

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA MICROTOPOGRAFIA DE
SUPERFÍCIES RETIFICADAS COM FERRAMENTAS ESTRUTURADAS**

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

SHERLINE WUNDER

FLORIANÓPOLIS, JULHO DE 2006

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA MICROTOPOGRAFIA DE SUPERFÍCIES
RETIFICADAS COM FERRAMENTAS ESTRUTURADAS

SHERLINE WUNDER

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO
TÍTULO DE
MESTRE EM ENGENHARIA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO
FABRICAÇÃO SENDO APROVADA EM SUA FORMA FINAL.

Prof. Dr.-Ing. Walter Lindolfo Weingaertner
Orientador

Prof., Dr.
Coordenador do Curso

BANCA EXAMINADORA

Prof. Lourival Boehs Dr. Eng.
Presidente

Prof. Rolf Bertrand Schroeter Dr. Eng.

Prof. Dr.-Ing. Joel Martins Crichigno Filho

*Aos meus pais, Euclair e Hugo
Aos meus irmãos, Sheila e Sheilon*

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos ao Prof. Walter Weingaertner, pela orientação neste trabalho, pela amizade e incentivo nos anos de LMP, pela orientação à distância e pelas visitas de acompanhamento durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Konrad Wegener, pela co-orientação e pela disponibilização da estrutura e financiamento para o desenvolvimento deste trabalho no laboratório de Máquinas Ferramentas e Produção – IWF, Zurique, Suíça.

Ao Dr. sc. techn. Friedrich Kuster pelas discussões e incentivo ao longo do trabalho.

Ao mestre e amigo Fábio Wagner Pinto por todos os ensinamentos, discussões, paciência e tentativa de instigar o pensamento crítico e crescimento intelectual no dia-dia do desenvolvimento deste trabalho.

Aos amigos Ângelo, Jonas, Felipe, Guilherme, pelas conversas, apoio e amizade.

Aos amigos e parceiros Benno e Manuel Zigelic, pela cooperação na fabricação das ferramentas usadas neste trabalho, amizade e confiança.

Ao amigo Albert, por todos os ensinamentos e pronta disposição no preparo das peças necessárias ao desenvolvimento deste trabalho e ainda pelas aulas de alemão suíço.

Aos antigos amigos e colegas do LMP e aos novos amigos e colegas do IWF.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, pela oportunidade de realização deste trabalho.

A todos que direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	6
LISTA DE TABELAS.....	12
SIMBOLOGIA.....	12
1 Introdução	16
2 Revisão	21
2.1 Mecanismo de Penetração do Gume e Formação de Cavaco.....	21
2.2 Ferramenta de corte.	22
2.2.1 Materiais abrasivos – tipos de grãos.....	22
2.2.2 Ligantes	27
2.2.3 Ferramentas convencionais.....	29
a) Desgaste e condicionamento.....	30
2.2.4 Ferramentas superabrasivas	32
a) Ferramentas galvânicas.....	33
b) Ferramentas brasadas.....	35
2.2.5 Ferramentas estruturadas.....	36
2.3 Embasamento Cinemático	39
2.4 Geometria da Superfície	42
2.5 Simulação de processos	45
3 Objetivos	49
4 Metodologia e Métodos	52
4.1 Modelagem da ferramenta e processo de corte.....	52
4.1.1 Geometrias e Posicionamento.....	52
4.1.2 Cinemática do processo de retificação	60
4.1.3 Processo de corte	63
4.1.4 Condicionamento da ferramenta.....	64
4.2 Fabricação de ferramentas estruturadas	67
4.2.1 <i>Microdrop</i>	67
4.2.2 Sistema de posicionamento	69
4.2.3 Projeção dos grãos abrasivos na ferramenta	71
4.3 Pré-validação do modelo	72

5	Resultados	76
5.1	Resultados das análises das ferramentas	76
5.1.1	Formas do ABN800	76
5.1.2	Distribuição dos pontos de cola	78
5.1.3	Distribuição dos grãos	78
5.1.4	<i>Clusters</i> e falta de grão abrasivo	82
5.2	Pré-validação do modelo geométrico.	82
5.3	Simulação numérica da retificação com ferramentas estruturadas....	85
5.3.1	Avaliação dos parâmetros de estrutura Δx e Δz	86
5.3.2	Avaliação do desvio da posição do gume.....	88
5.3.3	Avaliação da altura do grão abrasivo em relação à ferramenta ..	89
5.3.4	Avaliação da ausência de grãos abrasivos.....	90
5.3.5	Avaliação da presença de <i>clusters</i>	90
5.3.6	Avaliação da forma dos grãos abrasivos	91
5.3.7	Avaliação do tamanho dos grãos abrasivos	92
5.3.8	Taxa de retificação (Q'_w).....	93
5.3.9	Velocidade corte (v_s).....	95
5.3.10	Penetração de trabalho (a_e).....	96
5.3.11	Diâmetro da peça.....	97
5.3.12	Condicionamento	97
6	Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros	99
6.1	Conclusões	99
6.2	Sugestões para Trabalhos Futuros	101
7	Referências	102
8	Anexo A.....	106

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplos de peça e ferramentas fabricadas com o processo de retificação.....	17
Figura 2 - Dependência entre grandezas de entrada e resultado na retificação [3].....	18
Figura 3 - Influências da variação de parâmetros de entrada sobre as características de processo nos resultados de trabalho [4].....	19
Figura 4 – Representação esquemática do início do corte na retificação [2] .	21
Figura 5 - Dureza Knoop para diferentes materiais de grãos abrasivos [3].....	23
Figura 6 - Aplicação dos grãos abrasivos [5].....	23
Figura 7 – Classificação dos grãos de CBN quanto à forma.....	25
Figura 8 – Tipos de grãos de CBN [28]	26
Figura 9 – Distribuição de energia durante o corte na retificação com grãos convencionais [2]	27
Figura 10 - Representação esquemática do desgaste radial Δr_s e de quina Δr_{sk} [2].....	30
Figura 11 - Seção transversal e vista superficial de um disco galvânico coberto [7]	33
Figura 12 - Ferramenta de diamante galvânica nova (deposição positiva) [4]	34
Figura 13 - Grão de CBN brasado.....	35
Figura 14 - Ferramenta galvânica estruturada [11]	37
Figura 15 - Parametrização da estrutura [10].....	38
Figura 16 - Ferramenta estruturada produzida com o método de Burkhard [7]	39
Figura 17 – Dependência entre a espessura de usinagem e as variáveis de entrada e condições de contato [2]	40
Figura 18 - Parâmetros variáveis de entrada para os principais processos de retificação [2].....	41
Figura 19 – Retificação cilíndrica externa de mergulho [4].....	41
Figura 20 - Desvio médio aritmético da rugosidade [31]	44
Figura 21 – Modelo matemático da cinemática para diferentes técnicas de retificação [25].....	46
Figura 22 – Estrutura do projeto de avaliação de rebolos estruturados	50

