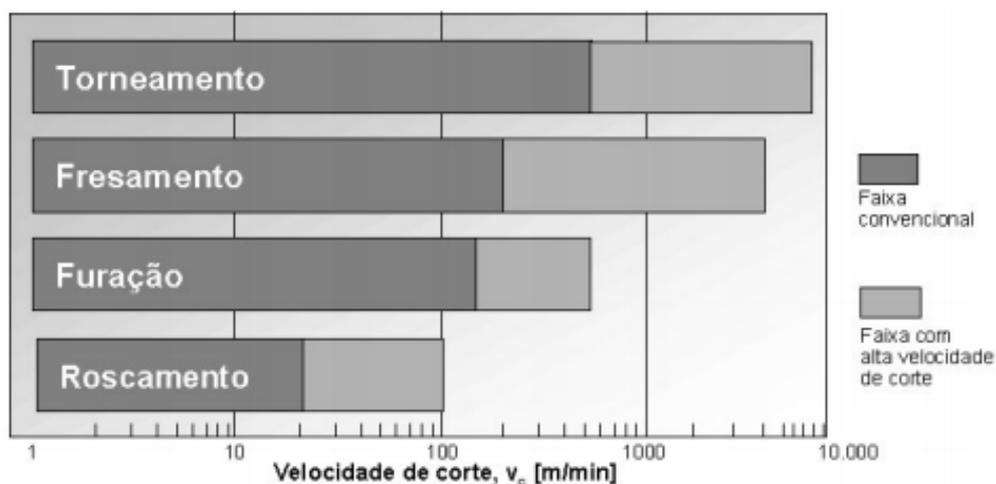
Conforme Sandvik (2002), a tecnologia HSM é capaz de reduzir substancialmente os tempos de processos e oferecer acabamentos melhores. Neste sentido, as máquinas de usinagem rápida são cada vez mais procuradas no Brasil. Os motivos que levam as indústrias a procurarem soluções baseadas em HSM são a redução nos tempos de processo, que não raras vezes caem de dias para horas, e as exigências técnicas, cada vez maiores, que tornam impossível a utilização de outras tecnologias para usinar determinadas peças, como as produzidas em liga de alumínio para a indústria aeroespacial.

Segundo Coelho et al. (2009) a implantação da tecnologia HSM aplicada a usinagem dos materiais endurecidos envolve:

- ✓ máquinas operatrizes com alta potência e rotação, tendo em vista a energia específica dos aços endurecidos;
- ✓ ferramentas de corte com alta resistência ao desgaste e alta dureza à altas temperaturas.

De forma prática, Machado et al. (2015) considera que a usinagem com altas velocidades envolve velocidades de corte cerca de três vezes acima da velocidade convencional. Segundo Brandão e Coelho (2011), ainda existe a necessidade de uma definição precisa do marco divisório entre a velocidade convencional e altas velocidades de corte, já que para cada processo de usinagem há lacunas a serem preenchidas para adequações dentro de normalizações ou definições mais precisas. De acordo com Müller e Soto (1999), as faixas de velocidades de corte convencional e com alta velocidade estão relacionadas com o processo de usinagem específico, conforme mostra a Figura 7.

**Figura 7 - Velocidades de corte convencional e HSC**



Fonte: Muller e Soto (1999).

Ferramentas de corte de cerâmica e PcBN tem sido aplicadas nas usinagens dos materiais endurecidos, utilizando altas velocidades de corte, pois apresentam alta resistência ao desgaste abrasivo e à altas temperaturas.

No processo de torneamento, a tecnologia HSM tem sido bem sucedida, pois máquinas-ferramentas com rotações até 9.000rpm tem sido aplicadas (GRZESIK, 2003), e máquinas especiais com rotações de 12.000rpm já encontram-se disponíveis (COELHO et al., 2009).

Conforme Sandvik (2002), um dos segmentos de mercado que mais busca as máquinas HSM (*high speed machining*) é o de moldes e matrizes, denominado matrizaria. Grande parte das empresas do setor necessita investir neste tipo de máquina porque precisa ganhar, sobretudo, agilidade aliada à qualidade. A obsolescência dos produtos é programada para ser cada vez mais rápida. Aplicando a tecnologia HSM (*high speed machining*) os ganhos de produtividade são possíveis porque a usinagem de alta velocidade permite alterações no processo produtivo, reduzindo ou simplificando os passos do processo convencional. No processo convencional se fazia, pela ordem, o desbaste, semi-acabamento, acabamento, tratamento térmico, polimento e ajuste. Dependendo do molde, havia o processo intermediário de eletroerosão, o que ainda exigia a produção de um eletrodo. Já no processo HSM (*high speed machining*) elimina-se consideravelmente a parte de eletroerosão e polimento. E o tratamento térmico, que era um processo intermediário, passa a ser feito antes de se agregar qualquer valor de usinagem à

peça. É possível pegar um bloco que já recebeu o tratamento térmico e se fazer, numa mesma máquina, desbaste, semi-acabamento e acabamento, sem contar que o polimento, que é uma atividade artesanal, pode muitas vezes ser dispensado, porque as peças saem da máquina com grau de qualidade superficial elevada.

A usinagem com alta velocidade apresenta precisão dimensional maior comparada à usinagem convencional e as peças trabalhadas possuem uma rugosidade baixa. É considerado um processo de alta produtividade, o que tem levado as indústrias ao desenvolvimento de pesquisas e investimentos que melhorem o desempenho da HSM, principalmente no que se refere às máquinas e ferramentas de corte (OLIVEIRA, 2003).

### **3.6 Caracterização da superfície usinada**

Durante a usinagem ocorrem alterações superficiais e subsuperficiais que precisam ser identificadas e controladas. Atenção especial deve ser dado à componentes que trabalharão sujeitos a altas tensões, em particular tensões alternadas, sob altas temperatura, ambientes corrosivos, porque as suas propriedades mecânicas podem ser alteradas. Estas alterações podem ser de origem mecânica ou metalúrgica (MACHADO et al., 2015).

Segundo Machado et al. (2015) existem várias técnicas para avaliação qualitativa e quantitativa da influência da usinagem, podendo ser através de ensaios destrutivos e não destrutivos. Algumas são de simples execução e baixo custo (inspeção visual por microscopia ótica, medição de dureza, análise metalográfica, partículas magnéticas, líquido penetrante), outras demandam altos tempos e altos custos (difractometria por raio X e ensaios de fadiga). Portanto, devemos utilizar estas técnicas e ensaios visando caracterizar a superfície usinada.

#### **3.6.1 Parâmetros de superfície bidimensionais (2D)**

Segundo Machado et al. (2015) a rugosidade são irregularidades finas devido ao processo de corte (marcas de avanço, aresta postiça, desgaste da ferramenta e outros). A peça usinada é inspecionada de forma macrogeométrica, onde são avaliadas as dimensões, forma, orientação, e de forma microgeométrica, onde é

avaliado a rugosidade através dos parâmetros próprios para sua quantificação. A rugosidade é avaliada por diversos parâmetros, classificados em:

- ✓ de amplitude: alturas dos picos, profundidade dos vales, ou por ambos;
- ✓ de espaço: espaçamento do desvio do perfil ao longo da superfície;
- ✓ híbridos: combinação dos parâmetros de amplitude e de espaço.

Diversas organizações, como DIN, JIS e ISO dispõem de normas técnicas para análise da rugosidade de superfícies. A Tabela 8 demonstra os principais parâmetros utilizados na quantificação e caracterização da rugosidade.

**Tabela 8 - Parâmetros de superfície bidimensionais (2D)**

<b>Símbolo</b>	<b>Nome</b>	<b>Definição</b>
Ra	Desvio aritmético médio do perfil em avaliação	Média dos valores absolutos das ordenadas no comprimento de amostragem.
Rq	Desvio médio quadrático do perfil em avaliação	Raiz quadrada da média dos valores das ordenadas no comprimento de amostragem.
Rt	Altura total do perfil	Soma da maior altura de pico do perfil e da maior profundidade de vale do perfil no comprimento de avaliação.
Rz	Altura máxima do perfil	Soma da altura máxima dos picos e a maior das profundidades dos vales no comprimento de amostragem.
Rsk	Fator de assimetria do perfil em avaliação	Quociente entre o valor médio dos valores das ordenadas e Rq ao cubo, no comprimento de amostragem.
Rku	Fator de achatamento do perfil em avaliação	Quociente entre o valor médio dos valores das ordenadas à quarta potência e o valor de Rq à quarta potência no comprimento de amostragem.

Fonte: Machado et al. (2015); Norma ABNT NBR ISO 4287 (2002).

Os principais parâmetros de superfície bidimensionais (2D) utilizados neste trabalho estão descritos na Tabela 9.

**Tabela 9 - Perfil de medição e parâmetros**

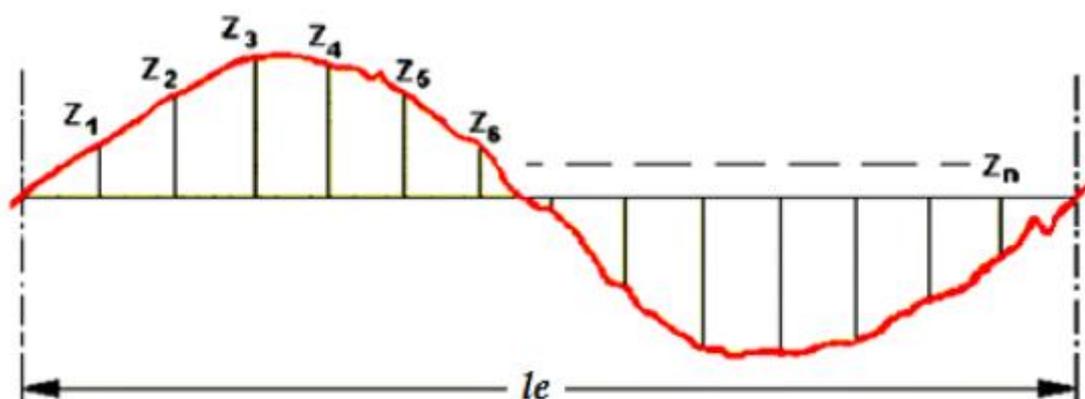
Perfil de medição	Parâmetros
R	Ra, Rz, Rq, Rt, Rp, Rv, Rsm Rsk, Rku, RΔq
DIN 4776	Rpk, Rvk, Rk, Mr1, Mr2, A1, A2, Vo

Fonte: Manual do usuário Mitutoyo, medidor de rugosidade modelo SJ301

### Desvio aritmético médio do perfil em avaliação (Ra)

É o parâmetro mais utilizado e conhecido na área industrial, representa o desgaste da ferramenta e está disponível nos instrumentos de medição mais simples. É definido como a média aritmética dos desvios do perfil, tendo como referencia a linha média, e é definido sobre um comprimento de amostragem ( $l_e$ ) conforme Figura 8. Isoladamente, não é suficiente para identificar algumas características importantes da superfície. Superfícies geometricamente diferentes podem apresentar Ra bem próximos ou iguais, mas desempenho em serviço bastante diversos (SEDLACEK; PODGORNIK; VIZINTIN, 2009).

**Figura 8 - Desvio aritmético médio do perfil em avaliação (Ra)**



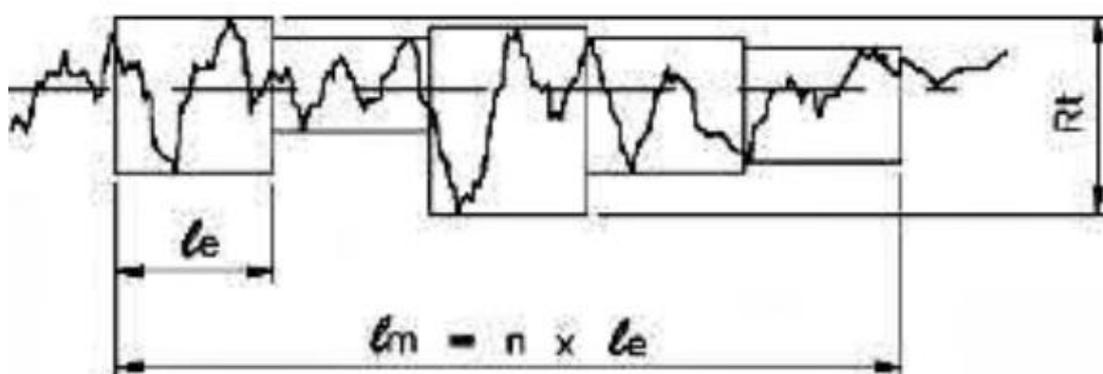
Fonte: Oliveira (2004).

De acordo com Freitas (2006), a rugosidade Ra define apenas a dimensão do perfil médio da rugosidade, não dando informações sobre a forma da rugosidade, o que poderá influenciar o desempenho e funcionabilidade da superfície. Dependendo da aplicação, este parâmetro deveria ser avaliado juntamente com outro parâmetro, por exemplo o Rsk (fator de assimetria do perfil em avaliação), que pode ser mais útil em aplicações tribológicas.

### Altura total do perfil (Rt)

É definido como a distância vertical entre o pico mais alto e o vale mais profundo no comprimento de avaliação ( $l_m$ ), conforme representado na Figura 9. As aplicações deste parâmetro são: superfícies de vedação, superfícies dinamicamente carregadas, parafusos altamente carregados e superfícies de deslizamento em que o perfil efetivo é periódico.

**Figura 9 - Altura total do perfil (Rt)**



Fonte: Souza (2007).

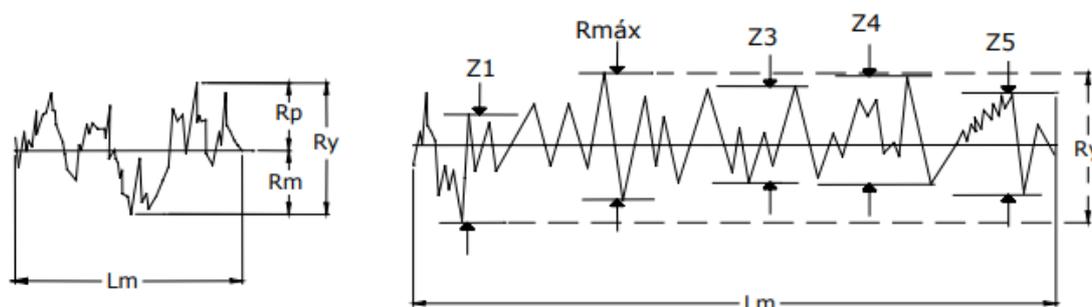
### Altura máxima do perfil (Rz)

É a média aritmética dos 5 valores da rugosidade parcial  $Z_i$ . A rugosidade parcial  $Z_i$  é definida como a soma dos valores absolutos das ordenadas dos pontos de maiores afastamentos (acima e abaixo da linha média) contidos em cada comprimento de amostragem  $l_e$ .

Rugosidade máxima ( $R_{m\acute{a}x}$ ): É o maior valor das rugosidades parciais  $Z_i$ , que se apresenta no percurso de medição  $L_m$  (Figura 10). A norma DIN 4762 (1984) indica um parâmetro semelhante ao  $R_{m\acute{a}x}$  para medição de rugosidade na Alemanha e é designada por  $R_y$ .  $R_y$  é a máxima distância pico-vale, dentro do

comprimento de avaliação. A análise gráfica dos parâmetros  $R_z$ ,  $R_{max}$  e  $R_y$  estão demonstradas na Figura 10.

**Figura 10 - Análise gráfica dos parâmetros  $R_z$ ,  $R_{max}$ ,  $R_y$**



Fonte: Manual do usuário Mitutoyo, medidor de rugosidade modelo SJ301.

### **Coeficiente de vazio ( $K_p$ )**

Segundo Pawlus e Michalski (1992) o desgaste linear e acabamento estão relacionados com o coeficiente de vazio, o qual é considerado importante parâmetro tribológico para avaliar o desgaste superficial da peça. Quanto menor o parâmetro  $K_p$  menor será o desgaste superficial e melhor o acabamento superficial da peça. Este parâmetro é utilizado na fabricação de superfícies brunidas de camisas de cilindros. Para o cálculo do coeficiente de vazio utiliza-se a Equação 1.

$$K_p = \frac{R_p}{R_t} \quad (1)$$

Onde:

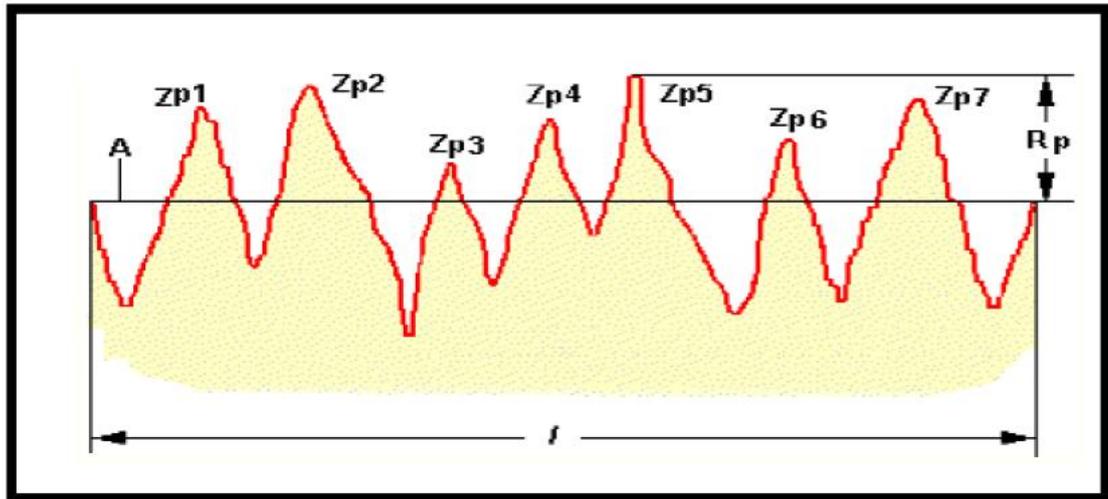
$R_p$  = distância do pico mais elevado até a linha média

$R_t$  = distância entre o pico mais elevado e o vale mais profundo

### **Altura máxima do pico do perfil ( $R_p$ )**

É o maior pico em relação a linha média. A análise gráfica do parâmetro  $R_p$  é demonstrada na Figura 11.

**Figura 11 - Análise gráfica do parâmetro  $R_p$**

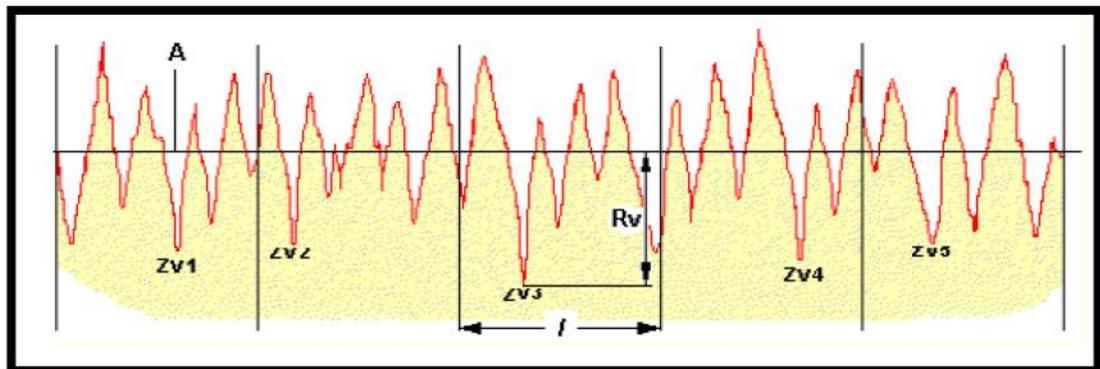


Fonte: Taylor Hobson Precision (2000).

### **Profundidade máxima do vale do perfil ( $R_v$ )**

É o vale mais profundo em relação a linha média. A análise gráfica do parâmetro é demonstrada na Figura 12.

**Figura 12 - Análise gráfica do parâmetro  $R_v$**

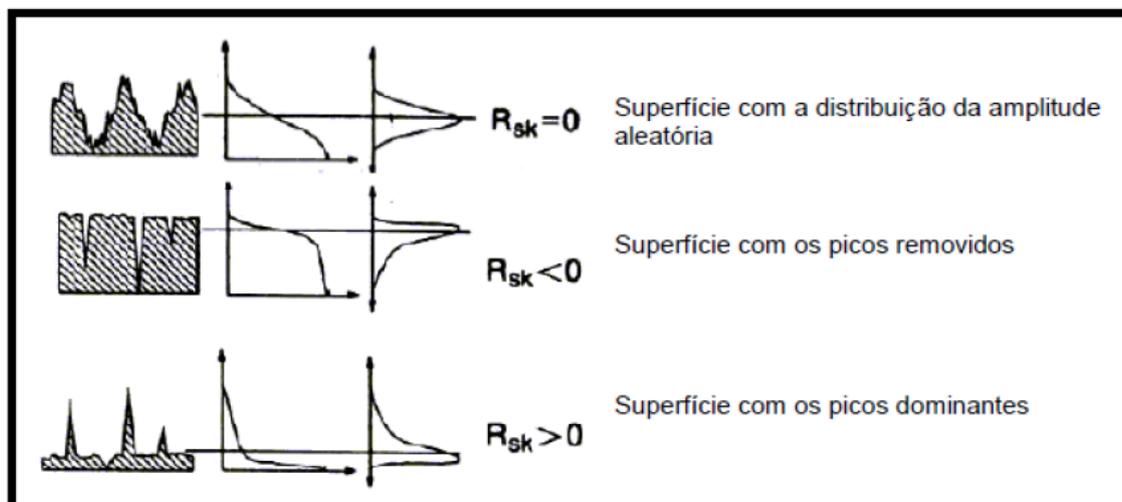


Fonte: Taylor Hobson Precision (2000).

### **Fator de Assimetria do perfil em avaliação ( $R_{sk}$ )**

O parâmetro  $R_{sk}$  está relacionado com o formato da curva de distribuição das amplitudes das irregularidades em relação a linha de referência. A representação gráfica do parâmetro é demonstrada na Figura 13.

**Figura 13 - Representação gráfica do parâmetro Rsk**



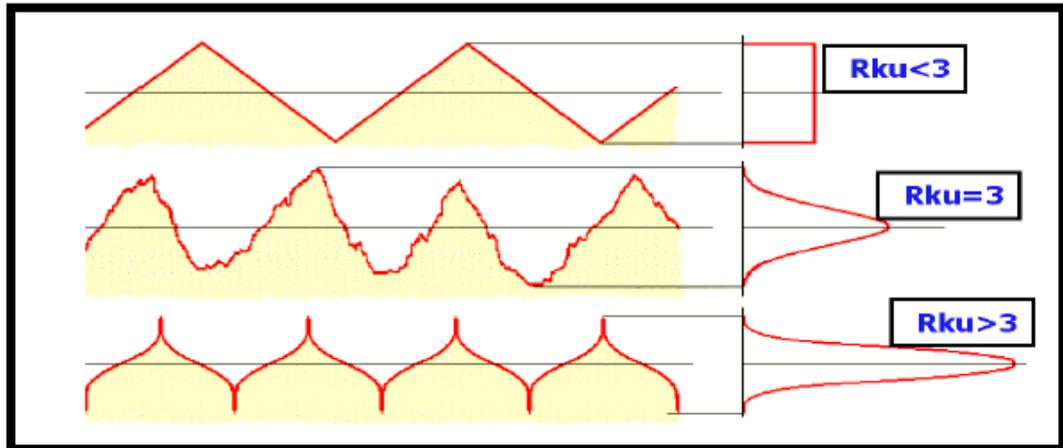
Fonte: Taylor Hobson Precision (2000).

Uma característica de uma boa superfície de apoio é que ela deve ter uma inclinação negativa, indicando a presença de poucos pontos que podem desgastar-se rapidamente e vales profundos relativos para reter lubrificante. Uma superfície com uma inclinação positiva é propensa a ter característica de pouca retenção de óleo, devido a falta de vales profundos necessários para reter lubrificante. Superfícies com uma assimetria positiva, tais como superfícies torneadas tem elevados picos que se projetam acima da linha média (LEACH, 2014).

#### **Fator de achatamento do perfil em avaliação (Rku)**

Este parâmetro mede a forma da curva de distribuição das amplitudes, ou seja, o afinamento ou achatamento desta curva. Na prática, elevados valores de curtose ( $Rku > 3$ ), indicam que as irregularidades superficiais são pontiagudas, ou seja, mais suscetíveis a desgaste prematuro do que superfícies não pontiaguadas, com valores de curtose baixos ( $Rku < 3$ ) (FREITAS, 2006). A representação gráfica do parâmetro Rku é demonstrada na Figura 14.

**Figura 14- Representação gráfica do parâmetro Rku**



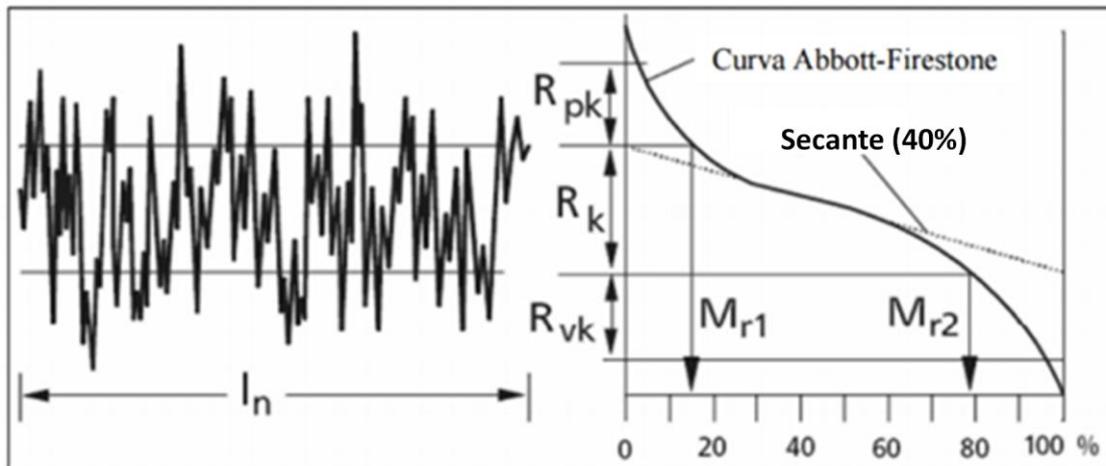
Fonte: Taylor Hobson Precision (2000).

### **Curva de Abbot-Firestone**

No ano de 1933, Abbott e Firestone desenvolveram a curva denominada Abbott-Firestone, a qual descreve todas as propriedades de amplitude de uma superfície. Ela é construída a partir da razão de material da superfície do perfil em função da profundidade e possui limites de 0 a 100%. Esta curva avalia a rugosidade através do perfil de medição DIN 4776, onde são avaliados a família de parâmetros Rk ( $R_{pk}$ ,  $R_{vk}$ ,  $R_k$ ,  $Mr_1$ ,  $Mr_2$ ,  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $V_o$ ).

As normas ISO 13565-1 (1996), ISO 13565-2 (1996) e ISO 13565-3 (1998) recomendam o uso dos parâmetros Rk em substituição ao parâmetro  $R_a$  no projeto e fabricação de componentes ultracríticos, tipo: cilindros, injetores de combustíveis, pistões e anéis de vedação (FENG; WANG; ZHIGUANG, 2002). É muito aplicado na indústria automobilística. A representação gráfica da Curva Abbott-Firestone e os parâmetros funcionais (família Rk) são demonstrados na Figura 15.

**Figura 15 - Gráfico da Curva Abbott-Firestone e os parâmetros Rk**



Fonte: Taylor Hobson Precision (2000).

Onde:

- ✓  $R_{pk}$ : representa a quantidade de superfície que será desgastada durante a carga inicial;
- ✓  $R_k$ : identifica a quantidade de superfície que suportará a maior parte da carga;
- ✓  $R_{vk}$ : é a quantidade de superfície que absorverá a maior parte de lubrificante;
- ✓  $M_{r1}$ : é a relação de material que conecta  $R_{pk}$  e  $R_k$ ;
- ✓  $M_{r2}$ : é a relação de material que conecta  $R_k$  e  $R_{vk}$ .

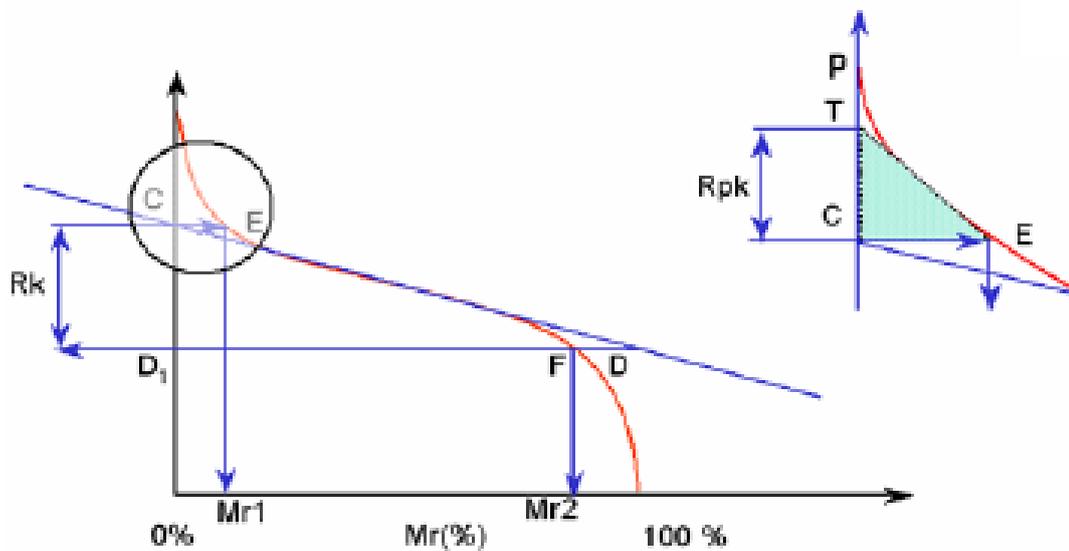
Para o cálculo dos parâmetros  $R_k$ , a curva se aproxima de uma linha retilínea, Curva Abbott-Firestone Linha Reta, que a secciona em três zonas de rugosidades parciais. A primeira zona ( $R_{pk}$ ) é a região dos picos, a região central ( $R_k$ ) é denominada profundidade da rugosidade do núcleo e a região inferior ( $R_{vk}$ ) é chamada profundidade reduzida dos vales.

### **Profundidade da rugosidade do núcleo ( $R_k$ )**

O parâmetro  $R_k$  está associado à parte intermediária do conjunto de rugosidade. Para determinar este parâmetro é traçado uma secante de menor inclinação possível sobre a curva de Abbott-Firestone, cuja componente horizontal corresponde a 40% dos pontos do perfil medido (ISO 13565-2, 1996). Por meio deste parâmetro é possível medir a taxa de desgaste de uma superfície em contato



Figura 17 - Representação gráfica do parâmetro  $R_{pk}$



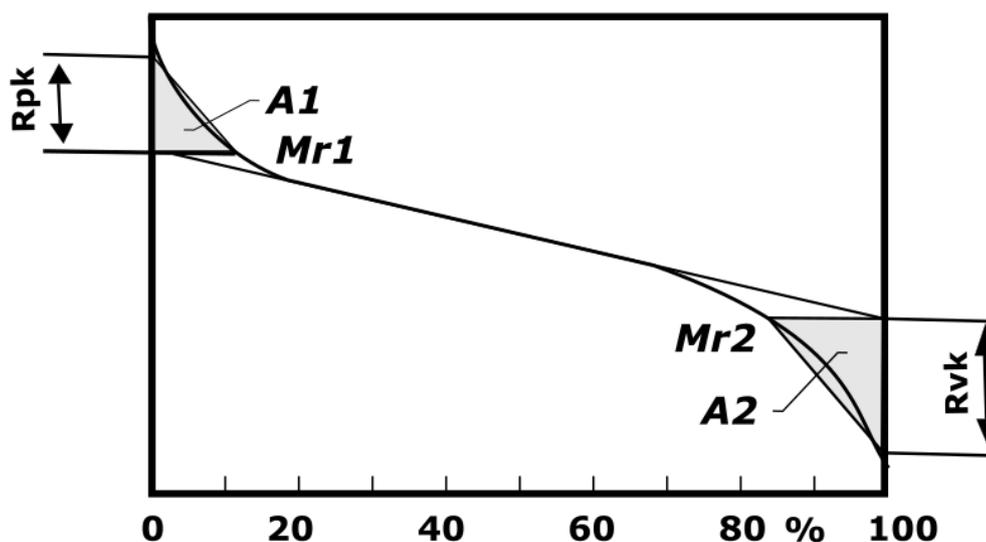
Fonte: Oliveira (2004).

### Profundidade reduzida dos vales ( $R_{vk}$ )

O parâmetro  $R_{vk}$  caracteriza a porção do perfil que está abaixo da rugosidade central e está relacionado com a capacidade de uma superfície em reter algum tipo de fluido. Este parâmetro tem aplicação na indústria automotiva e aeroespacial, na fabricação de motores de combustão interna, especificamente em pontos de lubrificação e retenção de fluido (OLIVEIRA, 2004). A representação gráfica do parâmetro  $R_{vk}$  está demonstrado na Figura 18.



**Figura 19 - Representação gráfica do parâmetro A1 e A2**



Fonte: Taylor Hobson Precision (2000).

### **Área correspondente à região dos vales (A2)**

A área A2 está compreendida entre a curva de Abbott-Firestone e a linha inferior da região central, definindo o volume de vazios na zona de vale. Quanto maior o volume de vazios na zona de vale melhor é a capacidade da superfície usinada na retenção de lubrificante (DONG; SULLIVAN; STOUT, 1994). A representação gráfica da área A2 está demonstrada na Figura 19.

### **3.6.2 Parâmetros de superfície tridimensionais (3D)**

De acordo com Dong, Sullivan e Stout (1994), tem aumentado as pesquisas científicas sobre a caracterização da superfície 3D, aliado a uma emergente comercialização de equipamentos de medição 3D (perfilômetros), evidenciando assim a importância da análise topográfica da superfície 3D. A análise dos parâmetros de superfície bidimensionais (2D) foi realizado na ciência e engenharia por mais de 50 anos, porém tem ocorrido claras evidências de uma crescente necessidade de análise da superfície através dos parâmetros de superfície tridimensionais (3D), devido as limitações da caracterização 2D. Contudo, aspectos positivos obtidos na definição de parâmetros de superfície bidimensionais (2D), por longos anos, são levados em consideração na definição de parâmetros de superfície tridimensionais (3D), através da correlação de alguns parâmetros.

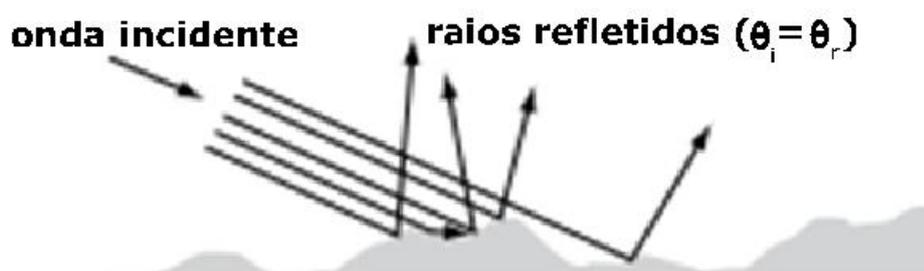
Conforme Franco e Sinatora (2015), os parâmetros de superfície tridimensionais (3D) definidos pela norma ISO 25178-2 têm um prefixo S (parâmetros de superfície) ou V (parâmetros de volume).

Segundo Dong, Sullivan, Stout (1994), todos os parâmetros de superfície tridimensionais (3D) são definidos em uma área de amostragem, ao contrário dos parâmetros de superfície bidimensionais (2D) os quais são definidos em um comprimento de avaliação ( $l_m$ ) composto de vários comprimentos de amostragem ( $l_e$ ).

O tempo necessário para realização das medições e o custo dos equipamentos, limitam um pouco a medição e análise 3D. As vantagens da medição e análise 3D é que os perfilômetros possuem recursos importantes para trabalhar os dados, são flexíveis e hábeis para coletar, processar e estocar os dados, e são fáceis para operar através de softwares, por exemplo sistema operacional *Windows* (LUCIANO, 2011).

Nesta pesquisa foi empregada a técnica de perfilometria óptica 3D sem contato, usando o equipamento denominado perfilômetro ótico, o qual se baseia em princípios físicos relacionados a luz. Ao incidir um feixe luminoso sobre uma superfície, ele será refletido em várias direções de acordo com a inclinação do local incidente, conforme demonstrado na Figura 20.

**Figura 20 - Efeitos da rugosidade superficial sobre a reflexão da luz**



Fonte: Parra et al. (2006).

A análise interferométrica das reflexões obtidas em uma região da amostra, possibilita traçar o perfil da superfície do mensurando e assim obter a sua rugosidade (DOMINGOS; FREITAS; NETO, 2014).

O processo de medição utilizando perfilometria ótica proporciona a vantagem de não realizar contato físico com a peça medida (FAINAMN; LENZ; SHAMIR,

1982). Porém, também existem limitações em relação a resolução da medição, determinados pela objetiva de magnificação e comprimento de onda utilizado (POON; BHUSHAN, 1995; PAVLICEK, 2008).

São várias as pesquisas e artigos que abordam as funcionalidades e aplicações utilizando o rugosímetro 3D, as quais enfatizam a importância da topografia superficial 3D, tanto nos estudos científicos, assim como nas aplicações de engenharia em geral, o que tem resultado no advento das análises, medições e caracterizações de superfícies em três dimensões (DONG; SULLIVAN; STOUT, 1994). Os parâmetros de superfície tridimensionais (3D) são importantes em estudos tribológicos e muitos deles mostram forte correlação com o desempenho operacional da superfície (FRANCO; SINATORA, 2015).

Principais parâmetros utilizados para caracterização dos aspectos topográfico:

### **3.6.2.1 Parâmetros de amplitude**

De acordo Dong, Sullivan e Stout (1994) a análise da topografia das superfícies de engenharia é complexo e não pode ser descrito completamente por um simples parâmetro, ou até mesmo por alguns poucos parâmetros. Cada parâmetro caracteriza apenas um aspecto da topografia da superfície. Alguns destes parâmetros são naturalmente extensões de seus parâmetros similares bidimensionais (2D), outros são específicos da análise topográfica 3D. Os parâmetros de superfície bidimensionais (2D) não são capazes de caracterizar uma superfície topográfica completamente, apenas caracterizam algumas propriedades topográficas relacionadas a geometria, estatística e aspectos funcionais da superfície. Todos os parâmetros de superfície tridimensionais (3D) são definidos em uma área de amostragem, ao contrário dos parâmetros de superfície bidimensionais (2D) os quais são definidos em um comprimento de avaliação consistindo de vários comprimentos de amostragem.

#### **Desvio médio aritmético da superfície ( $S_a$ )**

O desvio médio aritmético da superfície  $S_a$  é definido como sendo a média aritmética dos valores absolutos dos picos e vales da superfície partindo de um

plano médio dentro da área de amostragem (SERUP; JEMEC; GROVE, 2006; STOUT et al., 1993).

### **Altura máxima (Sz)**

Definido como o valor médio das alturas dos cinco picos mais altos (Sp) somados aos cinco vales mais profundos (Sv) dentro da área de amostragem (DONG; SULLIVAN; STOUT, 1994).

### **Altura máxima do pico (Sp)**

O parâmetro Sp é definido como sendo a altura máxima do pico, ponto mais alto da superfície (LEACH, 2013).

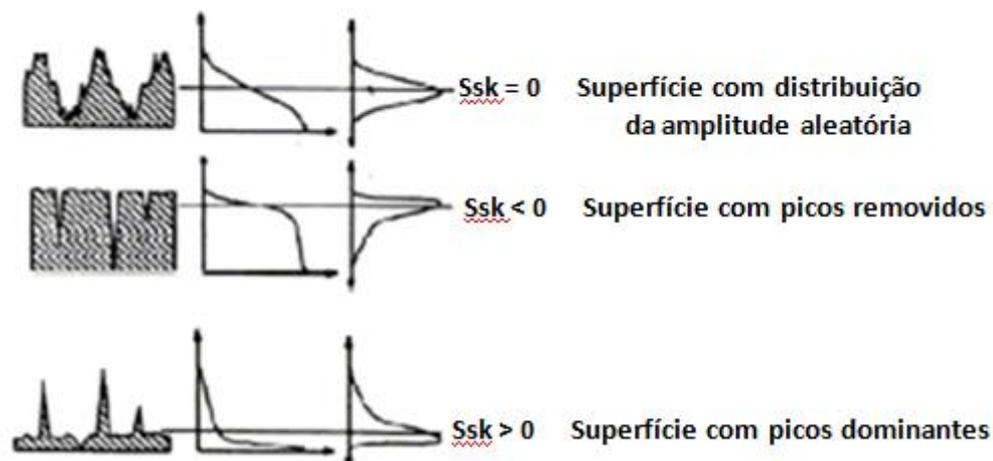
### **Profundidade máxima do vale (Sv)**

O parâmetro Sv é definido como sendo a altura máxima do vale, ponto mais baixo da superfície (LEACH, 2013).

### **Assimetria da distribuição das alturas da topografia ou *skewness* (Ssk)**

A assimetria da distribuição de alturas da topografia ou *skewness* é definida como a assimetria dos desvios da superfície sobre o plano médio. Este parâmetro descreve efetivamente o formato da distribuição das alturas da topografia. Para uma superfície com distribuição Gaussiana, que possui simetria de distribuição, o parâmetro Ssk é igual a zero. Para uma distribuição assimétrica das alturas, seu valor pode ser negativo, indicando a existência de mais vales. Para uma distribuição assimétrica, porém com valor positivo, indica a presença de mais picos. Um valor negativo na assimetria da distribuição das alturas da topografia Ssk indica uma melhor condição de retenção de fluidos ou lubrificantes e melhor capacidade de carregamento, portanto melhor desempenho. (MUMMERY, 1992; FARIAS, 2009). A Figura 21 demonstra o parâmetro Ssk.