Figura 23 – Morfologia dos cristais de CBN [29].	53
Figura 24 – a) Exemplos de grãos de ABN800 B251 b) grãos modelados	54
Figura 25 - Desvio entre o ponto nominal e real do gume de corte [10].	55
Figura 26 – (a) Amostra de pontos de cola e (b) representação e análise do posicionamento dos centros dos pontos de cola em MATLAB	56
Figura 27 – Representação da análise feita no primeiro método.	58
Figura 28 - Representação da análise feita no segundo método	58
Figura 29 - Representação da análise feita no terceiro método	59
Figura 30 - Ferramenta modelada	60
Figura 31 – Representação esquemática do processo de retificação cilíndrica externa	61
Figura 32 – Representação da cinemática do processo.	61
Figura 33 – Representação esquemática da remoção de material no modelo	64
Figura 34 – Representação esquemática da operação de <i>crushieren</i>	65
Figura 35 – Perfil da peça retificada	65
Figura 36 - Apresentação dos resultados de simulação	66
Figura 37 – Impacto a) simulado e b) real de uma gota numa superfície de um líquido	67
Figura 38 – a) Impacto de gotas produzidas pelo <i>microdrop</i> em um líquido e b) Gota de adesivo em contato com uma superfície	68
Figura 39 - Formação e percurso da gota de fluido [35]	68
Figura 40 - Foto do acionamento eletrônico MD-E-201 e desenho esquemático identificando os componentes do aplicador de fluido	69
Figura 41 - Sistema dosador do processo de posicionamento de grãos	70
Figura 42 – Padrão de distribuição livre de grãos sobre o corpo do rebolo	70
Figura 43 – Padrão de distribuição de grãos que obedece a uma função matemática	71
Figura 44 – Protótipo do sistema para fabricação de ferramentas estruturadas montado em um torno universal	71
Figura 45 – Retificadora Studer S-31.	74
Figura 46 – a) Rugosímetro Taylor-Robson Form Talysurf Series 2 PGI e b) Exemplo de perfil medido no microscópio	74

Figura 47 - Resultado da análise de forma de uma amostra de ABN800 B25176	
Figura 48 - Gráfico da distribuição da forma dos grãos de uma amostra de ABN800 B251	77
Figura 49 – Análise do posicionamento dos grãos pelo método 1 (circunferências circunscritas).....	79
Figura 50 - Determinação da distância do centro do ponto de cola ao centro da projeção do centro de geométrico da área superior do grão abrasivo	80
Figura 51 - Determinação da distância entre o centro do ponto de cola e a projeção do gume ativo do grão (maior elevação do grão)	81
Figura 52 – Exemplos dos rebolos usados na pré-validação do modelo	83
Figura 53 – Comparação dos valores de R_a da peça e obtidos na simulação	84
Figura 54 - Comparação dos valores de R_t da peça e obtidos na simulação .	84
Figura 55 – Resultado da simulação de ferramentas variando o parâmetro Δx	87
Figura 56 - Resultado da simulação de ferramentas variando o parâmetro Δz .	87
Figura 57 - Resultado da simulação de ferramentas variando o parâmetro desvio de D_p	88
Figura 58 - Resultado da simulação de ferramentas variando o parâmetro altura do grão em relação ao corpo da ferramenta	89
Figura 59 - Resultado da simulação de ferramentas variando o parâmetro falha de grãos abrasivos	90
Figura 60 - Resultado da simulação de ferramentas variando o parâmetro <i>clusters</i>	91
Figura 61 - Resultado da simulação de ferramentas variando o parâmetro forma dos grãos	92
Figura 62 - Resultado da simulação de ferramentas variando o parâmetro tamanho dos grãos abrasivos.	93
Figura 63 – Influências da variação da taxa de retificação em ferramentas de retificação convencionais [2]	94
Figura 64 - Resultado da simulação de ferramentas variando o parâmetro taxa de retificação	94

Figura 65 - Influências da variação da velocidade de corte em ferramentas de retificação convencionais [2]	95
Figura 66 - Resultado da simulação de ferramentas variando o parâmetro velocidade de corte	96
Figura 67 - Resultado da simulação variando o penetração de trabalho com manutenção da taxa de retificação	96
Figura 68 - Resultado da simulação de ferramentas variando o diâmetro da peça	97
Figura 69 - Resultado da simulação de ferramentas variando o parâmetro de condicionamento da ferramenta.....	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estrutura dos protótipos	72
Tabela 2 – Parâmetros estruturais e de processo dos ensaios de pré-validação	73
Tabela 3 – Relação dos Parâmetros usados na simulação	75
Tabela 4 - Análise de clusters e ausência de grãos abrasivos.....	82
Tabela 5 – Parâmetros de ferramenta adotados nos rebolos.....	83

SIMBOLOGIA

A_g	[mm ²]	Área do retângulo (definição de R_a)
A_{pi}	[mm ²]	Área dos picos
A_{sc}	[mm ²]	Superfície de desgaste total
A_{sk}	[mm ²]	Superfície de desgaste de quina
A_{sr}	[mm ²]	Superfície de desgaste radial
A_{vi}	[mm ²]	Área dos vales
C_{stat}	[mm ³]	Distribuição estática dos gumes
F_n	[N]	Força de Corte Normal
F_t	[N]	Força de Corte Tangencial
F_{nS}	[N]	Força Normal do Gume
F_{tS}	[N]	Força Tangencial do Gume
N_{kin}		Número de gumes cinemáticos
R_a	[μm]	Desvio médio aritmético da rugosidade
R_{max}	[μm]	Profundidade máxima individual de rugosidade
R_z	[μm]	Profundidade média da rugosidade
S_b	[mm]	Largura do rebolo
T_μ	[μm]	Profundidade de início de corte
V_s	[mm ³]	Volume desgastado do rebolo
V_w	[mm ³]	Volume de material removido da peça
V'_w	[mm ³ /mm]	Volume usinado específico
Q_{mon}	[mm ³ /s]	Seções de usinagem
Q_w	[mm ³ /s]	Taxa de retificação
Q'_w	[mm ³ /(mm.s)]	Taxa de retificação específica
a_e	[mm]	Profundidade de corte (no sentido do avanço)
a_p	[mm]	Largura de corte (no sentido do eixo do rebolo)
a_1		Tipo de retificação
a_2		Direção de retificação
d_s	[mm]	Diâmetro do rebolo

d_{se}	[mm]	Diâmetro equivalente do rebolo
d_w	[mm]	Diâmetro da peça
h_{cu}	[mm]	Espessura média do cavaco não-deformado
h_{cuf}	[mm]	Espessura efetiva de usinagem
k	[W/(m.K)]	Condutibilidade térmica
n_w	[s ⁻¹]	Número de rotações da peça
q_d	[-]	Velocidade relativa de dressamento
q	[-]	Relação de velocidades na retificação
v_{fr}	[mm/s]	Velocidade de avanço do rebolo
v_r	[m/s]	Velocidade do rolo dressador
v_s	[m/s]	Velocidade de corte do rebolo
v_{sd}	[m/s]	Velocidade do rebolo
v_w	[m/s]	Velocidade da peça
α	[-]	Constante
β	[-]	Constante
γ	[-]	Constante
Δr_s	[mm ²]	Desgaste radial do rebolo
Δr_{sk}	[mm ²]	Desgaste de quina do rebolo
η	[graus]	Ângulo de ataque
Δx		Afastamento entre grãos na direção x
Δz		Afastamento entre grãos na direção z
Δz_2		Atraso entre grãos
α		Ângulo entre grãos de uma coluna

BN	Nitreto de Boro
CBN	Nitreto de Boro Cúbico
EGT	Engineered Grinding Tools
Ti _{2+x} BN	Nitreto de boro – titânio
LMP	Laboratório de Mecânica de Precisão
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
IWF	Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung

RESUMO

De forma crescente a retificação é aplicada em processos de desbaste. Essa tendência é consequência de muitas vantagens apresentadas pelo processo de retificação, como a redução do tempo de processamento, redução do número de máquinas necessárias no processo. O resultado é o aumento na produtividade. Ferramentas galvânicas fazem parte de uma subdivisão das ferramentas de retificação geralmente aplicadas em operações de alta eficiência. Ligantes galvânicos apresentam boa fixação do grão abrasivo. A ligação mecânica entre grão e corpo da ferramenta possibilita a aplicação de apenas uma camada de grãos. A reduzida protusão de grãos dessas ferramentas, no entanto, diminui o espaço disponível para o fluxo do fluido de corte e cavaco, um efeito negativo. Ferramentas brasadas apresentam uma ligação química entre grãos, ligante e corpo da ferramenta. Essa especial ligação permite alta protusão de grão e aumenta o espaço na área de corte. A maximização desse volume de poros é desejada e pode ser atingida pelas Ferramentas Estruturadas, *Engineered Grinding Tools*, aqui chamadas de EGT. Essa dissertação apresenta um modelo numérico de otimização de EGTs. Modelos numéricos de ferramentas, assim como simulação do processo de retificação, são uma alternativa econômica no desenvolvimento de protótipos e para o dimensionamento de EGTs. Comparado com a distribuição aleatória de grãos em ferramentas convencionais, o posicionamento em estruturas reduz a densidade de grãos na ferramenta e aumenta os resultados de rugosidade em peças. Adicionalmente forma, tamanho de grão, geometria da ferramenta e parâmetros de processo apresentam um sistema complexo de variáveis inter-relacionadas que podem afetar os resultados de retificação. Por isso, atenção especial foi para eles dedicada. Finalmente, ferramentas convencionais se apresentam de forma diferente que as EGTs. Isso exige o desenvolvimento de modelos que melhor representem os efeitos cinemáticos em ferramentas com grãos posicionados. O parâmetro de saída desse modelo numérico é a rugosidade final de peças retificadas. O modelo foi validado com resultados experimentais.

Palavras chave: rebolos estruturados; retificação de desbaste; simulação; rugosidade

ABSTRACT

Grinding is increasingly used on rough processes. This trend is a consequence of the many advantages presented by the grinding processes; such as the reduction of processing time, the cut in the number of machines necessary to processes, etc. As a result productivity increases and the amount of producing assets falls. Electroplated grinding tools are a subset of grinding tools generally applied on highly efficient grinding operations. The electroplated bond presents good fixture of abrasive grits. The mechanical bond between grain and body tool enables the application of a single layer of grains. The grain protrusion on these tools decreases the available space to the flow of cutting fluid and chips what has negative effects. However, brazed bonded tools present chemical unions among grits, bond and tool body material. This special bond allows a higher grain protrusion and increases the grinding gap. The maximization of this space is highly desirable and can be achieved through Engineered Grinding Tools, hereafter referred as EGT. This thesis presents a numerical model to the optimization of EGTs. Numeric modeling of tools, as well as simulation of grinding processes is a cost effective alternative to the development of prototypes and to the dimensioning of EGTs. Compared to random patterns in conventional tools, engineered grain patterns decrease the overall grain density of tools and increase the resulting roughness of worked pieces. Additionally, shape, grain size, tool geometry and process parameters represent a complex balance of interrelated variables and may affect grinding results. Therefore, special attention was paid to them. Finally, conventional tools have a different kinematics model from EGTs. This required the development of new models that could better represent kinematics effects of tools with specific grain patterns. The output of this numeric model is the expected final roughness of worked-pieces. This model was validated through intensive experimental results.

Key-words: engineered grinding tools, rough grinding, simulation, roughness

CAPÍTULO 1

Introdução

Segundo a norma DIN 8588 [1], os processos de retificação, brunimento, lapidação, tamboreamento e jateamento são reunidos em um só grupo. Nestes processos, a remoção de material é procedida por grãos disformes de geometria não-definida de materiais duros postos em interferência com o material da peça.

Os processos de usinagem com ferramenta de geometria não-definida eram processos apenas finais de fabricação, onde alta qualidade das superfícies e exatidão de forma era objetivada. Hoje a retificação de alta potência e alta velocidade passa também a executar operações de desbaste da peça. Como exemplo, pode-se citar a usinagem de rasgos estreitos e profundos em materiais endurecidos, onde a retificação é mais eficiente que a usinagem com ferramentas de geometria definida [2].

O processo de retificação com ferramenta rotacional é definido pela norma DIN 8589-11 [1] como sendo um processo de fabricação onde a ferramenta é constituída por muitos gumes de geometria não-definida ligados entre si por meio de um ligante. O grão pode ser natural ou sintético. A interferência do gume da ferramenta com a peça resulta no corte de material. A velocidade de ação na retificação é alta, estando situada entre 20 e 300 m/s em aplicações industriais.

A retificação é o processo de usinagem com ferramenta de geometria não-definida mais empregado na indústria. A retificação é caracterizada pela remoção do material da peça através da ação conjunta de grãos abrasivos ativos de geometria não-definida [3]. Como exemplos de aplicações da retificação na indústria, podem-se citar as operações de acabamento de virabrequins, de comandos de válvula, de pistões de bicos injetores, ferramentas de corte, entre outros (Figura 1).