**Figura 21 - Assimetria de distribuição de alturas de uma superfície**



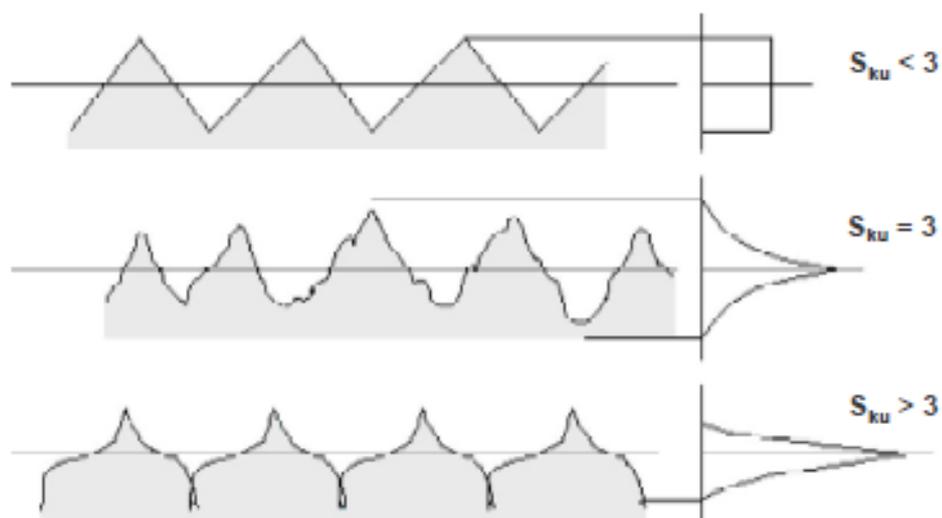
Fonte: Freitas (2006).

### **Curtose da distribuição das alturas da topografia ( $S_{ku}$ )**

De acordo com Dong, Sullivan e Stout (1994), o parâmetro  $S_{ku}$  é sempre apresentado em conjunto com o parâmetro  $S_{sk}$  para descrever a forma da distribuição topográfica do perfil de rugosidade. Ele mede o grau de achatamento ou de afinamento da distribuição topográfica dos picos do perfil de rugosidade.

Uma superfície com distribuição Gaussiana, caracterizada por sua simetria, o parâmetro  $S_{ku}$  é igual a três, para uma superfície com distribuição de alturas centralizadas seu valor é menor que três e para superfícies com alturas largamente espalhadas na distribuição o valor é maior que três. Valores de  $S_{ku}$  superiores a três indicam superfícies com picos mais finos, portanto mais passíveis ao desgaste prematuro, e valores inferiores a três indicam superfícies com menor tendência ao desgaste prematuro (MUMMERY, 1992; FARIAS, 2009). A Figura 22 demonstra o parâmetro  $S_{ku}$ .

**Figura 22 - Curtose da curva de distribuição de amplitudes**



Fonte: Freitas (2006).

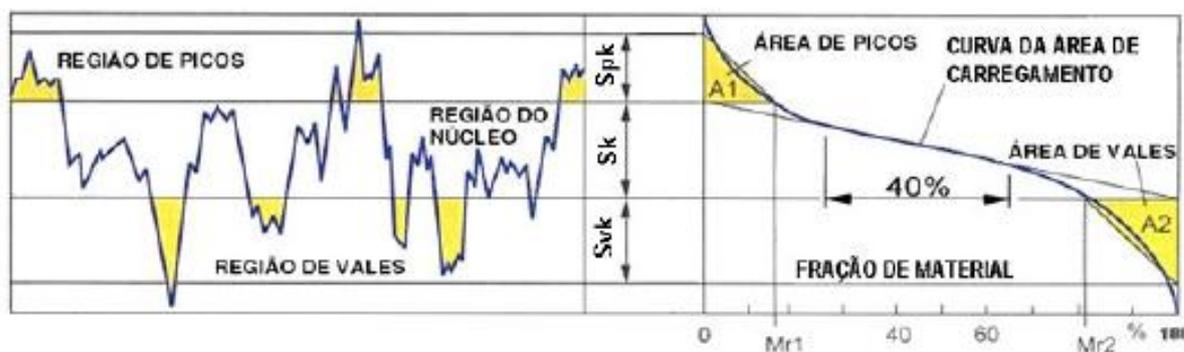
### 3.6.2.2 Parâmetros funcionais

De acordo com Franco e Sinatora (2015) o entendimento físico dos parâmetros funcionais pode ser da seguinte forma: o  $S_{pk}$  corresponde ao material da superfície que será desgastado no contato inicial com outra superfície, e corresponde aos picos acima do núcleo, já o  $S_{vk}$  representa vales/poços cuja profundidade desce além do núcleo e que pode ser preenchido com detritos provenientes dos picos ou lubrificantes. O núcleo  $S_k$  é a parte da superfície responsável por fornecer ao mesmo tempo uma superfície de rolamento, assim como serve como depósito de lubrificante, pelo menos nos casos de contacto deslizante lubrificado. Os parâmetros  $S_k$ ,  $S_{pk}$  e  $S_{vk}$ , série "k," são os sucessores, dentro do contexto dos parâmetros de superfície tridimensionais (3D), de  $R_k$ ,  $R_{pk}$  e  $R_{vk}$  previamente definidos pela ISO 13565-2, e abordados no tópico 3.6.1.

A norma ISO 13565-2 (1996) define cinco parâmetros ( $S_{pk}$ ,  $S_k$ ,  $S_{vk}$ ,  $Mr_1$  e  $Mr_2$ ) baseados na Curva da Área de Carregamento ou Curva de Abbott-Firestone, onde os parâmetros expressam a composição da distribuição dos picos e vales na superfície. Na Figura 23 é demonstrado a divisão das áreas na Curva de Abbott-Firestone, assim como o método utilizado para extração dos parâmetros, baseados

na extensão da linha que abrange 40% da fração do material central da curva (porção central da curva Abbott-Firestone).

**Figura 23** - Parâmetros funcionais baseados na Curva de Abbott-Firestone



Fonte: Mummery (1992).

### Profundidade da rugosidade núcleo ( $S_k$ )

O parâmetro  $S_k$  mede a altura da parte central do núcleo. Descreve a parte mais plana da curva de Curva Abbott-Firestone, isto é, a região com maior volume de material (SERUP; JEMEC; GROVE, 2006).

Conforme norma ISO 13565-2 (1996) a profundidade da rugosidade central é definida como a profundidade da rugosidade do núcleo do perfil. Este parâmetro caracteriza o desgaste da superfície a longo prazo, o que irá afetar o desempenho operacional da superfície (peça). Valores baixos para o parâmetro  $S_k$  indicam maior capacidade de carga durante operações de contato, conseqüentemente, maior vida útil da peça ou componente. Por outro lado, valores altos para o parâmetro  $S_k$  indicam melhor desempenho funcional por longos anos, provocado por um desgaste lento e constante (KUNDRAK; GYANI; BANA, 2008).

### Altura reduzida do pico ( $S_{pk}$ )

O parâmetro  $S_{pk}$  mede altura do pico da superfície que se projeta para além da superfície do núcleo. Um valor baixo de  $S_{pk}$  indica que a superfície não inclui muitos sulcos e pode estar livre de picos extremos (SERUP; JEMEC; GROVE, 2006).

Conforme norma ISO 13565-2 (1996) a altura reduzida do pico  $S_{pk}$  é definida como a altura média dos picos acima do perfil da rugosidade central. Este parâmetro

representa a porção da superfície que sofrerá desgaste prematuro. Processos de usinagem que produzem baixos valores para o parâmetro Spk são ideais para peças e componentes cuja forma geométrica deva ser mantida após o início de operação da mesma, eliminando ou até mesmo zerando o período denominado de amaciamento.

### **Profundidade reduzida do vale (Svk)**

O parâmetro Svk indica proporção de vales de uma superfície que se estendem no material abaixo do núcleo. Fornece informações úteis sobre sulcos e vales da superfície (SERUP; JEMEC; GROVE, 2006).

Conforme norma ISO 13565-2 (1996) a profundidade reduzida do vale Svk é definida como a profundidade média do perfil dos vales projetados além do perfil da rugosidade do núcleo. O parâmetro Svk caracteriza a capacidade de retenção de fluidos dos vales da superfície. Valores altos indicam maior capacidade de retenção de fluido lubrificante.

### **Porções do material da superfície (Mr1 e Mr2)**

De acordo com a norma ISO 13565-2 (1996) as porções do material da superfície Mr1 e Mr2 são definidas como a porção do material determinado pela interseção da linha que separa as alturas dos picos do perfil de rugosidade do núcleo (Mr1) e a porção do material determinado pela interseção da linha que separa o perfil dos vales projetados além do perfil da rugosidade do núcleo (Mr2). Com estes dois parâmetros é possível determinar a porcentagem de superfície que se encontra na área de picos, área do núcleo e na área de vales.

### **3.6.2.3 Índices funcionais**

#### **Índice de apoio da superfície (Sbi)**

É definido como sendo a razão entre os parâmetros de desvio RMS e a altura da superfície a 5% da área de mancal, conforme Equação 2:

$$Sbi = \frac{S_q}{\eta_{0,05}} = \frac{1}{h_{0,05}} \quad (2)$$

Onde:

$Sq$  = desvio médio quadrático da superfície (equivalente ao  $Rq$  em 2D) e  $\eta_{0,05}$  é a altura da superfície correspondente a 5% da área de mancal.

De acordo com Freitas (2006) um valor alto de  $S_{bi}$  indica que a superfície usinada tem uma boa propriedade de mancal. A grande maioria de superfícies de engenharia o valor de  $S_{bi}$  está entre 0,3 e 2,0 (STOUT et al., 2000).

### **Índice de retenção de fluido no núcleo ( $S_{ci}$ )**

É a razão do volume de vazio da área de amostragem na zona do núcleo da superfície, sobre o desvio quadrático da superfície  $Sq$  (FREITAS, 2006). Um valor alto  $S_{ci}$  indica uma boa retenção de fluido na zona do núcleo da superfície usinada, e diminui quando ocorre o processo de desgaste (STOUT et al., 2000).

### **Índice de retenção de fluido no vale ( $S_{vi}$ )**

É razão do volume de vazio da área de amostragem na zona de vale da superfície usinada sobre o desvio quadrático da superfície  $Sq$ . Um valor alto de  $S_{vi}$  indica boa retenção de fluido na zona do vale, e mantém-se estável num processo tribológico (FREITAS, 2006).

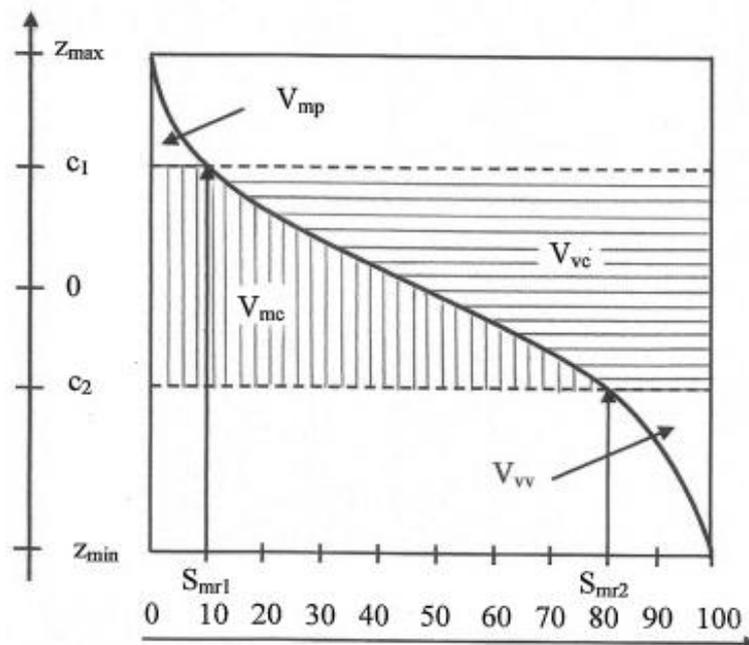
#### **3.6.2.4 Parâmetros funcionais de volume**

De acordo com Franco e Sinatora (2015) a análise 3D trouxe a possibilidade de ir além das relações de altura, comprimento e área. Tornou-se possível definir parâmetros que expressam volumes efetivamente envolvidos com o desempenho operacional da superfície. As definições de  $S_{pk}$ ,  $S_{vk}$  e  $S_k$  são amarradas às alturas  $c_1$  e  $c_2$  (ver Figura 24), que são obtidas através da extensão da linha que abrange 40% da fração do material central da curva Abbott-Firestone, enquanto os parâmetros de volume são definidos por um padrão em conexão com um núcleo, arbitrariamente definido como a parte da superfície entre as relações padrões de  $S_{mr1} = 10\%$  e  $S_{mr2} = 80\%$ . O volume de material do pico  $V_{mp}$  é o parâmetro de volume de material resultante quando o valor padrão de  $S_{mr1} = 10\%$ , enquanto o volume de vazio na zona de vale  $V_{vv}$  é dado para  $S_{mr2} = 80\%$ . Este padrão permite o uso de parâmetros de volume referenciados a outras relações de  $S_{mr1}$  e  $S_{mr2}$ , sempre que for necessário.

A Figura 24 demonstra por meio da curva Abbott-Firestone os quatro parâmetros de volume calculados a partir de dois níveis de razão de rolamentos  $Mr_1 = 10\%$  e  $Mr_2 = 80\%$ , sendo:

- ✓  $V_{mp}$ : volume de material na zona de pico;
- ✓  $V_{vv}$ : volume vazio na zona de vale;
- ✓  $V_{mc}$ : volume de material no núcleo;
- ✓  $V_{vc}$ : volume vazio dentro do núcleo.

**Figura 24 - Representação gráfica do parâmetros funcionais de volume**



Fonte: Leach (2013); Franco, Sinadora (2015).

### **Volume de material na zona de pico ( $V_{mp}$ )**

O parâmetro volume de material na zona de pico  $V_{mp}$  caracteriza o volume de material localizado nos picos mais altos da superfície que é removido durante o processo de desgaste (LEACH, 2013).

De acordo com Franco e Sinadora (2015) o parâmetro  $V_{mp}$  fornece informações essenciais para a análise do desgaste, uma vez que ele quantifica a possível quantidade de detritos que serão gerados durante a operação da peça ou componente.

### **Volume de vazio na zona de vale ( $V_{vv}$ )**

O parâmetro  $V_{vv}$  caracteriza o volume de retenção de líquidos nos vales mais profundos da superfície, não sendo afetado pelo processo de desgaste aplicado na superfície (LEACH, 2013).

De acordo Franco e Sinadora (2015) os parâmetros  $V_{mp}$  e  $V_{vv}$  fornecem informações essenciais para a análise do desgaste, uma vez que quantificam, respectivamente, a possível geração de detritos durante a operação e o volume dos poços mais profundos capazes de reter esses detritos.

### **Volume de material no núcleo ( $V_{mc}$ )**

O parâmetro  $V_{mc}$  representa a parte de material da superfície que não interage com outra superfície em contato, e também não desempenha qualquer papel na lubrificação (LEACH, 2013).

### **Volume de vazio no núcleo ( $V_{vc}$ )**

O parâmetro  $V_{vc}$  é aplicado na avaliação da textura superficial de componentes mecânicos que são usados em contato com outras superfícies (LEACH, 2013).

## **3.6.3 Tensão residual**

Lu (1996) define tensões residuais como sendo aquelas que permanecem na peça quando todas as forças externas e/ou gradientes de temperatura são removidos.

Conforme Withers e Bhadeshia (2001), tensão residual é aquela que permanece em um corpo que é estacionário e em equilíbrio com o seu entorno. Pode ser muito prejudicial para o desempenho e vida útil de um componente. Alternativamente, as tensões residuais benéficas podem ser introduzidas deliberadamente. As tensões residuais são mais difíceis de prever do que as tensões em serviço nas quais elas se sobrepõem. Por essa razão, é importante ter métodos confiáveis para medir essas tensões e entender o nível de informação que elas podem fornecer.

De acordo com Machado et al. (2015) a tensão residual no processo de usinagem é proveniente da ação das arestas de corte sobre a superfície em

trabalho. Estas tensões podem ser avaliadas e quantificadas pela técnica de difração de raios X, a qual faz uma relação entre o ângulo de difração " $\Theta$ " dos raios incidentes (comprimento de onda " $\lambda$ ") com a distância entre os planos atômicos " $d$ ". Tensões residuais de tração diminuem a distância interplanar " $d$ ", enquanto tensões residuais de compressão aumentam a distância " $d$ ". A tensão residual é calculada baseada na deformação associada a variação da distância " $d$ ", Módulo de Elasticidade " $E$ " e Coeficiente de Poison " $\nu$ " do material.

Uma das principais causas do surgimento da tensão residual é a ocorrência de deformações plásticas não uniformes ao longo de uma seção da peça, causadas por efeitos térmico e mecânico, causando solicitações além do limite elástico do material. Pode-se afirmar que se não ocorrem deformações plásticas, não serão geradas tensões residuais (CARMO, 2006).

### **3.6.3.1 Métodos de medição da tensão residual**

De acordo com Tonsholf e Brinksmeier (1980) existe uma grande demanda por informações sobre o comportamento e desempenho operacional das superfícies usinadas baseado nos seus respectivos processos de usinagem. A análise e investigação através das tensões residuais é uma das técnicas disponíveis para investigar o estado físico das camadas superficiais.

Tendo em vista que as tensões residuais tem influências significativas sobre as propriedades e confiabilidade de peças e componentes mecânicos tornou-se muito importante compreendê-las e quantificá-las (SOUZA, 2012).

De acordo com Martins et al. (2004) não existe um método universal para medir as tensões residuais. Existem algumas técnicas disponíveis as quais devem ser selecionadas baseado em alguns critérios para a seleção e aplicação das mesmas. Para definição do método de medição de tensão residual deve-se levar em conta os seguintes fatores:

- ✓ Geometria da peça/componente;
- ✓ Gradiente de tensões residuais;
- ✓ A natureza do componente;
- ✓ Tipos de tensões residuais presentes na peça;
- ✓ Precisão e repetibilidade do método;
- ✓ Custo das medições;

- ✓ Tempo do processo de medição e obtenção dos resultados;
- ✓ Local onde será realizado as medições (campo ou laboratório);
- ✓ Tipo do método do ensaio, se destrutivo ou não-destrutivo.

A Tabela 10 mostra os principais métodos de medição de tensão residual, sendo que, o método não-destrutivo de difração de raios-X foi utilizado neste trabalho.

**Tabela 10 - Métodos de medição de tensão residual**

<b>Classificação</b>	<b>Principais métodos</b>	<b>Considerações</b>
Semidestrutivos	Método de furo cego	Execução de um furo, Ø 0,8 a 3,2mm, Método normatizado pela ASTM-E-837
Destrutivos	Método da remoção de camadas (Método da deflexão)	Camadas retiradas por ataque químico. Pode estar aliada ao Método Difração e Raios X
	Método do seccionamento	Cortes parciais longitudinais ou transversais ao eixo de peças axisimétricas, ex.: cilindros
Não-destrutivos	Difração de raios X	Variação das distâncias entre os planos atômicos. Técnica normatizada pela SAE-J784a
	Difração de nêutrons	Semelhante ao método de Raios X, no entanto, com inspeção em todo o volume
	Método ultrassônico	Variação da velocidade de ondas ultrassônicas no interior do material
	Método magnético	Relação entre propriedades magnéticas, permeabilidade, indução e efeito Barkhausen

Fonte: Suterio (2005).

Martins et al. (2004) avaliou as tensões residuais em anéis de rolamento fabricados aço ABNT 52100 através das técnicas por Difração de Raios-X,

Micromagnético e pelo Método do Furo Cego Incremental e concluiu que Difração de Raios-X foi a técnica que apresentou melhor precisão nos resultados.

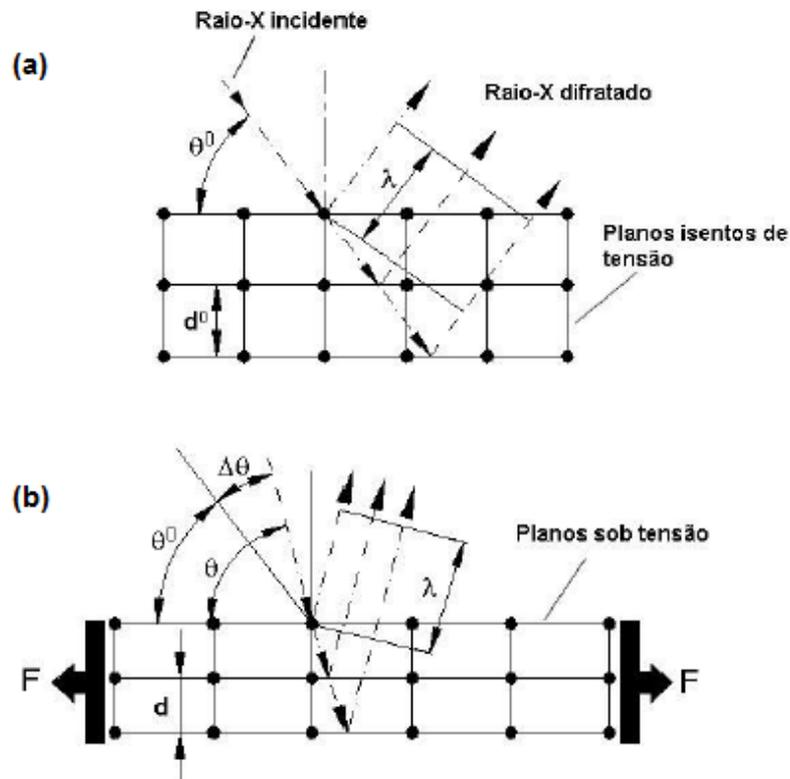
### **Método de difração de raios-X**

Segundo Prevey (1986 apud MARTINS, 2004) na análise das tensões residuais por difração de raios-X a variação do retículo cristalino, induzida pela presença de tensões, é medida com base na lei de Bragg e as tensões residuais são calculadas assumindo-se que a distorção ocorre no regime linear elástico.

O equipamento utilizado para a medição das tensões residuais é o difratômetro de raios-X, o qual utiliza o seguinte princípio físico:

- ✓ calcula-se a tensão residual tomando medidas de deformação no cristal do material em análise comparando aos parâmetros de rede do cristal deste mesmo material sem sofrer deformação;
- ✓ quando um feixe de raios-X é direcionado para a superfície do material em análise, uma parte desses raios é absorvida pelos átomos, a outra parte é enviada de volta em todas as direções da área irradiada;
- ✓ mede-se a intensidade máxima dos raios difratados para um determinado ângulo de varredura;
- ✓ tendo como referência este ângulo de varredura é possível obter o espaçamento interplanar dos planos de difração;
- ✓ neste método mede-se o parâmetro "d" do reticulado do corpo de prova em análise e calcula as respectivas deformações existentes conforme Figura 25. Mede-se somente a parte elástica do campo de deformações já que as deformações plásticas não prejudicam os parâmetros cristalinos (FARIAS, 2009).

Figura 25 - Difração de raios-x em material isento de tensões (a) e com tensões de compressão (b)



Fonte: Brinksmeier (1982).

- ✓ Lei de Bragg: a difração de raios-x é descrita como uma reflexão seletiva segundo certos planos cristalográficos, de acordo a Equação 3, conhecida como lei de Bragg (BRINKSMEIER, 1982 apud BORDINASSI, 2006).

$$\lambda = 2 \cdot d \cdot \sin \Theta \quad (3)$$

Onde:

$d$  = parâmetro do reticulado

$\Theta$  = ângulo de refração

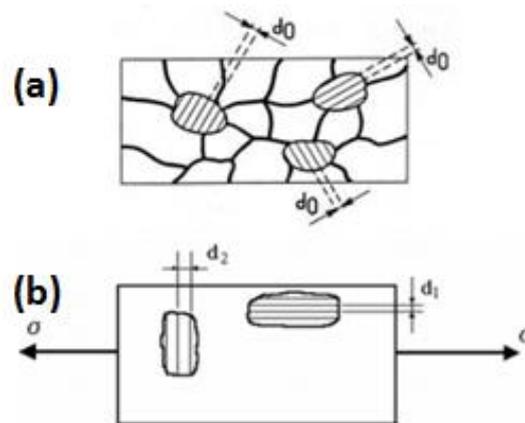
$\lambda$  = comprimento de onda dos raios-x.

- ✓ Calculando-se a deformação associada à variação na distância " $d$ ", é possível determinar, utilizando-se os módulos de elasticidade " $E$ " e de Poisson " $\nu$ " do material, o valor da tensão residual " $\sigma$ " aplicada (MACHADO et al.; 2015).

- ✓ Limitações do método: devido a limitações da profundidade de penetração dos raios-X, este método pode ser utilizado apenas para camadas superficiais, com aproximadamente 10 $\mu$ m de espessura (LIU; ZHANG, 2002).

De acordo com Lu (2005) materiais policristalinos compostos por uma fina granulometria e isentos de tensão (Figura 26-a) não apresentam mudanças no espaçamento interplanar com a orientação destes planos, a não ser com a presença de uma tensão, a qual provoca alterações nas distâncias interplanares, devido a deformação na rede cristalina. Tensão trativa induz um aumento no espaçamento entre os planos perpendiculares a esta tensão, e uma diminuição entre os planos paralelos a esta tensão (Figura 26-b).

**Figura 26** - Distâncias interplanares em material (a) isento de tensões (b) sob tensão



Fonte: Lu (2005).

A técnica da difração permite a medição das variações das distâncias interplanares, tornando possível determinar o estado de tensão atuante na rede cristalina, utilizando a Lei de Hooke, Equação 4 onde a tensão  $\sigma_x$  é relacionada com a deformação  $\varepsilon_x$  através do módulo de elasticidade E. Quando um corpo está sob tensão na direção x, região de deformação elástica linear, irá ocorrer deformação na direção ( $\varepsilon_x$ ) e deformações nas direções ortogonais ( $\varepsilon_y$  e  $\varepsilon_z$ ) A relação estabelecida entre estas deformações fornece o Coeficiente de Poisson ( $\nu$ ), conforme Equação 5.

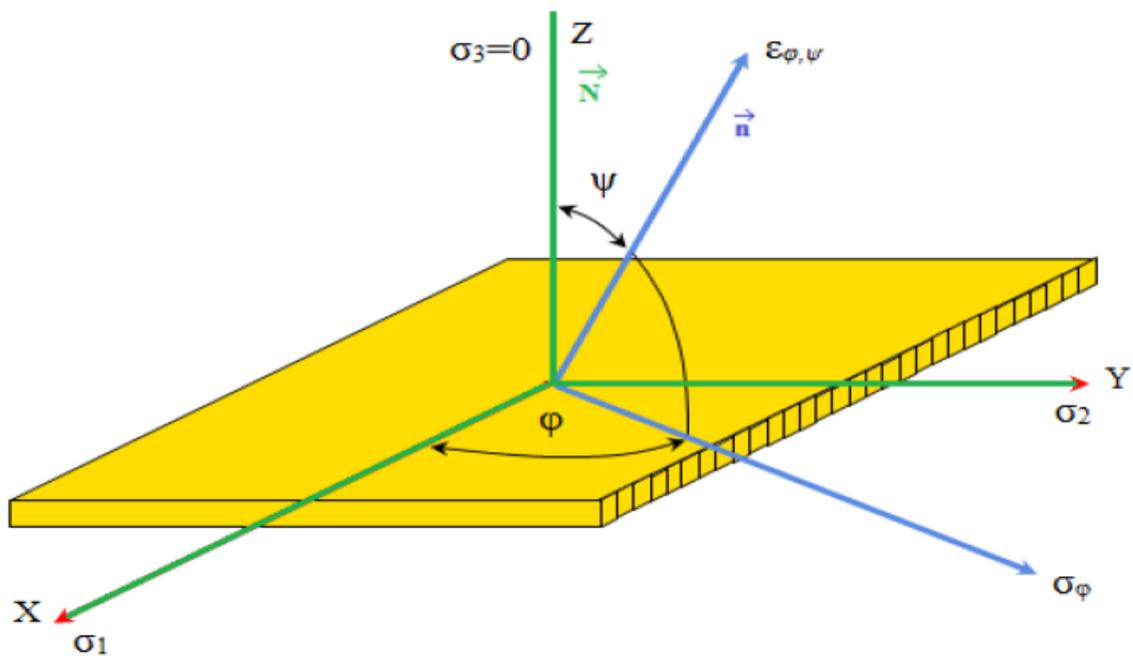
$$\sigma_x = E \cdot \varepsilon_x \quad (4)$$

$$\nu = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_z} = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_z} \quad (5)$$

A Figura 27 representa o estado de tensão em uma amostra cristalina e a determinação da deformação  $\varepsilon_{\phi\psi}$  ocorre através da Equação 6.

$$\varepsilon_{\phi\psi} = \frac{1+\nu}{E} (\sigma_1 \alpha_1^2 + \sigma_2 \alpha_2^2) - \frac{\nu}{E} (\sigma_1 + \sigma_2) \quad (6)$$

**Figura 27** - Esquema da medição da tensão residual por DRX



Fonte: Gobbo, Rekhi (2009 apud ALVES, 2014).

De acordo com Alves (2014) o cálculo da tensão em função das distâncias interplanares da rede cristalina é dado pela Equação 7.

$$\sigma_\phi = \frac{d_\psi - d_0}{d_0} \frac{E}{1+\nu} \frac{1}{\sin^2 \psi} \quad (7)$$

Onde:

$\sigma_\phi$  = tensão na direção  $\phi$

$\phi$  = ângulo rotação da amostra

$d_\psi$  = distância entre os planos difratores inclinados

$\psi$  = ângulo de inclinação da amostra, formado entre a normal à superfície do material e a normal aos planos cristalográficos (hkl)

E = módulo de elasticidade, específico do material

$\nu$  = coeficiente de Poisson, específico do material

$d_0$  = distância interplanar livre de tensão

### Método do $\text{sen}^2\psi$ ou múltipla exposição

De acordo com Bordinassi (2006) utiliza-se o método do  $\text{sen}^2\psi$  quando é desejado grande exatidão nas medidas da tensão residual. Segundo Alves (2014) as limitações da técnica são vazios e impurezas na estrutura cristalina, granulometria grosseira, presença de textura rugosa, superfície irregular, configuração do instrumento e processamento dos dados.

Segundo Cullity (1978 apud SIMÕES, 2012) a tensão residual pode ser calculada através do coeficiente angular da função correspondente a variação interplanar entre os planos cristalográficos e o  $\text{sen}^2\psi$ , conforme Equação 8.

$$\sigma = \frac{E}{(1+\nu)(\text{sen}^2\psi)} \left( \frac{d_{\phi\psi} - d_{\phi_0}}{d_{\phi_0}} \right) \quad (8)$$

Onde:

- ✓ E e  $\nu$  são o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson, respectivamente;
- ✓  $d_{\phi_0}$  é o espaçamento interplanar da família de planos (h, k, l) orientados na direção da deformação  $\varepsilon_{\phi\psi}$ ;
- ✓ em muitas situações práticas  $d_{\phi_0}$  é utilizado em substituição a  $d_0$  (espaçamento entre planos de uma amostra livre de tensão) com muita precisão, devido o valor de  $d_0$  não ser conhecido.

Observa-se quanto maior o valor do ângulo  $2\Theta$ , maior será a variação da distância interplanar, conforme Equação 9, obtida pela diferenciação da lei de Bragg.

$$\frac{\Delta d}{d} = - \frac{(\cot\phi)\Delta 2\phi}{2} \quad (9)$$

De acordo com Santos (2012) deve-se plotar os valores de deformação  $2\Theta \times \sin^2 \psi$  em um gráfico, afim de encontrar uma reta cujo coeficiente angular  $m$  será dado pela Equação 10.

$$m = \sigma_{\phi} \frac{(1+\nu)}{E} \quad (10)$$

Entretanto, a tensão residual poderá ser calculada pela Equação 11:

$$\sigma_{\phi} = m \frac{E}{(1+\nu)} \quad (11)$$

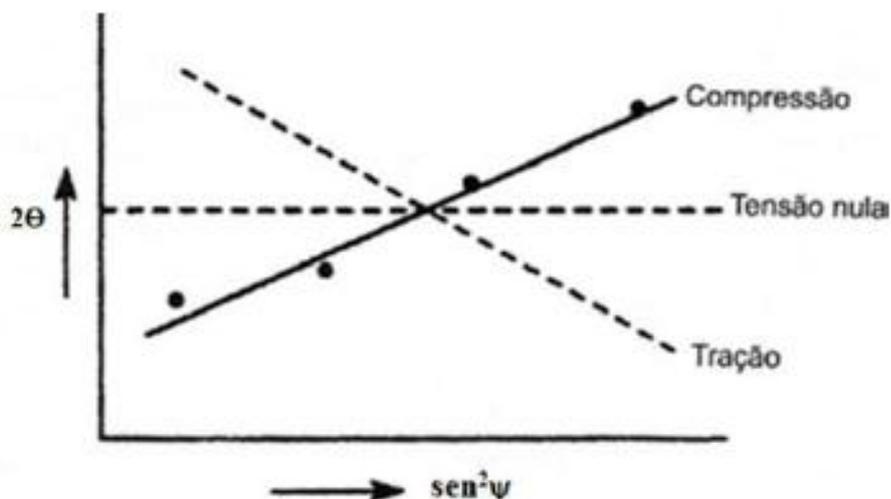
Onde:

- ✓  $m$  = coeficiente angular da reta
- ✓  $E$  = módulo de elasticidade
- ✓  $\nu$  = coeficiente de Poisson

Segundo Bordinassi (2006) existem alguns procedimentos par determinar a tensão residual utilizando o método  $\sin^2 \psi$ , sendo eles:

- ✓ definir a posição do pico de difração de um determinado conjunto de planos  $(h, k, l)$  nas diferentes orientações  $\psi$  da peça;
- ✓ plotar a deformação  $2\Theta$  versus  $\sin^2 \psi$  por regressão conforme Figura 28;
- ✓ determinar a inclinação " $m$ " da reta obtida;
- ✓ utilizar a Equação 11 para obtenção da tensão.

**Figura 28** - Gráfico  $2\theta \times \text{sen}^2 \psi$



Fonte: Bordinassi (2006).

O procedimento utilizado nesse método consistiu em variar o ângulo  $\psi$  de  $0^\circ$  a  $45^\circ$ , com incrementos de  $5^\circ$ , obter os respectivos ângulos de difração e traçar uma reta por regressão, pelo método dos mínimos quadrados, por meio destes 8 pontos.

### 3.6.3.2 Tensões residuais nos processos de usinagem

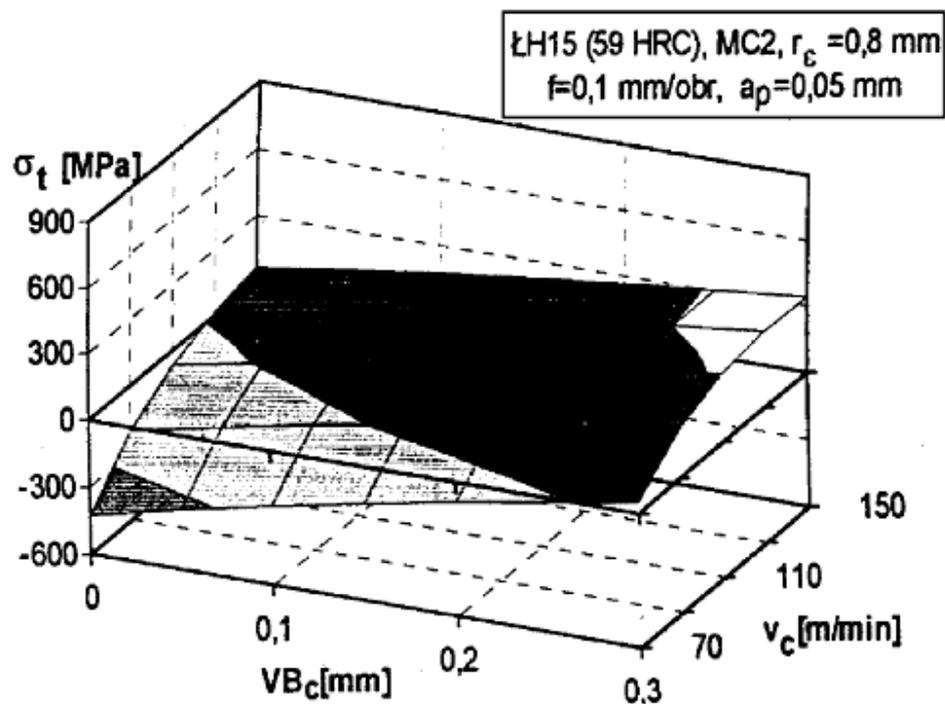
De acordo com Brinksmeier et al. (1982), as propriedades físicas da superfície usinada determina a vida útil e funcionabilidade de peças e componentes altamente carregados. Por isto, é necessário e importante cada vez mais o conhecimento dos processos de usinagem, afim de conhecermos a influência destes processos na propriedades superficiais das peças e componentes.

As tensões residuais induzidas pelo processo de torneamento podem ser de tração ou compressão, com diferentes intensidades. As tensões residuais de compressão são benéficas, pois aumentam a resistência à fadiga da peça. Por outro lado, as tensões residuais de tração diminuem a resistência à fadiga e a resistência mecânica do material da peça. A tensão residual no torneamento varia com o desgaste de flanco da ferramenta, com o avanço, profundidade de corte, velocidade de corte e com as características do material da peça a ser usinada (COSTA, 2003).

Barbacki, Kawalec e Hamrol (2003), mostraram que, no torneamento do aço LH15 (AISI 52100, contendo 1% de C e 1,5% de Cr, dureza:  $60 \pm 2$  HRc) utilizando ferramenta de cerâmica mista MC2 ( $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$ ), a tensão residual possui valores

negativos (compressão) para baixa profundidade de corte, baixa velocidade de corte e pequeno desgaste de flanco. Ao contrário, possui valores positivos (tração) quando o desgaste de flanco aumenta e são utilizadas velocidades de corte mais elevadas, conforme demonstrado na Figura 29.

**Figura 29 - Influência do desgaste de flanco ( $VB_c$ ) e da velocidade de corte ( $v_c$ ) na tensão residual circunferencial na superfície do aço LH15 (AISI 52100)**



Fonte: Barbacki; Kawalec; Hamrol (2003).

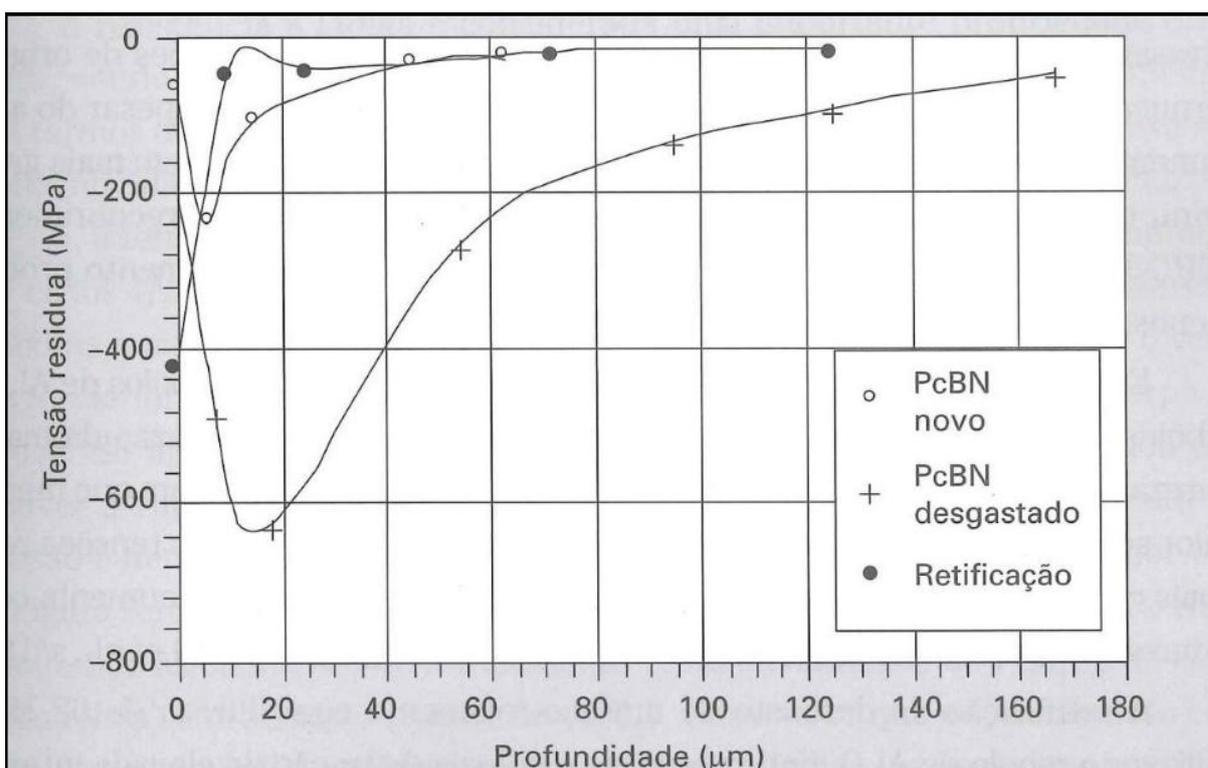
De um modo geral, o processo de torneamento induz tensões residuais superficiais de tração. A forma da cunha de corte e o desgaste da ferramenta de corte tem forte influência sobre o padrão das tensões residuais nas camadas superficiais usinadas (MACHADO et al., 2015).

De acordo com Tsuchida et al. (1975, apud MACHADO et al., 2015) quando o efeito térmico provocado pelo calor gerado pelo atrito e pela deformação plástica, superar a ação mecânica, o resultado será tensões de tração na superfície da peça que está sendo usinada. Este fato ocorre quando em processos de usinagem onde são utilizadas altas velocidades de corte.

Em processos de torneamento de aço cementado com alta dureza, utilizando ferramentas de cerâmicas e altos valores de avanços, geram tensões residuais compressivas de maior intensidade (KONIG et al., 1990 apud MACHADO, 2015).

A Figura 30 mostra a variação das tensões residuais impostas após o processo de torneamento, utilizando ferramentas de PcBN novas e desgastadas, e também pelo processo de retificação, utilizando rebolo de  $Al_2O_3$ , quando foi usinado um aço rolamento temperado, com dureza de 62 HRc. Pode-se observar que todas as tensões induzidas são compressivas, e que quando foi utilizado a ferramenta de PcBN na condição desgastada, ocorreu tensões de compressão maiores, assim como de maiores profundidades, possivelmente devido a maior área de contato entre a superfície de folga da ferramenta e a peça (MACHADO et al., 2015).

**Figura 30 - Tensões residuais induzidas em aço rolamento temperado, 62 HRc, após processos de torneamento e retificação, ferramenta de corte: PcBN**



Fonte: Machado et al. (2015).

As tensões residuais geradas pelo processo de retificação dependem da classe do rebolo, da penetração de trabalho e do fluido de corte utilizado (TARASOV et al., 1957, apud MACHADO et al., 2015).