Figura 1 – Exemplos de peça e ferramentas fabricadas com o processo de retificação

Mesmo se tratando de um processo há muito tempo conhecido, retificação é ainda considerado um processo complexo em função da variedade de fatores que influenciam simultaneamente os resultados de trabalho. Os fatores que se destacam são:

- Parâmetros de corte: taxa de retificação, velocidade de corte, avanço, rotação da peça, profundidade de corte, comprimento de corte;
- Ferramenta: diâmetro, material abrasivo, tamanho do grão abrasivo, densidade de grãos, ligante, condicionamento;
- Peça: forma, material, usinabilidade;
- Máquina-ferramenta: potência, rigidez, capacidade;
- Periféricos:
 - Fluido de corte: tipo, concentração, conservação, pressão de aplicação, posicionamento das tubeiras;
 - Filtros;
 - Ambiente.

O resultado de trabalho (exatidão de forma, rugosidade e camada termicamente afetada) apresenta alterações como consequência da interação das grandezas de sistema (máquina-ferramenta, ferramenta, peça, ferramenta de dressamento e fluido de corte) e das grandezas variáveis de entrada (velocidade de avanço, velocidade de corte, velocidade da peça, características

do rebolo, condições de dressamento, características do fluido de corte, condições de alimentação do fluido de corte) [3], como mostra a Figura 2.

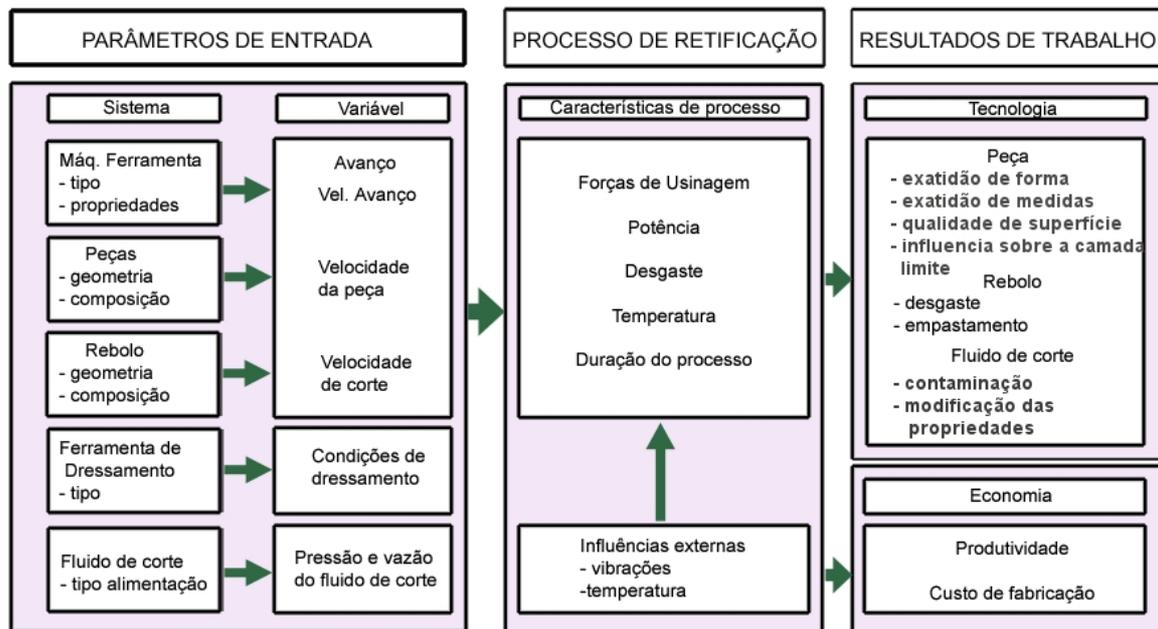


Figura 2 - Dependência entre grandezas de entrada e resultado na retificação [3]

A obtenção de uma da superfície com características dentro de tolerâncias bastante estreitas é um dos principais objetivos a serem alcançados na retificação. A rugosidade dos materiais é quantificada de várias maneiras. O parâmetro vertical da rugosidade R_a , desvio médio aritmético da rugosidade, é um parâmetro bastante utilizado na indústria para comparação de superfícies na fabricação de componentes.

Analisando o resultado de trabalho com relação a fatores relacionados à máquina-ferramenta e parâmetros de processo (Figura 3), o valor de R_a tem uma tendência decrescente quando valores de velocidade de corte, quantidade de óleo lubrificante e comprimento de contato são aumentados e uma tendência crescente quando a taxa de remoção de material é aumentada. Quando relacionado com parâmetros da ferramenta, o comportamento da rugosidade acompanha o aumento do tamanho do grão e grau de afiação e tende a cair com o aumento da dureza do ligante e da concentração de grãos

na ferramenta. Uma vez que um parâmetro é alterado, influências em outras características do processo e do resultado de trabalho são identificadas.

Critérios de Análise		Exatidão de dimensões e Forma		Superfície	Interface
		Forças de Corte $F = f(\dots)$	Relação G $G = f(\dots)$	Rugosidade $R_a = f(\dots)$	Temperatura $\vartheta = f(\dots)$
Peça	Usinabilidade do material da peça (dureza, forma do cavaco)				
		Usinabilidade	Usinabilidade	Usinabilidade	Usinabilidade
Parâmetros de Processo e Periféricos	Velocidade de corte v_c (m/s)				
	Taxa de Retificação ($\text{mm}^3/(\text{mm}\cdot\text{s})$)				
	Fluido de corte (concentração)				
	Área de contato (mm^2)				
Rebolo	Tamanho do grão				
	Dureza do ligante				
	Concentração do ligante (Karat/ cm^3)				
	Afição (topografia do rebolo)				

Figura 3 - Influências da variação de parâmetros de entrada sobre as características de processo nos resultados de trabalho [4]

As características da ferramenta são responsáveis por grande parte dos resultados obtidos na retificação. A pesquisa de novas ferramentas de

retificação visa o melhor entendimento do processo. Ferramentas de retificação com grãos posicionados (ferramentas estruturadas) possibilitam um melhor fluxo de fluido de corte e remoção de cavacos da área de corte durante o processo. As forças de corte e tangencial são reduzidas.

A produção de ferramentas estruturadas ainda não é comercialmente empregada e as mesmas ainda estão em fase de testes para identificação de sua capacidade e potencial de aplicação. Elementos como estrutura da ferramenta, tamanho de grão, geometria da ferramenta, parâmetros de processo – taxa de remoção de material, velocidade de corte, profundidade de corte - e características do material da peça são exemplos que evidenciam a quantidade de parâmetros que podem ser variados em busca de uma ferramenta otimizada para um processo específico, e que torna esse processo experimental muito caro.