De acordo com Herzog et al. (apud MACHADO et al., 2015), com relação ao material abrasivo, ao contrário dos rebolos de  $Al_2O_3$ , rebolos de cBN, definidos como superabrasivos, promovem tensões residuais de compressão, devido a sua maior agressividade e condutividade térmica, que fazem com que menos calor seja gerado e conduzido à peça. A intensidade destas tensões residuais de compressão em peças de aço aumenta com a dureza da peça, promovendo maior resistência a fadiga.

A operação de dressagem do rebolo tem influência sobre as alterações subsuperficiais, sendo que uma dressagem fina (grau de recobrimento alto) induz na peça tensões térmicas mais intensas, promovendo tensões residuais de tração. No entanto, a retificação de acabamento produz menos calor que a de desbaste (BRINKSMEIR et al., 1982; BRINKSMEIR et al., 1984).

A retificação de desbaste do aço-rolamento com dureza de 62 HRc, utilizando rebolo de  $Al_2O_3$ , induz tensões residuais de tração de elevada intensidade. Porém, estas tensões residuais são removidas na operação de retificação de acabamento, desde que seja removida uma camada com profundidade de  $100\mu m$  (MITTAL; ROWE, 1982, apud MACHADO et al., 2015).

Os ciclos de aquecimento e resfriamento alternados da peça durante a retificação provocam o aparecimento de tensões residuais de tração na superfície da peça, as quais são reduzidas até o valor zero cerca de  $200\mu m$  abaixo da superfície, dependendo do material da peça e das condições de operação (TONSHOFF; BRINKSMEIER, 1980).

De acordo com Alves, Bianchi e Aguiar (2008), o processo de retificação gera tensões residuais na superfície usinada, as quais são induzidas por deformação plástica não-uniforme, resultando em alterações das propriedades mecânicas do material. O mecanismo de formação de cavaco na retificação inicia-se com deformações plásticas, resultando predominantemente em tensões residuais compressivas, provocados por deslocamentos plásticos localizados. Porém, aquecimento e resfriamento de forma diferente ao longo da peça, mais rápido na superfície do que no núcleo, tendem a gerar tensões residuais de tração. Quando ocorre transformação de fases, implica em mudanças de volumes, tornando o processo de maior complexidade. Tensões residuais de compressão são benéficas nas propriedades mecânicas do material, aumentando a resistência a fadiga, já as

tensões residuais de tração são consideradas prejudiciais para a resistência mecânica, a corrosão e o desgaste (abrasão a altas temperaturas).

Li et al. (1995) avaliaram o efeito da rugosidade de uma peça de aço inoxidável sobre os resultados da medição das tensões residuais por difração de Raio X. Segundo seus resultados, há pouca influência da rugosidade sobre os resultados de medição quando o valor da rugosidade  $R_a$  não supera a profundidade da penetração do Raio X. Para a potência de Raio X utilizada por autores uma rugosidade superior a  $10\ \mu\text{m}$  ia interferir nos resultados de medição.

Segundo Abrão (2005) e Matsumoto, Hashimoto e Lahoti (1999), o avanço exerce grande influência na geração de tensões residuais de compressão nas superfícies torneadas, sendo o principal parâmetro de corte associado a este fenômeno técnico.

Já a profundidade de corte e a velocidade de corte causam opiniões diversas entre os resultados obtidos pelos pesquisadores, não havendo consenso sobre a influência destes parâmetros sobre a tensão residual (FARIAS, 2009). De acordo com Matsomoto, Hashimoto e Lahoti (1999) e Dahlman, Gunnberg e Jacobson (2004) a profundidade de corte não influencia a tensão residual final das superfícies torneadas. Já os estudos de Delijaicov (2004) e Bordinassi (2006) concluíram que a profundidade de corte ( $a_p$ ) pode influenciar o estado final de tensões residuais das superfícies torneadas .

De acordo com Gunnberg, Escursell e Jacobson (2006), a velocidade de corte ( $v_c$ ) influenciou negativamente, induzindo tensões residuais de tração nas superfícies torneadas. E segundo Rech e Moisan (2003) a velocidade de corte induz fortemente o estado final da tensão residual nas superfícies torneadas.

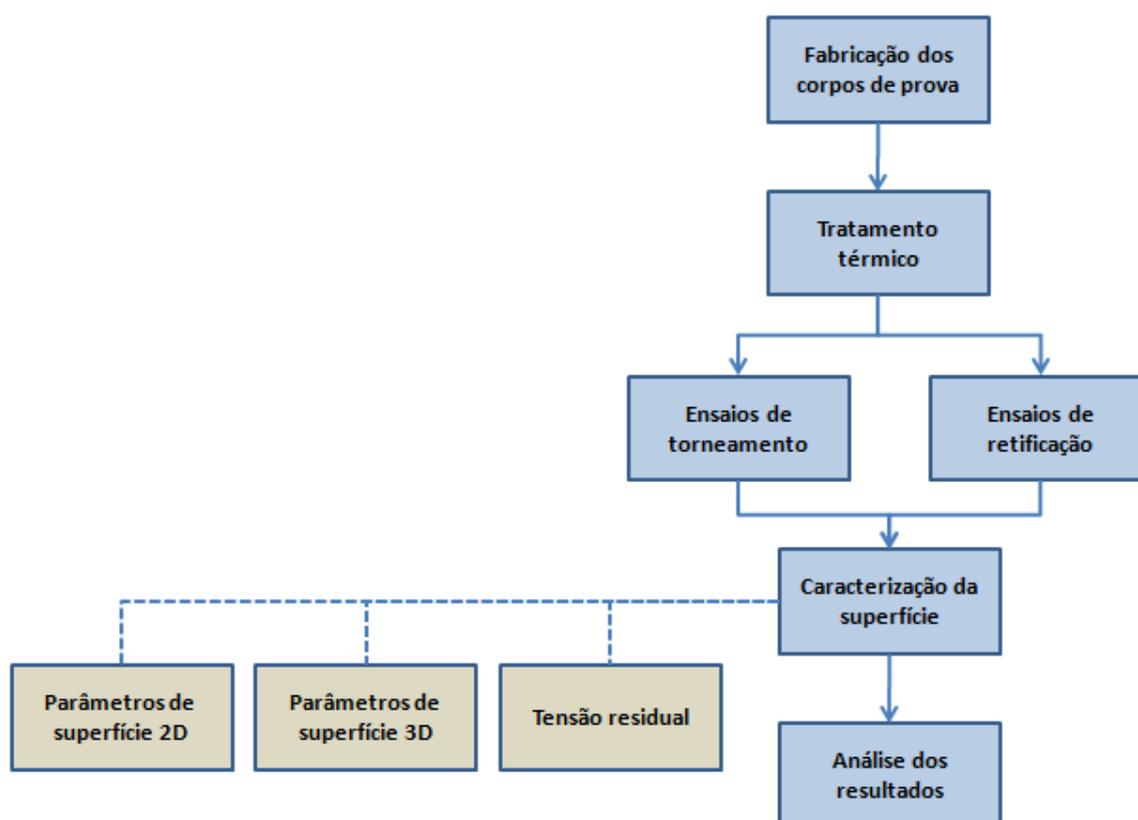
Conforme Navas, Gonzalo e Bengoetxea (2012) o estado final de tensão depende da importância relativa dos fatores mecânicos, térmicos e dos efeitos de transformação estrutural/fase, que são determinados não apenas pelas propriedades físicas e mecânicas do material a ser usinado, mas também pelos parâmetros de usinagem empregados. Portanto, é muito importante controlar o efeito que cada parâmetro de corte tem na integridade da superfície final da peça usinada, a fim de determinar os parâmetros de usinagem mais adequados e apropriados.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Os experimentos de retificação foram realizados no Laboratório de Retificação no Departamento de Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG, e os de torneamento foram realizados na empresa Setormec, na cidade de Divinópolis/MG. Já os ensaios de caracterização dos parâmetros de superfície bidimensionais (2D) e tensões residuais foram realizados no Laboratório de Caracterização do CEFET-MG e a caracterização dos parâmetros de superfície tridimensionais (3D) foram realizados no Departamento de Engenharia de Superfícies do Centro de Inovação e Tecnologia SENAI FIEMG.

A sequência das atividades desenvolvidas durante o procedimento experimental estão demonstradas no Fluxograma 1.

**Fluxograma 1 - Sequência das atividades do procedimento experimental**



Fonte: próprio autor

#### 4.1 Corpo de prova

Os corpos de prova utilizados nos ensaios foram confeccionados em formato cilíndrico, material aço ABNT 4340, temperado e revenido com dureza de  $52 \pm 2$  HRc. O tratamento térmico foi executado na empresa METALTEMPER, especializada neste processo, sendo fornecido o certificado de qualidade do serviço.

Na Tabela 11 é apresentada a composição química do aço ABNT 4340. As informações sobre este aço foram obtidas por meio do certificado de análise do material, fornecido pela empresa Açocon, no momento da compra do material.

**Tabela 11 - Composição química (% em massa) do aço ABNT 4340**

C	Mn	P	Si	S	Cr	Ni	Mo	Al	Cu	Co	V	Fe
0,4	0,7	0,007	0,35	0,001	0,78	1,74	0,24	0,015	0,05	0,01	0,01	Balanço

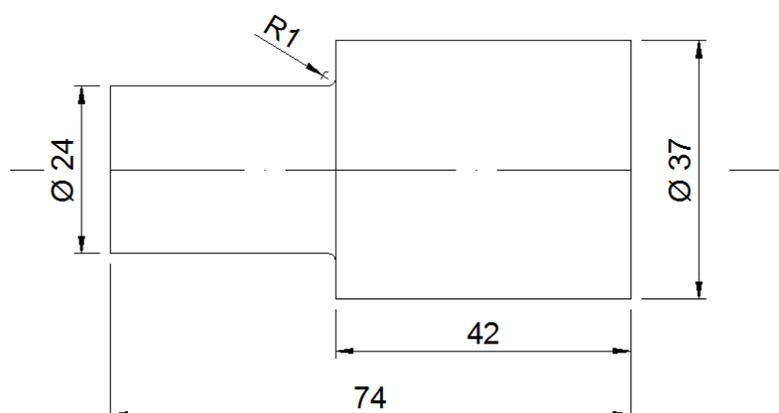
Fonte: Açocon (2015).

O aço ABNT 4340 por apresentar boas propriedades mecânicas é usualmente empregado nas indústrias automotiva, aeronáutica, marítima, siderúrgica, laminação, trefilação onde há severas condições de trabalho, acrescido de ambiente industrial extremamente agressivo (altas temperaturas, poluição e outros), sendo aplicado na fabricação de engrenagens, eixos, mancais, trem de pouso e outros (SILVA; MEI, 2006, apud CAMPOS, 2016).

Além da elevada resistência mecânica e tenacidade, este aço apresenta também elevada temperabilidade, resistência à fluência e resistência à fadiga, porém é susceptível à corrosão, que é um dos mecanismos mais comuns de falha em aços (HAZAN; SADIA; GELBSTEIN, 2013).

Foram executadas três medições de dureza em todos os corpos de prova, sendo adotado a média das durezas. As dimensões do corpo de prova para ambos processos de usinagem (torneamento e retificação) são apresentadas conforme Figura 31, sendo a dimensão útil de  $\varnothing 37 \times 42$ mm a que foi utilizada nos experimentos.

**Figura 31 - Desenho esquemático do corpo de prova**



Fonte: próprio autor

Foram fabricados 48 corpos de prova, os quais foram utilizados da seguinte forma:

- ✓ 32 nos ensaios de torneamento;
- ✓ 12 nos ensaios de retificação;
- ✓ 04 nos ensaios de testes preliminares e *set up* de máquinas.

## 4.2 Ferramentas de corte

No processo de torneamento foram utilizadas ferramentas de corte conforme demonstrado na Tabela 12.

**Tabela 12 - Ferramentas de corte utilizadas no torneamento**

Material	Geometria	Classe		Composição	Revestimento	Dados de corte recomendados		
		Sandvik	ISO			$v_c$ (m/min)	$f$ (mm/rev)	$a_p$ (mm)
Cerâmica mista	SNGA 120408 T01020	CC650	H05	$Al_2O_3 + 28\% TiC$	Sem revest.	150 (160-50)	0,10 (0,07-0,21)	1,2 (0,1-3,6)
Cerâmica mista	SNGA 120408 T01525	CC6050	H05	$Al_2O_3 + 28\% TiC$	PVD - TiN	160 (170-90)	0,10 (0,05-0,3)	0,2 (0,1-1,0)
PcBN	SNGA 120408 S01525F	CB7115	H15	50% de CBN com grãos finos em um ligante de cerâmica	PVD - TiN	190 (250-150)	0,15 (0,05 - 0,3)	0,2 (0,07-0,4)

Fonte: Sandvik (2018).

As ferramentas de corte foram montadas no suporte porta-ferramenta código ISO DSBNL 2525M12, fabricado pela Sandvik, altura da haste 25mm, largura da haste 25mm, comprimento funcional 150mm, resultando nos seguintes ângulos principais: ângulo de posição principal ( $\chi_r$ ):  $75^\circ$ , ângulo de posição secundário ( $\chi_r'$ ):  $15^\circ$ , ângulo de saída ( $\gamma_0$ ):  $-6^\circ$ , ângulo de inclinação ( $\gamma_s$ ):  $-6^\circ$ .

No processo de retificação foi utilizado o rebolo de óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ), designação: FE 38A60KV, dimensões: 355,6 x 50,8 x 127mm. O rebolo de óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ) é utilizado na retificação de aços com alta resistência à tração e elevada dureza e na retificação de ferramentas de aço rápido.

### **4.3 Máquinas operatrizes utilizadas nos ensaios**

Para realização dos ensaios de retificação foi utilizada uma retificadora cilíndrica universal, marca TosHostivar, com potência de 9kW, executando a operação de retificação cilíndrica externa de mergulho.

Para realização dos ensaios de torneamento foi utilizado um torno horizontal CNC, marca ROMI, modelo Centur 35D, com potência de 11kW, rotação de 3.000 RPM, comando CNC Siemens Sinumerik 828D.

### **4.4 Equipamentos para caracterização da superfície**

#### **4.4.1 Parâmetros de superfície bidimensionais (2D)**

Para medição dos parâmetros de superfície bidimensionais (2D) dos corpos de prova torneados e retificados, foi utilizado o rugosímetro portátil Mitutoyo, modelo SJ-301, com ponta de diamante com raio de  $5\mu m$ , o qual atende as normas internacionais DIN, ISO, ANSI e JIS.

Foi utilizado comprimento de amostragem de 0,8mm e um comprimento de medição de 4mm. Para cada corpo de prova foram feitas oito medições no sentido radial do corpo de prova, equidistante a  $45^\circ$ . Foram coletados e avaliados os seguintes parâmetros:

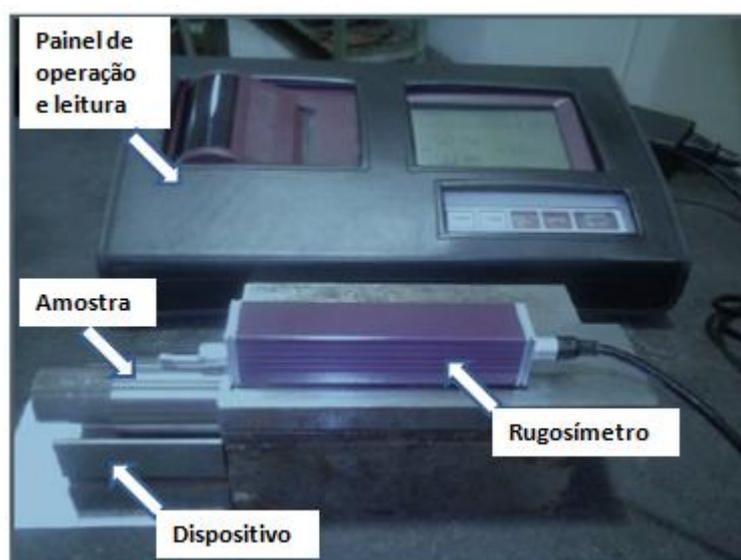
- ✓ perfil de medição R: desvio aritmético médio do perfil de avaliação ( $R_a$ ), altura máxima do perfil ( $R_z$ ), desvio médio quadrático do perfil em avaliação ( $R_q$ ), altura total do perfil ( $R_t$ ), altura máxima do pico do perfil

(Rp), profundidade máxima do vale do perfil (Rv), fator de assimetria do perfil em avaliação (Rsk), fator de achatamento do perfil em avaliação (Rku) e inclinação média quadrática do perfil em avaliação ( $R\Delta q$ ).

- ✓ perfil de medição DIN4776: altura reduzida do pico (Rpk), profundidade reduzida dos vales (Rvk), profundidade da rugosidade do núcleo (Rk), porção de material determinado pela linha de interseção que separa os picos da rugosidade central (Mr1), porção de material determinado pela linha de interseção que separa os vales da rugosidade central (Mr2), área correspondente à região dos picos (A1), área correspondente à região dos vales (A2) e volume de medição (Vo).

Os resultados coletados foram transferidos para planilhas, onde foram manipulados e realizados os cálculos das médias e dos desvios padrão de cada ensaio. Na Figura 32 é apresentado o rugosímetro portátil e os dispositivos utilizados nos ensaios de caracterização dos parâmetros de superfície bidimensionais (2D).

**Figura 32 - Rugosímetro e dispositivos para medição dos parâmetros de superfície bidimensionais (2D)**

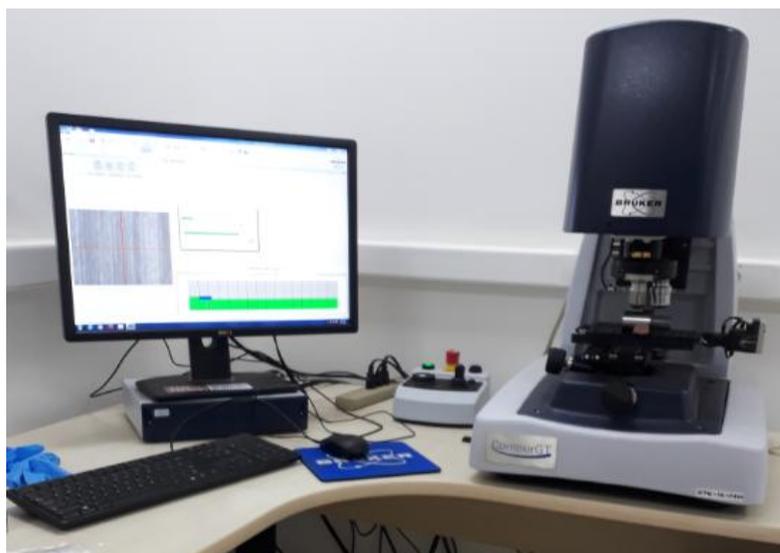


Fonte: próprio autor

#### 4.4.2 Parâmetros de superfície tridimensionais (3D)

Para medição dos parâmetros de superfície tridimensionais (3D) foi empregada a técnica de perfilometria ótica, sem contato (não utiliza uma agulha para a medição), utilizando o perfilômetro ótico (perfilometria por interferometria, luz branca), fabricante Bruker, modelo Contour GTK, do Depto. de Engenharia de Superfícies do Centro de Inovação e Tecnologia (CIT) SENAI FIEMG. Foi adotado 1 (uma) área de medição de 4x2mm no sentido longitudinal do corpo de prova, sendo: comprimento de 4mm no eixo X na direção longitudinal do corpo de prova, compreendendo 8.112 pontos e espaçamento entre os pontos de 0,493 $\mu$ m, e no eixo y no sentido da circunferência do corpo de prova foi de 2mm, compreendendo 4.056 pontos com espaçamento entre eles de 0,493 $\mu$ m. Os dados coletados pela medição da superfície foram processados por meio do software MountainsMap, versão 7.4, gerando os parâmetros de superfície tridimensionais (3D), curvas Abbott-Firestone e imagens topográficas das superfícies. A Figura 33 demonstra o perfilômetro ótico utilizado nos ensaios de caracterização dos parâmetros de superfície tridimensionais (3D).

**Figura 33 - Perfilômetro ótico utilizado na medição dos parâmetros de superfície tridimensionais (3D)**

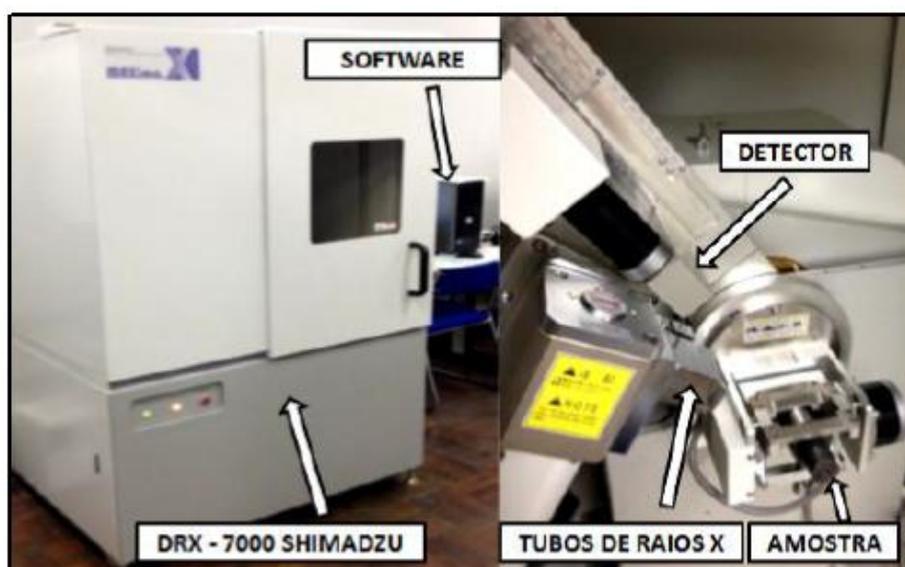


Fonte: próprio autor

#### 4.4.3 Tensão residual

Os ensaios de medições das tensões residuais induzidas pelos processos de torneamento e retificação foram executados pelo método não destrutivo, por meio da técnica de múltiplas exposições ou método do  $\text{sen}^2\psi$ , por difração de raios X, utilizando o difratômetro de raios X, modelo RDX-7000, fabricante SHIMADZU, com tubo de raios X (alvo de cromo), conforme Figura 34.

**Figura 34 - Difratômetro de Raio X e montagem da amostra**



Fonte: próprio autor

De acordo com a norma ASTM E2860-12 (2012) - Método de Teste Padrão para Medição da Tensão Residual por Difração de Raio X, ao realizar medições de tensão residual em aços martensíticos, o alvo  $\text{Cr K}\alpha$  é tipicamente usado com o plano {211}, com um ângulo de aproximadamente 154 a 157°.

O corpo de prova foi ajustado no porta amostra do Difratômetro de Raio X e foram realizados os ajustes de processo através do software de comando. Os parâmetros utilizados foram os seguintes:

- ✓ comprimento de onda: 2,291 Å;
- ✓ tensão: 30 kV;
- ✓ corrente: 40 mA;
- ✓ pico de difração utilizado (211) do plano de ferrita-martensita com ângulo  $2\theta$ : 156,1°;

- ✓ variação do ângulo de difração  $2\Theta$ : 150 a 160°;
- ✓ velocidade varredura: 2°/min;
- ✓ passos de 0,1 graus;
- ✓ exposição: 3 segundos;
- ✓ foram utilizados os valores do módulo de elasticidade,  $E= 210$  GPa, e do coeficiente de Poisson,  $\nu= 0,3$ , para o aço ABNT 4340.

A característica típica do método de medição das tensões por difração de raios X (DRX) é que as medições ocorrem numa camada próxima da superfície. Os corpos de provas vêm com superfícies alteradas (tensões residuais, rugosidades inerentes ao processo de fabricação, óleo de proteção da superfície usinada e até mesmo corrosão). Por isto, a preparação da superfície previamente à medição das tensões residuais é essencial, apesar de nem sempre ser observada ou haver procedimentos padronizados. A recomendação geral é remover a camada micrométrica do óleo protetivo para não mascarar as tensões causadas pelos processos de usinagem (retificação e torneamento). Neste trabalho para limpeza do óleo protetivo foi utilizando uma flanela limpa e álcool etílico absoluto ou álcool puro (concentração alcoólica maior que 95%), o que atende às recomendações da norma ASTM E2860-12 em um tempo razoavelmente curto.

Procedimento para execução das medições das tensões residuais através do DRX:

- ✓ limpar a amostra utilizando álcool absoluto e flanela limpa;
- ✓ posicionar a amostra no porta-amostra do DRX;
- ✓ fechar as portas do DRX;
- ✓ programar os parâmetros do ensaio (tensão, corrente, comprimento de onda, velocidade de varredura e outros) através do software do DRX ;
- ✓ cadastrar os dados da amostra;
- ✓ executar a medição da tensão residual;
- ✓ obter os dados da tensão residual (se é de compressão ou tração e o seu valor em MPa).

#### 4.5 Procedimento experimental dos ensaios

Os ensaios de torneamento foram realizados utilizando 3 tipos de ferramentas de corte: cerâmica mista classe CC650 ( $Al_2O_3 + 28\% TiC$ ) sem revestimento, cerâmica mista classe CC6050 ( $Al_2O_3 + 28\% TiC$ ) com revestimento de TiN e PcBN classe CB7115 com revestimento de TiN.

Para realização dos ensaios foram definidas como variáveis a velocidade de corte e o sistema de lubrificação. Para a velocidade de corte foram adotados os valores: 150, 225 e 300m/min, e para o sistema de lubrificação foram adotadas as condições à seco e jorro. Na condição de lubrificação por jorro (convencional) foi utilizado o fluido de corte semissintético, do fabricante All Quimic, concentração de 4%. O avanço e a profundidade de corte foram mantidos constantes em 0,05mm/rev e 0,15mm, respectivamente. Os parâmetros de corte foram definidos baseados em pesquisas realizadas (GRZESIK, 2008; KUNDRAK, GYANI, BANA, 2008), informações do catálogo do fornecedor e também em testes preliminares. Em todos os ensaios foram utilizadas arestas de corte novas.

As condições de corte das três ferramentas de corte utilizadas nos ensaios experimentais de torneamento estão demonstradas na Tabela 13.

**Tabela 13 - Condições de cortes utilizadas no torneamento**

Ferramentas	$v_c$ (m/min)	$f$ (mm/rev)	$a_p$ (mm)	Sistema de lubrificação
CC650, CC6050, CB7115	150	0,05	0,15	Seco
CC650, CC6050				Jorro (convencional)
CC650, CC6050, CB7115	225	0,05	0,15	Seco
CC650, CC6050				Jorro (convencional)
CC650, CC6050, CB7115	300	0,05	0,15	Seco
CC650, CC6050, CB7115				Jorro (convencional)

Fonte: próprio autor

Cada ferramenta foi testada em 3 condições de velocidade de corte (150, 225 e 300m/min), 2 condições de lubrificação (seco e jorro) e foram realizados 2 ensaios (teste e réplica), assim, no total foram realizados 12 ensaios para cada ferramenta de corte (exceto para a ferramenta de PcBN que foram 8 ensaios, não sendo realizados os ensaios utilizando as velocidades de corte de 150 e 225m/min, com lubrificação). Como foram utilizadas 3 tipos de ferramentas de corte, sendo

2 de cerâmica mista (classes CC650 e CC6050) e 1 de PcBN (classe CB7115), no total foram realizados 32 ensaios de torneamento.

O volume de material removido no torneamento foi de  $3,31 \times 10^3 \text{mm}^3$ , que corresponde a uma redução no diâmetro do corpo de prova de 1,5mm.

Para evitar a oxidação da superfície, após o torneamento, cada amostra foi protegida com uma camada fina de óleo. Em seguida, as amostras foram embaladas, para proteção da superfície e armazenadas seguramente.

Os ensaios de retificação foram realizados em uma retificadora cilíndrica universal, realizando operação de retificação cilíndrica externa de mergulho, utilizando rebolo convencional de óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Previamente a realização do ensaio foi realizado a dressagem do rebolo, utilizando dressador conglomerado de diamante. Este procedimento visa garantir que o rebolo não se apresentasse desgastado ou contaminado por cavacos dos ensaios anteriores antes da realização dos ensaios subsequentes, garantindo assim uma padronização para todos os ensaios.

Para realização dos ensaios de retificação foram definidas como variáveis a velocidade de mergulho e o volume de material retificado. Para a velocidade de mergulho foram adotados os valores de 0,3; 0,6 e 0,9mm/min. Para o volume de material retificado foram adotados valores de  $3,31 \times 10^3$  e  $6,47 \times 10^3 \text{mm}^3$ , correspondente a uma redução no diâmetro do corpo de prova de 1,5 e 3,0mm, respectivamente. Demais parâmetros do processo foram mantidos constantes: tempo de centelhamento (*spark-out*): 8s, velocidade periférica: 30m/s e sistema de lubrificação. Para o sistema de lubrificação foi utilizado fluido de corte sintético, Syntilo 9902, com concentração de 4%. Os ensaios foram realizados em 6 condições conforme demonstrado na Tabela 14.

**Tabela 14 - Condições dos ensaios de retificação**

Parâmetros	Símbolo	Unidade	Condições dos ensaios					
			1	2	3	4	5	6
Velocidade de mergulho	$v_f$	mm/min	0,3	0,3	0,6	0,6	0,9	0,9
Volume de material retificado	$Z_w$	$10^3 \text{mm}^3$	3,31	6,47	3,31	6,47	3,31	6,47
Velocidade do rebolo	$v_s$	m/s	30					
Tempo de centelhamento	$t_a$	s	8					
Vazão do fluido de corte	$Q_f$	L/min	13,5					

Fonte: próprio autor

Para cada condição de corte, foram realizadas 2 ensaios (teste e réplica), assim, no total foram realizados 12 ensaios de retificação.

Para evitar a oxidação da superfície, após a retificação, cada amostra foi protegida com uma camada fina de óleo. Em seguida, as amostras foram embaladas, para proteção da superfície e armazenadas seguramente.

A operação de dressagem do rebolo foi feita no princípio de cada ciclo de ensaio utilizando um dressador conglomerado de diamante. Os parâmetros do processo de dressagem estão demonstrados na Tabela 15.

**Tabela 15 - Parâmetros utilizados na dressagem**

<b>Parâmetros</b>	<b>Dados de corte utilizados</b>
Velocidade longitudinal da mesa	2,5mm/s
Profundidade de dressagem	0,05mm/passe
Número de passes	10passes
Camada removida na dressagem	0,5mm

Fonte: próprio autor

O esquema de montagem do dispositivo utilizado na operação de dressagem está representado na Figura 35.

**Figura 35 - Operação de dressagem**



Fonte: próprio autor

As Tabelas 16 e 17 demonstram os parâmetros de superfície bidimensionais (2D) e os tridimensionais (3D) avaliados.

**Tabela 16 - Parâmetros de superfície bidimensionais (2D) avaliados**

Parâmetro	Simbologia	Unidade	Definição
Amplitude	Ra	µm	Desvio aritmético médio do perfil em avaliação
	Rq	µm	Desvio médio quadrático do perfil em avaliação
	Rz	µm	Altura máxima do perfil
	Rsk	-	Fator de assimetria do perfil em avaliação
	Rku	-	Fator de achatamento do perfil em avaliação
	Rp	µm	Altura máxima do pico do perfil
	Rv	µm	Profundidade máxima do vale do perfil
	Rt	µm	Altura total do perfil
Funcionais de superfície	Rpk	µm	Altura reduzida do pico
	Rvk	µm	Profundidade reduzida do vale
	Rk	µm	Profundidade da rugosidade do núcleo
	Mr1	%	Porção de material da zona de pico
	Mr2	%	Porção de material da zona de vale

Fonte: próprio autor

Procedimento para execução das medições dos parâmetros de superfície bidimensionais (2D):

- ✓ limpar corpos de prova utilizando álcool absoluto e flanela limpa;
- ✓ posicionar do corpo de prova sobre os dispositivos;
- ✓ alinhar e nivelar corpo de prova com o rugosímetro;
- ✓ programar os parâmetros desejados no rugosímetro;
- ✓ medir e registrar os parâmetros de superfície bidimensionais (2D), perfil medição R;
- ✓ medir e registrar os parâmetros de superfície bidimensionais (2D), perfil DIN 4776;
- ✓ repetir os ciclos de medição e registro dos parâmetros de superfície bidimensionais (2D) para as oito posições, efetuando as mudanças de posições do corpo de prova manualmente.

Tabela 17 - Parâmetros de superfície tridimensionais (3D) avaliados

Parâmetro	Simbologia	Unidade	Definição
Amplitude	Sa	$\mu\text{m}$	Desvio médio aritmético da superfície
	Sq	$\mu\text{m}$	Desvio médio quadrático da superfície
	Sz	$\mu\text{m}$	Altura máxima
	Ssk	-	Assimetria da distribuição das alturas da topografia
	Sku	-	Curtose da distribuição das alturas da topografia
	Sp	$\mu\text{m}$	Altura máxima do pico
	Sv	$\mu\text{m}$	Profundidade máxima do vale
	St	$\mu\text{m}$	Altura total
Índices funcionais	Sbi	-	Índice de apoio da superfície
	Sci	-	Índice de retenção de fluido no núcleo
	Svi	-	Índice de retenção de fluido no vale
Funcionais de superfície	Spk	$\mu\text{m}$	Altura reduzida do pico
	Svk	$\mu\text{m}$	Profundidade reduzida do vale
	Sk	$\mu\text{m}$	Profundidade da rugosidade do núcleo
	Sr1 (Smr1)	%	Porção de material da zona de pico
	Sr2 (Smr2)	%	Porção de material da zona de vale
Funcionais de volume	Sa1 (Vmp)	$\mu\text{m}^3/\text{mm}^2$	Volume de material na zona de pico
	Sa2 (Vvv)	$\mu\text{m}^3/\text{mm}^2$	Volume de vazio na zona de vale

Fonte: próprio autor

Procedimento para execução das medições dos parâmetros de superfície tridimensionais (3D):

- ✓ limpar corpos de prova utilizando álcool absoluto e flanela limpa;
- ✓ definir o local da área de medição (área: 4x2mm);
- ✓ posicionar o corpo de prova sobre o porta-amostra do perfilômetro, de forma que a superfície da amostra fique perpendicular com o ponto de emissão do feixe de luz branca;
- ✓ executar o *set up* e programar os parâmetros desejados por meio do software do perfilômetro;
- ✓ medir os parâmetros de superfície tridimensionais (3D), utilizando uma lente de 20X de aumento, posicionada a uma distância de 5mm da superfície da amostra, aproximadamente;
- ✓ processar os dados através do software MountainsMap, gerando os parâmetros de superfície tridimensionais (3D), curvas Abbott-Firestone e as imagens topográficas da superfície.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

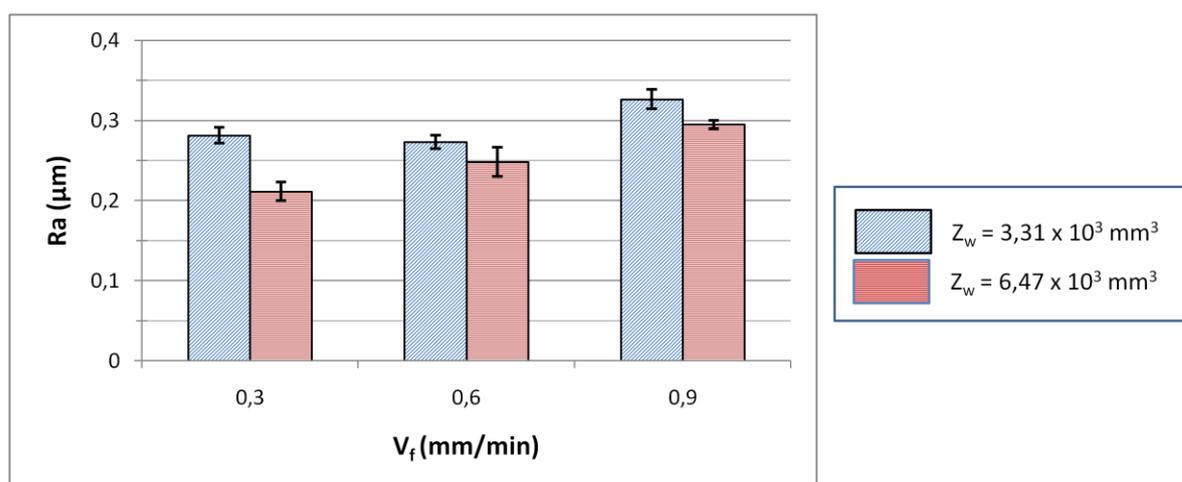
Neste tópico serão apresentados e discutidos os resultados obtidos por meio dos ensaios de caracterização dos parâmetros de superfície bidimensionais (2D) e tridimensionais (3D) e análise da tensão residual, das superfícies usinadas por meio dos processos de torneamento e retificação do aço ABNT 4340 endurecido. Os ensaios realizados permitiram obter dados e informações que geraram subsídios para avaliação, discussão e conclusão sobre a caracterização das superfícies. Os resultados foram avaliados e comparados de forma quantitativa e qualitativa, visando conhecer características comuns e específicas de cada processo de usinagem.

### 5.1 Caracterização da superfície-Parâmetros de superfície bidimensionais (2D)

#### 5.1.1 Desvio aritmético médio do perfil de avaliação (Ra)

Na Figura 36 são demonstrados os valores médios do parâmetro de superfície Ra, obtidos pelo processo de retificação, e seus respectivos desvios padrão para as velocidades de mergulho de 0,3; 0,6 e 0,9mm/min, respectivamente.

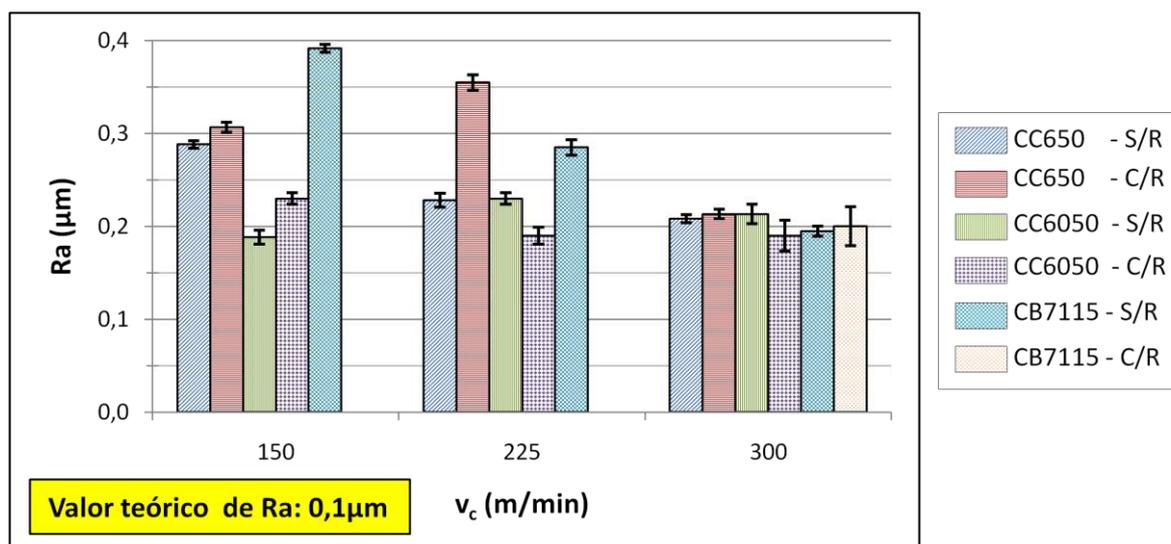
**Figura 36 - Desvio aritmético médio do perfil em avaliação (Ra) em função das velocidades de mergulho ( $v_f$ ) e dos volumes de material retificado ( $Z_w$ )**



Fonte: próprio autor

Já na Figura 37 são demonstrados os valores médios do parâmetro de superfície Ra, obtidos pelo processo de torneamento, e seus respectivos desvios padrão para as velocidades de corte de 150, 225 e 300m/min, respectivamente.

**Figura 37 - Desvio aritmético médio do perfil em avaliação (Ra) em função das velocidades de corte ( $v_c$ ) utilizando ferramentas de corte de cerâmica mista (CC650 e CC6050) e PcBN (CB7115), S/R - à seco e C/R - com lubrificrefrigeração**



Fonte: próprio autor

Observa-se na Figura 36 que o menor valor para o parâmetro de superfície Ra foi de 0,21 $\mu$ m obtido através da velocidade de mergulho de 0,3mm/min e volume de material retificado de 6,47x10<sup>3</sup>mm<sup>3</sup>. Percebe-se, também, que a rugosidade Ra foi maior quando foi utilizado o menor volume de material retificado, possivelmente devido à maior agressividade do rebolo após operação de dressagem, resultando em superfícies mais rugosas. De acordo com Bianchi et al. (2011), em operações de retificação com tempos operacionais reduzidos (volume de material retificado menor), o rebolo apresenta agressividade elevada, resultando em rugosidades maiores, porém o mesmo comportamento não é aplicado em operações com tempos operacionais elevados (volume de material retificado maior), onde a agressividade é baixa, exigindo a capacidade de resistência ao desgaste do grão abrasivo, consequentemente, a rugosidade é menor.

Os resultados das rugosidades apresentam comportamento característico, nos quais são observados maiores valores de rugosidades para as maiores

velocidades de mergulho, onde a taxa de remoção de material é maior, e as menores rugosidades para as menores velocidades de mergulho. Os resultados são compatíveis com os obtidos por Lee e Kim (2001), onde foi constatado que para maiores taxas de avanço as rugosidades foram maiores. Porém, os testes executados nas condições experimentais de menor volume de material retificado e velocidades de mergulhos de 0,3 e 0,6mm/min, não houve variação do parâmetro de rugosidade Ra, mantendo-se constante (0,28 $\mu$ m). Esta mesma tendência, também, foi constatada na análise dos parâmetros Rz, Rt e Rk.

Nos ensaios de retificação os valores obtidos para o parâmetro de superfície Ra ficaram na faixa de 0,21 a 0,33 $\mu$ m. O pior desempenho ocorreu quando foi utilizada a velocidade de mergulho de 0,9mm/min e volume de material retificado de 3,31x10<sup>3</sup>mm<sup>3</sup>, onde o parâmetro Ra foi de 0,33 $\mu$ m.

Observando a Figura 37, nota-se que no processo de torneamento os valores obtidos para o parâmetro Ra ficaram na faixa de 0,19 à 0,39 $\mu$ m. Esta faixa de valores de rugosidade é equivalente com os valores obtidos no processo de retificação. Portanto, utilizando-se as ferramentas e parâmetros de corte adequados, é possível conseguir acabamento no torneamento compatíveis como a retificação, o que permite maior flexibilidade no ambiente industrial. Para fins de referência, o valor teórico para o parâmetro Ra é de 0,1 $\mu$ m.

O pior desempenho ocorreu quando foi utilizado a ferramenta de PcBN, classe CB7115, à seco, velocidade de corte de 150m/min, onde o valor da rugosidade Ra foi de 0,39 $\mu$ m. Porém, este valor de rugosidade Ra ainda é compatível com o processo de retificação.

Normalmente, quando se aumenta a velocidade de corte, obtem-se menores rugosidades, e este fato foi constatado nos ensaios experimentais. Vale salientar que, as demais condições de corte, avanço e profundidade de corte, foram mantidas constantes, para as três velocidades de corte testadas. Conforme referências bibliográficas (MACHADO et al., 2015), ferramentas de cerâmica e PcBN suportam altas temperaturas, sem perder resistência mecânica, o que propicia trabalhar com altas velocidades de corte.

Baseado nos menores valores médios encontrados no processo de torneamento para o parâmetro Ra, pode-se concluir que a ferramenta de corte de cerâmica, classe CC6050, obteve o melhor desempenho (melhor acabamento),

quando foi encontrado o menor valor ( $0,19\mu\text{m}$ ), nas três velocidades de corte testadas.

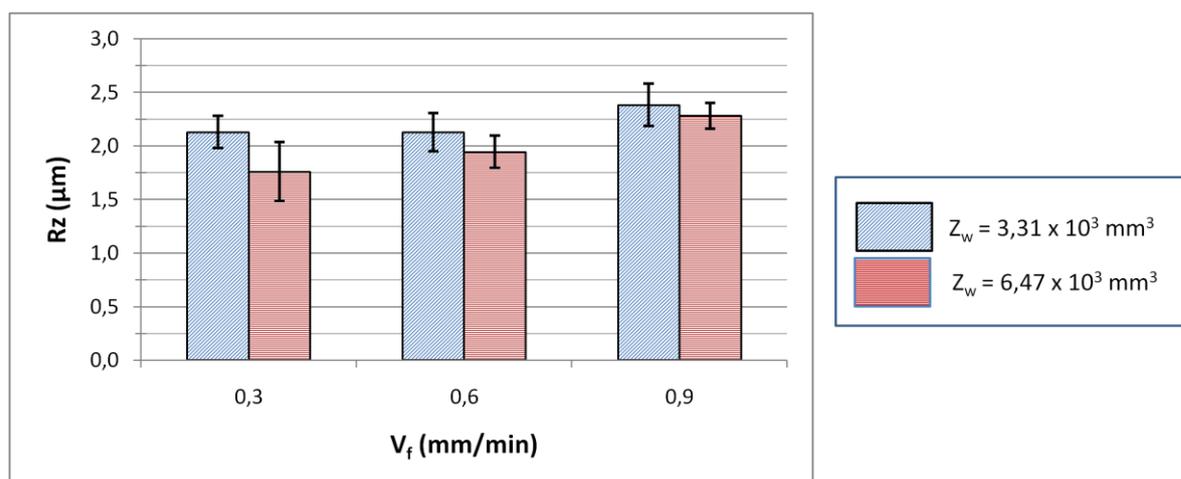
Comparando os dois processos, a faixa de valores obtidos para o parâmetro Ra foi  $0,21$  à  $0,33\mu\text{m}$  para a retificação e  $0,19$  à  $0,39\mu\text{m}$  para o torneamento. De acordo com pesquisas anteriores (TONSHOFF; ARENDT; AMOR, 2000; LIMA et al., 2005; BENGA; ABRÃO, 2003; CHOU; EVANS; BARASH, 2002) sobre o torneamento dos aços endurecidos utilizando ferramentas de corte de cerâmica mista e de PcBN (CBN-L, baixo percentual de CBN) foram obtidos valores para o parâmetro Ra na faixa de  $0,2$  à  $0,5\mu\text{m}$ , utilizando avanço de  $0,05\text{mm/rev}$  e velocidades de corte de  $80$ ,  $150$  e  $220\text{m/min}$ . Já Alves, Bianchi e Aguiar (2008) em suas pesquisas sobre a influência da velocidade de avanço do rebolo nos danos de aços endurecidos retificados, encontraram valores de Ra na faixa de  $0,2$  à  $0,4\mu\text{m}$ , utilizando velocidades de mergulho de  $0,25$ ;  $0,50$ ;  $1,00$ ;  $1,50$  e  $2,00\text{mm/min}$ .

Baseado na dispersão dos resultados obtidos, os processos de torneamento e retificação foram considerados similares.

### 5.1.2 Altura máxima do perfil (Rz)

Na Figura 38 são demonstrados os valores médios do parâmetro de rugosidade Rz, obtidos pelo processo de retificação, e seus respectivos desvios padrão para as velocidades de mergulho de  $0,3$ ;  $0,6$  e  $0,9\text{mm/min}$ , respectivamente.

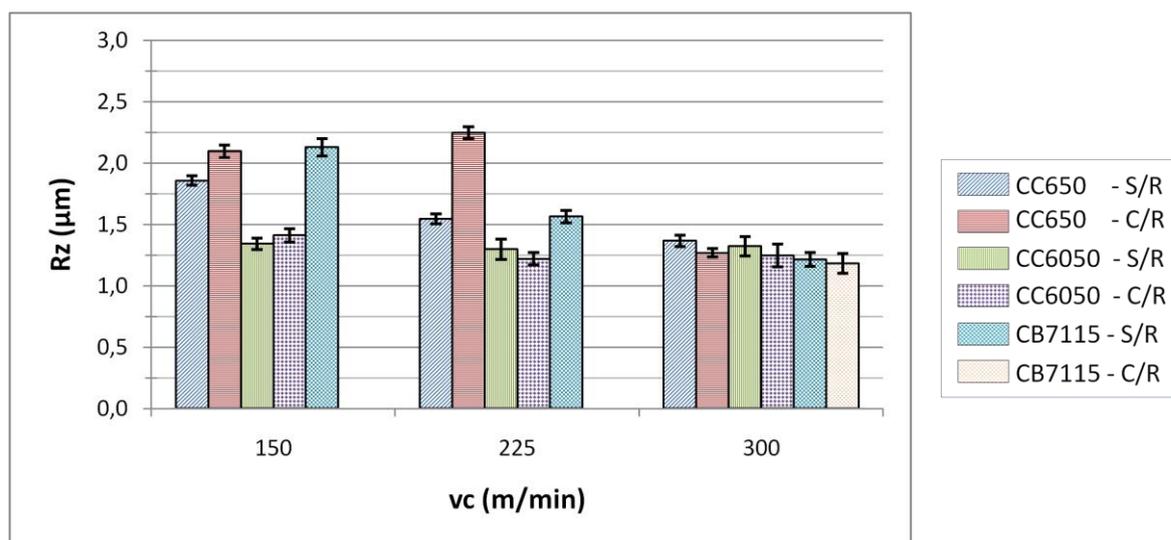
**Figura 38 - Altura máxima do perfil (Rz) em função das velocidades de mergulho ( $v_f$ ) e dos volumes de material retificado ( $Z_w$ )**



Fonte: próprio autor

Já na Figura 39 são demonstrados os valores médios do parâmetro de rugosidade Rz, obtidos pelo processo de torneamento, e seus respectivos desvios padrão para as velocidades de corte de 150, 225 e 300m/min, respectivamente.

**Figura 39 - Altura máxima do perfil (Rz) em função das velocidades de corte ( $v_c$ ) utilizando ferramentas de corte de cerâmica mista (CC650 e CC6050) e PcBN (CB7115), S/R - à seco e C/R - com lubrificrefrigeração**



Fonte: próprio autor

Nota-se na Figura 38 que o menor valor médio da rugosidade Rz foi de  $1,8\mu\text{m}$ , utilizando a velocidade de mergulho de  $0,3\text{mm}/\text{min}$  e volume de material retificado de  $6,47 \times 10^3\text{mm}^3$ . Por outro lado, o maior valor da rugosidade Rz foi na velocidade de mergulho de  $0,9\text{mm}/\text{min}$  e volume de material retificado de  $3,31 \times 10^3\text{mm}^3$ , onde o valor de Rz foi de  $2,4\mu\text{m}$ .

Houve uma tendência de aumento dos valores de Rz para os menores volumes de material retificado e com o aumento da velocidade de mergulho. Analisando os resultados para o parâmetro Rz e comparando-o com o parâmetro Ra, observa-se um comportamento semelhante para ambos, no qual os menores valores médios foram verificados na menor velocidade de mergulho e no maior volume de material retificado. Assim como foi constatado no parâmetro de rugosidade Ra, os resultados obtidos do parâmetro de rugosidade Rz são compatíveis com os obtidos por Alves, Bianchi e Aguiar (2008), onde foi constatado que para maiores taxas de avanço a rugosidade Rz foi maior.

Alves, Bianchi e Aguiar (2008) afirmaram que a velocidade de mergulho determina a taxa de remoção volumétrica do material que está sendo trabalhado, consequentemente, maiores velocidades de mergulho possibilitam menores tempos de usinagem e maior produtividade. Portanto, na definição do processo de retificação é preciso conciliar todos estes parâmetros (velocidade de mergulho, tempo de processo, rugosidade, produtividade e outros). É importante evidenciar também, que é comum associar as maiores velocidades de mergulho a maiores danos térmicos na peça trabalhada.

Observando os resultados do parâmetro Rz no torneamento, demonstrados na Figura 39, verifica-se que são análogos ao parâmetro Ra, ou seja, os menores valores de Rz foram obtidos na velocidade de corte de 300m/min. Baseado nos menores valores médios obtidos e seus respectivos desvios padrão, conclui-se que a ferramenta de corte de PcBN apresentou o melhor desempenho, quando foi obtido o valor de 1,2 $\mu$ m para o parâmetro Rz, utilizando a velocidade de corte de 300m/min em condição lubrificada. Por outro lado, o pior desempenho ocorreu quando foi utilizado a ferramenta de cerâmica, classe CC650, utilizando velocidade de corte de 225m/min, na condição lubrificada, onde o valor da rugosidade Rz foi de 2,25 $\mu$ m.

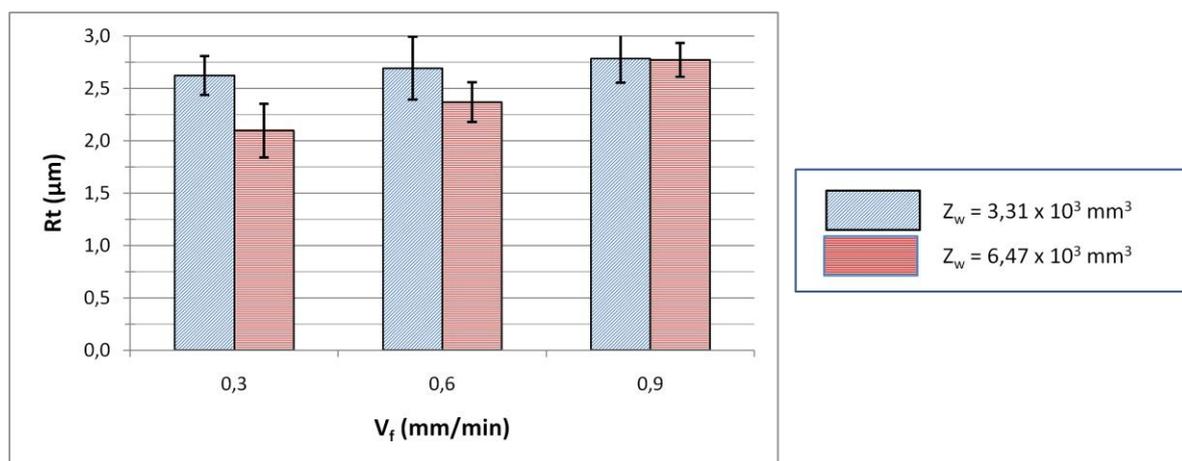
A ferramenta de cerâmica mista, classe CC6050, apresentou desempenho superior nas velocidades de corte de 150 e 225m/min, com valores de rugosidade inferiores a todos os valores encontrados no processo de retificação. Deve-se considerar, também, que a mesma obteve rendimento similar ao da ferramenta de corte de PcBN, quando foi testada na velocidade de corte de 300m/min, apresentando-se como uma boa opção de utilização. Este resultado confirma os estudos elaborados por Grzesik e Wanat (2005), quando concluíram que ferramentas de cerâmica mista obtêm as melhores performances quando trabalham com aços endurecidos na faixa de 50 à 52 HRC.

Comparando os dois processos, a faixa de valores obtidos para o parâmetro Rz foram de 1,8 à 2,4 $\mu$ m para a retificação e de 1,2 à 2,2  $\mu$ m para o torneamento. Baseado na faixa de valores obtidos para ambos os processos, conclui-se que o torneamento apresentou melhores resultados para o parâmetro Rz.

### 5.1.3 Altura total do perfil (Rt)

Na Figura 40 são demonstrados os valores médios da altura total do perfil (Rt), obtidos pelo processo de retificação, e seus respectivos desvios padrão para as velocidades de mergulho de 0,3; 0,6 e 0,9mm/min, respectivamente.

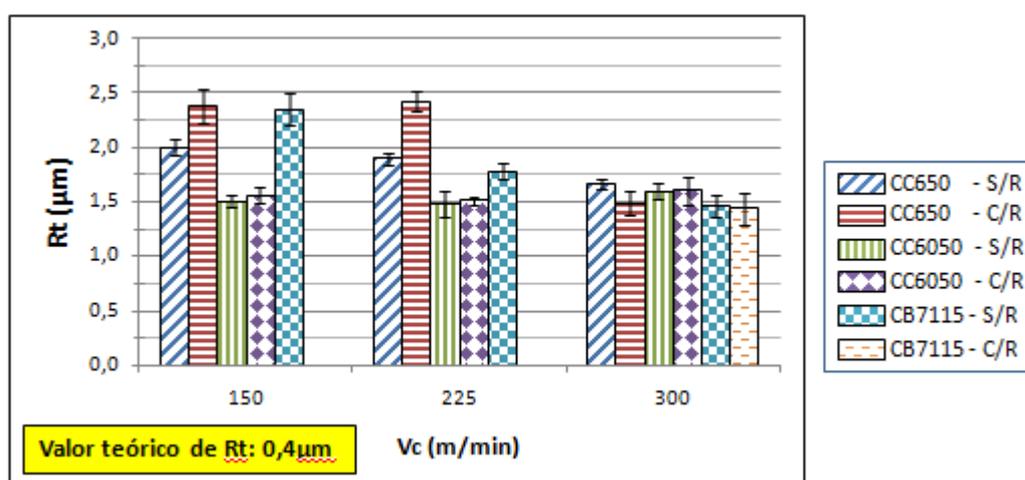
**Figura 40 - Altura total do perfil (Rt) em função das velocidades de mergulho ( $v_f$ ) e dos volumes de material retificado ( $Z_w$ )**



Fonte: próprio autor

Na Figura 41 são demonstrados os valores médios da altura total do perfil (Rt), obtido pelo processo de torneamento, e seus respectivos desvios padrão para as velocidades de corte de 150, 225 e 300m/min, respectivamente.

**Figura 41 - Altura total do perfil (Rt) em função das velocidades de corte ( $v_c$ ) utilizando ferramentas de corte de cerâmica mista (CC650 e CC6050) e PcBN (CB7115), S/R - à seco e C/R - com lubrificação**



Fonte: próprio autor

Observa-se na Figura 40 que o menor valor médio obtido para o parâmetro Rt foi de 2,1 $\mu$ m, o qual foi obtido utilizando a velocidade de mergulho de 0,3mm/min e volume de material removido de 6,47 x 10<sup>3</sup>mm<sup>3</sup>. Já o maior valor médio do parâmetro Rt foi de 2,8 $\mu$ m, o qual foi obtido através da velocidade de mergulho de 0,9mm/min, para ambos os volumes de materiais removidos.

Novamente, houve uma tendência de aumento dos valores do parâmetro Rt quando foram aumentados os valores da velocidade de mergulho. Analisando os resultados para o parâmetro Rt e comparando-o com os parâmetros Ra e Rz, observa-se um comportamento semelhante, no qual os menores valores foram verificados na menor velocidade de mergulho e no maior volume de material retificado.

No torneamento, os resultados do parâmetro Rt demonstrados na Figura 41, são análogos aos parâmetros Ra e Rz, ou seja, os menores valores de Rt foram obtidos utilizando a velocidade de corte de 300m/min. Baseado nos menores valores obtidos para o parâmetro Rt, e seus respectivos desvios padrão, conclui-se que a ferramenta de corte de PcBN, classe CB7115, obteve o melhor desempenho (melhor acabamento), quando foi utilizado a velocidade de corte de 300m/min na condição lubrificada, cujo valor médio da altura total do perfil Rt foi de 1,4 $\mu$ m. Por outro lado, os piores desempenhos ocorreram quando foi utilizada a ferramenta de corte de cerâmica mista CC650, utilizando as velocidades de corte de 150 e 225m/min, na condição lubrificada, e também, na ferramenta de corte de PcBN CB7115, utilizando a velocidade de corte de 150m/min, na condição à seco.

Analogamente aos parâmetros Ra e Rz, a ferramenta de cerâmica mista, classe CC6050 apresentou desempenhos equivalentes em todas as condições testadas, com valor médio da rugosidade em torno de 1,6 $\mu$ m, apresentando performance de acabamento superficial superior ao processo de retificação e, também, obteve rendimento similar ao da ferramenta de corte de PcBN, quando foi testada na velocidade de corte de 300m/min, apresentando-se como uma opção de utilização. Cabe ressaltar o melhor desempenho da ferramenta CC6050 nas velocidades de corte de 150 e 225m/min, em relação as demais ferramentas de corte.

Campos et al. (2011) comparou os principais efeitos dos parâmetros de corte, ou seja, velocidade de corte, avanço e profundidade de corte sobre os parâmetros de rugosidade Ra, Rz e Rt. Foi evidenciado que o efeito do avanço é relativamente

superior ao da velocidade de corte e da profundidade de corte. O aumento do avanço provoca maior ondulação na superfície da peça. Grzesik e Wanat (2005) avaliaram o efeito da variação do avanço sobre a qualidade superficial do aço endurecido, sendo constatado que o valor do parâmetro Ra aumentou de 0,25 para 0,57 $\mu$ m, quando o avanço variou de 0,04 para 0,1mm/rev. Concluíram que para se obter alto padrão de acabamento superficial o avanço deverá ser menor que 0,1mm/rev. O aumento da velocidade de corte poderá implicar em aumento da vibração do sistema máquina-ferramenta-peça. Já as baixas profundidades de corte pouco influenciam na rugosidade da peça.

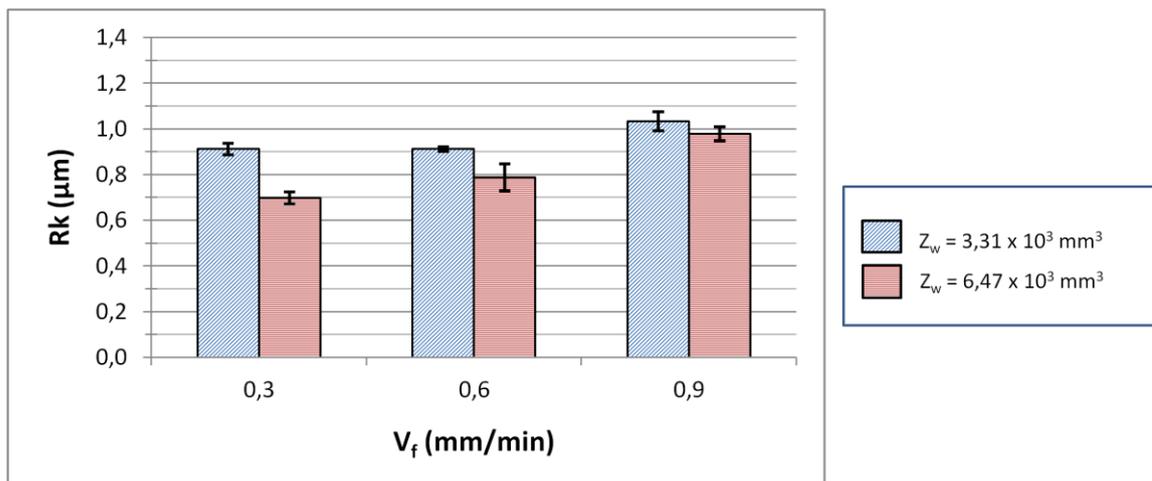
Comparando os dois processos, a faixa de valores obtidos para o parâmetro Rt foi de 2,1 à 2,8 $\mu$ m para a retificação e de 1,4 à 2,4 $\mu$ m para o torneamento. Para fins de referência, o valor teórico para o parâmetro Rt é 0,4 $\mu$ m. Baseado na faixa de valores obtidos para ambos os processos, conclui-se que o torneamento apresentou melhores resultados para o parâmetro Rt.

Silva (2018) em seus estudos dos parâmetros de superfície no aço ABNT 4340 endurecido após retificação, utilizando diferentes fluidos de corte, obteve valores para o parâmetro Rt na faixa de 2,1 à 4,0 $\mu$ m, utilizando velocidades de mergulho de 0,6 e 1,2mm/min e volumes de material retificado de 1,93; 12,64 e 21,81x10<sup>3</sup>mm<sup>3</sup>.

#### **5.1.4 Profundidade da rugosidade do núcleo (Rk)**

Na Figura 42 são demonstrados os valores médios da profundidade da rugosidade do núcleo (Rk), obtidos pelo processo de retificação, e seus respectivos desvios padrão para as velocidades de mergulho de 0,3; 0,6 e 0,9mm/min, respectivamente.

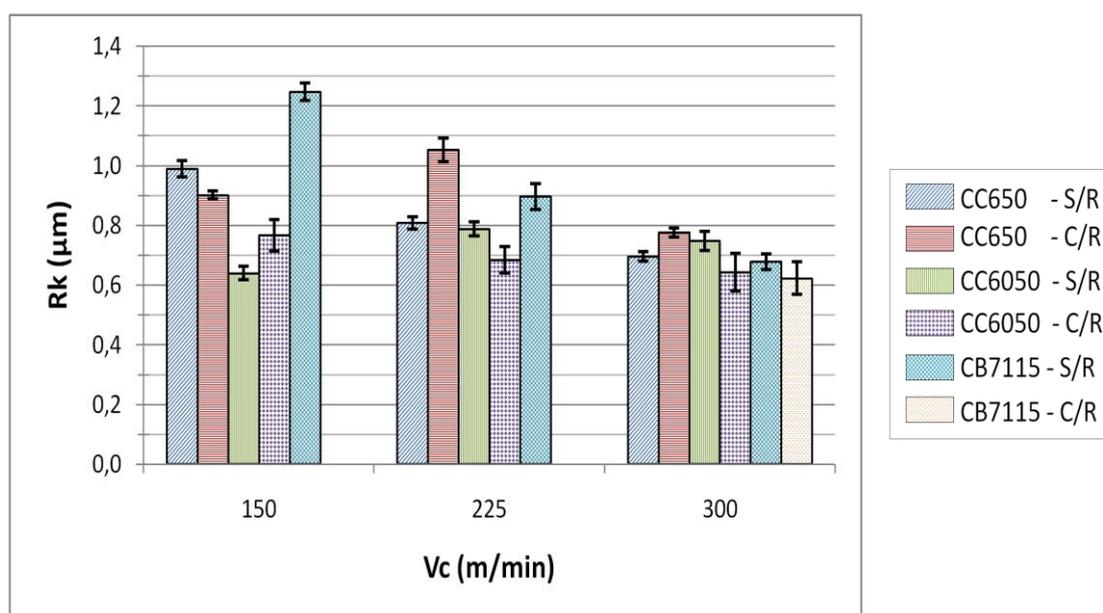
**Figura 42 - Profundidade da rugosidade do núcleo (Rk) em função das velocidades de mergulho ( $v_f$ ) e dos volumes de material retificado ( $Z_w$ )**



Fonte: próprio autor

Já na Figura 43 são demonstrados os valores médios da profundidade da rugosidade do núcleo (Rk), obtidos pelo processo de torneamento, e seus respectivos desvios padrão para as velocidades de corte de 150, 225 e 300m/min, respectivamente.

**Figura 43 - Profundidade da rugosidade do núcleo (Rk) em função das velocidades de corte ( $v_c$ ) utilizando ferramentas de corte de cerâmica mista (CC650 e CC6050) e PcBN (CB7115), S/R - à seco e C/R - com lubrificrefrigeração**



Fonte: próprio autor.

Percebe-se na Figura 42, que no geral houve um aumento crescente do valor de  $R_k$  à medida que foi aumentada a velocidade de mergulho, para ambos volumes de materiais removidos. O menor valor do parâmetro  $R_k$  foi de  $0,7\mu\text{m}$ , utilizando a velocidade de mergulho de  $0,3\text{mm}/\text{min}$  e volume de material removido de  $6,47 \times 10^3 \text{mm}^3$ . Já o maior valor médio do parâmetro  $R_k$  foi de  $1,03\mu\text{m}$ , utilizando velocidade de mergulho de  $0,9\text{mm}/\text{min}$  e volume de material retificado de  $3,31 \times 10^3 \text{mm}^3$ .

O parâmetro  $R_k$  mede a altura da porção do material do núcleo da superfície e quantifica a taxa de desgaste das superfícies em contato. De acordo com Stout (2000) um valor pequeno de  $R_k$  apresenta uma alta resistência ao desgaste e uma alta capacidade de suportar carga em operações de contato.

Mummery (1992, apud MEDEIROS, 2002) afirma a importância de utilizar-se a família dos parâmetros  $R_k$  quando se pretende avaliar o contato interativo entre duas superfícies, assim como, estimar os limites de espessura de filme de óleo ou desgaste em pares tribológicos.

Para o processo de torneamento, a Figura 43 demonstra que o menor médio valor do parâmetro  $R_k$  foi  $0,62\mu\text{m}$ , quando foi utilizado a ferramenta de corte de PcBN CB7115, velocidade de corte de  $300\text{m}/\text{min}$ , na condição lubrificada, e também com a ferramenta CC6050, velocidade de corte de  $150\text{m}/\text{min}$ , na condição à seco. Já o maior valor do parâmetro  $R_k$  para o processo de torneamento foi de  $1,25\mu\text{m}$ , quando foi utilizado a ferramenta de corte de PcBN com velocidade de corte de  $150\text{m}/\text{min}$ , na condição à seco. No geral, observa-se também que, existe uma tendência de reduzir o valor de  $R_k$  quando a velocidade de corte é aumentada.

Considerados os menores valores para o parâmetro  $R_k$ , e seus respectivos desvios padrão, pode-se concluir que a ferramenta de corte de cerâmica mista, classe CC6050, e a de PcBN, classe CB7115, apresentaram desempenhos similares, quando foram utilizadas com velocidade de corte de  $300\text{m}/\text{min}$ , na condição lubrificada.

Novamente, a ferramenta de cerâmica mista, classe CC6050, apresentou desempenhos equivalentes em todas as condições testadas, com valor da rugosidade  $R_k$  entre  $0,6$  à  $0,8\mu\text{m}$ , o que resulta em superfícies com perfil mais achatado e com maior capacidade de suportar cargas, conseqüentemente, melhor desempenho. Deve-se ressaltar, também, que a mesma obteve rendimento similar ao da ferramenta de corte de PcBN, quando foi testada na velocidade de corte de

300m/min, apresentando-se como uma opção de utilização. Cabe ressaltar o melhor desempenho da ferramenta CC6050 nas velocidades de corte de 150 e 225m/min, em relação as demais ferramentas de corte. De acordo com Petropoulos et al. (2003), os quais analisaram a relação entre os parâmetros  $R_k$  e  $R_{pk}$  nos processos de usinagem, concluíram que quanto menor o valor de  $R_k$ , menor será o valor de  $R_{pk}$ , conseqüentemente, menor será o desgaste na fase inicial de contato entre duas superfícies.

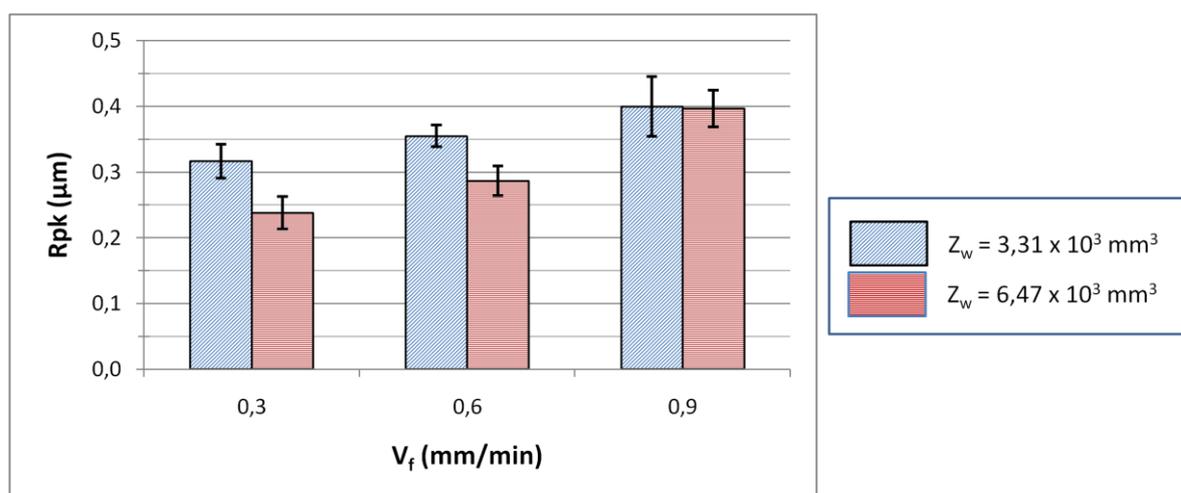
Silva (2018) em seus estudos dos parâmetros de superfície no aço ABNT 4340 endurecido após processo de retificação, utilizando diferentes fluidos de corte, obteve o valor de  $1,1\mu\text{m}$  para o parâmetro  $R_k$ , utilizando velocidade de mergulho de  $0,6\text{mm/min}$ , volume de material retificado de  $1,93 \times 10^3 \text{mm}^3$  e fluido de corte sintético.

Comparando os dois processos, a faixa de valores obtidos para o parâmetro  $R_k$  foi de  $0,70$  à  $1,02\mu\text{m}$  para a retificação e de  $0,62$  à  $1,25\mu\text{m}$  no torneamento. Baseado na faixa de valores obtidos para ambos os processos, conclui-se que a retificação apresentou melhores resultados para o parâmetro  $R_k$ .

### 5.1.5 Altura reduzida do pico ( $R_{pk}$ )

Na Figura 44 são demonstrados os valores médios da altura reduzida do pico ( $R_{pk}$ ), obtidos pelo processo de retificação, e seus respectivos desvios padrão para as velocidades de mergulho de  $0,3$ ;  $0,6$  e  $0,9\text{mm/min}$ , respectivamente.

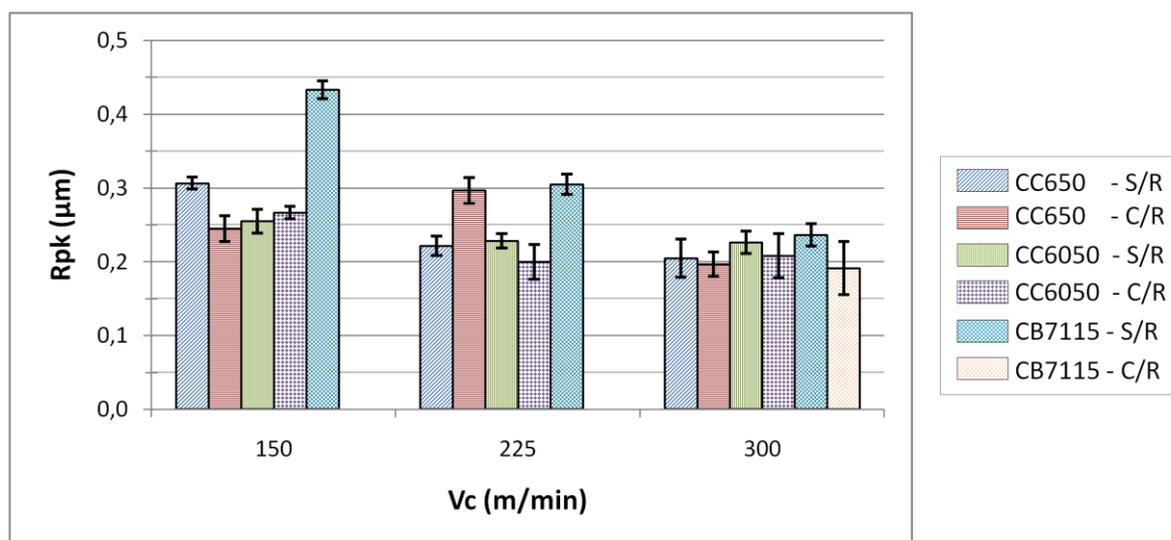
**Figura 44 - Altura reduzida do pico ( $R_{pk}$ ) em função das velocidades de mergulho ( $v_f$ ) e dos volumes de material retificado ( $Z_w$ )**



Fonte: próprio autor.

Na Figura 45 são demonstrados os valores médios da altura reduzida do pico (Rpk), obtidos pelo processo de torneamento, e seus respectivos desvios padrão para as velocidades de corte de 150, 225 e 300m/min, respectivamente.

**Figura 45 - Altura reduzida do pico (Rpk) em função das velocidades de corte ( $v_c$ ) utilizando ferramentas de corte de cerâmica mista (CC650 e CC6050) e PcBN (CB7115), S/R - à seco e C/R - com lubrificação**



Fonte: próprio autor.

Observa-se na Figura 44, que no processo de retificação existe uma tendência de aumentar o valor do parâmetro Rpk com o aumento da velocidade de mergulho. Fica evidente, também, que o menor valor de Rpk foi de 0,24µm, o qual foi obtido utilizando a menor velocidade de mergulho de 0,3mm/min e volume de material retificado de  $6,47 \times 10^3 \text{mm}^3$ . Este parâmetro representa a quantidade de superfície que será desgastada durante a carga inicial, durante os contatos relativos entre as superfícies que estão trabalhando em contato (OLIVEIRA, 2004).

A Figura 45 demonstra que o menor valor do parâmetro Rpk para o processo de torneamento foi 0,18µm, utilizando a ferramenta de corte de PcBN, classe CB7115, velocidade de corte de 300m/min, na condição lubrificada. Já o maior valor do parâmetro Rpk foi de 0,43µm, utilizando a ferramenta de corte de PcBN, classe CB7115, velocidade de corte de 150 m/min, na condição à seco. No geral, a ferramenta de cerâmica mista, classe CC6050, apresentou desempenhos equivalentes em todas as condições testadas, com o valor do parâmetro Rpk variando entre 0,20 à 0,27µm, o que resulta em um perfil de rugosidade com picos

menos pontiagudos e menor período de amaciamento. Deve-se ressaltar, também, que a mesma obteve rendimento similar ao da ferramenta de corte de PcBN, quando foi testada na velocidade de corte de 300m/min. Por outro lado, a mesma obteve desempenho superior a ferramenta de PcBN nas velocidades de corte de 150 e 225m/min. Na velocidade de corte de 300m/min todas as ferramentas apresentaram desempenhos similares em ambas condições de lubrificação.

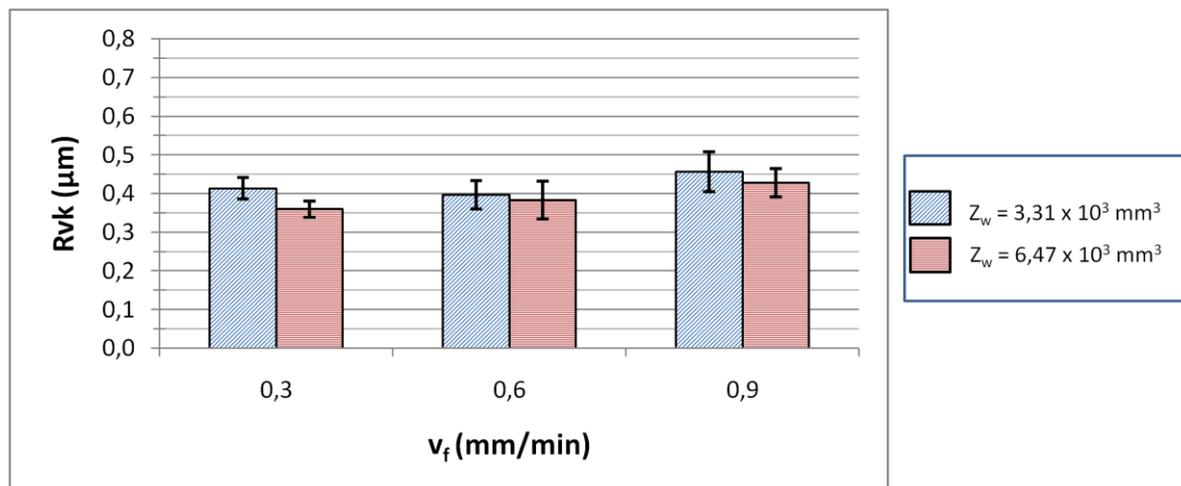
Comparando os dois processos, a faixa de valores médios obtidos para o parâmetro Rpk para a retificação foi de 0,24 a 0,40 $\mu$ m e para o torneamento foi de 0,18 a 0,43 $\mu$ m. Baseado nas faixas dos valores obtidos para o parâmetro Rpk, e seus respectivos desvios padrão, observa-se que ambos os processos, retificação e torneamento, obtiveram desempenhos similares. Conforme estudos de Petropoulos et al. (2003), já mencionado na análise do parâmetro Rk, foi comprovado nesta pesquisa que tanto no processo de retificação, quanto no processo de torneamento, quanto menor o valor de Rk, menor será o valor de Rpk, conseqüentemente, menor será o desgaste na fase inicial de contato entre duas superfícies.

Grzesik (2008) analisando a influência do desgaste da ferramenta no acabamento superficial, no torneamento do aço endurecido AISI 5140, dureza de 60 HRc, utilizando ferramenta de cerâmica mista, classe CC650, velocidade de corte de 100m/min, avanço de 0,1mm/rev, profundidade de corte de 0,25mm, encontrou valores máximo de 0,76 $\mu$ m para o parâmetro Rpk. Silva (2018) em seus estudos dos parâmetros de superfície no aço ABNT 4340 endurecido após processo de retificação, utilizando diferentes fluidos de corte, obteve o valor de 0,38 $\mu$ m para o parâmetro Rpk, utilizando velocidade de mergulho de 0,6mm/min, volume de material retificado de 1,93x10<sup>3</sup>mm<sup>3</sup> e fluido de corte sintético.

### **5.1.6 Profundidade reduzida do vale (Rvk)**

Na Figura 46 são demonstrados os valores médios da profundidade reduzidas dos vales (Rvk), obtidos pelo processo de retificação, e seus respectivos desvios padrão para as velocidades de mergulho de 0,3; 0,6 e 0,9mm/min, respectivamente.

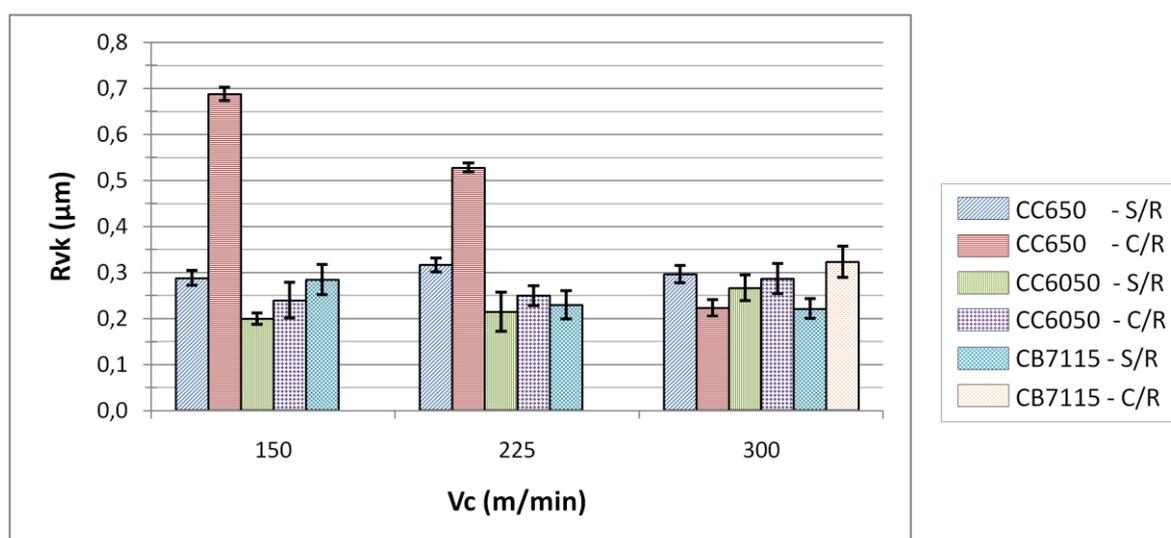
**Figura 46 - Profundidade reduzida dos vales (Rvk) em função das velocidades de mergulho ( $v_f$ ) e dos volumes de material retificado ( $Z_w$ )**



Fonte: próprio autor.

Na Figura 47 são demonstrados os valores médios da profundidade reduzida dos vales (Rvk), obtidos pelo processo de torneamento, e seus respectivos desvios padrão para as velocidades de corte de 150, 225 e 300m/min, respectivamente.

**Figura 47 - Profundidade reduzida dos vales (Rvk) em função das velocidades de corte ( $v_c$ ) utilizando ferramentas de corte de cerâmica mista (CC650 e CC6050) e PcBN (CB7115), S/R - à seco e C/R - com lubrificação**



Fonte: próprio autor.

Observa-se na Figura 46, que no geral o comportamento do parâmetro Rvk no processo de retificação tendeu ao aumento da menor para a maior velocidade de

mergulho. Nota-se, também, que os menores valores do parâmetro  $Rvk$  foram obtidos para os maiores volumes de material retificado. O menor valor de  $Rvk$  foi de  $0,35\mu\text{m}$ , o qual foi obtido velocidade de mergulho de  $0,3\text{mm}/\text{min}$ , e volume de material retificado de  $6,47 \times 10^3 \text{mm}^3$ . Por outro lado, o maior valor de  $Rvk$  foi de  $0,45\mu\text{m}$ , o qual foi obtido na velocidade de mergulho de  $0,9\text{mm}/\text{min}$  e volume de material removido de  $3,31 \times 10^3 \text{mm}^3$ . O aumento do volume de material retificado não apresentou variação significativa no parâmetro  $Rvk$  nas velocidades de mergulho de  $0,3$  e  $0,6\text{mm}/\text{min}$ .