Uma alternativa para viabilizar a identificação da estrutura otimizada é o desenvolvimento de uma ferramenta computacional. Um software que identifique a qualidade da superfície usinada, a capacidade e a durabilidade da ferramenta segundo as características particulares de construção do rebolo. Essa dissertação de mestrado tem como alvo a avaliação da rugosidade de peças retificadas com ferramentas estruturadas bem como a modelagem e a identificação das influências de diferentes estruturas na qualidade da superfície.

No capítulo seguinte é apresentada uma revisão bibliográfica dos principais assuntos relacionados a este trabalho de mestrado, após o qual serão expostos, respectivamente, os materiais e métodos empregados para a realização dos ensaios, o planejamento e execução experimental, e, por fim, na análise dos resultados poderão ser observadas as tendências das principais características da ferramenta e do processo na qualidade da superfície retificada com ferramentas estruturadas.

CAPÍTULO 2

Revisão

2.1 Mecanismo de Penetração do Gume e Formação de Cavaco

Durante o processo de retificação, os gumes penetram na superfície da peça em uma trajetória quase plana. A Figura 4 ilustra esquematicamente os mecanismos de penetração do gume no material e a formação de cavaco. O grão penetra no material com velocidade v_s e com ângulo de ataque η , sob a ação das forças tangenciais F_{tS} e normais F_{nS} . Distinguem-se as três regiões: região de deformação elástica pura (I); seguida de deformação elástica e plástica com escoamento de material para as laterais e por baixo do grão abrasivo, sem formação de cavaco efetiva (II); e finalmente a região de deformação elástica e plástica com formação de cavaco, que inicia quando a espessura de usinagem, h_{cu} , atinge a profundidade de início de corte T_μ (III). A espessura efetiva de usinagem h_{cuf} é ligeiramente inferior à espessura de usinagem h_{cu} , devido às deformações elásticas [2].

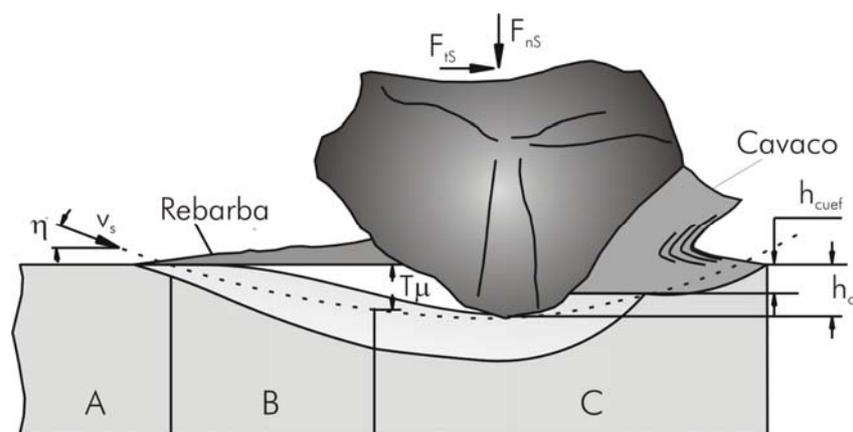


Figura 4 – Representação esquemática do início do corte na retificação [2]

Tal mecanismo de deformação vem sendo bastante pesquisado. No entanto, em virtude da complexidade desse processo de formação de cavacos

e da dificuldade da identificação dessas fases, a divisão entre estas etapas não são exatamente conhecidas.

2.2 Ferramenta de corte

A ferramenta de corte utilizada na retificação é chamada de rebolo e esta, junto com máquina e parâmetros de corte utilizados, classifica o processo de retificação. As ferramentas por si só são caracterizadas segundo o par material abrasivo-ligante que as constituem. A capacidade de remoção durante o processo ou a qualidade da superfície retificada são alguns dos objetivos a serem alcançados com essa combinação.

2.2.1 Materiais abrasivos – tipos de grãos

Para uma eficiente retificação, o material abrasivo deve ter como características básicas: extrema dureza; estabilidade térmica; estabilidade química; tenacidade elevada. Há materiais abrasivos naturais e sintéticos. Exemplos destes são quartzo, granada, esmeril, coríndon, carboneto de silício, carboneto de boro, diamante e CBN (nitreto de boro cúbico cristalino). É importante destacar que devido às exigências divergentes que se faz, não existe, até o momento, um material abrasivo que atenda a todas essas exigências. Deve-se fazer a sua escolha em função da sua aplicação [3].

Com exceção do diamante, os materiais abrasivos naturais não dispõem de resistência mecânica suficiente. Além disso, nesses materiais a qualidade não pode ser controlada de uma forma tão eficiente e reproduzível como nos produtos sintéticos. Em virtude disto, esses materiais abrasivos, com exceção do diamante, têm atualmente uma importância apenas secundária [2].

Os materiais abrasivos sintéticos atualmente utilizados na fabricação de rebolos, são divididos em abrasivos convencionais (Óxido de Alumínio e Carboneto de Silício) e superabrasivos (Nitreto de Boro Cúbico e Diamante) [3]. Tal classificação leva em conta a dureza do material, assim como mostrado na Figura 5.

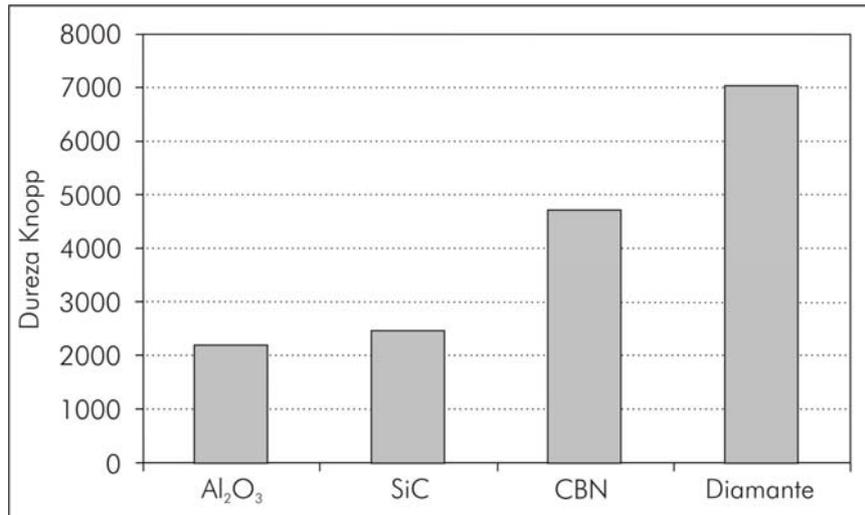


Figura 5 - Dureza Knoop para diferentes materiais de grãos abrasivos [3]

Além da escolha do grão abrasivo em função de sua dureza e, por conseqüência, aplicação, a escolha do tamanho do grão abrasivo é também uma importante decisão que deve ser tomada na fabricação de um rebolo. O tamanho do grão tem influência direta na qualidade da superfície da peça e na escolha do processo de retificação. Para uma superfície com pequena rugosidade, preferencialmente grãos pequenos são empregados. Já para retificação de desbaste, ferramentas com grãos grandes são utilizadas [5]. A Figura 6 indica, de acordo com o material e o processo de usinagem, as faixas de tamanhos de grãos recomendadas.