De acordo com Oliveira (2004), o parâmetro  $Rvk$  indica a capacidade de retenção de fluido, portanto valores baixos de  $Rvk$  indicam que a superfície é de poucos vales e tem menor capacidade de reter fluidos e lubrificantes. Verifica-se que maiores taxas de material removido (altas velocidades de mergulho) propiciam uma superfície com mais vales e, conseqüentemente, maior capacidade de reter lubrificante, porém com rugosidades maiores (pior acabamento). É necessário conciliar estas duas variáveis, capacidade de retenção de lubrificante e acabamento superficial, de acordo com a aplicação da peça.

Nota-se, também, uma tendência dos valores do parâmetro  $Rvk$  serem maiores que os valores do parâmetro  $Rpk$ . Quanto maior for o valor de  $Rvk$  em relação a  $Rpk$  menor será o atrito entre duas superfícies em contato, maior será a capacidade de lubrificação e, conseqüentemente, menor o desgaste entre as mesmas (SEDLACEK; PODGORNIK; VIZINTIN, 2009).

Conforme Figura 47, o menor valor médio do parâmetro  $Rvk$  no processo de torneamento foi  $0,20\mu\text{m}$ , quando foi utilizada a ferramenta de corte de cerâmica mista, classe CC6050, velocidade de corte de  $150 \text{m}/\text{min}$ , na condição à seco. Já o maior valor médio do parâmetro  $Rvk$  foi de  $0,68\mu\text{m}$ , quando foi utilizada a ferramenta de corte de cerâmica mista, classe CC650, velocidade de corte de  $150\text{m}/\text{min}$ , na condição lubrificada. A ferramenta de cerâmica mista, classe CC6050, apresentou desempenhos equivalentes em todas as condições testadas, com o valor de  $Rvk$  variando entre  $0,20$  à  $0,28\mu\text{m}$ , o que resulta em um perfil de rugosidade com vales menos profundos e menor capacidade de retenção de fluido lubrificante. No geral, a ferramenta de cerâmica mista classe CC6050 apresentou desempenhos similares à ferramenta de PcBN, em todas as condições testadas.

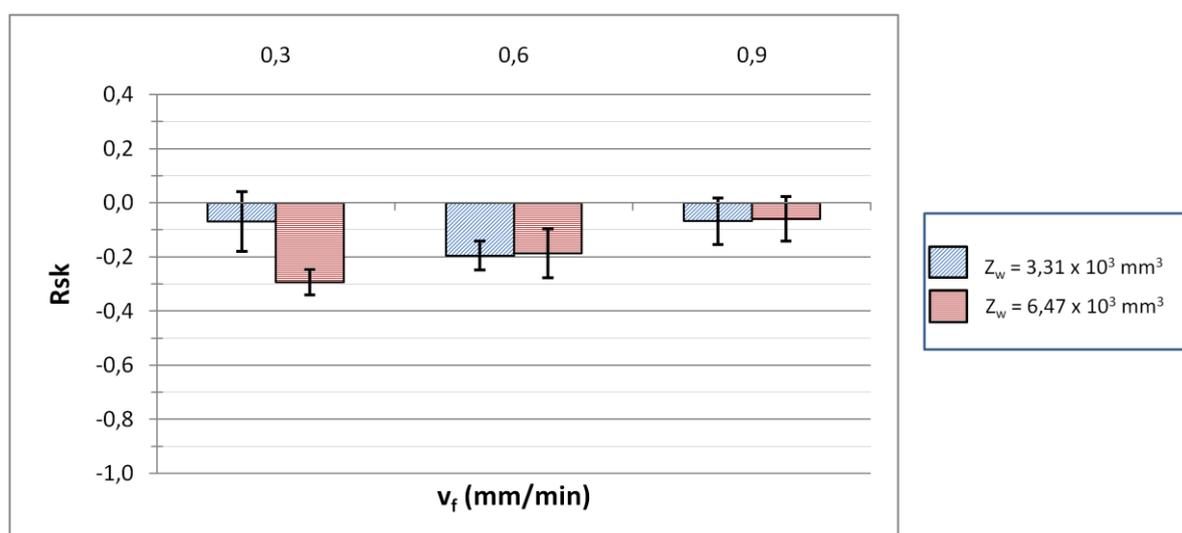
Comparando os dois processos, a faixa de valores obtidos para o parâmetro  $Rvk$  foi de  $0,35$  à  $0,45\mu\text{m}$  para a retificação e para o torneamento foi de  $0,20$  à

0,68 $\mu$ m. Baseado nos valores obtidos para o parâmetro Rvk, observa-se que o processo de torneamento gerou vales mais profundos, apenas quando foi utilizado a ferramenta de cerâmica, classe CC650, velocidades de corte de 150 e 225m/min, na condição lubrificada. Demais condições de testes, todos os valores de Rvk ficaram abaixo de 0,3 $\mu$ m. Já no processo de retificação o parâmetro Rvk é mais estável, com pouca variação entre seus valores mínimo e máximo. Silva (2018) em seus estudos dos parâmetros de superfície no aço ABNT 4340 endurecido após processo de retificação, utilizando diferentes fluidos de corte, obteve o valor de 0,45 $\mu$ m para o parâmetro Rvk, utilizando velocidade de mergulho de 0,6mm/min, volume de material retificado de 1,93x10<sup>3</sup>mm<sup>3</sup>.

### 5.1.7 Fator de assimetria do perfil em avaliação (Rsk)

Na Figura 48 são demonstrados os valores médios do fator de assimetria do perfil em avaliação (Rsk), obtidos pelo processo de retificação, e seus respectivos desvios padrão para as velocidades de mergulho de 0,3; 0,6 e 0,9mm/min, respectivamente.

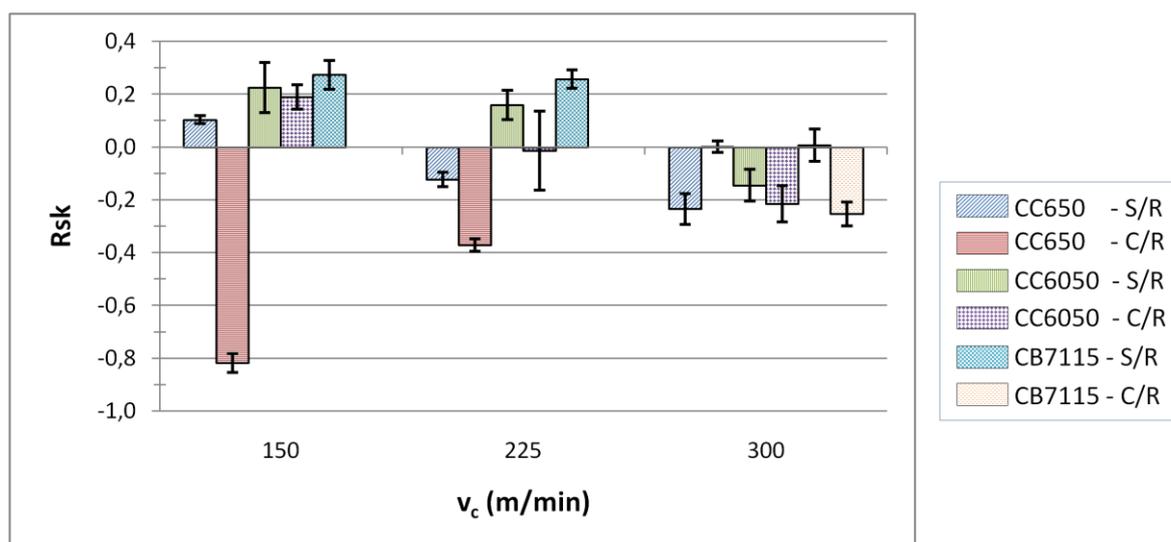
**Figura 48 - Fator de assimetria do perfil em avaliação (Rsk) em função das velocidades de mergulho ( $v_f$ ) e dos volumes de material retificado ( $Z_w$ )**



Fonte: próprio autor

Na Figura 49 são demonstrados os valores médios do fator de assimetria do perfil em avaliação ( $R_{sk}$ ), obtidos pelo processo de torneamento, e seus respectivos desvios padrão para as velocidades de corte de 150, 225 e 300m/min, respectivamente.

**Figura 49 - Fator de assimetria do perfil em avaliação ( $R_{sk}$ ) em função das velocidades de corte ( $v_c$ ) utilizando ferramentas de corte de cerâmica mista (CC650 e CC6050) e PcBN (CB7115), S/R - à seco e C/R - com lubrificação refrigerada**



Fonte: próprio autor

Observa-se na Figura 48 que para as três velocidades de mergulho e os dois volumes de material retificado foram obtidas superfícies com os picos removidos, pois os valores encontrados de  $R_{sk}$  são negativos. Este tipo de perfil é característico de uma boa superfície de apoio, indicando poucos pontos que podem desgastar-se rapidamente na fase de amaciamento.

Conforme Leach (2014) os valores negativos de  $R_{sk}$  indicam mais vales que picos, enquanto valores positivos indicam mais presença de picos. Também, o valor negativo para o parâmetro  $R_{sk}$  indica boa propriedade de retenção de óleo, garantindo maior resistência ao desgaste e um bom comportamento funcional das superfícies.

O parâmetro  $R_{sk}$  é muito aplicado na fabricação de mancais, pois os sulcos servem como depósito de lubrificante. Para superfícies de mancais, recomenda-se  $R_{sk}$  entre -1,6 e -2,0 (CARPINETTI et al., 2000 apud FREITAS, 2006).

Nota-se por meio da Figura 49 que existem valores positivos e negativos para o parâmetro Rsk no processo de torneamento, quando foram utilizadas as velocidades de corte de 150 e 225m/min. Já quando foi utilizado a velocidade de corte de 300m/min foram obtidos valores negativos predominantemente, os quais caracterizam superfícies com picos removidos. Portanto, utilizando velocidades de cortes maiores, a tendência é obtermos superfícies similares a obtidas pelo processo de retificação.

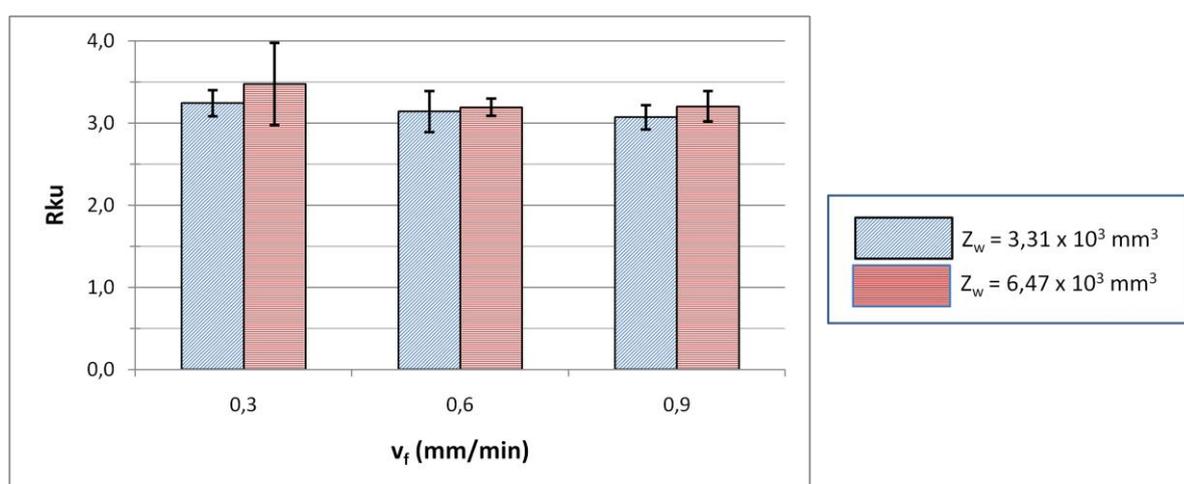
Baseado nos maiores valores negativos para o parâmetro Rsk no processo de torneamento, e os seus respectivos desvios padrão, pode-se concluir que a ferramenta de cerâmica mista, classe CC650, utilizando velocidade de corte de 150m/min, sob condição lubrificada, obteve superfície típica de mancal. Pode-se observar, também, que a ferramenta de cerâmica mista, classe CC650, apresentou valores negativos para o parâmetro Rsk nas três velocidades de corte testadas, observadas as condições de lubrificação, apresentando-se como opção para produzir superfícies com melhor capacidade de retenção de fluido lubrificante e melhor capacidade de carregamento, portanto melhor desempenho. Resultados similares também foram obtidos na análise do parâmetro de superfície tridimensional (3D) Ssk, conforme demonstrado na Tabela 19. Novamente, a ferramenta de cerâmica classe CC6050, apresentou desempenho similar ao processo de retificação, quando foi utilizado velocidade de corte de 300m/min, em ambas condições de lubrificação.

Comparando os dois processos, retificação e torneamento, a faixa de valores médios obtidos para o parâmetro Rsk na retificação foi de -0,06 à -0,30 e no torneamento foi de -0,82 à 0,27. Silva (2018) em seus estudos dos parâmetros de superfície no aço ABNT 4340 endurecido após processo de retificação, utilizando diferentes fluidos de corte, obteve o valor de  $-0,07\mu\text{m}$  para o parâmetro Rsk, utilizando velocidade de mergulho de 0,6mm/min, volume de material retificado de  $1,93 \times 10^3 \text{mm}^3$  e fluido de corte sintético, caracterizando uma superfície com mais presença de vales. Grzesik e Wanat (2006) analisando o acabamento superficial no torneamento do aço endurecido AISI 5140, dureza de 60 HRc, utilizando ferramenta de cerâmica mista, classe CC650, velocidade de corte de 100m/min, avanço de 0,04mm/rev e profundidade de corte de 0,25mm, encontrou o valor de  $0,43\mu\text{m}$  para o parâmetro Rsk, caracterizando uma superfície com mais presença de picos.

### 5.1.8 Fator de achatamento do perfil em avaliação (Rku)

Na Figura 50 são demonstrados os valores médios do fator de achatamento do perfil em avaliação (Rku), obtidos pelo processo de retificação, e seus respectivos desvios padrão para as velocidades de mergulho de 0,3; 0,6 e 0,9mm/min, respectivamente.

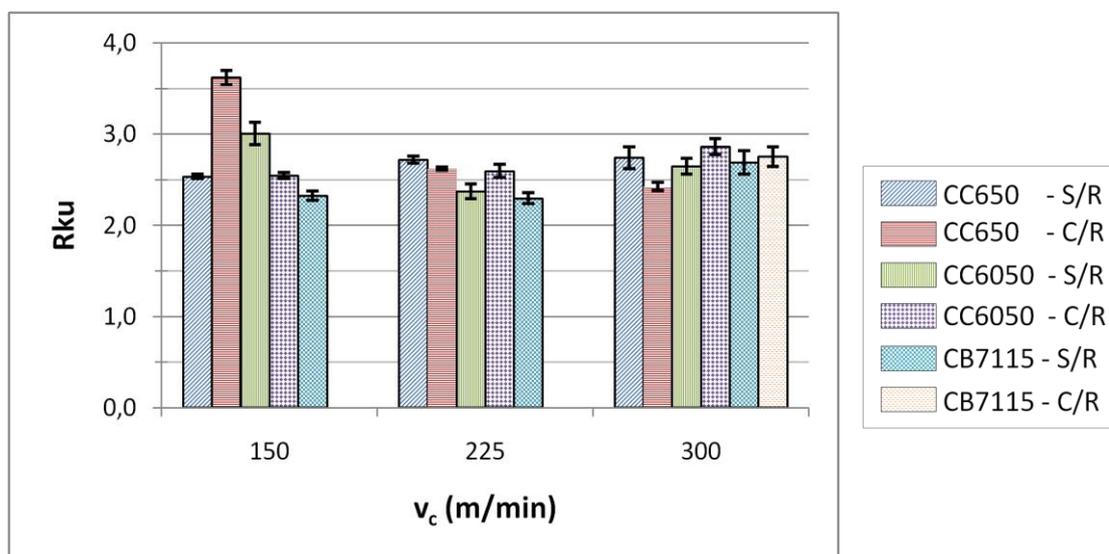
**Figura 50 - Fator de achatamento do perfil em avaliação (Rku) em função das velocidades de mergulho ( $v_f$ ) e dos volumes de material retificado ( $Z_w$ )**



Fonte: próprio autor

Na Figura 51 são demonstrados os valores médios do fator de achatamento do perfil em avaliação (Rku), obtidos pelo processo de torneamento, e seus respectivos desvios padrão para as velocidades de corte de 150, 225 e 300m/min, respectivamente.

**Figura 51 - Fator de achatamento do perfil em avaliação (Rku) em função das velocidades de corte ( $v_c$ ) utilizando ferramentas de corte de cerâmica mista (CC650 e CC6050) e PcBN (CB7115), S/R - à seco e C/R - com lubrificação**



Fonte: próprio autor.

De acordo com Freitas (2006), elevados valores de curtose ou simetria,  $Rku > 3$ , indicam que as irregularidades são pontiagudas e mais passíveis ao desgaste da superfície. Já valores de  $Rku < 3$  indicam superfícies não pontiagudas, com um perfil mais achatado. Por outro lado, superfícies com  $Rku = 3$  indica que a distribuição da amplitude de um perfil possui forma gaussiana balanceada. Conforme Leach (2014) este é um parâmetro útil para prever o desempenho da peça com relação ao desgaste e retenção de lubrificação. De acordo com literaturas, superfícies retificadas teriam um  $Rku$  igual a três, indicando um perfil com uma gaussiana balanceada, ou seja, teria-se uma superfície não áspera com poucos picos (SILVA, 2018).

Na retificação, o parâmetro  $Rku$  tendeu para um valor próximo de 3, conforme demonstrado na Figura 50, não havendo uma tendência linear do aumento de  $Rku$  com o aumento da velocidade de mergulho e com o aumento do volume de material removido.

No torneamento, observa-se por meio da Figura 51 que o valor do parâmetro  $Rku$  variou entre 2,3 a 3,6. Baseado nos valores de  $Rku$  menores que 3, os quais caracterizam um perfil de rugosidade não pontiagudo, e seus respectivos desvios padrão, pode-se concluir que as três ferramentas de corte (CC650, CC6050 e CB7115) apresentaram desempenhos similares, observados as condições de

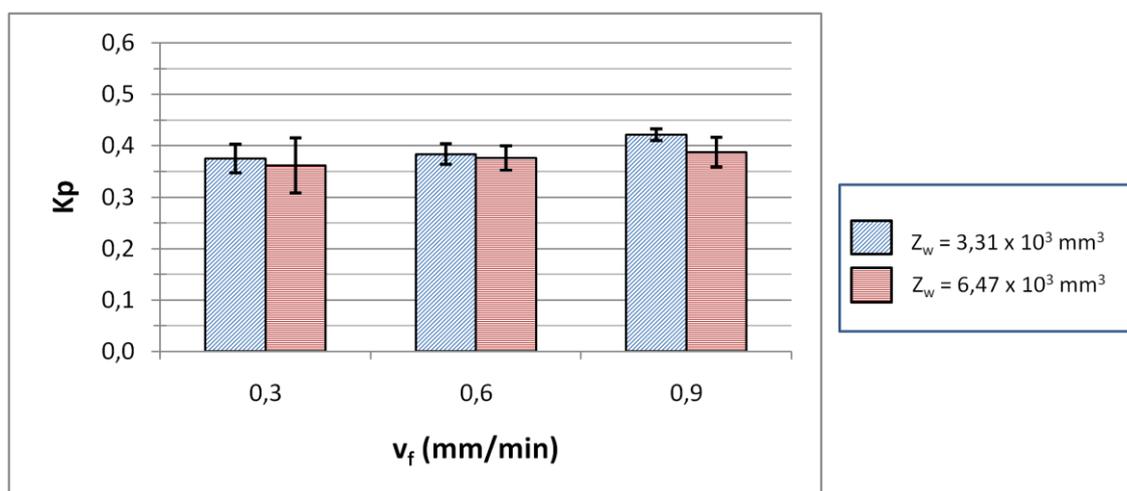
processo (velocidade de corte e condição de lubrificação) com  $Rku$  próximo do valor 2,5, caracterizando superfícies menos passíveis de desgaste.

Comparando ambos processos, a faixa de valores obtidos para o parâmetro  $Rku$  na retificação foi de 3,0 a 3,5, com uma maior predominância do valor em torno de 3,0, enquanto no torneamento foi de 2,3 a 3,6, com uma maior predominância do valor em torno de 2,5. Grzesik e Wanat (2006) analisando o acabamento superficial no torneamento do aço endurecido AISI 5140 com dureza de 60 HRC, utilizando ferramenta de cerâmica mista, classe CC650, velocidade de corte de 100m/min, avanço de 0,04mm/rev e profundidade de corte de 0,25mm, encontrou o valor de  $2,33\mu\text{m}$  para o parâmetro  $Rku$ , caracterizando uma superfície com perfil de rugosidade não pontiagudo. Silva (2018) em seus estudos dos parâmetros de superfície no aço ABNT 4340 endurecido após processo de retificação, utilizando diferentes fluidos de corte, obteve o valor de  $3,1\mu\text{m}$  para o parâmetro  $Rku$ , utilizando velocidade de mergulho de 0,6mm/min, volume de material retificado de  $1,93 \times 10^3 \text{mm}^3$  e fluido de corte sintético.

### 5.1.9 Coeficiente de vazio ( $K_p$ )

Na Figura 52 são demonstrados os valores médios do coeficiente de vazio ( $K_p$ ), obtidos pelo processo de retificação, e seus respectivos desvios padrão para as velocidades de mergulho de 0,3; 0,6 e 0,9mm/min, respectivamente.

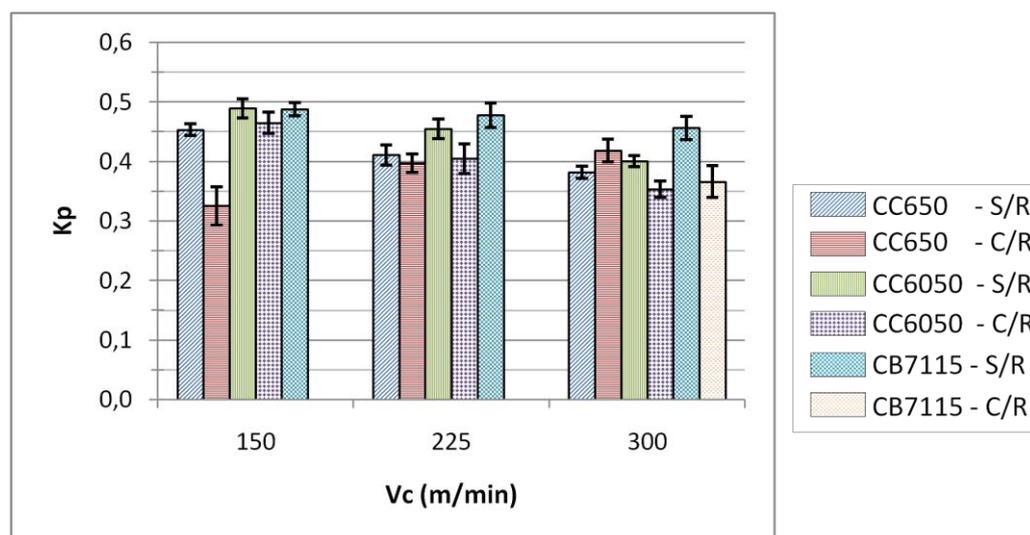
**Figura 52 - Coeficiente de vazio ( $K_p$ ) em função das velocidades de mergulho ( $v_f$ ) e dos volumes de material retificado ( $Z_w$ )**



Fonte: próprio autor

Na Figura 53 são demonstrados os valores médios do coeficiente de vazio ( $K_p$ ), obtidos pelo processo de torneamento, e seus respectivos desvios padrão para as velocidades de corte de 150, 225 e 300m/min, respectivamente.

**Figura 53 - Coeficiente de vazio ( $K_p$ ) em função das velocidades de corte ( $v_c$ ) utilizando ferramentas de corte de cerâmica mista (CC650 e CC6050) e PcBN (CB7115), S/R - à seco e C/R - com lubrificação**



Fonte: próprio autor

O desgaste linear e acabamento podem ser relacionados através do coeficiente de vazio que é um importante parâmetro tribológico usado para avaliar o desgaste ocorrido na superfície da peça. Quanto menor o valor do coeficiente de vazio, menor será o desgaste na superfície da peça e melhor o acabamento superficial (PAWLUS; MICHALSLI, 1992). O coeficiente de vazio é dado pela razão entre o parâmetro de amplitude  $R_p$  (altura máxima do pico do perfil) e  $R_t$  (altura total do perfil), conforme Equação 1.

Analisando o processo de retificação, Figura 52, o valor médio do parâmetro  $K_p$  aumenta suavemente quando a velocidade de mergulho foi aumentada, resultando uma superfície com acabamento mais grosseiro, quando comparado com o acabamento obtido utilizando-se velocidades de mergulho menores, as quais produzem superfícies com menores valores de  $K_p$ . O aumento do volume de material retificado não apresentou variação significativa no parâmetro  $K_p$  nas três velocidades de mergulho.

Nota-se por meio da Figura 53 que os valores de  $K_p$  para o processo de torneamento tenderam a diminuir quando a velocidade de corte foi aumentada, indicando uma melhoria na qualidade da superfície. Ao contrário, baixas velocidades de corte resultaram em maiores valores de  $K_p$ , obtendo-se superfícies com piores acabamentos, exceto para a ferramenta de corte de cerâmica mista, classe CC650. Baseado nos menores valores para o parâmetro  $K_p$ , e seus respectivos desvios padrão, pode-se concluir que a ferramenta de cerâmica mista, classe CC650, utilizando a velocidade de corte de 150m/min, na condição lubrificada, obteve o melhor desempenho, obtendo o menor valor para o parâmetro  $K_p$  igual a 0,33. Na condição de velocidade de corte de 300m/min, o parâmetro  $K_p$  variou de 0,35 à 0,45, sendo que a ferramenta de cerâmica mista, classe CC6050, obteve desempenho similar ao da ferramenta de corte de PcBN, classe CB7115.

Comparando ambos processos, a faixa de valores médios obtidos para o parâmetro  $K_p$  na retificação foi de 0,36 à 0,42, enquanto no torneamento foi de 0,33 à 0,48. Baseadas nestas faixas de valores do parâmetro  $K_p$ , podemos considerar os processos equivalentes. Grzesik e Wanat (2006) analisando o acabamento superficial no torneamento do aço endurecido AISI 5140, dureza de 59 HRc, utilizando ferramenta de cerâmica mista, classe CC650, velocidade de corte de 100m/min, avanço de 0,04mm/rev e profundidade de corte de 0,25mm, encontrou o valor de 0,48 $\mu$ m para o parâmetro  $K_p$ . Silva (2018) em seus estudos dos parâmetros de superfície no aço ABNT 4340 endurecido após processo de retificação, utilizando diferentes fluidos de corte, obteve o valor de 0,38 $\mu$ m para o parâmetro  $K_p$ , utilizando velocidade de mergulho de 0,6mm/min, volume de material retificado de 1,93x10<sup>3</sup>mm<sup>3</sup> e fluido de corte sintético.

## **5.2 Caracterização da superfície-Parâmetros de superfície tridimensionais (3D)**

### **5.2.1 Parâmetros de amplitude e índices funcionais**

Os parâmetros de amplitudes e índices funcionais das amostras retificadas nas velocidades de mergulho de 0,3; 0,6 e 0,9mm/min e volumes de material removido de 3,31x10<sup>3</sup> e 6,47x10<sup>3</sup>mm<sup>3</sup> são demonstrados na Tabela 18.

**Tabela 18 - Parâmetros de amplitudes e índices funcionais das amostras retificadas**

Parâmetros	$Z_w = 3,31 \times 10^3 \text{mm}^3$			$Z_w = 6,47 \times 10^3 \text{mm}^3$		
	$v_f = 0,3$ (mm/min)	$v_f = 0,6$ (mm/min)	$v_f = 0,9$ (mm/min)	$v_f = 0,3$ (mm/min)	$v_f = 0,6$ (mm/min)	$v_f = 0,9$ mm/min
Sa ( $\mu\text{m}$ )	0,358	0,352	0,380	0,276	0,323	0,373
Sq ( $\mu\text{m}$ )	0,455	0,446	0,486	0,353	0,427	0,473
Sz ( $\mu\text{m}$ )	20,400	5,190	7,460	7,960	15,400	9,750
Ssk (-)	-0,013	-0,298	-0,371	-0,351	-1,300	-0,234
Sku (-)	11,500	3,370	3,710	3,710	18,400	3,640
Sp ( $\mu\text{m}$ )	22,300	3,660	4,090	5,540	11,700	6,070
Sv ( $\mu\text{m}$ )	5,630	2,870	4,140	4,060	12,100	4,420
St ( $\mu\text{m}$ )	28,000	6,530	8,230	9,600	23,800	10,500
Sbi (-)	0,021	0,151	0,146	0,071	0,039	0,089
Sci (-)	1,460	1,450	1,420	1,440	1,380	1,470
Svi (-)	0,133	0,130	0,134	0,135	0,137	0,128

Fonte: próprio autor.

Analisando os parâmetros de amplitude da superfície em 3D (Sa, Sq, Sz, Ssk, Sku, Sp, Sv, St) da Tabela 18, pode-se caracterizar melhor as superfícies retificadas e compará-los com os resultados obtidos por meio dos parâmetros 2D, assegurando uma maior confiabilidade dos resultados.

Com relação ao parâmetro Sa, nota-se o mesmo comportamento obtido pelas medições 2D, ou seja, maiores valores de Sa para os menores volumes de materiais removidos, e menores valores de Sa para os maiores volumes de materiais removidos. Conforme já mencionado na análise dos parâmetros de superfície bidimensionais (2D), esta tendência deve-se, possivelmente, a agressividade do rebolo. Comparando-se os parâmetros de superfície bidimensionais (2D) e tridimensionais (3D), verifica-se que os parâmetros Ra e Sa apresentaram comportamentos semelhantes. Para o parâmetro de superfície bidimensional (2D) a faixa encontrada foi de 0,21 à 0,33 $\mu\text{m}$ , enquanto para o parâmetro de superfície tridimensional (3D) a faixa encontrada foi de 0,27 à 0,38 $\mu\text{m}$ . Silva et al. (2018) em seus estudos dos parâmetros de superfície tridimensionais (3D) no aço ABNT 4340 endurecido após processo de retificação, utilizando diferentes fluidos de corte, obteve valores variando de 0,262 à 0,752 $\mu\text{m}$  para o parâmetro Sa, utilizando

velocidade de mergulho de 0,6mm/min, volumes de material retificado de  $1,93 \times 10^3$  e  $21,82 \times 10^3 \text{mm}^3$  e fluidos de corte mix, integral, sintético e MQL. Kundrak, Gyani e Bana (2008) analisando o acabamento superficial na retificação do aço endurecido ISO 16MnCr5, dureza de 62 HRc, utilizando velocidade de mergulho de 2,2mm/min, fluido de corte emulsão, encontrou valores variando de 0,467 à 0,588 $\mu\text{m}$  para o parâmetro Sa.

Além do parâmetro Sa, a Tabela 18 também demonstra os demais parâmetros de amplitude, Sq, Sz, Sp, Sv, St, os quais também são utilizados para caracterização da superfície retificada. São apresentados também os índices funcionais, Sbi (índice de apoio da superfície), Sci (índice de retenção de fluido no núcleo) e Svi (índice de retenção de fluido no vale), os quais caracterizam as propriedades de apoio e de retenção de fluido da superfície. Estes índices funcionais são equivalentes aos parâmetros de volume, Vmp (volume de material na zona de pico), Vvc (volume de vaizo no núcleo) e Vvv (volume de vazio na zona de vales), respectivamente, e suas interpretações possuem o mesmo significado (GRZESIK; ZAK; KISZKA, 2014).

Os valores encontrados para os parâmetros Sz e St estão bem maiores em relação aos encontrados na inspeção 2D. Esta variação deve-se principalmente ao fato de que os parâmetros Sz e St tem a sua definição baseada na distância entre picos e vales. Griffiths (2001 apud CAMPOS, 2016) e Dong, Sullivan, Stout (1994) afirmam que a definição de vales e picos é ainda um problema presente na maioria dos parâmetros de superfície tridimensionais (3D). Na análise dos parâmetros de superfície bidimensionais (2D), um pico é o valor mais elevado entre os dois vizinhos, ao longo da linha média do perfil. Já na análise 3D, um pico pode ser definido por diversos critérios, poder ser em relação a quatro ou oito vizinhos próximos, e cada análise produz diferentes resultados. A faixa dos valores encontrados para os parâmetros Rz e Rt foi de 1,8 à 2,4 $\mu\text{m}$  e 2,1 à 2,8 $\mu\text{m}$ , respectivamente. Enquanto que a faixa dos valores encontrados para os parâmetros Sz e St foi de 5,19 à 20,4 $\mu\text{m}$  e 6,53 à 28 $\mu\text{m}$ , respectivamente. Kundrak, Gyani e Bana (2008) analisando o acabamento superficial na retificação do aço endurecido ISO 16MnCr5, dureza de 62 HRc, encontraram valores variando de 3,77 à 4,72 $\mu\text{m}$  para o parâmetro Sz e valores variando de 4,38 à 4,94 $\mu\text{m}$  para o parâmetro St.

Os valores de Ssk encontrados foram sempre negativos, variou de -0,01 à -1,30, comportamento similar ao parâmetro Rsk que variou de -0,06 à -0,3, o que

indica maior predominância de vales, conseqüentemente, maior capacidade de retenção de lubrificantes, garantindo maior resistência ao desgaste e um bom comportamento funcional das superfícies. Silva et al. (2018) em seus estudos dos parâmetros de superfície tridimensionais (3D) no aço ABNT 4340 endurecido após processo de retificação, encontrou valores de Ssk variando de -0,05 à -0,58. Kundrak, Gyani e Bana (2008) analisando o acabamento superficial na retificação do aço endurecido ISO 16MnCr5, dureza de 62 HRc, encontraram valores variando de -0,060 à -0,178 $\mu\text{m}$  para o parâmetro Ssk.

Os valores de Sku encontrados diferem dos encontrados nas inspeções 2D (variou de 3,0 à 3,5), variando de 3,71 a 18,4, porém com maior predominância da faixa de valores entre 3,370 à 3,710. Valores acima de 3 indicam que as irregularidades superficiais são pontiagudas. Já na medição 2D os valores encontrados estão bem próximos de 3. Kundrak, Gyani e Bana (2008) analisando o acabamento superficial na retificação do aço endurecido ISO 16MnCr5, dureza de 62 HRc, encontraram valores variando de 2,79 à 2,83 $\mu\text{m}$  para o parâmetro Sku.

Na Tabela 19 são apresentados os valores médios dos parâmetros de amplitudes e índices funcionais (superfície 3D) das amostras torneadas nas velocidades de corte de 150, 225 e 300m/min, utilizando ferramentas de corte de cerâmica mista, classes CC650 e CC6050, e de PcBN, classe CB7115, à seco (S/R) e com lubrificação (C/R).

**Tabela 19 - Parâmetros de amplitudes e índices funcionais no processo de torneamento**

Velocidade de corte de 150 m/min						
Parâmetros	Ferramentas de corte					
	CC650-S/R	CC650-C/R	CC6050-S/R	CC6050-C/R	CB7115-S/R	CB7115-C/R
Sa (µm)	0,345	0,344	0,246	0,271	0,387	-
Sq (µm)	0,434	0,442	0,309	0,341	0,476	-
Sz (µm)	5,130	7,350	4,940	5,140	4,480	-
Ssk (-)	0,018	-0,674	0,096	0,012	0,437	-
Sku (-)	2,970	3,580	3,060	3,070	2,680	-
Sp (µm)	3,070	4,790	3,220	4,290	4,050	-
Sv (µm)	2,490	4,670	2,840	2,990	2,230	-
St (µm)	5,570	9,460	6,060	7,280	6,280	-
Sbi (-)	0,186	0,107	0,115	0,092	0,150	-
Sci (-)	1,600	1,280	1,600	1,590	1,780	-
Svi (-)	0,116	0,160	0,109	0,114	0,081	-

Velocidade de corte de 225 m/min						
Parâmetros	Ferramentas de corte					
	CC650-S/R	CC650-C/R	CC6050-S/R	CC6050-C/R	CB7115-S/R	CB7115-C/R
Sa (µm)	0,283	0,382	0,269	0,217	0,319	-
Sq (µm)	0,354	0,474	0,333	0,270	0,389	-
Sz (µm)	3,280	13,600	3,130	4,050	3,870	-
Ssk (-)	-0,233	-0,447	-0,005	-0,296	0,368	-
Sku (-)	2,950	3,630	2,730	3,060	2,610	-
Sp (µm)	1,650	13,000	1,610	2,026	2,180	-
Sv (µm)	1,790	4,270	1,690	2,720	2,580	-
St (µm)	3,440	17,200	3,300	4,980	4,760	-
Sbi (-)	0,322	0,039	0,315	0,146	0,262	-
Sci (-)	1,460	1,340	1,570	1,430	1,720	-
Svi (-)	0,123	0,137	0,108	0,126	0,081	-

Velocidade de corte de 300 m/min						
Parâmetros	Ferramentas de corte					
	CC650-S/R	CC650-C/R	CC6050-S/R	CC6050-C/R	CB7115-S/R	CB7115-C/R
Sa (µm)	0,300	0,278	0,261	0,223	0,221	0,204
Sq (µm)	0,371	0,345	0,326	0,280	0,278	0,254
Sz (µm)	4,920	3,710	3,310	4,880	3,590	3,020
Ssk (-)	-0,274	-0,074	-0,263	-0,279	0,099	-0,137
Sku (-)	2,950	2,870	2,930	3,260	3,080	2,890
Sp (µm)	2,720	2,170	2,110	5,270	2,460	1,810
Sv (µm)	3,110	2,740	1,580	2,160	3,390	1,770
St (µm)	5,830	4,920	3,700	7,430	5,850	3,570
Sbi (-)	0,173	0,214	0,204	0,058	0,140	0,182
Sci (-)	1,440	1,530	1,470	1,470	1,590	1,151
Svi (-)	0,122	0,113	0,127	0,128	0,111	0,118

Fonte: próprio autor

Percebe-se na Tabela 19 que a faixa dos valores para o parâmetro Sa foi de 0,20 à 0,39µm, enquanto a faixa dos valores para o parâmetro de superfície Ra foi de 0,19 à 0,39µm. Portanto, ambas análises resultaram em valores similares para

este parâmetro. Kundrak, Gyani e Bana (2008) analisando o acabamento superficial no torneamento do aço endurecido ISO 16MnCr5, dureza de 62 HRc, utilizando ferramenta de corte de PcBN, classe CBN7020, velocidade de corte de 180m/min, avanço de 0,08mm/rev, profundidade de corte de 0,05mm, encontrou o valor de 1,02 $\mu$ m para o parâmetro Sa. Grzesik e Wanat (2005) analisando o perfil de rugosidade no torneamento do aço endurecido AISI 5140, dureza de 59 HRc, utilizando ferramenta de corte de cerâmica mista, classe CC650, velocidade de corte de 100m/min, avanço de 0,04mm/rev, profundidade de corte de 0,25mm, obteve o valor médio de 0,280 $\mu$ m para o parâmetro Sa.

Já as faixas dos valores encontrados para os parâmetros Sz e St estão maiores em relação aos encontrados na medição 2D. A explicação para estas divergências é similar a anteriormente definida para a análise do processo de retificação. A faixa dos valores médios encontrados para os parâmetros Rz e Rt foi de 1,22 à 2,25 $\mu$ m e 1,40 à 2,40 $\mu$ m, respectivamente. Enquanto que a faixa dos valores encontrados para os parâmetros Sz e St foi de 3,130 à 13,600 $\mu$ m (com maior predominância da faixa entre 3,130 à 5,140 $\mu$ m) e 3,300 à 17,200 $\mu$ m (com maior predominância da faixa entre 3,300 à 6,280 $\mu$ m), respectivamente. Kundrak, Gyani e Bana (2008) analisando o acabamento superficial no torneamento do aço endurecido encontraram os valores de 5,32 à 5,40 $\mu$ m para o parâmetro Sz e o valor de 5,76  $\mu$ m para o parâmetro St. Grzesik e Wanat (2005) analisando o perfil de rugosidade no torneamento do aço endurecido encontraram valor de 2,380 $\mu$ m para o parâmetro Sz.

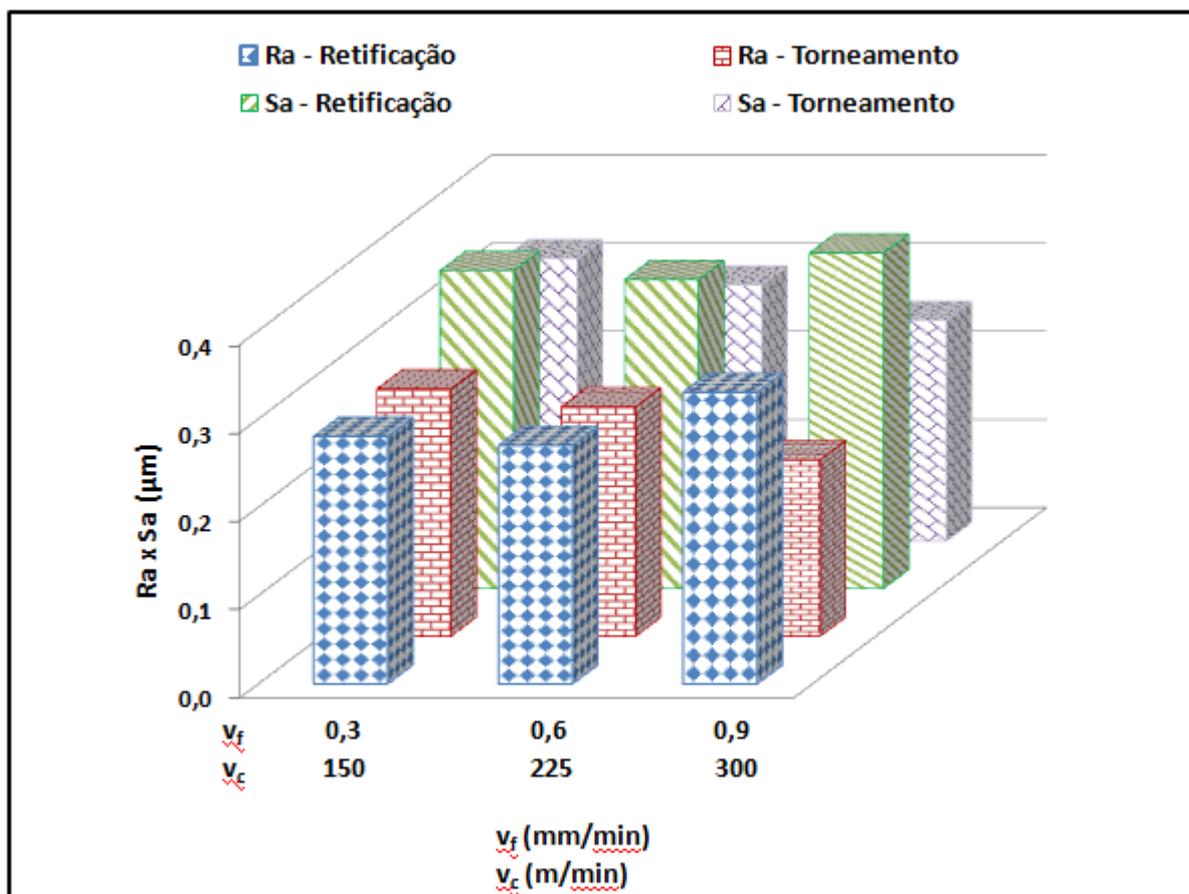
Conforme Kundrak, Gyani e Bana (2008), a definição de *skewness* (Ssk) e *Kurtosis* (Sku) do perfil de rugosidade da superfície pode ser facilmente compreendida, pois ambos são avaliados por meio da curva Gaussiana realizada com base nos histogramas de distribuição topográfica do perfil de rugosidade das superfícies. O parâmetro Ssk para uma superfície retificada é sempre negativo, enquanto para uma superfície torneada apresenta valor positivo. Nos estudos realizados por eles, as superfícies retificadas apresentaram baixos valores negativos para o parâmetro Ssk e com a forma de uma curva gaussiana perfeita. No entanto, as superfícies torneadas apresentam baixos valores positivos. A tendência observada nas medições 2D também são válidas para as medições 3D. Os valores encontrados em seus estudos para o parâmetro Ssk variaram de 0,564 à 0,662 $\mu$ m.

Com relação ao parâmetro  $Sku$ , Kundrak, Gyani e Bana (2008) observaram que a distribuição topográfica do perfil de rugosidade nas medições 3D, apresentaram valores menores que 3 para as superfícies torneadas, porém as superfícies retificadas apresentaram valores maiores que 3. Valores relativamente altos para  $Sku$ , acima de 3, indicam que os picos e vales da textura superficial apresentam forma pontiaguda, com raios bem pequenos. Já superfícies com baixos valores para  $Sku$ , menores que 3, apresentam vales e picos com forma não pontiaguda (perfil mais reforçado), com raios maiores, propiciando uma maior resistência a fadiga. Além disto, superfícies com picos e vales pontiagudos são altos concentradores de tensões. Os valores encontrados em seus estudos para o parâmetro  $Sku$  variaram de 2,34 à 2,52 $\mu\text{m}$ . O parâmetro de superfície  $Sku$  a faixa dos valores médios obtidos foi de 2,610 à 3,630, predominando valores próximos de 3,0, indicando trata-se de uma superfície gaussiana. Já para o parâmetro de superfície  $Rku$  a faixa de valores obtidos foi de 2,3 à 3,6, predominando também valores próximos de 3,0. Portanto, ambas análises resultaram em valores similares.

Nesta pesquisa a faixa dos valores obtidos para o parâmetro  $Ssk$  foi de -0,674 à 0,437, predominando mais os valores negativos, o que resultou em superfícies com maior presença de vales. Já para o parâmetro de superfície  $Rsk$  a faixa de valores obtidos foi de -0,82 à 0,27, também com maior predominância dos valores negativos, indicando também superfícies com maior presença de vales, principalmente utilizando a maior velocidade de corte. Portanto, ambas análises resultaram em valores similares para este parâmetro.

Para fins de comparação entre as análises 2D e 3D, na Figura 54 são apresentados os valores médios obtidos para o parâmetro de superfície bidimensional (2D)  $Ra$  e, também, para o parâmetro de superfície tridimensional (3D)  $Sa$ , considerado a condição de redução do diâmetro externo de 1,5mm para ambos os processos. Percebe-se uma tendência de aumento dos valores do parâmetro  $Sa$  em relação ao parâmetro  $Ra$ , para ambos os processos.

**Figura 54 - Comparação do parâmetro Ra x Sa em função da velocidade de mergulho ( $v_f$ ) e velocidade de corte ( $v_c$ )**



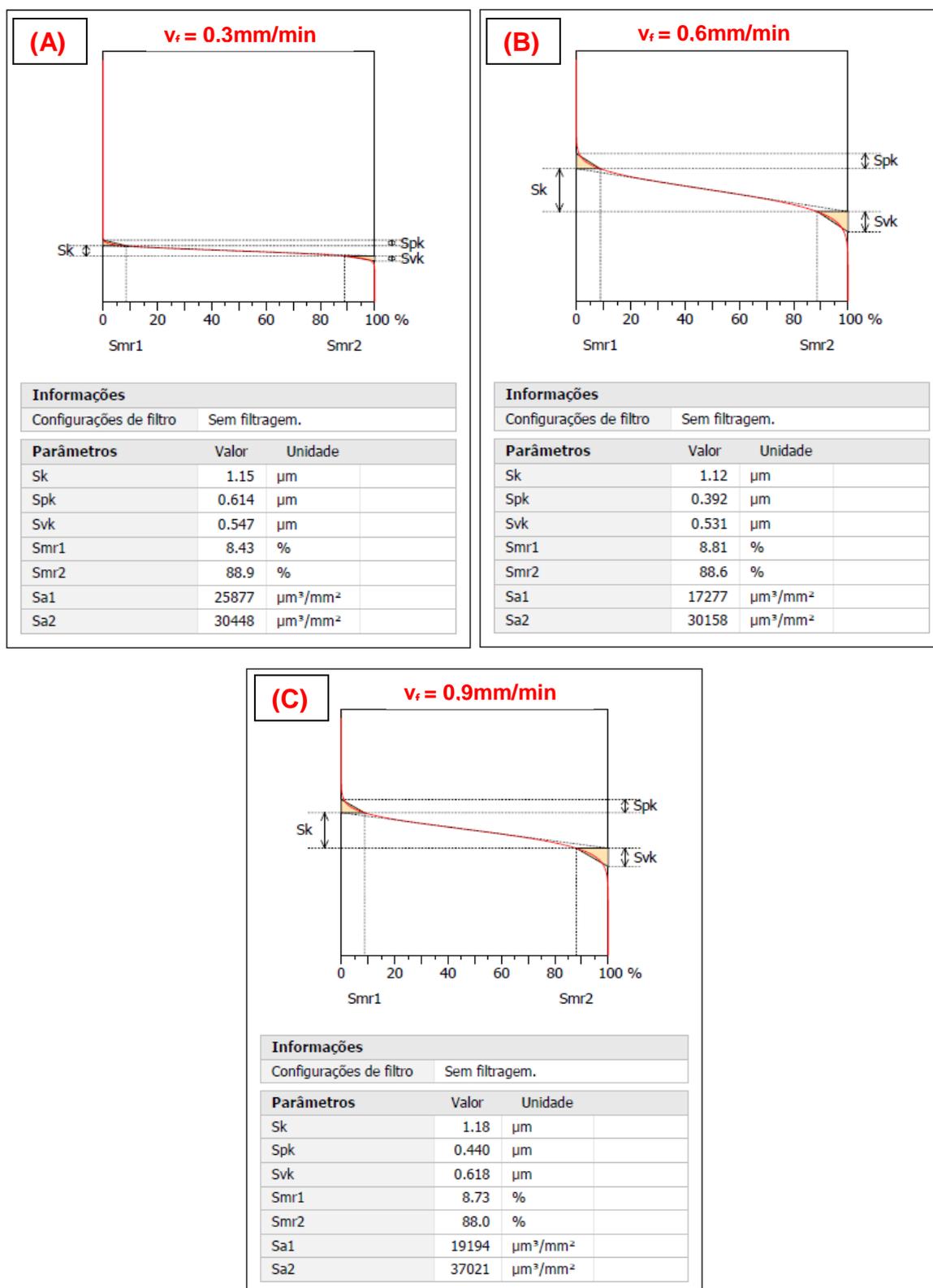
Fonte: próprio autor.

### 5.2.2 Curva de Abbott-Firestone com os parâmetros funcionais de superfície e de volume

Neste tópico, será executada avaliação comparativa dos parâmetros funcionais da superfície produzida pelo processo de retificação utilizando rebolo de convencional de óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), e também do processo de torneamento utilizando ferramentas de corte de cerâmica mista, classes CC650 e CC6050, e de PcBN, classe CB7115, incluindo análises 2D e 3D.

Na Figura 55 é apresentada a Curva de Abbott-Firestone com os parâmetros funcionais de superfície e de volume das amostras retificadas utilizando volume de material retificado de  $3,31 \times 10^3 \text{ mm}^3$  e as velocidades de mergulho de (A) 0,3mm/min, (B) 0,6mm/min e (C) 0,9mm/min.

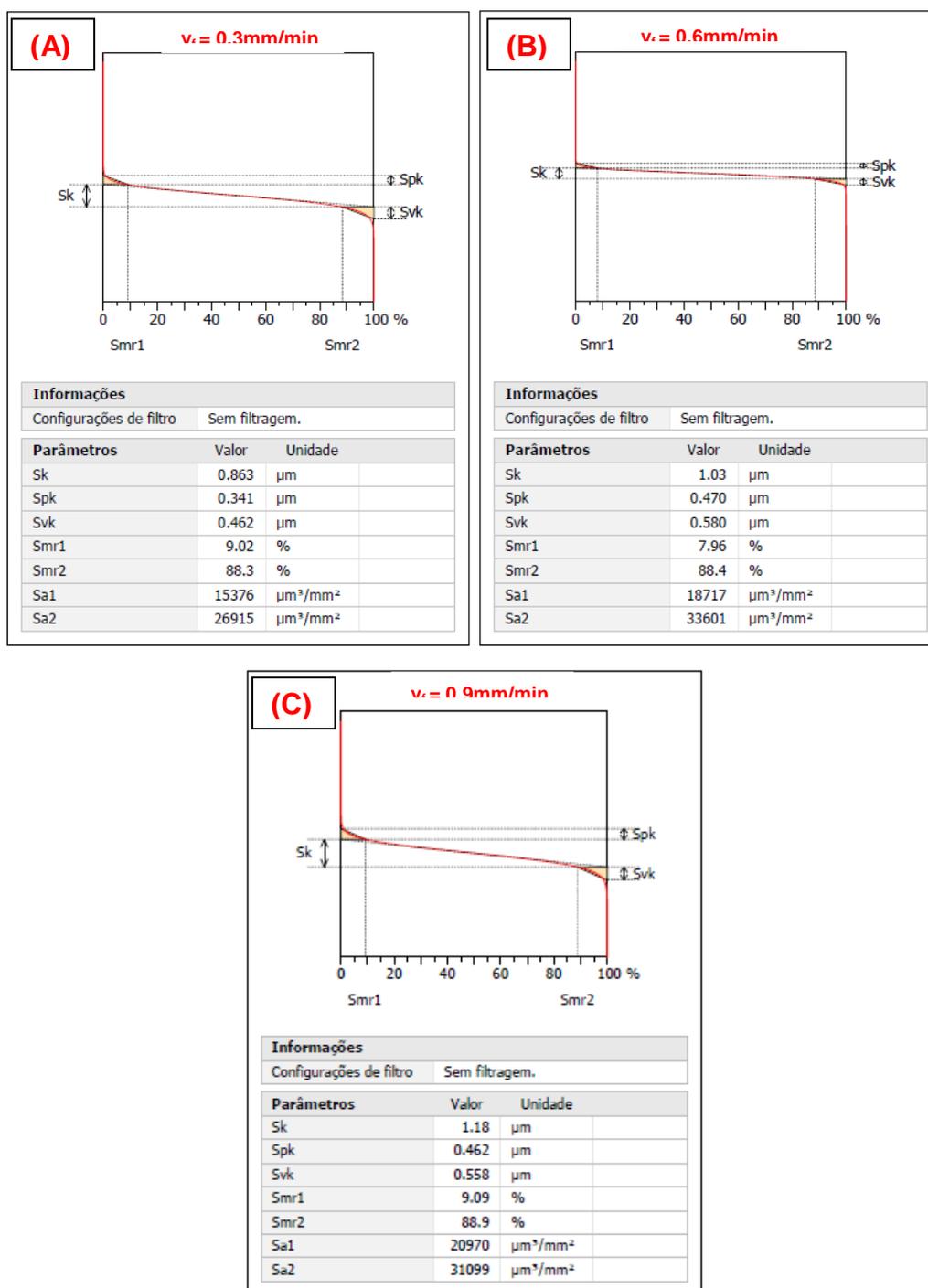
**Figura 55 - Curva de Abbott-Firestone com os parâmetros funcionais de superfície e de volume das amostras retificadas, utilizando velocidades de mergulho ( $v_f$ ) de 0,3;0,6 e 0,9mm/min e volume de material retificado ( $Z_w$ ) de  $3,31 \times 10^3 \text{ mm}^3$**



Fonte: próprio autor.

Na Figura 56 é apresentada a Curva de Abbott-Firestone com os parâmetros funcionais de superfície e de volume das amostras retificadas, utilizando volume de material retificado de  $6,47 \times 10^3 \text{ mm}^3$  e as velocidades de mergulho de (A) 0,3mm/min; (B) 0,6mm/min e (C) 0,9mm/min.

**Figura 56 - Curva de Abbott-Firestone com os parâmetros funcionais de superfície e de volume das amostras retificadas, utilizando velocidades de mergulho ( $v_f$ ) de 0,3;0,6 e 0,9mm/min e volume de material retificado ( $Z_w$ ) de  $6,47 \times 10^3 \text{ mm}^3$**



Fonte: próprio autor

A curva de Abbott-Firestone permite avaliar os parâmetros funcionais de superfície, os quais são muito importantes para avaliação dos aspectos tribológicos, pois eles afetam significativamente o desgaste, a durabilidade e a vida útil das peças e componentes (KUNDRAK; GYANI; BANA, 2008). De acordo com Khellaf et al. (2017) a curva de Abbott-Firestone permite uma avaliação das propriedades funcionais da superfície, sendo possível distinguir diferentes superfícies, as quais apresentaram o mesmo valor para o parâmetro Ra ou outro parâmetro de amplitude, por meio de suas respectivas curvas de Abbott-Firestone. A curva de Abbott é normalmente dividida em três regiões, denominadas Sk (profundidade da rugosidade do núcleo), Spk (altura reduzida do pico da superfície de avaliação) e Svk (profundidade reduzida do vale da superfície de avaliação). É desejável que a superfície tenha um pequeno valor para o parâmetro Spk, pois esta região será desgasta durante o período inicial de serviço, enquanto o parâmetro Sk caracteriza a região que determina a vida útil da superfície.

Inicialmente, foram avaliados os parâmetros funcionais Spk, Sk e Svk das amostras retificadas, por meio da análise das Figuras 55 e 56. Observa-se na Figura 56(A) que o menor valor para o parâmetro Sk foi de  $0,863\mu\text{m}$ , utilizando a velocidade de mergulho de  $0,3\text{mm}/\text{min}$  e volume de material retificado de  $6,47 \times 10^3 \text{mm}^3$ . Conforme norma ISO 13565-2 (1996), este parâmetro caracteriza a capacidade da superfície de resistir ao desgaste, o que vai influenciar o desempenho operacional da superfície. Valores baixos para o parâmetro Sk indicam maior capacidade de carga durante as operações de contato. Por outro lado, valores altos para o parâmetro Sk é melhor considerando o desempenho funcional por longos anos, provocado por um desgaste lento e constante (KUNDRAK; GYANI; BANA, 2008). Nos ensaios o maior valor obtido para Sk foi de  $1,18\mu\text{m}$ , utilizando a maior velocidade de avanço ( $v_f$ ) de  $0,9\text{mm}/\text{min}$ , conforme demonstrado nas Figura 55(C) e Figura 56(C).

Silva et al. (2018) avaliaram os parâmetros de superfície tridimensionais (3D) do aço ABNT 4340 endurecido, dureza de 52 HRc, após processo de retificação e encontraram valores para o parâmetro Sk que variam de  $0,484$  à  $1,24\mu\text{m}$ . Kundrak, Gyani e Bana (2008) também avaliaram os parâmetros de superfície tridimensionais (3D) do aço ISO 16MnCr5, com dureza de 62 HRc, e os valores de Sk variaram de  $1,52$  à  $1,84\mu\text{m}$ . Nesta pesquisa, comparando as análises para caracterização da superfície 2D e 3D, o parâmetro Rk no processo de retificação variou de  $0,70$  à

1,02 $\mu\text{m}$  e o parâmetro Sk variou de 0,863 à 1,18 $\mu\text{m}$ . Portanto, ambas análises em 2D e 3D resultaram em valores similares para este parâmetro.

Por outro lado, o parâmetro Spk definido pela norma ISO 13565-2 (1996) como a altura média dos picos acima do perfil de rugosidade do núcleo, apresentou o menor valor de 0,341 $\mu\text{m}$ , utilizando velocidade de mergulho de 0,3mm/min e volume de material retificado de 6,47x10<sup>3</sup>mm<sup>3</sup>, conforme Figura 56(A). Este parâmetro representa a porção da superfície que sofrerá desgaste prematuro, no período inicial de operação. Processos que produzem valores reduzidos para o parâmetro Spk são ideais para produtos que necessitam manter a forma geométrica após o seu início de operação. Nesta situação, o período de amaciamento do produto é transferido para o processo de fabricação, em sua totalidade ou em parte, utilizando ferramentas e parâmetros de corte otimizados, gerando baixos valores para o parâmetro Spk.

Silva et al. (2018) avaliaram os parâmetros de superfície tridimensionais (3D) na retificação do aço ABNT 4340 endurecido e encontraram valores de Spk que variaram de 0,167 à 0,412 $\mu\text{m}$ . Kundrak, Gyani e Bana (2008) avaliaram os parâmetros de superfície tridimensionais (3D) da superfície retificada do aço endurecido ISO 16MnCr5 e encontraram valores que variaram de 0,478 à 0,582 $\mu\text{m}$ . Comparando as análises 2D e 3D executados neste trabalho para caracterização das superfícies temos que no processo de retificação o parâmetro Rpk variou de 0,24 à 0,40 $\mu\text{m}$  e o parâmetro Spk variou de 0,341 à 0,614 $\mu\text{m}$ .

O parâmetro Svk, definido pela norma ISO 13565-2 (1996) como a profundidade média do perfil dos vales projetados além do perfil da rugosidade do núcleo, apresentou o maior valor de 0,618 $\mu\text{m}$ , utilizando velocidade de mergulho de 0,9mm/min e volume de material retificado de 3,31x10<sup>3</sup>mm<sup>3</sup>, conforme Figura 55 (C). Valores altos para o parâmetro Svk indicam melhor capacidade para retenção de lubrificantes, conseqüentemente melhor capacidade de lubrificação, enquanto valores baixos causam, provavelmente, baixa eficiência de lubrificação no final da vida útil do componente (KUNDRAK; GYANI, BANA, 2008).

Silva et al. (2018) avaliaram os parâmetros de superfície tridimensionais (3D) na retificação do aço ABNT 4340 endurecido e encontraram valores de Svk que variaram de 0,218 à 0,505 $\mu\text{m}$ . Kundrak, Gyani e Bana (2008) avaliaram os parâmetros de superfície tridimensionais (3D) da superfície retificada do aço endurecido ISO 16MnCr5 e encontraram valores que variaram de 0,521 à 0,742 $\mu\text{m}$ .

Comparando as análises 2D e 3D obtidos neste trabalho para caracterização das superfícies retificadas, o parâmetro  $Rvk$  variou de 0,35 à 0,45 $\mu\text{m}$  e o parâmetro  $Svk$  variou de 0,462 à 0,618 $\mu\text{m}$ .

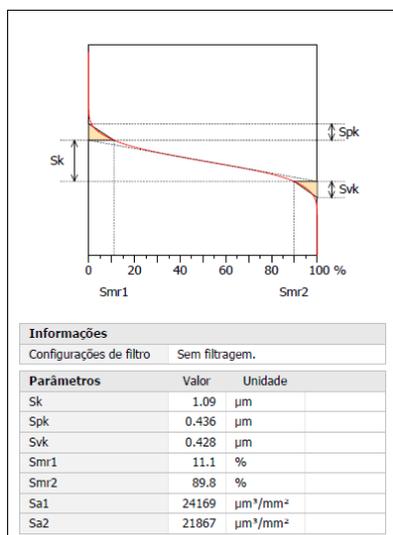
Analogamente ao parâmetro  $Spk$ , o parâmetro  $Sa1$  ( $Vmp$ ), o qual caracteriza o volume de material na zona de pico, obteve o seu menor resultado o valor de 15.376 $\mu\text{m}^3/\text{mm}^2$ , utilizando velocidade de avanço de 0,3mm/min e volume de material retificado de 6,47x10<sup>3</sup>mm<sup>3</sup>, conforme Figura 56(A). Silva et al. (2018) avaliaram os parâmetros de superfície tridimensionais (3D) na retificação do aço ABNT 4340 endurecido e encontraram valores de  $Vmp$  que variaram de 12.500 à 30.500 $\mu\text{m}^3/\text{mm}^2$ .

Seguindo a mesma coerência com o parâmetro  $Svk$ , o parâmetro  $Sa2$  ( $Vvv$ ), o qual caracteriza o volume de vazio na zona de vale, apresentou o maior valor de 37.021 $\mu\text{m}^3/\text{mm}^2$ , utilizando velocidade de mergulho de 0,9mm/min e volume de material retificado de 3,31x10<sup>3</sup>mm<sup>3</sup>, conforme Figura 55(C). Silva et al. (2018) avaliaram os parâmetros de superfície tridimensionais (3D) na retificação do aço ABNT 4340 endurecido e encontraram valores de  $Vvv$  que variaram de 35.900 à 74.800 $\mu\text{m}^3/\text{mm}^2$ .

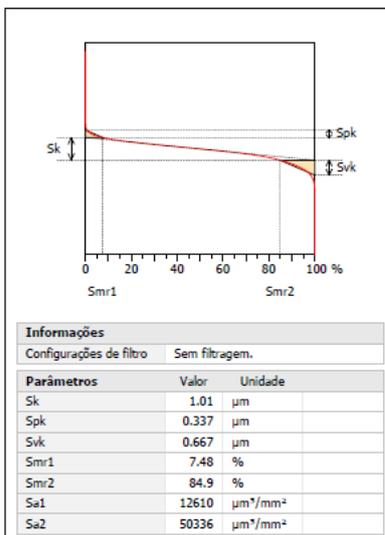
Nas Figuras 57 à 59 são apresentadas as Curvas de Abbott-Firestone com os parâmetros funcionais de superfície das amostras torneadas, utilizando ferramentas de cerâmica (CC650 e CC6050) e PcBN (CB7115), velocidades de corte de 150, 225 e 300m/min, S/R - à seco e C/R - com lubrificrefrigeração.

**Figura 57 - Curva Abbott-Firestone com os parâmetro funcionais de superfície e de volume das amostras torneadas, utilizando ferramentas de cerâmica mista (CC650 e CC6050) e PcBN (CB7115), velocidade de corte de 150m/min, à S/R - à seco e C/R - com lubrificação**

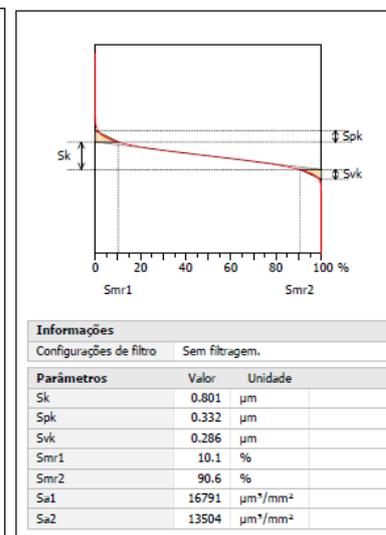
(A) CC650 - S/R



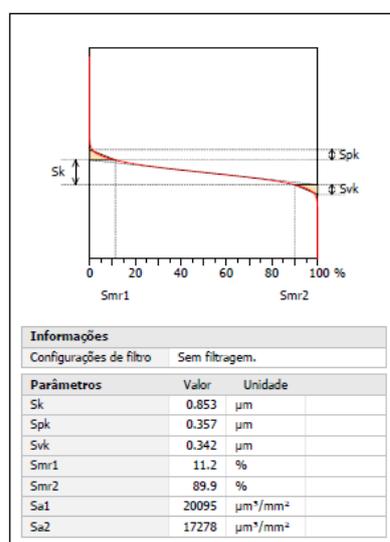
(B) CC650 - C/R



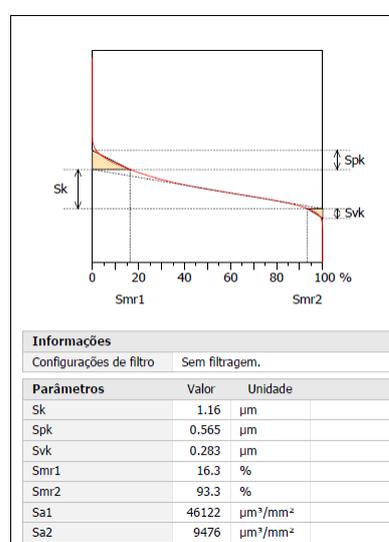
(C) CC6050 - S/R



(D) CC6050 - C/R



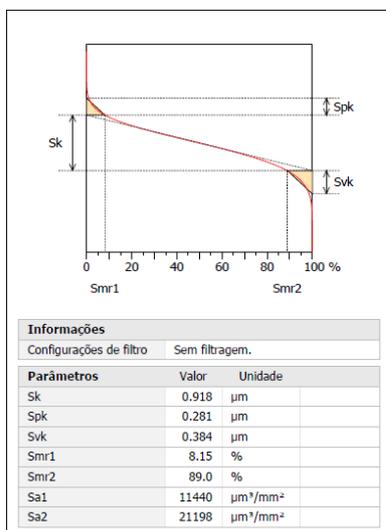
(E) CB7115 - S/R



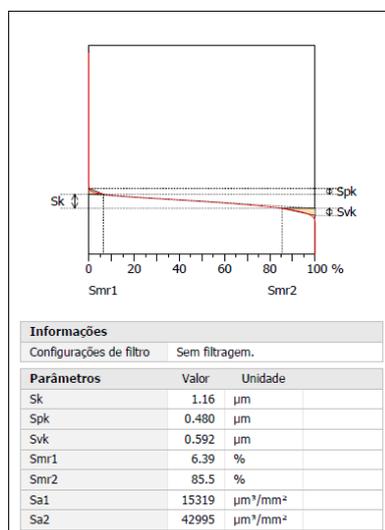
Fonte: próprio autor

**Figura 58 - Curva de Abbott-Firestone com os parâmetros funcionais de superfície e de volume das amostras torneadas, utilizando ferramentas de cerâmica mista (CC650 e CC6050) e PcBN (CB7115), velocidade de corte de 225m/min, S/R - à seco e C/R - com lubrificação**

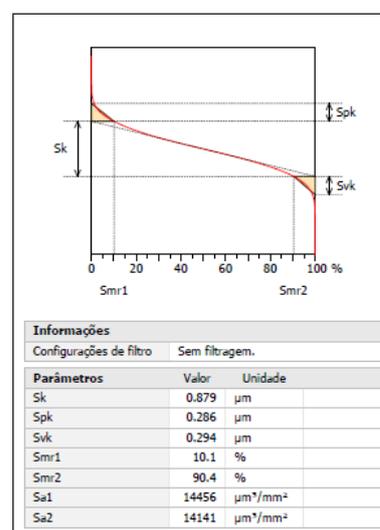
(A) CC650 - S/R



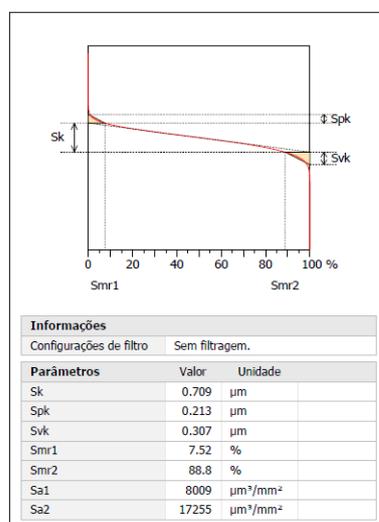
(B) CC650 - C/R



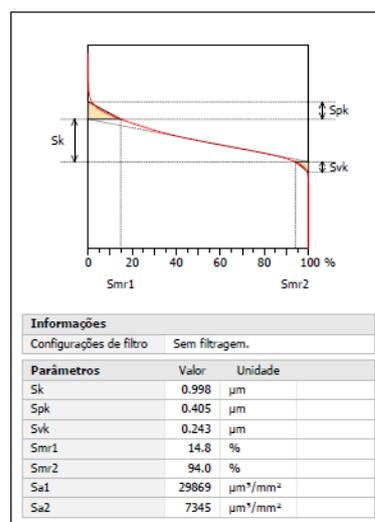
(C) CC6050 - S/R



(D) CC6050 - C/R

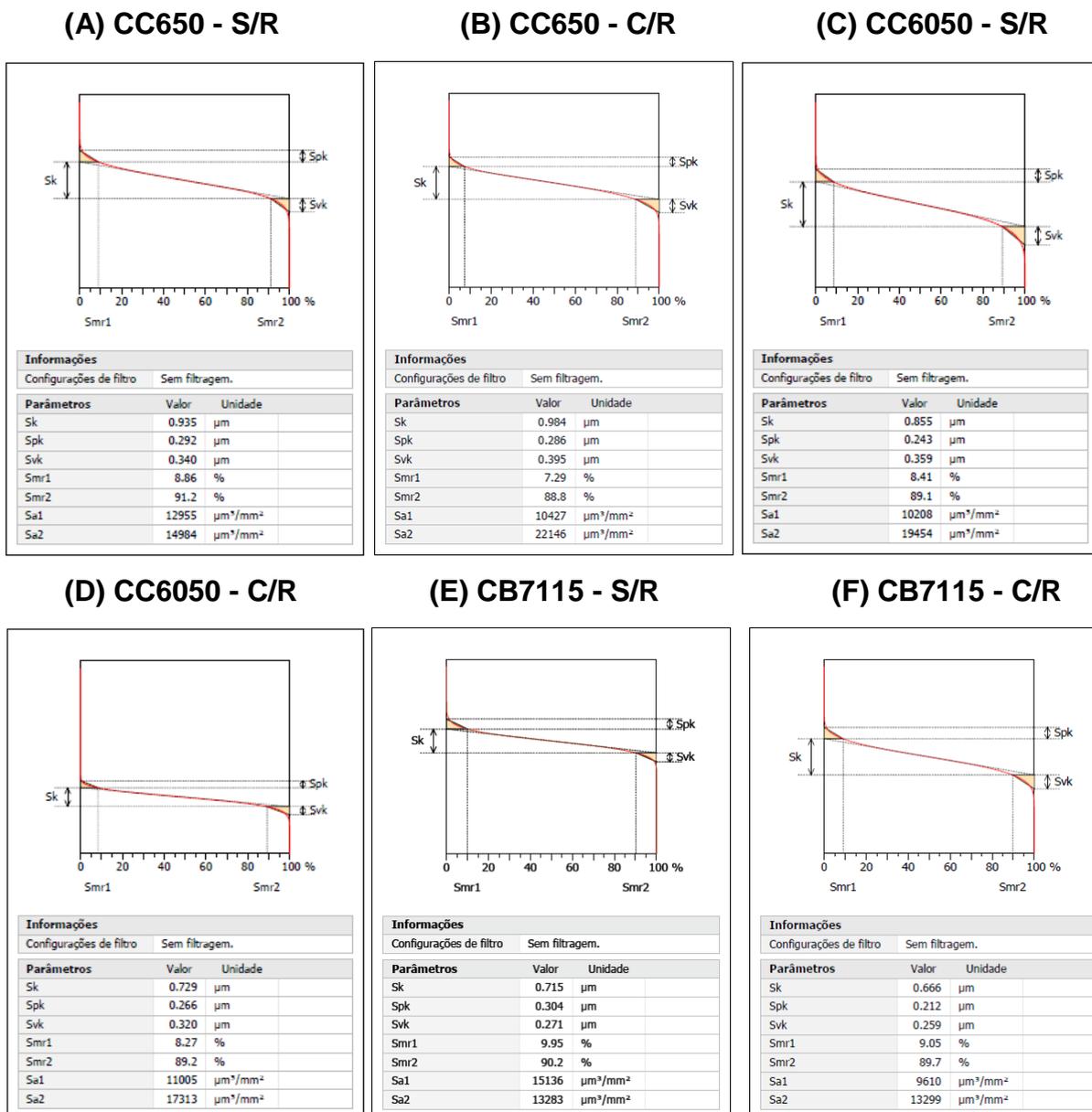


(E) CB7115 - S/R



Fonte: próprio autor

**Figura 59 - Curva de Abbott-Firestone com os parâmetros funcionais de superfície e de volume das amostras torneadas, utilizando ferramentas de cerâmica mista (CC650 e CC6050) e PcBN (CB7115), velocidade de corte de 300m/min, S/R - à seco e C/R - com lubrificação**



Fonte: próprio autor

Nas Figuras 57 à 59 são demonstradas as curvas de Abbott-Firestone das superfícies das amostras que foram torneadas com seus respectivos parâmetros funcionais. As formas das curvas não assemelham a uma curva-S clássica de Abbott-Firestone. Por meio destas curvas, pode-se avaliar e quantificar os parâmetros funcionais de superfície e volume.

Observa-se por meio das Figuras 57 à 59 que o menor valor obtido para o parâmetro  $S_k$  (profundidade da rugosidade do núcleo da superfície em avaliação) no torneamento foi de  $0,666\mu\text{m}$ , conforme Figura 59(F), quando foi utilizada a ferramenta de corte de PcBN - CB7115, com lubrificrefrigeração e velocidade de corte de  $300\text{m}/\text{min}$ . Baixos valores para o parâmetro  $S_k$  implicam em superfícies com maior capacidade de carga durante operações de contato. Nota-se também que o valor do parâmetro  $S_k$  variou de  $0,666$  à  $1,160\mu\text{m}$  para o processo de torneamento, enquanto no processo de retificação este parâmetro variou de  $0,863$  à  $1,180\mu\text{m}$ . Portanto, percebe-se que no geral o processo de torneamento produziu superfícies com menores valores para o parâmetro  $S_k$ . Kundrak, Gyani e Bana (2008) avaliaram os parâmetros de superfície tridimensionais (3D) do aço ISO 16MnCr5, com dureza de 62 HRc, e o valor de  $S_k$  variou de  $2,55$  à  $2,71\mu\text{m}$ . Comparando as análises 2D e 3D para caracterização das superfícies torneadas temos que o parâmetro  $R_k$  variou de  $0,64$  à  $1,25\mu\text{m}$  e o parâmetro  $S_k$  variou de  $0,67$  à  $1,16\mu\text{m}$ . Portanto, as análises dos parâmetros de superfície bidimensionais (2D) e tridimensionais (3D) são similares.

Observa-se que o menor valor obtido para o parâmetro  $S_{pk}$  (altura reduzida do pico) no torneamento foi de  $0,212\mu\text{m}$ , quando foi utilizado a ferramenta de corte de PcBN - CB7115, com lubrificrefrigeração e velocidade de corte de  $300\text{m}/\text{min}$ , conforme Figura 59(F). Baixos valores para o parâmetro  $S_{pk}$  são ideais para peças e componentes que precisam manter as formas geométricas durante operação, minimizando o período de amaciamento. Nota-se também que o valor do parâmetro  $S_{pk}$  variou de  $0,212$  à  $0,565\mu\text{m}$  para o processo de torneamento, enquanto no processo de retificação este parâmetro variou de  $0,341$  à  $0,614\mu\text{m}$ . Portanto, percebe-se que o processo de retificação produziu superfícies com picos mais acentuados, os quais serão desgastados no período inicial de operação, prolongando o processo de amaciamento da peça. Comparando as análises 2D e 3D para caracterização das superfícies torneadas temos que no processo de torneamento o parâmetro  $R_{vk}$  variou de  $0,19$  à  $0,43\mu\text{m}$  e o parâmetro  $S_{pk}$  variou de  $0,21$  à  $0,56\mu\text{m}$ . Pode-se afirmar que existe semelhança na análise dos parâmetros de superfície bidimensionais (2D) e tridimensionais (3D). Kundrak, Gyana e Bana (2008) avaliaram os parâmetros de superfície tridimensionais (3D) após torneamento do aço endurecido ISO 16MnCr5 encontram valores que variaram de  $1,41$  à  $1,66$  para o parâmetro  $S_{pk}$ .

Na análise do parâmetro  $Svk$ , observa-se por meio das Figuras 57 à 59 que o menor valor obtido para o parâmetro  $Svk$  no torneamento foi de  $0,243\mu m$ , conforme Figura 58(E), quando foi utilizada a ferramenta de corte de PcBN - CB7115, sem lubrificação e velocidade de corte de  $225m/min$ . Baixos valores para o parâmetro  $Svk$  reduzem a capacidade de lubrificação da superfície. Nota-se também que o valor do parâmetro  $Svk$  (profundidade reduzida do vale) variou de  $0,24$  à  $0,67\mu m$  para o processo de torneamento, enquanto no processo de retificação este parâmetro variou de  $0,462$  à  $0,618\mu m$ . Portanto, percebe-se que a faixa de valores do parâmetro  $Svk$  do processo de retificação produziu superfícies com vales mais profundos e com melhores propriedades de lubrificação. Comparando as análises 2D e 3D para caracterização das superfícies torneadas, observa-se que o parâmetro  $Rvk$  variou de  $0,20$  à  $0,69\mu m$  e o parâmetro  $Svk$  variou de  $0,243$  à  $0,667\mu m$ . Portanto, as análises 2D/3D são similares. Kundrak, Gyana e Bana (2008) avaliaram os parâmetros de superfície tridimensionais (3D) da superfície endurecida do aço ISO 16MnCr5, e encontraram valores que variaram de  $0,135$  à  $0,190\mu m$  para o parâmetro  $Svk$ .

A porção de material na zona de picos ( $Smr1$ ) foi maior no processo de torneamento, variando de  $6,39$  à  $14,80\%$ , enquanto no processo de retificação variou de  $7,96$  à  $9,09\%$ , o que caracteriza uma zona de picos mais acentuada no torneamento. Comparando as análises 2D e 3D para caracterização das superfícies torneadas temos que no processo de torneamento o parâmetro  $Mr1$  variou de  $6,72$  à  $14,44\%$  e o parâmetro  $Smr1$  variou de  $6,39$  à  $14,80\%$ . Portanto, as análises 2D/3D são similares. Já a porção de material na zona de vales ( $Smr2$ ) no torneamento variou de  $84,9$  à  $94\%$ , e no processo de retificação variou de  $88,0$  à  $88,9\%$ , o que caracteriza profundidade mais reduzida de vales no torneamento. Comparando as análises 2D e 3D para caracterização das superfícies torneadas temos que no processo de torneamento o parâmetro  $Mr2$  variou de  $83,44$  à  $93,28\%$  e o parâmetro  $Smr2$  variou de  $84,9$  à  $94,0\%$ . Portanto, as análises 2D/3D são similares. Kundrak, Gyana e Bana (2008) avaliaram os parâmetros de superfície tridimensionais (3D) do aço endurecido ISO 16MnCr5, e no processo de torneamento encontraram valores variando de  $22,9$  à  $24,7\%$  para o parâmetro  $Smr1$ , e valores variando de  $98,6$  à  $98,7\%$  para o parâmetro  $Smr2$ . Por outro lado, na retificação encontraram valores variando de  $8,50$  à  $9,98\%$  para o parâmetro  $Smr1$ , e valores variando de  $87,1$  à  $88,6\%$  para o parâmetro  $Smr2$ .

Quando comparamos os parâmetros funcionais de volume, Sa1(Vmp), volume de material na zona de pico, Sa2 (Vvv), volume de vazio na zona de vale, mais conclusões podem ser obtidas para caracterização das superfícies obtidas para ambos os processos. No torneamento, o volume de material na zona de pico, Vmp, variou de 8.009 à 46.122 $\mu\text{m}^3/\text{mm}^2$ , enquanto na retificação variou de 15.376 à 25.977 $\mu\text{m}^3/\text{mm}^2$ . No torneamento a faixa dos valores encontrados para o parâmetro Vmp é maior em relação ao encontrado na retificação, resultado semelhante também foi encontrado por Kundrak, Gyana e Bana (2008). Silva et al. (2018) encontraram valores para o parâmetro Vmp que variaram de 12.500 à 30.500 $\mu\text{m}^3/\text{mm}^2$  para o processo de retificação do aço endurecido.

Avaliando o parâmetro Vvv, volume de vazio na zona de vale, percebe-se que no torneamento variou de 7.345 à 50.336 $\mu\text{m}^3/\text{mm}^2$ , enquanto na retificação variou de 26.915 à 37.021 $\mu\text{m}^3/\text{mm}^2$ , portanto maior no torneamento, caracterizando maior capacidade de retenção de fluidos. Resultado contrário foi encontrado por Kundrak, Gyana e Bana (2008), sendo registrados volumes de vazios na zona de vale bem maiores no processo de retificação do que no torneamento. Silva et al. (2018) encontraram valores para o parâmetro Vvv que variaram de 53.900 à 106.000 $\mu\text{m}^3/\text{mm}^2$  para o processo de retificação. De acordo com Franco e Sinadora (2015), os parâmetros Vmp e Vvv fornecem informações essenciais para análise do desgaste, uma vez que quantificam, respectivamente, a possível geração de detritos durante a operação e o volume dos poços e vales mais profundos capazes de reter esses detritos.

### **5.2.3 Textura superficial**

A avaliação da textura da superfície usinada é de fundamental importância, sendo que a qualidade obtida está relacionada com as características do processo de usinagem. Alterações como mudança na composição química e dureza do material, desgaste excessivo da ferramenta de corte, utilização de parâmetros de corte inadequados e instabilidade da máquina refletem diretamente na textura da peça. A textura da superfície usinada é a impressão digital do processo de usinagem utilizado e está diretamente ligada com a função que o componente irá desempenhar (SANTOS; SALES, 2007).