Aço ferramenta endurecido				
Soldas, Bronze, Latão				
Aço ferramenta				
GS, GTW, GTS, GG				
Aço				
Granulometria	8...36	46...80	90...180	220...120
Tamanho de grão (mm)	2,83...0,42	0,3...0,15	0,18...0,05	0,075...0,003
Classificação	grande	médio	fino	muito fino

Figura 6 - Aplicação dos grãos abrasivos [5]

O superabrasivo CBN se destaca no grupo de abrasivos sintéticos em função de suas propriedades físicas, geométricas e aplicações. Apresenta uma dureza Knoop de cerca de $K_{100} = 4700$, inferior apenas à do diamante. Igualmente ao diamante, ele apresenta uma elevada condutividade térmica. Vantajosa é sua resistência à temperatura. A síntese do CBN possibilitou a retificação de aços endurecidos com grãos superabrasivos. Isto porque o emprego do diamante na retificação de ferrosos, especialmente aços hipoeutéticos, não saturados de carbono, não é viável, já que sob temperaturas e pressões de contato típicas do processo de retificação o diamante perde a estabilidade e por difusão, perde carbono para o ferro. A retificação com CBN é usada hoje principalmente para a usinagem de aço-ferramenta e aplicada mais extensivamente a outros materiais ferrosos e ligas aeronáuticas [3].

O nitreto de boro cúbico é sintetizado a partir do nitreto de boro hexagonal, um pó com propriedades semelhantes às da grafite (lubrificante sólido), mediante aplicação de elevadas pressões e temperaturas na presença de um catalisador [2]. O processo de síntese do grão resulta em diferentes classes de resistência cristalina, grau de estabilidade térmica, morfologia dos cristais e formas particulares [29].

Comparado ao diamante, o CBN apresenta uma resistência elevada à temperatura. Enquanto que em diamantes a partir de 700°C inicia a grafitização, o nitreto de boro cúbico à pressão atmosférica apresenta estabilidade até 1900°C [8]. Além disso, a queda da dureza do diamante com a temperatura é tão brusca a partir de 500°C que em 800°C ela é inferior à do CBN à mesma temperatura [2].

No que se refere à forma, os grãos de CBN, como mostrado na Figura 7, tem a característica de se apresentarem bem definidos. Esses grãos são comercialmente divididos em classes como, por exemplo, ABN800, ABN200, ABN300. A classe ABN800 se destaca pela alta estabilidade térmica e insignificante redução da resistência ao impacto, mesmo quando aquecido a uma temperatura de 1100°C [29].

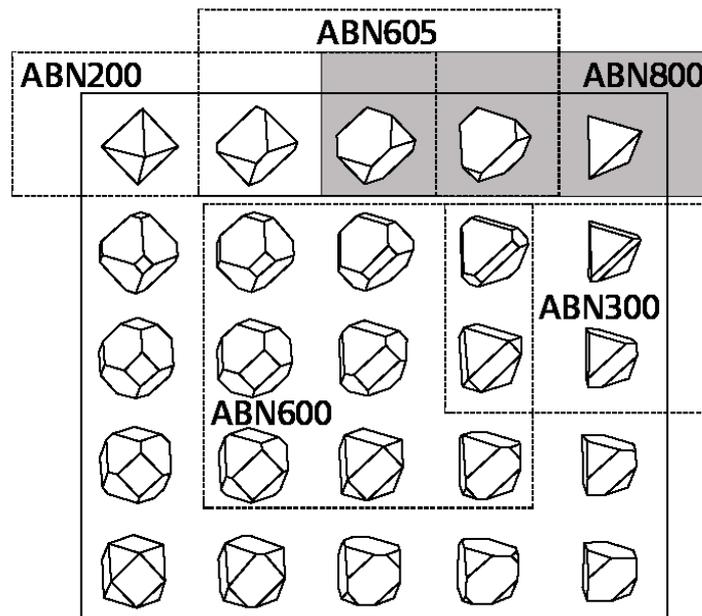


Figura 7 – Classificação dos grãos de CBN quanto à forma

Outra característica dos grãos de CBN é o pequeno desgaste durante o trabalho, o que garante a manutenção da exatidão de forma e dimensão em peças usinadas com essas ferramentas [4]. O desgaste do grão é ocasionado por diversos fatores e é representado pelo micro desgaste e pelo macro desgaste. Micro desgaste é efeito da estrutura do grão e também é ocasionado pela abrasão e por solicitações térmicas e químicas. E o macro desgaste é diretamente relacionado com as forças envolvidas no processo de corte e se caracteriza por micro e macro lascamentos, bem como pela perda de grãos inteiros da estrutura do rebolo.

São três os tipos básicos de grãos de CBN hoje comercializados (Figura 8). Eles podem ser classificados pelas suas diferentes estruturas cristalinas: poli-cristalino (*several inter-grown crystals per grain*), micro cristalino (*thousand of fine crystals per grain*) e cristal único (*one crystal per grain*). Em função de suas diferentes estruturas, eles possuem diferentes propriedades e resultam em uma significativa diferença no seu comportamento durante a retificação quando relacionado com forças e desgaste, mas pouca influência quanto à qualidade da superfície retificada resultante [8].