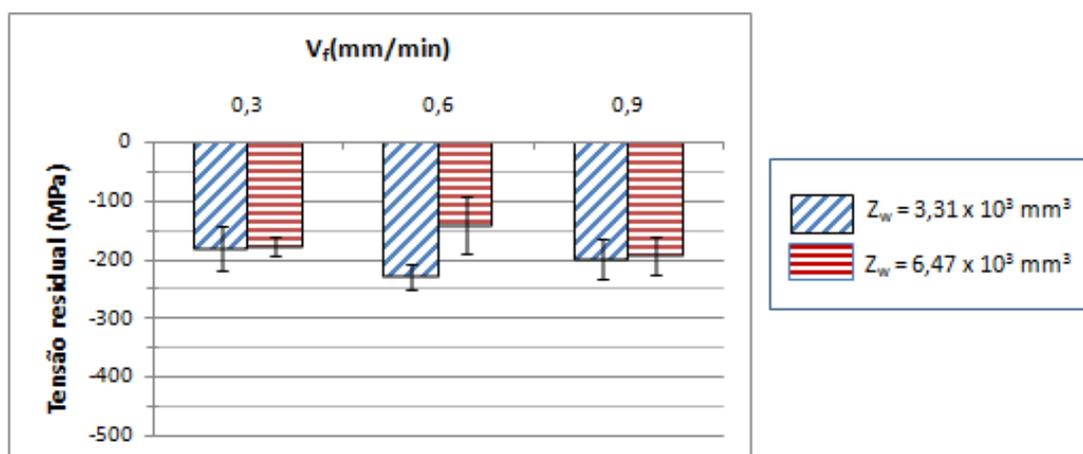
Nas topografias das superfícies usinadas pelos processos de retificação e torneamento, os picos e vales contidos na superfície são representados por cores, onde as cores azul escuro e preto representam as regiões mais profundas dos vales, as cores verde e azul claro representam a parte central do perfil de rugosidade, e as cores branco, vermelho e amarelo e suas combinações representam as regiões mais elevadas dos picos. De acordo com Khellaf et al. (2017), texturas superficiais que apresentam as cores azul escuro e vermelho indicam que existem uma grande variação na altura pico-vale da superfície. Por outro lado, superfícies que apresentam uma única cor em sua textura superficial indicam uma pequena variação da amplitude pico-vale, indicando que esta é a melhor qualidade superficial produzida.

As imagens topográficas das superfícies retificadas e torneadas, assim como os histogramas de distribuição de material estão demonstrados nos Apêndices A, B, C e D.

### 5.3 Tensão residual

Na Figura 60 são apresentados os valores de tensão residual para o processo de retificação, em função das velocidades de mergulho de 0,3, 0,6 e 0,9mm/min e volume de material retificado dos corpos de prova de  $3,31 \times 10^3 \text{ mm}^3$  e  $6,47 \times 10^3 \text{ mm}^3$ , com seus respectivos desvios padrões.

**Figura 60 - Tensão residual em função das velocidades de mergulho de 0,3; 0,6 e 0,9mm/min, considerando os volumes de materiais retificados de  $3,31 \times 10^3$  e  $6,47 \times 10^3 \text{ mm}^3$**



Fonte: próprio autor

Para fins de referências, foram analisadas as tensões residuais de dois corpos de prova fabricados com o mesmo material, aço ABNT 4340, com o objetivo de avaliar o estado inicial das tensões residuais e compará-lo, após a realização dos ensaios de retificação e torneamento, com o estado final das superfícies usinadas por ambos processos. Um corpo de prova foi apenas torneado para as dimensões nominais do corpo de prova, não sendo tratado termicamente (temperado), e apresentou tensão residual de tração de 33MPa. O outro corpo de prova foi torneado para as dimensões nominais do corpo de prova, em seguida foi temperado e revenido, e apresentou tensão residual de tração de maior magnitude, cujo valor foi de 262MPa. Este estado de tensão residual inicial foi alterado à partir dos processos de retificação e torneamento, sendo induzidas tensões residuais de compressão por meio do processo de retificação, tensões residuais de tração por meio do processo de torneamento utilizando ferramentas de cerâmica e tensões residuais de compressão utilizando ferramentas de PcBN. Este estado final de tensões compressivas para o processo de retificação está de acordo com os resultados obtidos por Reis et al. (2010) em seus estudos sobre as tensões residuais geradas na usinagem do aço ABNT 4340.

Conforme demonstrado na Figura 60, foi observado uma grande variação nos perfis das tensões residuais dos corpos de prova retificados, tanto no tipo quanto na magnitude, induzindo tensões residuais compressivas em todas as condições de ensaios. Reis et al. (2010) analisou as tensões residuais em corpos de prova que foram retificados e encontrou tensões compressivas da ordem de -168 MPa. De acordo com Fusse (2005) as dilatações térmicas na retificação são proporcionais as temperaturas geradas no processo e as tensões de compressão são geradas pela maior dilatação térmica das camadas externas em relação as camadas mais internas. Essa diferença de dilatação entre as camadas se deve a exposição a temperaturas mais elevadas sobre as camadas mais externas.

Tensões residuais de compressão são benéficas, pois atuam como inibidoras a nucleação e propagação de trincas, eliminando o modo de falha do componente, e conseqüentemente, aumentando a sua resistência a fadiga e vida útil.

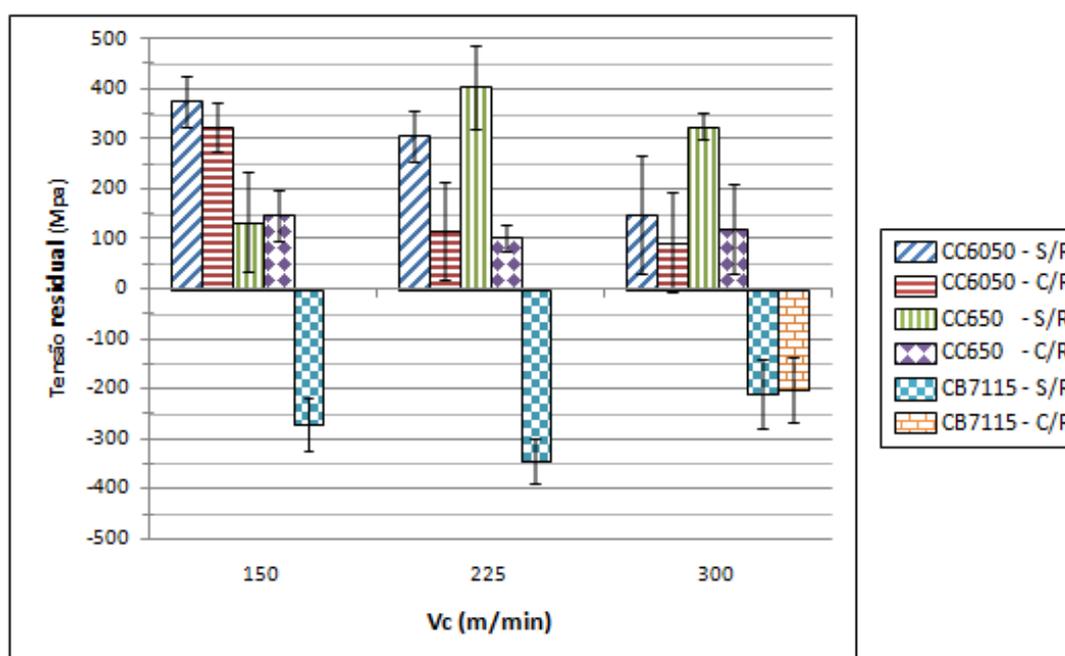
Percebe-se também que as maiores tensões residuais de compressão foram encontradas no menor volume de material retificado de  $3,31 \times 10^3 \text{mm}^3$ , tendo o seu maior valor médio de tensão residual igual a - 220MPa, com velocidade de mergulho de 0,6mm/min. Este valor da maior tensão de compressão está compatível com as

pesquisas realizadas por Fusse (2005). Silva et al (2018) encontraram valores de tensões residuais compressivas que variaram de -275 à -340Mpa, em amostras retificadas do aço ABNT 4340 endurecido, utilizando fluido de corte sintético.

Nota-se também que existe uma tendência dos valores das tensões residuais de compressão aumentarem a medida que aumenta-se a velocidade de mergulho. Alves, Bianchi e Aguiar (2008) afirmam que as condições de usinagem controlam a indução de tensões residuais nos componentes usinados, porém a necessidade de trabalhar com maiores taxas de remoção resulta em maiores tensões residuais de tração, o que é maléfico para o componente, sendo necessário adotar taxas de remoção menores.

Na Figura 61 são apresentados os valores de tensão residual para o processo de torneamento em função das velocidades de corte de 150, 225 e 300m/min, avanço de 0,05mm/rev e profundidade de corte de 0,15mm, com seus respectivos desvios padrões. Foram utilizados ferramentas de corte de cerâmica mista, classes CC650 e CC6050, e de PcBN, classe CB7115 e nas condições à seco (S/R) e com lubrificação (C/R).

**Figura 61 - Tensão residual em função das velocidades de corte de 150, 225 e 300m/min, utilizando ferramentas de cerâmica mista, classes CC650 e CC6050, e PcBN, classe CB7115, à seco (S/R) e com lubrificação (C/R)**



Fonte: próprio autor

Os resultados indicam que as ferramentas de cerâmica mista, classes CC650 e CC6050, induziram nos corpos de prova tensões residuais de tração em ambas condições de lubrificação, já a ferramenta de PcBN induziu tensões de compressão em todas as condições experimentais.

Navas, Gonzalo e Bengoetxea (2012), também encontraram tensões residuais de tração em corpos de prova que foram torneados, utilizando o aço ABNT 4340, sendo que estas tensões eram maiores em condições de usinagem onde o calor gerado foi mais elevado.

De acordo com Barbacki, Kawalec e Hamrol (2003) as alterações das características das superfícies torneadas dependem de vários parâmetros, incluindo: o material da peça, o material da ferramenta de corte, geometria da ferramenta de corte, desgaste da ferramenta de corte e dos parâmetros de corte utilizados. Em suas investigações concluíram que os mais importantes parâmetros de corte que influenciam o acabamento superficial são: o desgaste da aresta de corte da ferramenta ( $VB_c$ ), a velocidade de corte ( $v_c$ ) e a profundidade de corte ( $a_p$ ).

Conforme Barbacki, Kawalec e Hamrol (2003), tensões residuais utilizando ferramentas de corte de cerâmica podem ser de compressão, utilizando baixa profundidade de corte ( $a_p = 0,05\text{mm}$ ), baixa velocidade de corte ( $v_c < 100\text{m/min}$ ) e pequeno desgaste de flanco ( $VB_c < 0,2\text{mm}$ ), alterando o estado de tensões residuais trativas da ordem de 300 à 400MPa presentes na superfície após tratamento térmico.

Navas, Gonzalo e Bengoetxea (2012) em seus estudos sobre os efeitos dos parâmetros de corte na tensão residual superficial, no torneamento do aço ABNT 4340 no estado normalizado, utilizando ferramenta de corte de metal duro, classe ISO P10, velocidades de corte de 200, 255 e 300m/min, avanços de 0,075; 0,100; 0,125 e 0,175mm/rev e profundidade de corte constante de 0,4mm, concluíram que:

- ✓ o aumento do avanço tende a induzir tensões residuais de tração, devido ao aumento da temperatura de corte, aumentando também a rugosidade;
- ✓ para velocidades de corte entre 200 e 300m/min, o aumento da velocidade induz tensões residuais que tendem ser menos trativas;
- ✓ o aumento do raio de ponta da ferramenta implica em uma maior área de contato ferramenta/peça, gerando maior temperatura e menores deformações plásticas, induzindo mais tensões residuais de tração, e simultaneamente, aumento da rugosidade;

- ✓ ferramentas com cobertura produz melhores valores de rugosidades, porém as tensões residuais tendem a ser mais trativas, pois o revestimento atua como isolante térmico, transferindo o calor gerado para a peça.
- ✓ finalmente, reduzir o avanço e aumentar a velocidade de corte induz menos tensões residuais superficiais de tração, provocando menores danos a peça usinada. Somado a estes fatores, a utilização de ferramentas de corte sem cobertura e com raio de ponta menor garantem uma melhor qualidade da integridade superficial.

Comparativamente aos valores de tensão residual do processo de retificação, o processo de torneamento do aço endurecido ABNT 4340 tem capacidade de induzir maiores intensidades de tensões residuais de compressão, utilizando ferramenta de corte PcBN, nas velocidades de corte de 150 e 225m/min, à seco, onde os valores das tensões residuais atingiram -270 e -350MPa, respectivamente, e valores equivalentes para ambos os processos utilizando ferramenta de PcBN, velocidade de corte de 300m/min, à seco e com lubrificação, quando o valor médio foi de aproximadamente -200MPa. Por outro lado, as tensões residuais utilizando ferramentas de cerâmica mista, classes CC650 e CC6050, foram todas de tração, com valores variando de 100 à 400MPa.

O processo de medição das tensões residuais utilizando raios-X apresentou grande dispersão nos resultados de algumas amostras torneadas. Estas dispersões também foram encontradas por Farias (2009) na análise da tensão residual no processo de torneamento do aço ABNT 8620 endurecido.

Finalmente, o acabamento superficial e a tensão residual podem afetar a resistência dos componentes usinados quando estes são submetidos à altos ciclos de fadiga (sob cargas). As trincas geradas por fadiga, em geral, são nucleadas na superfície das peças e, posteriormente, se propagam para o seu interior. Como as trincas se expandem, a resistência da seção do componente é reduzida e, então, a seção poderá não mais resistir à carga aplicada e uma falha poderá ocorrer. Portanto, o estado de tensão na superfície, onde as trincas são nucleadas, é de fundamental importância. Este estado de tensão é a soma das tensões devido a carga aplicada somado a tensão residual induzida pelo processo de usinagem. Se a tensão residual na superfície é trativa e a tensão aplicada, também é trativa, a resistência à fadiga será reduzida significativamente.

## 6 CONCLUSÃO

Este tópico apresenta as principais conclusões sobre o estudo da caracterização da superfície usinada por meio dos processos de torneamento e retificação do aço ABNT 4340 endurecido.

- ✓ De maneira em geral, os valores dos parâmetros de superfície bidimensionais (2D) ( $R_a$ ;  $R_z$ ;  $R_t$ ;  $R_k$ ;  $R_{vk}$ ;  $K_p$ ) apresentaram valores inferiores utilizando o processo de torneamento, tendo obtido um melhor desempenho quando foram usinados com a velocidade de corte de 300m/min, com destaque especial para a ferramenta de cerâmica CC6050, que apresentou melhor performance nas três velocidades de cortes testadas.
- ✓ Os valores para o parâmetro  $R_{ku}$  nas amostras que foram retificadas ficaram próximos de 3, típico para uma superfície retificada, que apresenta a forma de uma curva gaussiana balanceada, o que evidencia uma boa condição de corte do rebolo. Já nas amostras torneadas, a maioria dos valores médios de  $R_{ku}$  ficaram abaixo de 3, indicando tratar-se de superfícies mais achatadas.
- ✓ Os valores médios para o parâmetro  $R_{sk}$  nas amostras retificadas foram todos negativos, indicando tratar-se de superfícies com predominância de vales profundos, conseqüentemente, uma superfície com boa capacidade de lubrificação. Já as superfícies torneadas não apresentaram um comportamento uniforme, sendo registrados valores positivos e negativos. Os valores negativos tiveram maior predominância quando foi utilizada a velocidade de corte de 300m/min.
- ✓ Em relação aos parâmetros de superfície bidimensionais (2D) e tridimensionais (3D), em geral a ferramenta de cerâmica CC6050 apresentou melhor desempenho, seguida das ferramentas de PcBN e cerâmica CC650, respectivamente, em ambas condições de lubrificação.
- ✓ O processo de retificação induziu tensões residuais de compressão em todas as condições de corte ensaiadas. O estado original das tensões residuais dos corpos de prova previamente a retificação e torneamento, foi de tração. No torneamento utilizando ferramentas de corte de cerâmica CC650 e CC6050, induziram tensões residuais de tração, em todas as condições de corte, enquanto as amostras usinadas com ferramenta de corte de PcBN

CB7115, foram induzidas tensões residuais de compressão, também em todas as condições de corte.

- ✓ As análises executadas por meio da curva de Abbot-Firestone, utilizando a análise 3D, permitiram uma avaliação detalhada dos parâmetros funcionais de superfície e de volume, permitindo associar o parâmetro  $V_{mp}$  ao parâmetro  $S_{pk}$  e o parâmetro  $V_{vv}$  ao parâmetro  $S_{vk}$ . A análise dos parâmetros funcionais permitiu também a comparação entre as análises 2D/3D, possibilitando avaliação das superfícies resultantes de ambos os processos, as quais se equivalem em suas principais características (área de contato, capacidade de carregamento e de retenção de fluidos).
- ✓ O aumento da velocidade de corte proporcionou melhor integridade superficial. O processo de torneamento utilizando velocidade de corte de 300m/min apresentou melhor desempenho do que o processo de retificação.
- ✓ No geral, a utilização de lubrificação no torneamento não apresentou desempenho superior em relação a condição à seco.
- ✓ Mediante resultados em geral, pode-se concluir que o processo de torneamento de aços endurecidos é capaz de proporcionar integridade superficial comparável com o processo de retificação.

## 7 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

- ✓ Variar os parâmetros de corte (avanço e profundidade de corte) para verificar o grau de influência dos mesmos na qualidade das superfícies obtidas e nas alterações geradas nas camadas da subsuperfície. A análise da influência destes parâmetros irá complementar este trabalho, principalmente o avanço cujo efeito é relativamente superior ao da velocidade de corte e da profundidade de corte sobre os parâmetros de rugosidade.
- ✓ Estudar o comportamento dos parâmetros de superfície bidimensionais (2D) e tridimensionais (3D) e das alterações microestruturais quando usinadas com ferramentas de corte de diferentes geometrias, pois estas exercem influencia direta sobre os parâmetros de superfície 2D/3D e nas alterações subsuperficiais mecânicas (microdureza, tensões residuais) e metalúrgicas (recristalização e transformação de fase).
- ✓ Caracterizar a superfície usinada via Microscópio de Força Atômica (AFM). A microscopia de força atômica além de caracterizar a estrutura superficial da amostra é, também, uma técnica bastante utilizada para o estudo de propriedades mecânicas e tribológicas de superfícies na escala nanométrica.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRÃO, A. M. Torneamento de aços endurecidos. Tecnologias avançadas de Manufatura. Cap. 5, Editora Novos Talentos, 2005, p. 89-103.

ABRÃO, A. M., **The machining of annealed and hardened steels using advanced ceramic cutting tools**. Tese (Ph.D.), University of Birmingham, 1995.

ABRÃO, A. M.; ASPINWALL, D. K.; WISE, M. L. H., Tool Life and Workpiece Surface Integrity Evaluations When Machining Hardened AISI H13 and AISI E52100 Steels With Conventional Ceramic And PcBN tool Materials. SME technical paper. **Society Manufacturing Engineers**, MR95-159, Dearborn, MI, p 1-8, 1995.

ALVES, J. M. **Análise da transformação martensítica e tensão residual em um aço inoxidável 304L**. 2014. 103 p. Trabalho de Conclusão do Curso (Mestrado) - Curso de Ciências dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2014.

ALVES, M. C. S.; BIANCHI, E. C.; AGUIAR, P. R. Influência da velocidade de avanço do rebolo nos danos de aços endurecidos retificados. **Matéria**, v. 13, n. 4, p. 636-642, jun. 2008.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **E2860-12**: Standard Test Method for Residual Stress Measurement by X-Ray Diffraction for Bearing Steels. West Conshohocken, 2012.

ASM International, Metal Handbook, vol. 16: Machining, 9th ed. Metals Park, p. 944, 1995.

ASM-HANDBOOK. **Properties and selection**: irons, steels and high-performance alloys. v. 1, American Society for Metals, 1993.

ASMT INTERNATIONAL. **ASTM E2860-12**: Standard Test Method for Measuring Residual Stress by X-Ray Diffraction for Rolling Steels. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR ISO 4287**: Especificações Geométricas do Produto (GPS) - Rugosidade: Método do Perfil - Termos, Definições e Parâmetros da Rugosidade. Rio de Janeiro, 2002.

BARBACKI, A.; KAWALEC, M.; HAMROL, A. Turning and grinding as a source of microstructural changes in the surface layer of hardened steel. **Journal of Materials Processing Technology**, 2003.

BENGA, G.C.; ABRÃO, A. M. Turning of hardened 100Cr6 bearing steel with ceramic and PCBN cutting tools, **Journal of Materials Processing Technology** 143–144 (2003) 237–241.

BIANCHI, E. C. O desempenho de rebolos pode ser controlado pela dressagem. **Máquinas e Metais**. , n.317, p.12 - 25, 1992.

BIANCHI, E. C. et al. A otimização da agressividade de rebolos pelas condições de usinagem e dressagem. **Máquina e Metais**, p.70-83, mai. 1996.

BIANCHI, E. C. et al. Estudo comparativo entre a agressividade superficial na retificação com rebolos de óxido de alumínio e CBN, fabricados com ligantes resinóide e vitrificado. **Cerâmica**, São Paulo, v. 57, p. 431-437, dez. 2011.

BORDINASSI, É. C. **Contribuição ao estudo da integridade superficial de um aço inoxidável super-duplex após usinagem**. 2006. 221 f. Tese (Doutorado) - Curso de Doutorado em Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

BRANDÃO, L. C.; COELHO, R. T. Resultados e perspectivas de um projeto temático. **Máquinas e Metais**, nº 542, p.32-44, mar. 2011.

BRINKSMEIER, E. et al. Nondestructive testing for evaluating surface integrity. **Annals of the CIRP**, v. 33, n. 2, p. 489-509, 1984.

BRINKSMEIER, E. et al. Residual stresses - Measurement and causes in machining processes. **Annals of the CIRP**, v. 31, p. 491-510, 1982.

CAMPOS, C. N. de. **Análise da integridade da região abaixo da superfície no torneamento de materiais endurecidos com ferramentas de PcBN e metal-duro**. 2016. 150 p. Trabalho de Conclusão do Curso (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

CAMPOS, P. H. S. et al. Modelagem da rugosidade (Ra, Rt) no torneamento duro com cerâmica mista alisadora utilizando projetos de experimentos (DOE). In: **XXXI ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**, 2011, Belo Horizonte.

CARMO, D. C. **Análise de tensões por ultra-som em barra de aço sob flexão**. 2006. 95 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

CHOU, Y. K.; EVANS, C. J.; BARASCH, M. M., Experimental investigation on CBN turning of hardened AISI 52100 steel, **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 124, n. 3, p. 274-283, 2002.

CHOU, Y., **"Wear Mechanisms of Cubic Boron Nitride Tools in Precision Turning of Hardened Steels"**, PhD Thesis, Purdue University, 1994.

COELHO, R. T. et al. Até onde evoluiu e quais são as limitações da HSM. **Máquinas e Metais**, n. 519. p. 192-229, abr. 2009.

COSTA, L. A. **Torneamento de matrizes nitretadas de aço AISI H10 para trabalho a quente**. 2003. 133 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.

CULLITY, B. D. Elements of x-ray diffraction. 2ª ed. Phillipines: Addison-Wesley Publishing Company Inc., 1978. 555 p.

DAHLMAN, P.; GUNNBERG, F.; JACOBSON, M. The influence of rake angle, cutting feed and cutting depth on residual stresses in hard turning. **Journal of Materials Processing Technology**, 147, 2004, p. 181-184.

DAMASCENO, R. F. **Análise da influência da profundidade de corte e de diferentes métodos de lubrificação na retificação plana de aço abnt 4340**. 2010. 165 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Bauru, 2010.

DELIJAICOV, S. **Modelagem das tensões residuais no processo de torneamento duro de um aço 100CrMn6 e suas correlações com os esforços de corte**, 183 p., Tese (Doutorado), Departamento de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da USP, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

DING, W. et al. Review on grinding-induced residual stresses in metallic materials, **International Journal Advanced Manufacturing Technology**, n. 88, p. 2939 - 2968, 2017.

DOMINGOS, F. C.; FREITAS, S. V. C. de; NETO, V. M. Análise metrológica de rugosímetros. In: **CONGRESSO INTERNACIONAL DE METROLOGIA MECÂNICA**, 3., 2014, Gramado.

DONG, W.P.; SULLIVAN, P.J.; STOUT, K.J. Comprehensive study of parameters for characterising threedimensional surface topography: III: Parameters for characterising amplitude and some functional properties. **Wear**, Birmingham, v. 178, p.29-43, jul. 1994.

DUAN, C.; DOU, T.; WANG, M. Research on influence of material hardness and cutting conditions on serrated chip formation during high speed machining of AISI 1045 hardened steel. In: **COMPUTER ENGINEERING AND 159 TECNOLOGY (ICCET), 2010 2ND INTERNATIONAL CONFERENCE**, 2010, Dalian, China, 16-18 abr. 2010, v. 5, p. 552-555.

EBBRELL, S. et al. The effects of cutting fluid application methods on the grinding process. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 40, n. 2, p. 209-223, jan. 2000.

FAINMAN, Y.; LENZ, E.; SHANIR, J. Optical profilometer: a new method for high sensibility and wide dynamic range. **Applied Optics**, v. 21, n. 17, 1982.

FARIAS, A. de. **Análise da tensão residual e integridade superficial no processo de torneamento em material endurecido do aço ABNT 8620 cementado**. 2009. 191 p. Trabalho de Conclusão e Curso (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica de Projeto e Fabricação, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

FENG C. X.; WANG X.; ZHIGUANG Y. Neural networks modeling of honing surface roughness parameters defined by ISO 13565. **Journal of Manufacturing Systems**, p. 395-408, 2002.

FERRARESI, D. **Usinagem dos metais**. 1. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1970. 751 p.

FRANCO, L. A.; SINATORA, A. 3D surface parameters (ISO 25178-2): Actual meaning of Spk and its relationship to Vmp. **Precision Engineering**, v. 40, p 106-111, 2015.

FREITAS, E. S. R. **Parâmetros topográficos para avaliação, caracterização e controle tribológicos de superfícies de engenharia**. 2006. 118 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

FUSSE, R. Y. **Estudo comparativo entre a lubri-refrigeração convencional e a MQL no processo de retificação cilíndrica externa de mergulho**. 2005. 118 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Industrial, Faculdade de Engenharia da UNESP, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2005.

GODOY, V. A. A. de; DINIZ, A. E., Turning of interrupted and continuous hardened steel surfaces using ceramic and CBN cutting tools, **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 211, p. 1014-1025, 2011.

GRZESIK, W. Friction Behavior of heat isolating coatings in machining: mechanical, thermal and energy-based considerations. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, nº 43, p. 145-150, 2003.

GRZESIK, W. Influence of tool wear on surface roughness in hard turning using differently shaped ceramic tools. **Wear**, vol. 265, p. 327-335, 2008.

GRZESIK, W.; WANAT, T. Comparative assessment of surface roughness produced by hard machining with mixed ceramic tools including 2D and 3D analysis. **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 169, p. 364-371, 2005.

GRZESIK, W.; WANAT, T., Surface finish generated in hard turning of quenched alloy steel parts using conventional and wiper ceramic inserts, **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, vol. 46, p. 1988-1995, 2006.

GRZESIK, W.; ZAK, K.; KISZKA, P., Comparison of surface textures generated in hard turning and grinding operations, **Procedia CIRP**, vol. 13, p. 84-89, 2014.

GUNNBERG, F.; ESCURSELL, M.; JACOBSON, M. The influence of cutting parameters on residual stresses and surface topography during hard turning of 18MnCr5 Case Carburized steel. **Journal of Materials Processing Technology**, 174, 2006, p. 82-90.

HAZAN, E.; SADIA, Y.; GELBSTEIN, Y. Characterization of AISI 4340 Corrosion Products Using Raman Spectroscopy. **Corrosion Science**, v. 74, p. 414-418, 2013.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 13565**: Geometrical product specifications (GPS). 1996.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 13565-2**: Geometrical product specifications profile method, surfaces having stratified functional properties – Part 2: Height characterization using the linear material ratio curve. 1996.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 13565-3**: Geometrical product specifications (GPS) - surface texture: profile method; surfaces having stratified functional properties - part 3: height characterization using the material probability curve. 1998.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 25178-2**: 2012 Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface texture: Areal, Part 1: Terms, definitions and surface texture parameters.

JACOBSON, M.; DAHLMAN, P.; GUNNBERG, F. Cutting speed influence on surface integrity of harned turned bainite steel. **Journal of Materials Processing Technology**, 2002, p. 318-323.

KHELLAF, A. et al., 2017. Comparative assessment of two ceramic cutting tools on surface roughness in hard turning of AISI H11 steel: including 2D and 3D surface topography. **International Journal Advanced Manufacturing Technology**, n. 89, p. 333-354, 2017.

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.

KUNDRAK, J.; GYANI, K.; BANA, V., 2008. Roughness of ground and hard-turned surfaces on the basis of 3D parameters. **International Journal Advanced Manufacturing Technology**, n. 38, p. 110-119, 2008.

LANDI, D. C. Torneamento com altas velocidades de corte. Usinagem em altíssimas velocidades: como os conceitos HSM/HSC podem revolucionar a indústria metal mecânica - São Paulo, 2<sup>o</sup> edição, 2003.

LEACH, R. **Characterisation of Areal Surface Texture**. Uk: Springer, 2013. 355 p.

LEACH, R. **Of Surface Texture Using Stylus Instruments**: Engineering Measurement Division National Physical Laboratory. Hampton: Hmso, 2014. 112 p.

LEE, E.S.; KIM, N.H. A study on the machining characteristics in the external plunge grinding using the current signal of the spindle motor. **International Journal Of Machining Tools & Manufacture**, v. 41, n. 7, p. 937-915, May. 2001.

LI, A et al. **Surface roughness effects on stress determination by the X-ray diffraction Method. Experimental Techniques.** 1995;19(2):9-11. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1111/j.1747-1567.1995.tb00840.x>>. Acesso em: 31 jul. 2018.

LIMA, F.; CORRÊA, M. Usinagem de materiais endurecidos. **Tecnologia**, Fortaleza, CE, v. 23, n. 1, p. 38-44, dez. 2002.

LIMA, J. G. et al. Hard turning: AISI 4340 high strength low alloy steel and AISI D2 cold work tool steel, **Journal of Materials Processing Technology.** 169 (2005) 388–395.

LIU, X.; ZHANG, B. Effects of grinding process on residual stresses in nanostructured ceramic coatings. **Journal of Materials Science**, v. 37, n. 15, p. 3229-3239, 2002.

LU, J. **Handbook of measurement of residual stresses.** SEM - Society for Experimental Mechanics, The Fairmont Press, Lilburn, GA, USA, 1996.

LU, J. **Handbook of Measurements of Residual Stress**, v. 2, Ed. SEM, 2. ed., p. 417, 2005.

LUCIANO, M. A. **Avaliação da corrosão do aço carbono ASTM A-36 quando em contato com biodiesel de variadas matrizes e diesel aditivado com 5% de biodiesel.** 2011. 101 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

MACHADO, A. R. et. al. **Teoria da usinagem dos materiais.** 3. ed. rev. e atual. São Paulo: Blucher, 2015. 407 p.

MALKIN, S., CHIU, N. Computer simulation for cylindrical plunge grinding. **Annals of the CIRP...** v.42, p.383-387, Jan. 1993.

MALKIN, S.; GUO, C. **Grinding technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives**, 2nd ed., Industrial Press Inc., 372 p., 2008.

MARINESCU, I. D. et al. **Handbook of Machining with Grinding Wheels.** 2<sup>a</sup> edition, New York: Taylor & Francis, 2016.

MARTINS, C. O. D. et al. Comparação entre as técnicas de análise de tensões residuais em anéis de rolamento do aço ABNT 52100. **Matéria**, v. 9, n. 1, p. 20-28, 2004.

MATSUMOTO, H.; PEDROSA, E. A.; DINIZ, A. E. Análise do torneamento de aços endurecidos utilizando ferramentas de PcBN. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 2., 2002, João Pessoa. **Anais eletrônicos...** Paraíba, 2002. Disponível em: <<http://www.abcm.org.br/anais/conem/2002/trabalhos/tema13/CPB0655.PDF>>. Acesso em: 01 jun. 2017.

MATSUMOTO, Y; HASHIMOTO, F.; LAHOTI G. Surface integrity generated by precision hard turning. **Annals of the CIRP**, v 48, 1999, p. 59-62.

MATTOS, R. F. J. **Análise Topográfica da Superfície de Cilindro de Motores a Combustão Interna**. 2009. 65 p. Dissertação (Mestrado), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Paraná, 2009.

MEDEIROS, J. T. N. **Fadiga de contato de discos metálicos não-conformes submetidos a ensaios a seco de rolamento cíclico**. 2002. 501 p. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

MELLO, N. **Retificação e afiação: princípios de retificação e afiação na indústria metal mecânica**. 1. ed. São Paulo: Copyright, 2011. 322 p.

MITUTOYO. **Manual do usuário SJ-301: Medidor de Rugosidade**. n. 178.

MINKE, E., 1999, Handbuch zur Abricht Technik, Riegger Diamantwerkzeuge GMBH.

MULLER, P.; SOTO, M. Usinagem sem refrigeração de Furos e Roscas. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE ALTA VELOCIDADE – ABM, 4., 1999, Santa Bárbara do Oeste. **Anais...** Santa Bárbara do Oeste: ABM, 1999. p. 126-133.

MUMMERY, L. **Surface Texture Analysis – The Handbook**. Hommelwerke GmbH, Germany, 1992.

NAVAS, V. G.; GONZALO, O.; BENGOETXEA, I. Effect of cutting parameters in the surface residual stresses generated by turning in AISI 4340 steel. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, p. 48-57. 2012.

NGUYEN, T.; ZHANG, L.C. An assessment of the applicability of cold air and oil mist in surface grinding. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 140, n. 1, p. 224-230, sep. 2003.

OLIVEIRA, C. J. de. **Avaliação da influência de sistemas de filtragem aplicados a topografia de superfície em usinagens**. 2004. 123 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

OLIVEIRA, F. G. HSM – Conceito e aplicações. In: Usinagem em altíssimas velocidades: como os conceitos HSM/HSC podem revolucionar a indústria metalmeccânica. São Paulo: Ed. Érica, 2003, p. 29–35.

PARRA, B. S. et al. Rugosidade superficial de revestimentos cerâmicos. **Cerâmica Industrial**, v. 11, n. 2, p.15-18, 2006.

PAULA, A. R. de. **Estudo da usinabilidade do aço ABNT 4340 endurecido no torneamento com alta velocidade de corte sob diferentes condições de lubrificrefrigeração**. 2012. 168 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais, Departamento de Engenharia de Materiais,

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET-MG, Belo Horizonte, 2012.

PAVLICEK, P. Influence of surface roughness on the measurement uncertainty of white-light interferometry, In: POLISH-SLOVAK-CZECH OPTICAL CONFERENCE ON WAVE AND QUANTUM ASPECTS OF CONTEMPORARY OPTICS, n. 16, 2008.

PAWLUS, P.; MICHALSKI, J. Characterization of the shape of the roughness profile ordinate distribution of honed cylinder surfaces. **Wear**, vol. 161, p. 135-143, 1992.

PETROPOULOS, G. et al. Is the Rk group of roughness parameters suitable to describe turned surfaces. In: International Scientific Conference, 2003, Gabrovo. **Proceedings**. Gabrovo: ISC, 2003.

POON, C. Y.; BHUSHAN, B. Comparison of surface roughness measurements by stylus profiler, AFM and non-contact optical profiler. **Wear Journal**, v. 190, n. 1, 1995.

PUERTO, P. et al. Evolution of surface roughness in grinding and its relationship with the dressing parameters and the radial wear. **Procedia Engineering**, p. 174-182. 2013.

RECH, J.; MOISAN, A. Surface integrity in finish hard turning of case-hardened steels. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, 43, 2003, p. 543-555.

REIS, W. P. dos et al. Estudo das Tensões Residuais Geradas na Usinagem de Aço AISI 4340. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 2010, Campos do Jordão. **Anais...** Campos do Jordão: CBECIMAT, 2010. p. 2-3.

ROSA, G. C. da, **Estudo da usinabilidade no torneamento a seco do aço inoxidável martensítico AISI 420 C endurecido com ferramenta de metal-duro**. 2017. 121 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

SANDVIK, **Cerâmica**. Disponível em: <[https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/materials/cutting\\_tool\\_materials/ceramics/pages/ceramic.aspx](https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/materials/cutting_tool_materials/ceramics/pages/ceramic.aspx)>. Acesso em: 28 jul. 2018.

SANDVIK, High Speed Machining. **O Mundo da Usinagem**, n.1, p. 16-23, 2002.

SANDVIK, **Torneamento de peças duras com CBN**. Disponível em: <<https://www.sandvik.coromant.com/sitecollectiondocuments/downloads/global/catalogues/pt-pt/c-2940-137.pdf>>. Acesso em: 31 julho 2018.

SANTOS, C. Z. **Estudo da tensão residual através de difração de raios x em aço inoxidável duplex submetido a diferentes tratamentos térmicos**. 2012. 94f.

Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2012.

SANTOS, S. C.; SALES, W. F. **Aspectos Tribológicos da Usinagem dos Materiais**. 1ª ed., editora Artliber, São Paulo, 2007.

SEDLACEK, M.; PODGORNIK, B.; VIZINTIN, J. Influence of surface preparation on roughness parameters, friction and wear. **Wear**, v. 266, p. 482-487, 2009.

SERUP, J.; JEMEC, G. B. E.; GROVE, G. L. **Handbook of Non-invasive Methods and the Skin**. 2. ed. Taylor & Francis, 2006.

SILVA E. J., BIANCHI, E. C., OLIVEIRA, J.F.G., "A review of grinding fluids – performances and management". **Revista de Ciência & Tecnologia**, v. 8, Nº18 – p. 67-77. Dez 2001.

SILVA, D. A. **Estudo dos parâmetros de superfície e da tensão residual no aço ABNT 4340 endurecido após retificação utilizando diferentes fluidos de corte**. 2018, 135 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG, Belo Horizonte, 2018.

SILVA, L. R. da et al. Study of 3D parameters and residual stress in grinding of AISI 4340 steel hardened using different cutting fluids **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, p. 1-11, 2018.

SILVA, L. R. da; COELHO, R. T.; CATAI, R. E. **Desgaste de ferramentas no torneamento com alta velocidade de corte da superliga "waspaloy"**. Rem: Rev. Esc. Minas, Ouro Preto, v. 57, n. 2, p. 109-114, June 2004. Available from <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0370-44672004000200007&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-44672004000200007&lng=en&nrm=iso)>. access on 21 Sept. 2018. <http://dx.doi.org/10.1590/S0370-44672004000200007>.

SIMÕES, R. P. **Utilização de diferentes métodos de lubri-refrigeração na retificação cilíndrica externa de mergulho de cerâmica avançada com rebolo diamantado**. 2012. Tese (Doutorado) - Pós-Graduação em Ciência de Materiais, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2012.

SOARES, D. D.; OLIVEIRA, J. F. G. Diagnóstico de processos de retificação pela análise de sinais. **Máquinas e Metais**, n. 436, p. 140-157, 2002.

SOUZA, A. J. **Fundamentos da usinagem de acabamento por abrasão mecânica**. Rio Grande do Sul: Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, 2007.

SOUZA, D. A. de. **Determinação das tensões residuais em materiais metálicos por meio de ensaio de dureza**. 2012. 114 p, Trabalho de Conclusão de Mestrado, Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São João Del-Rei, Minas Gerais, 2012.

STOUT, K. J. (2000). Developments of methods for the characterization of roughness in three dimensions, Penton Press, London, 2000.

STOUT, K. J. et al. **The development of methods for characterization of roughness in three dimensions**. University of Birmingham, Inglaterra, University of Birmingham Press, 1993, p. 359.

SUTERIO, R. **Medição de tensões residuais por indentação associada à holografia eletrônica**. 2005. 169 p. Tese (Doutorado) - Curso de Doutorado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

TAYLOR HOBSON PRECISION. **Guide to Surface Texture Parameters**, 2000.

TOMITA, K. O atual estágio da HSM e dos materiais de ferramentas de corte. **Máquinas e Metais**, n. 405. p.20-39, out. 1999.

TONSHOFF, H.K., ARENDT, C., AMOR, R. B. Cutting of hardened steel, **Ann. "CIRP** 49/2 (2000) 547–566.

TONSHOFF, K. K.; BRINKSMEIER, E. Determination of mechanical and thermal influence on machined surfaces by microhardness and residual stress analysis. **Annals of the CIRP...** v. 29, n. 2, p. 519-530, 1980.

WANG, P. J. **Avaliação da retificação com rebolo CBN vitrificado aplicado em ligas de alto desempenho**. 2008. 163 p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

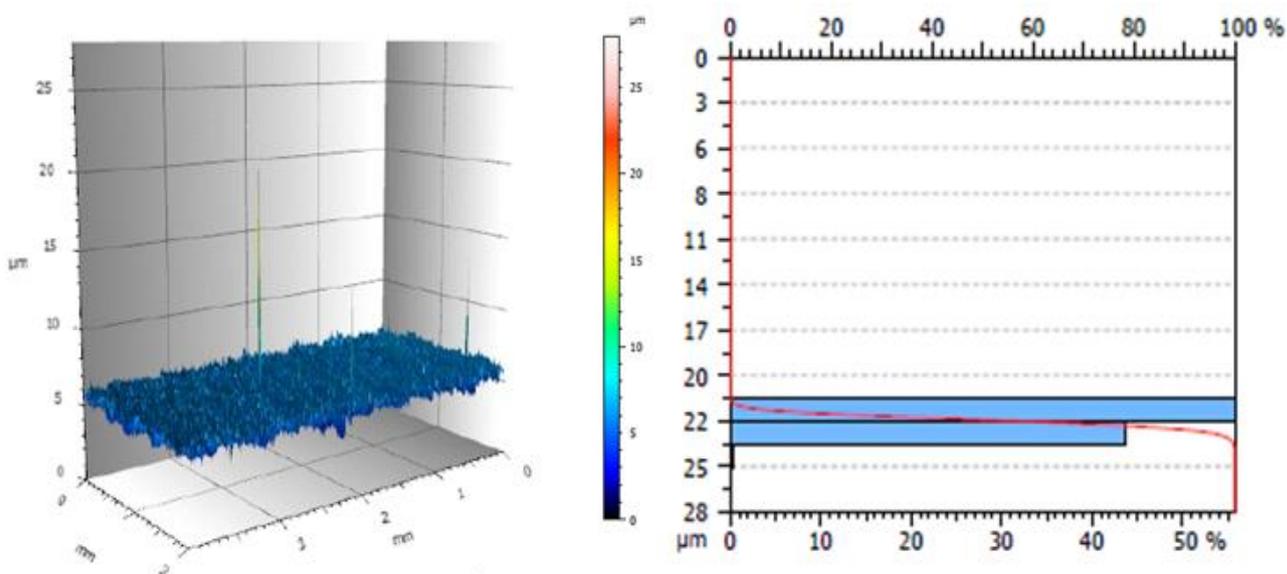
WITHERS, P. J.; BHADESHIA, H. D. H., 2001, Residual stress Part 1 - Measurement techniques, **Materials Science and Technology**, v. 17, p. 355-365, 2001.