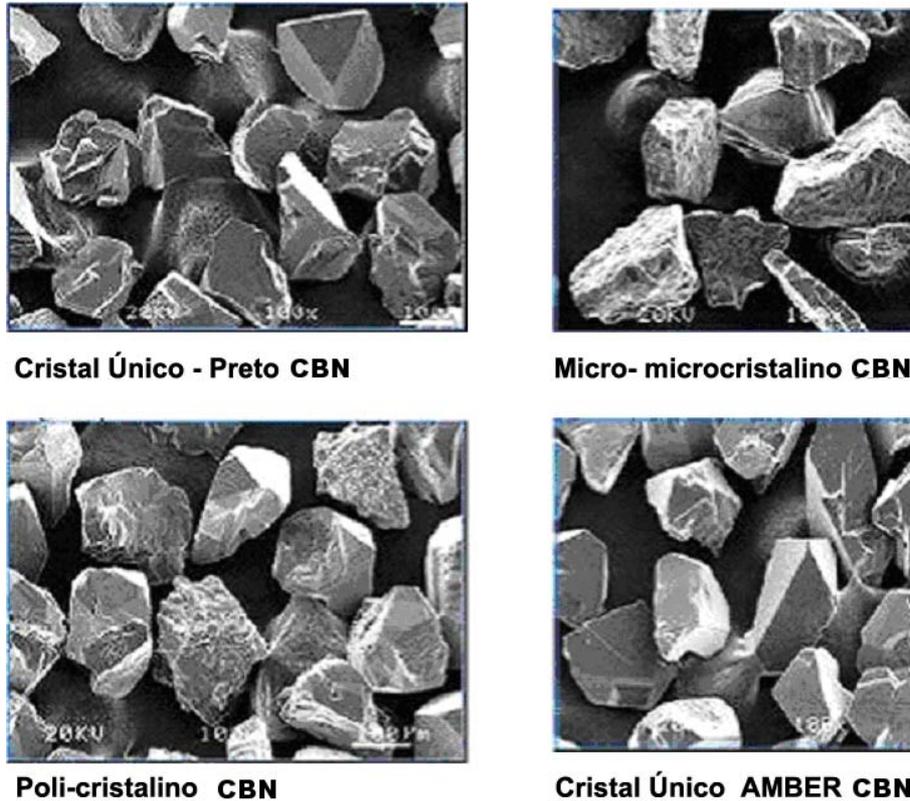


Figura 8 – Tipos de grãos de CBN [28]

Os grãos podem ainda ser revestidos. Os revestimentos empregados podem ser metálicos ou cerâmicos. O tipo de revestimento está ligado com a função desejada. Os revestimentos podem, dentre outros, aumentar a adesão entre ligante e grão e facilitar ou bloquear a remoção de calor.

A maior parte da energia na retificação é transformada em calor e, devido às elevadas velocidades de corte, verificam-se elevadas temperaturas. Na retificação com rebolos convencionais de óxido de alumínio (Al_2O_3), cerca de 60-75% do total da energia gerada no processo é transferida para a peça como calor na região de corte. Já na retificação com CBN, somente cerca de 20% do total da energia gerada é transferida como calor para a peça [19], [20], [21]. Isto ocorre devido à diferença entre a condutibilidade térmica do óxido de alumínio ($k_{\text{Al}_2\text{O}_3}=36 \text{ W/m.K}$) e do CBN ($k_{\text{CBN}}=1300 \text{ W/m.K}$). A elevada condutibilidade térmica do CBN tem como vantagem a transferência de uma parte significativa do calor para o abrasivo. Uma quantidade de calor proporcionalmente menor é transferida à peça [22]. Como ilustrado na Figura 9

para a retificação com grão convencional, o trabalho de retificação é transformado em calor em decorrência do atrito no flanco dos gumes, da deformação plástica na superfície da peça, da formação do cavaco propriamente dita e do atrito do ligante sobre a superfície da peça e transmitido predominantemente para a peça [2].

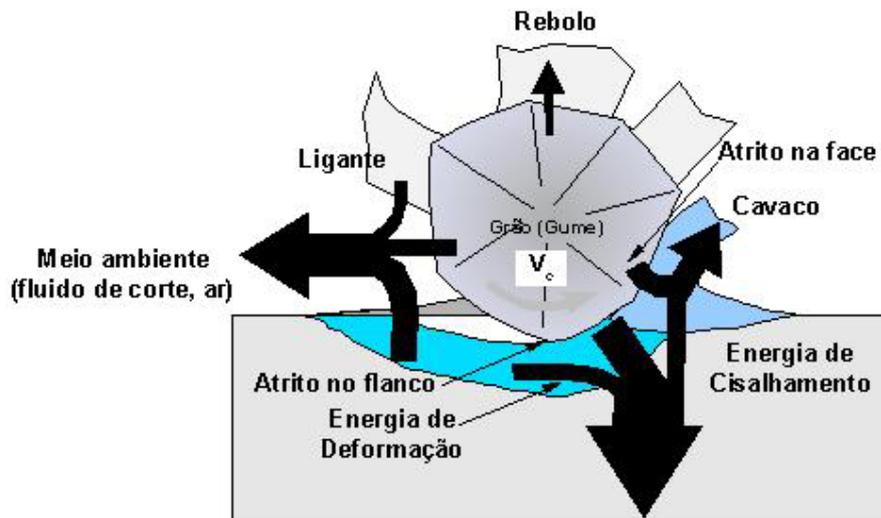


Figura 9 – Distribuição de energia durante o corte na retificação com grãos convencionais [2]

2.2.2 Ligantes

Os grãos abrasivos são unidos pelo ligante que confere resistência estrutural ao rebolo. O ligante deve ser suficientemente forte para resistir às forças de retificação, temperaturas e força centrífuga, como também possuir boa resistência química. Por outro lado o ligante deve permitir o descarte dos grãos quando estes não desempenham mais a função de remoção do material [3].

Os ligantes resinóides ocupam o segundo lugar de fabricação de rebolos, só perdendo para ligas vitrificadas. Este tipo de ligante pode resistir às cargas de choque, mas é mais suscetível a ataque químico [2].

Os ligantes metálicos se distinguem em ligantes obtidos por sinterização de pós metálicos nobres, como de bronze ou de metal-duro, ou em ligantes

galvânicos que fixam uma camada de grãos sobre um substrato metálico. Estes tipos de ligantes são amplamente utilizados nos rebolos superabrasivos [2].

Mais da metade de todos os rebolos fabricados usa ligantes vitro-cerâmicos. Esses ligantes são misturas de materiais como caulim, argilas brancas e vermelhas, quartzo em pó, feldspato e fundentes. Os fundentes contém silicatos de boro e monóxido de magnésio, com o objetivo de abaixar a temperatura de queima dos rebolos, poupando tempo e combustível no aquecimento dos fornos de sinterização [3].

Como principais características, os ligantes vitro-cerâmicos apresentam: agressividade da ferramenta em função da estrutura porosa, elevado módulo de elasticidade, fragilidade e suscetibilidade a impactos, resistência a temperatura, e resistência química a óleo, água, fluido de corte e ácidos [3].