## APÊNDICES

**APÊNDICE A - Imagens topográficas das superfícies retificadas e histogramas de distribuição de material utilizando  $v_f$  de 0,3; 0,6 e 0,9mm/min e  $Z_w$  de  $3,31 \times 10^3 \text{mm}^3$ .**

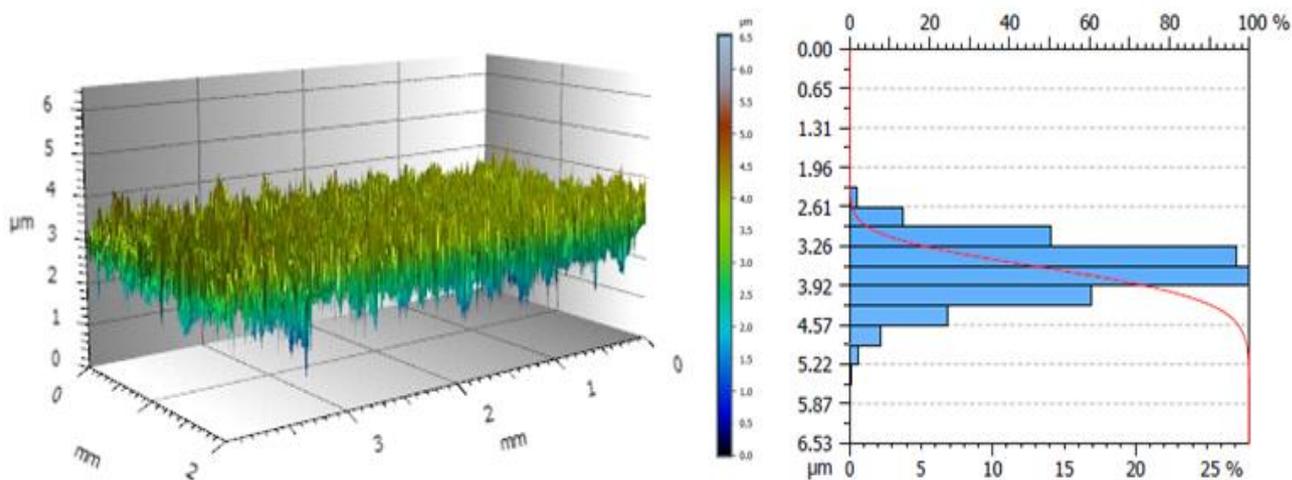
As Figuras 62 à 64 apresentam as imagens topográficas das superfícies retificadas e os histogramas de distribuição de material, utilizando velocidades de mergulho de 0,3; 0,6 e 0,9mm/min e volume de material removido de  $3,31 \times 10^3 \text{mm}^3$ .

**Figura 62 - Topografia da superfície retificada e histograma de distribuição de material, utilizando velocidade de mergulho de 0,3mm/min e volume de material removido de  $3,31 \times 10^3 \text{mm}^3$**



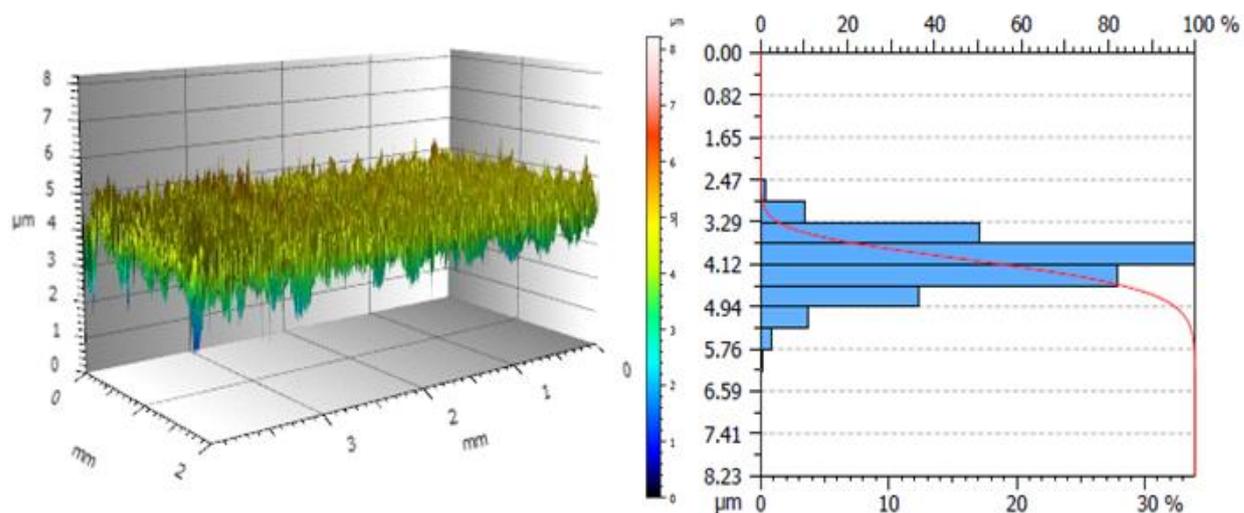
Fonte: próprio autor.

**Figura 63 - Topografia da superfície retificada e histograma de distribuição de material, utilizando velocidade de mergulho de 0,6mm/min e volume de material removido de  $3,31 \times 10^3 \text{ mm}^3$**



Fonte: próprio autor.

**Figura 64 - Topografia da superfície retificada e histograma de distribuição de material, utilizando velocidade de mergulho de 0,9mm/min e volume de material removido de  $3,31 \times 10^3 \text{ mm}^3$**

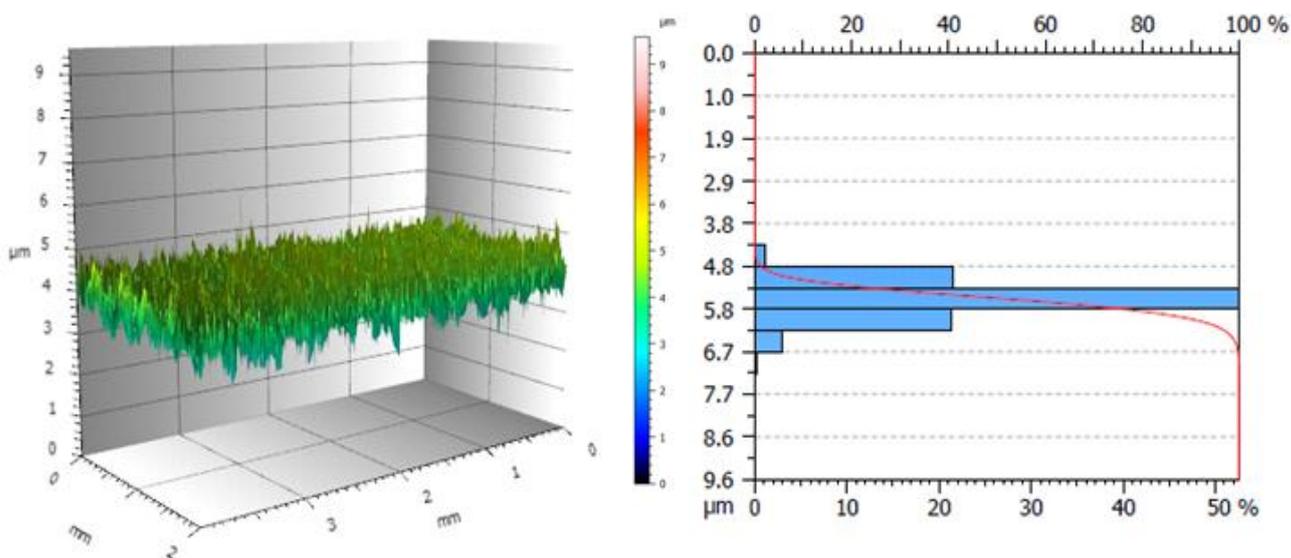


Fonte: próprio autor

**APÊNDICE B - Imagens topográficas das superfícies retificadas e histogramas de distribuição de material utilizando  $v_f$  de 0,3; 0,6 e 0,9mm/min e  $Z_w$  de  $6,47 \times 10^3 \text{mm}^3$ .**

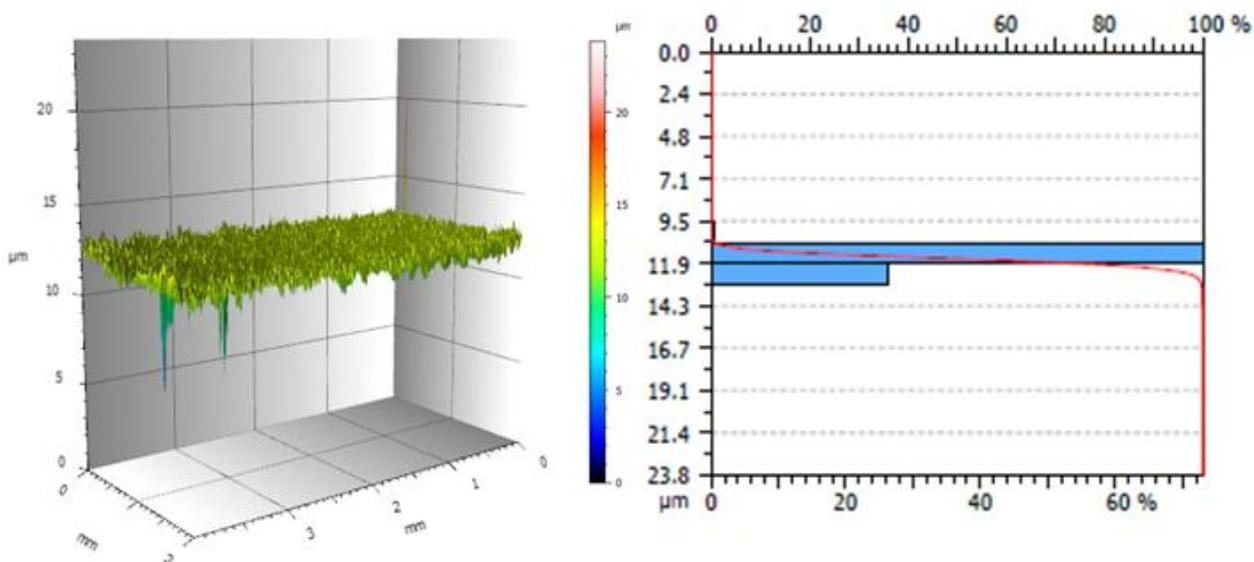
As Figuras 65 à 67 apresentam as imagens topográficas das superfícies retificadas e os histogramas de distribuição de material, utilizando velocidades de mergulho de 0,3; 0,6 e 0,9mm/min e volume de material removido de  $6,47 \times 10^3 \text{mm}^3$ .

**Figura 65 - Topografia da superfície retificada e histograma de distribuição de material, utilizando velocidade de mergulho de 0,3mm/min e volume de material removido de  $6,47 \times 10^3 \text{mm}^3$**



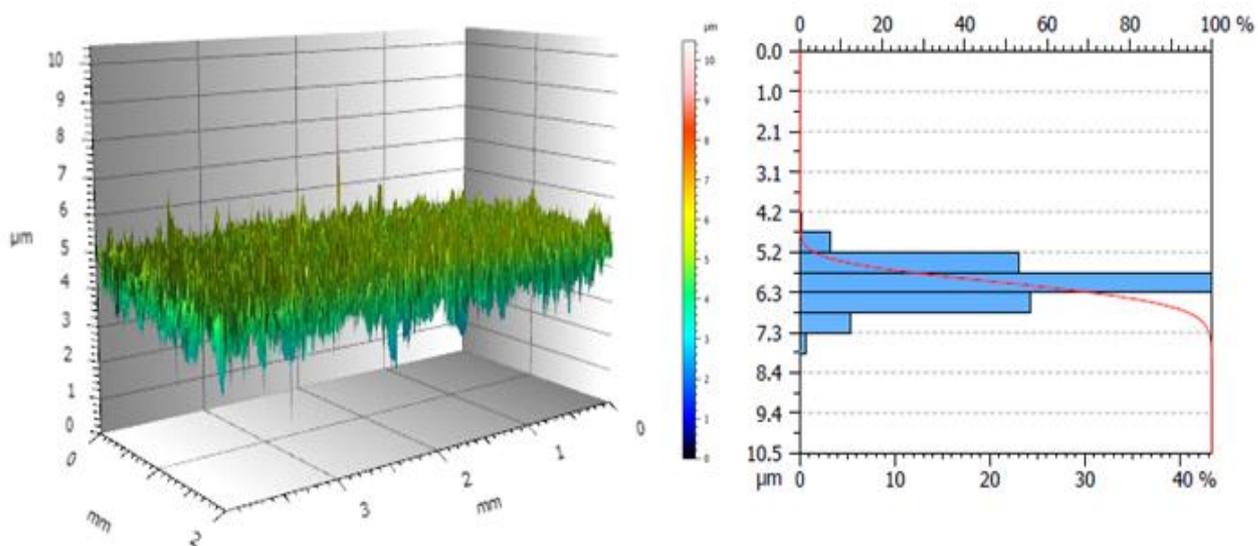
Fonte: próprio autor.

**Figura 66 - Topografia da superfície retificada e histograma de distribuição de material, utilizando velocidade de mergulho de 0,6mm/min e volume de material removido de  $6,47 \times 10^3 \text{ mm}^3$**



Fonte: próprio autor

**Figura 67 - Topografia da superfície retificada e histograma de distribuição de material, utilizando velocidade de mergulho de 0,9mm/min e volume de material removido de  $6,47 \times 10^3 \text{ mm}^3$**

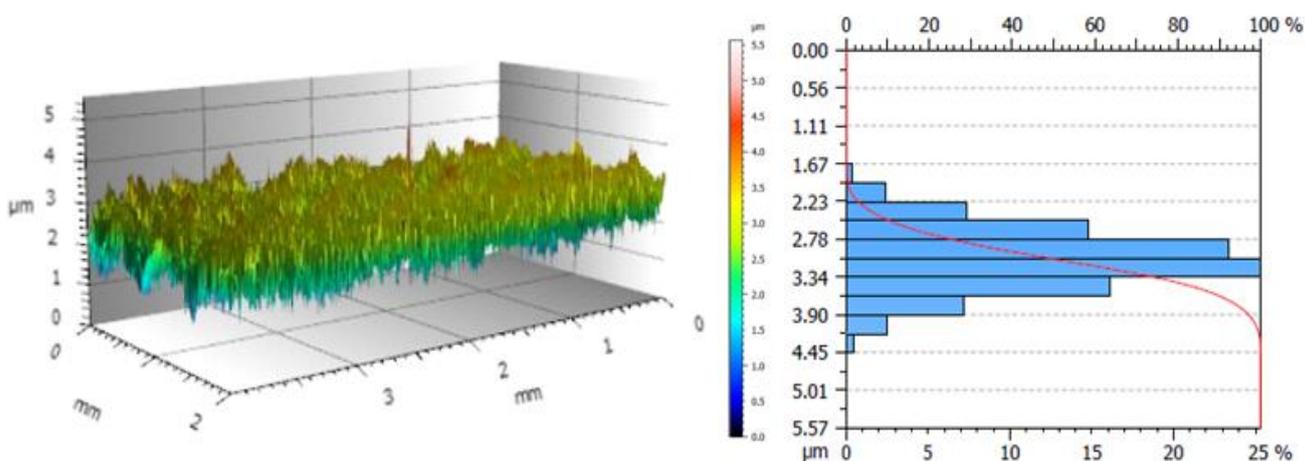


Fonte: próprio autor

**APÊNDICE C - Imagens topográficas das superfícies torneadas e histogramas de distribuição de material utilizando  $v_c$  de 150m/min, ferramentas de cerâmica mista e PcBN, sob condições de lubrificação e à seco.**

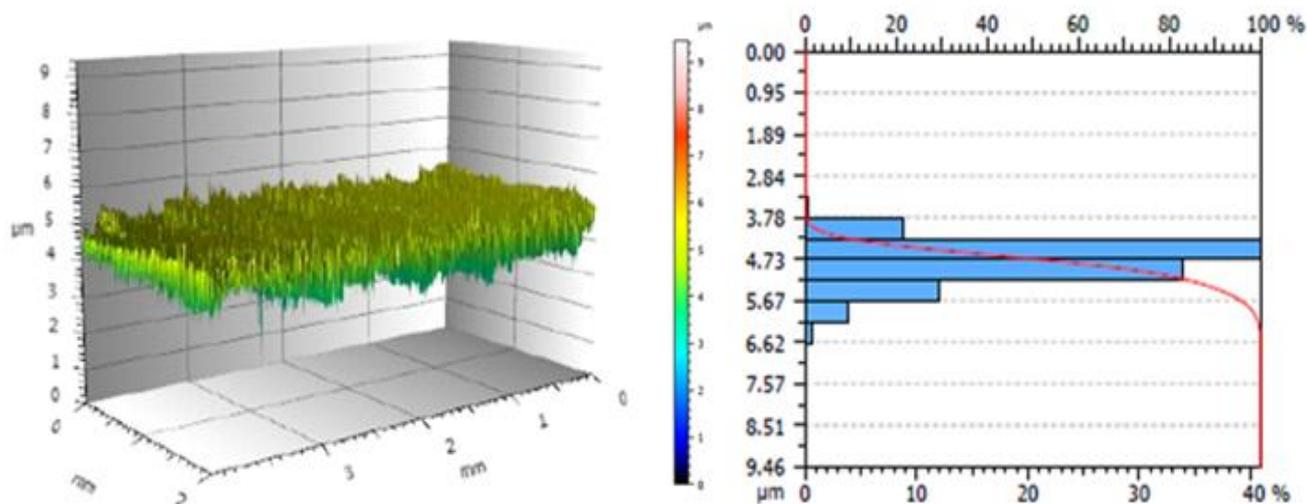
Nas Figuras 68 à 72 são demonstradas as imagens topográficas da superfícies torneadas, utilizando velocidades de corte de 150 m/min, avanço de 0,05 mm/rev e profundidade de corte de 0,15mm, ferramentas de corte de cerâmica mista, classes CC650 e CC6050, e de PcBN, classe CB 7115, à seco e com lubrificação.

**Figura 68 - Topografia da superfície torneada e histograma de distribuição de material utilizando velocidade de corte de 150m/min, ferramenta de corte de cerâmica mista, classe CC650, à seco.**



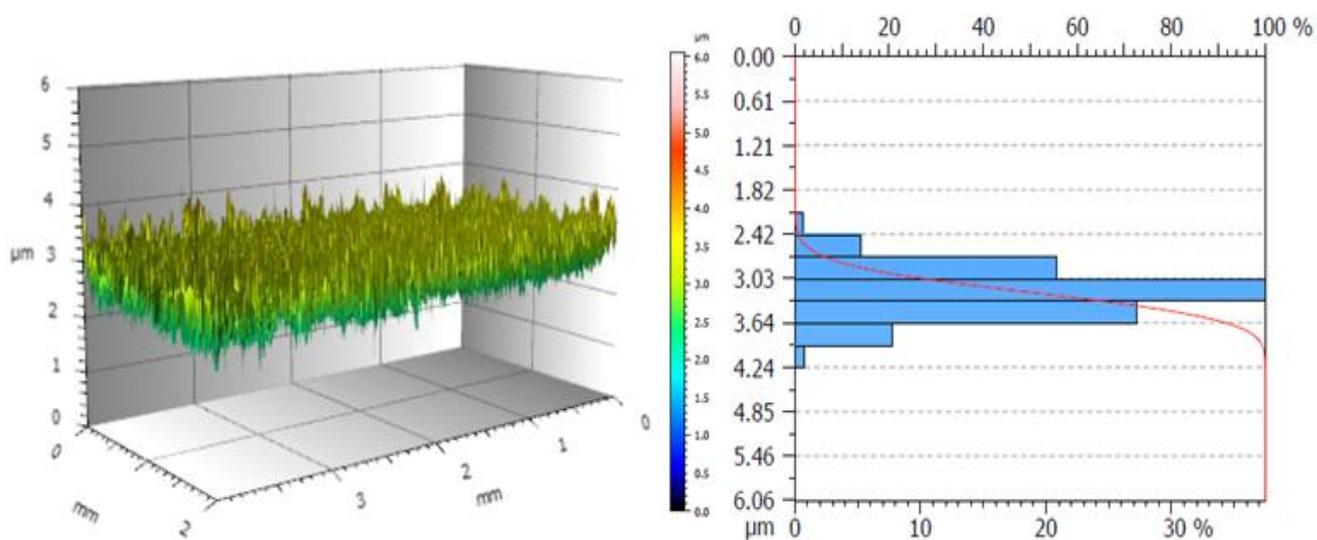
Fonte: próprio autor

**Figura 69 - Topografia da superfície torneada e histograma de distribuição de material utilizando velocidade de corte de 150m/min, ferramenta de corte de cerâmica mista, classe CC650, com lubrefrigeração.**



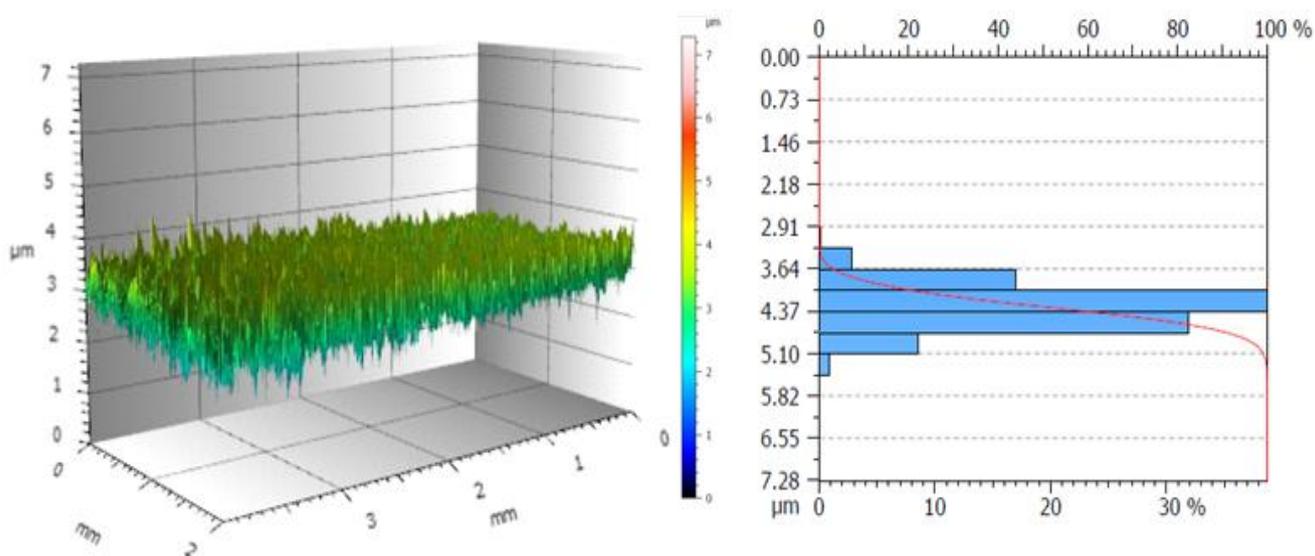
Fonte: próprio autor

**Figura 70 - Topografia da superfície torneada e histograma de distribuição de material utilizando velocidade de corte de 150m/min, ferramenta de corte de cerâmica mista, classe CC6050, à seco.**



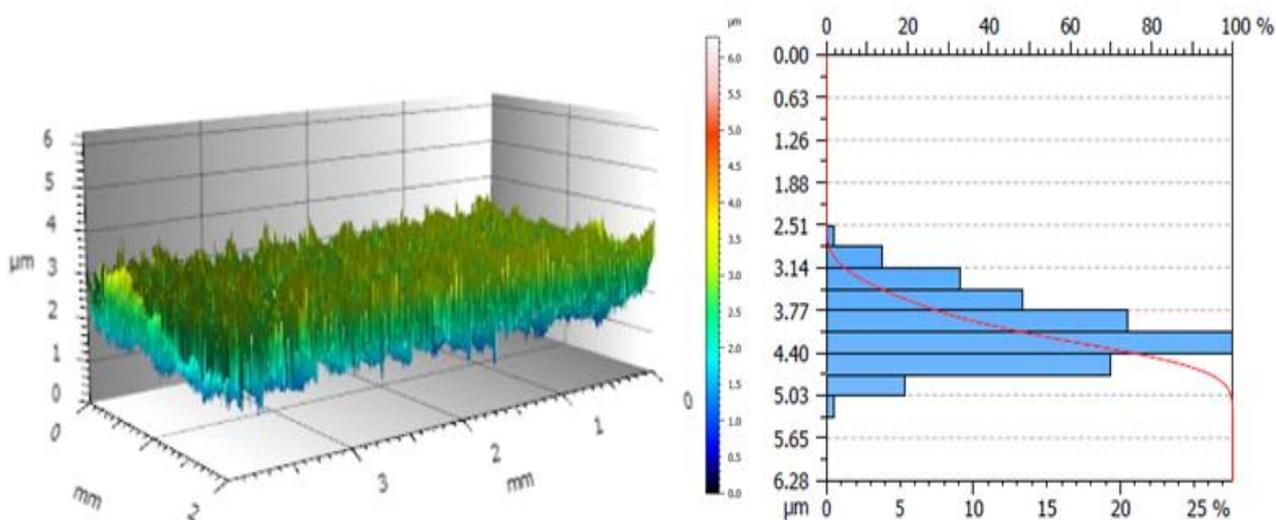
Fonte: próprio autor

**Figura 71 - Topografia da superfície torneada e histograma de distribuição de material utilizando velocidade de corte de 150m/min, ferramenta de corte de cerâmica mista, classe CC6050, com lubrificação.**



Fonte: próprio autor

**Figura 72 - Topografia da superfície torneada e histograma de distribuição de material utilizando velocidade de corte de 150m/min, ferramenta de corte de PcBN, classe CB7115, à seco.**

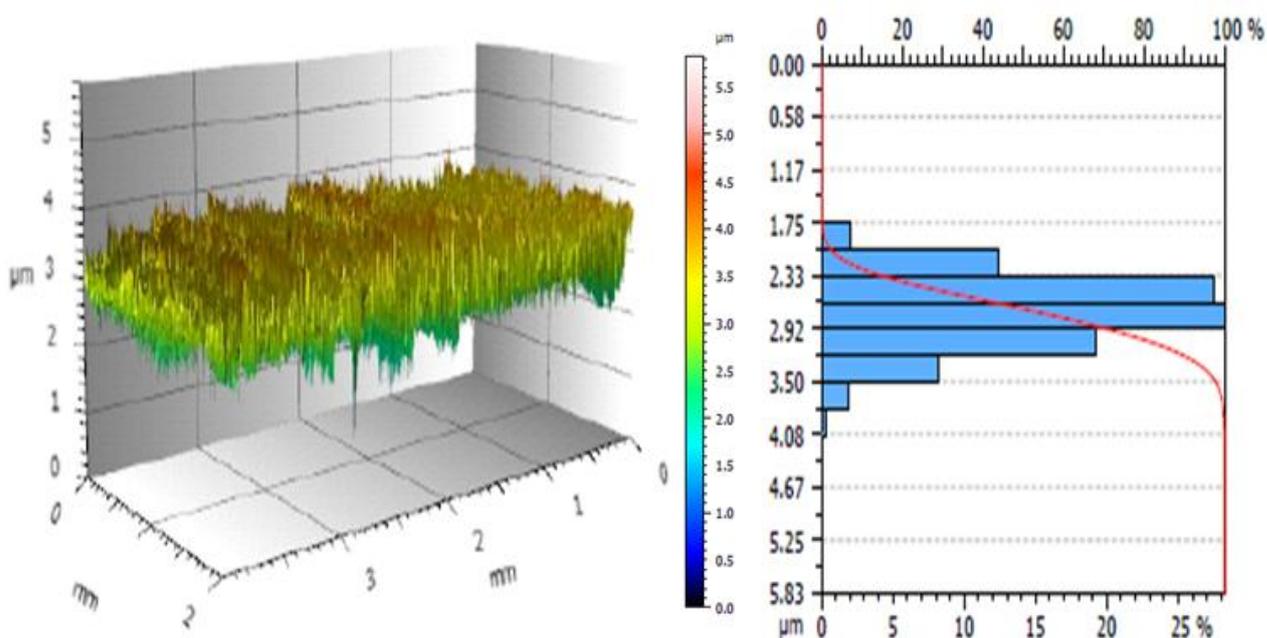


Fonte: próprio autor

**APÊNDICE D - Imagens topográficas das superfícies torneadas e histogramas de distribuição de material utilizando  $v_c$  de 300m/min, ferramentas de cerâmica mista e PcBN, sob condições de lubrificação e à seco.**

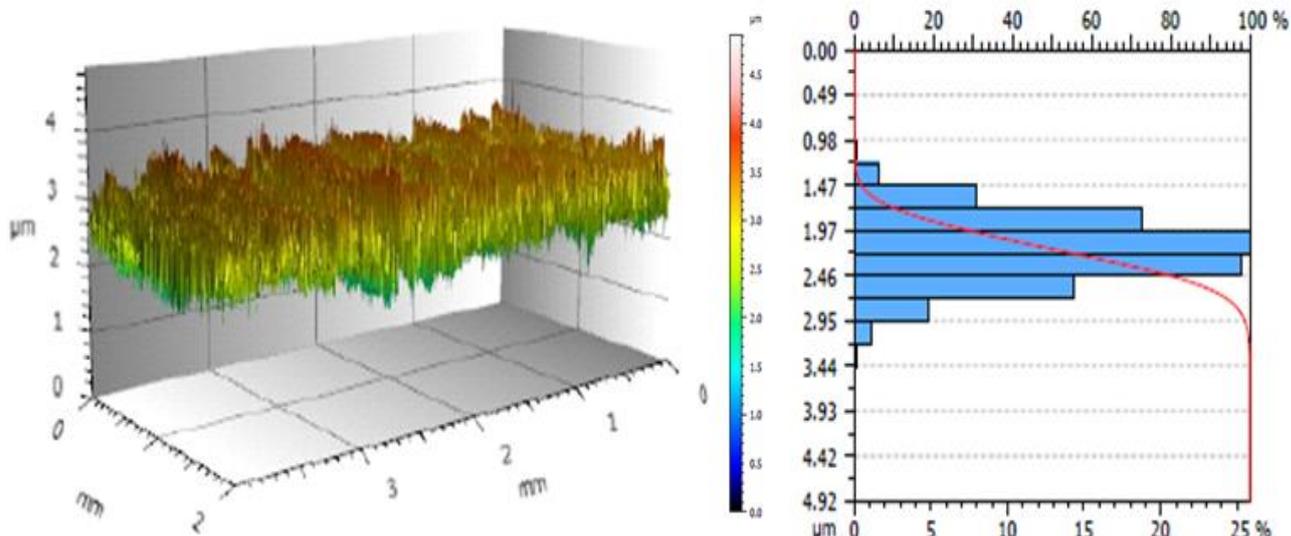
Nas Figuras 73 à 78 são demonstradas as imagens topográficas da superfícies torneadas, utilizando velocidades de corte de 300 m/min, avanço de 0,05 mm/rev e profundidade de corte de 0,15mm, ferramentas de corte de cerâmica mista, classes CC650 e CC6050, e de PcBN, classe CB 7115, à seco e com lubrificação.

**Figura 73 - Topografia da superfície torneada e histograma de distribuição de material utilizando velocidade de corte de 300m/min, ferramenta de corte de cerâmica mista, classe CC650, à seco**



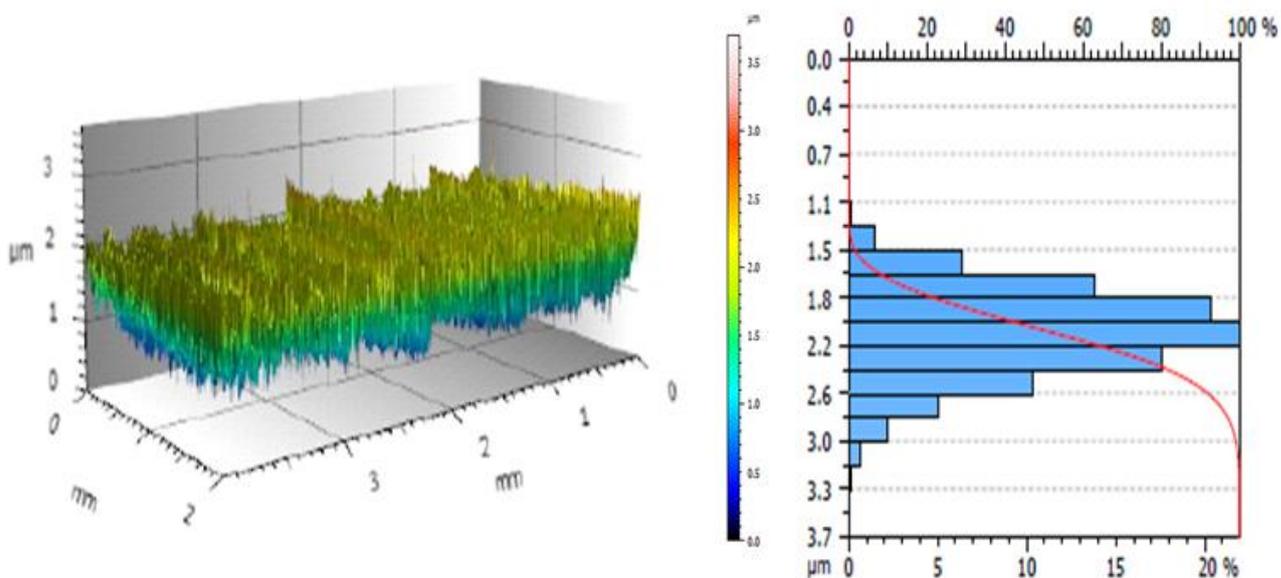
Fonte: próprio autor

**Figura 74 - Topografia da superfície torneada e histograma de distribuição de material utilizando velocidade de corte de 300m/min, ferramenta de corte de cerâmica mista, classe CC650, com lubrefrigeração**



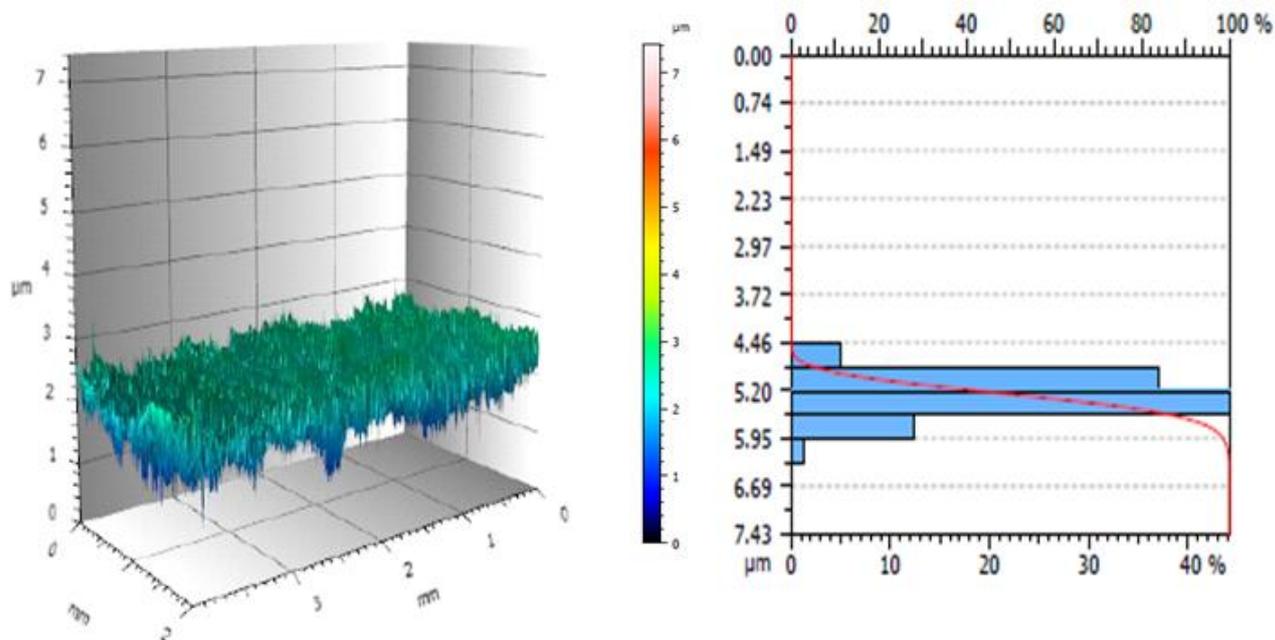
Fonte: próprio autor

**Figura 75 - Topografia da superfície torneada e histograma de distribuição de material utilizando velocidade de corte de 300m/min, ferramenta de corte de cerâmica mista, classe CC6050, à seco**



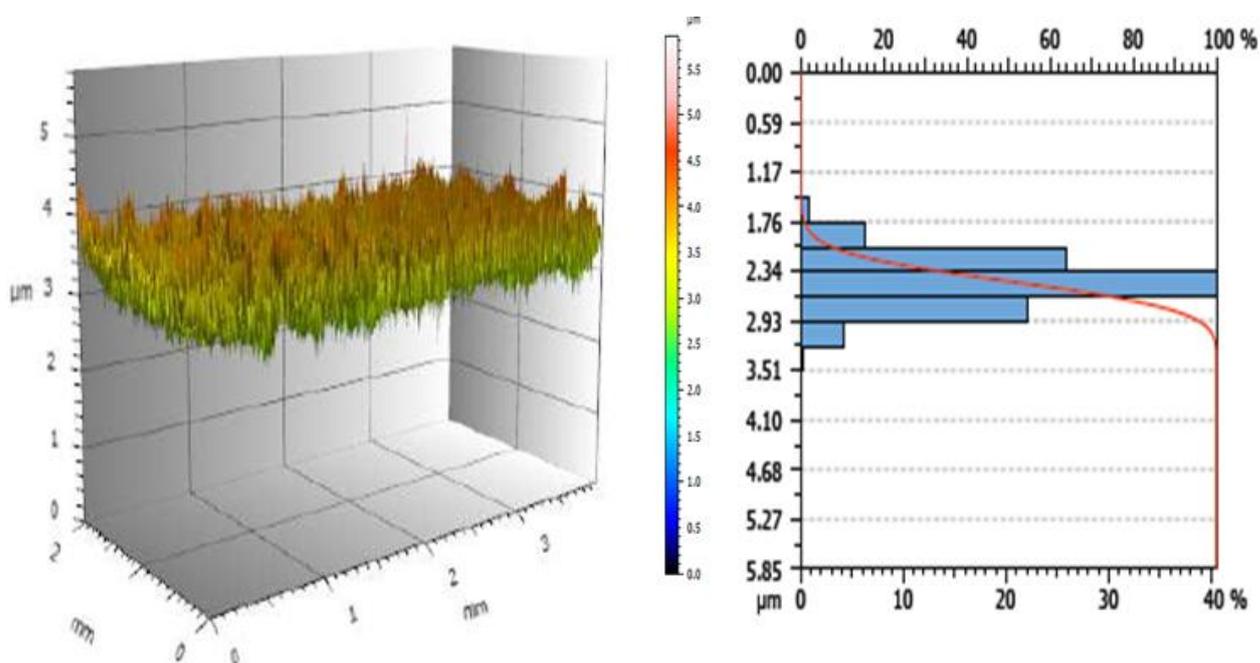
Fonte: próprio autor

**Figura 76- Topografia da superfície torneada e histograma de distribuição de material utilizando velocidade de corte de 300m/min, ferramenta de corte de cerâmica mista, classe CC6050, com lubrificação**



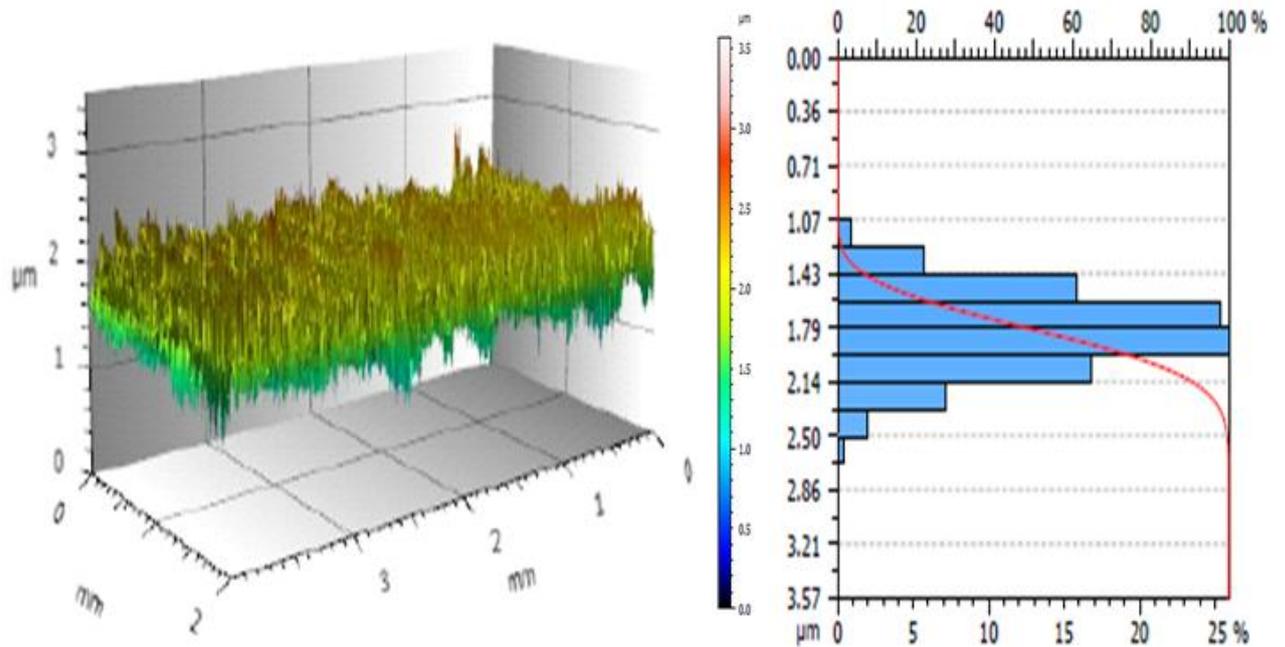
Fonte: próprio autor

**Figura 77 - Topografia da superfície torneada e histograma de distribuição de material utilizando velocidade de corte de 300m/min, ferramenta de corte de PcBN, classe CB7115, à seco**



Fonte: próprio autor

**Figura 78 - Topografia da superfície torneada e histograma de distribuição de material utilizando velocidade de corte de 300m/min, ferramenta de corte de PcBN, classe CB7115, com lubrefrigeração**



Fonte: próprio autor