Os ligantes resinóides proporcionam rebolos elásticos que inicialmente foram desenvolvidos para rebolos de diamante, já que esse abrasivo não resiste às altas temperaturas necessárias à sinterização de rebolos cerâmicos. Hoje em dia são largamente usados também como ligantes de rebolos de CBN e também de abrasivos convencionais [3].

Os ligantes resinóides são orgânicos, fabricados por pressão a quente com temperaturas relativamente baixas e apresentam características não agressivas de corte, baixa resistência a temperatura e conformidade estrutural. Os ligantes leves não são necessariamente prensados, mas apenas misturados na forma líquida com abrasivo e levado a cura. Concepções sobre classe e estrutura são muito diferentes dos ligantes vitrificados. Ligantes resinóides são divididos em três classes segundo a sua resistência à temperatura. Esses são: plásticos, resinas fenólicas e resinas poliamídicas [8].

Os ligantes metálicos são divididos entre sinterizados, galvânicos e brasados.

Os ligantes metálicos são empregados em ferramentas com revestimentos multicamadas e monocamada de abrasivo. Os ligantes sinterizado e sinterizado infiltrado são largamente empregados na fabricação de ferramentas para a indústria de pedras e corte de azulejos.

Em ferramentas com ligante galvânico, uma camada de níquel é depositada por galvanização. O nível de cobertura do grão é controlado para que o grão se apresente em torno de 50% exposto [8]. O processo de galvanização ocorre à baixa temperatura (abaixo de 100°C), onde o grão abrasivo é fixo apenas mecanicamente. Por conseqüência, a protusão do grão não pode ser superior a 50% do tamanho do grão abrasivo.

Um processo alternativo é ligar o grão abrasivo quimicamente através da brasagem usando temperaturas de até 900°C. O método de brasagem permite uma protusão de grão superior ao processo de galvanização, o que proporciona maior espaço para cavacos e também reduz as forças de corte. No entanto, as elevadas temperaturas do processo de brasagem podem afetar o material do abrasivo e distorcer o corpo da ferramenta. Tais ferramentas permitem alta taxa de remoção de material em operações de desbaste e encontram sua aplicação na retificação de componentes reforçados com fibra de vidro, discos de freio e coletores de exaustão de motores veiculares ou aplicações onde as exigências da qualidade da superfície não são muito elevadas [8].

2.2.3 Ferramentas convencionais

A denominação 'material abrasivo ligado' faz referência à constituição do corpo do rebolo convencional, que é totalmente construído a partir do material abrasivo misturado a uma matriz cerâmica ou resinóide, adicionada ao material de enchimento. Estes rebolos podem ser compactados conforme o material de sua matriz, passando em seguida por estágios intermediários de queima (cerâmica), polimerização (resinas) ou compactação a quente (resina compacta) e de usinagem final, para a garantia de forma e medida. Rebolos de granulometria muito fina podem ser obtidos pela técnica de colagem de barbotina ou terracota (abrasivo e ligante são misturados com água e fundidos em forma de gesso). São ferramentas frágeis e de estrutura porosa, o que impõe o seu uso segundo limites de velocidade especificados pelo fabricante [2].

A estrutura de rebolos convencionais é representada pela composição volumétrica em termos do percentual de grãos, ligante e poros, e de sua distribuição. Dureza, agressividade, elasticidade são alguns dos parâmetros que são influenciados pelo arranjo das variáveis.

a) Desgaste e condicionamento

À medida que uma ferramenta convencional é utilizada, ocorre o desgaste dos grãos e do ligante. Dependendo das condições de trabalho e do material abrasivo, o desgaste do grão abrasivo leva a um arredondamento do gume (micro efeito de desgaste dominante) ou em função de microlascamentos, levar a uma afiação contínua do grão (macro efeito de desgaste dominante).

Juntamente com o desgaste do grão abrasivo ocorre o desgaste do ligante. O arredondamento dos gumes provoca o aumento da força de retificação e a sobrecarga do ligante. Devido a essa sobrecarga, o grão é mais facilmente arrancado da estrutura. O desgaste pode ser ainda causado por ataque químico ou térmico [2].

A soma dos desgastes verificados nos grãos e no ligante resulta no desgaste do rebolo e este se apresenta como desgaste radial - Δr_s e desgaste de quina - Δr_{sk} , como mostrado na Figura 10.

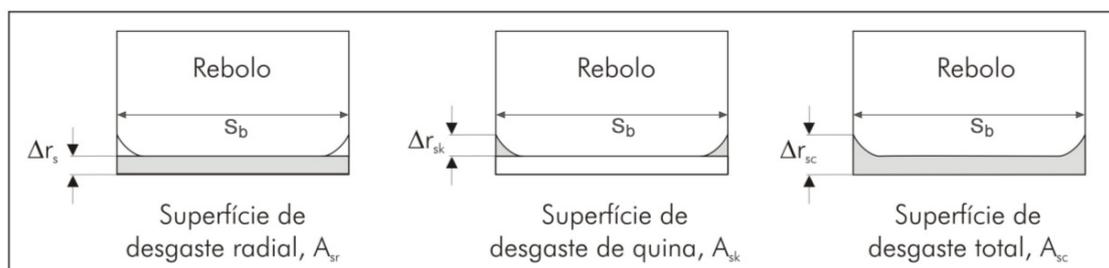


Figura 10 - Representação esquemática do desgaste radial Δr_s e de quina Δr_{sk}

[2]

A operação de condicionamento objetiva gerar ou recuperar a macro geometria (perfil) e a micro geometria (gume e espaços para cavaco e fluido de corte) da ferramenta. O condicionamento engloba as ações de perfilamento e afiação. Por perfilamento se entende o processo resgate da forma original do rebolo ou desejada. Essa etapa se dá com a remoção do material abrasivo desgastado até que toda a superfície do rebolo que está acima do nível da superfície atingida pelo desgaste de quina seja removida. A manutenção da macro geometria garante a forma geométrica e as dimensões da peça.

Para rebolos convencionais, a afiação ocorre simultaneamente ao perfilamento e então o processo é denominado de dressamento. Mediante a afiação, elimina-se o ligante dentre os grãos, numa determinada quantidade, para se ter o espaçamento necessário para o fluxo de cavacos, e também, permitir o fluido atingir à zona de corte. Os métodos mais utilizados para a afiação de rebolos de CBN ou diamante, são: afiação por jato de abrasivos, afiação com rolo de aço e fluxo de abrasivos (fluido, mais abrasivos), afiação com blocos de Al_2O_3 , e afiação com rebolos de carboneto de silício “SiC” ou óxido de alumínio (Al_2O_3).

Para o dressamento de rebolos são empregadas ferramentas de alta dureza que de variadas especificações de tamanho ou forma de grão. Basicamente, as ferramentas de dressamento são classificadas em ferramentas de grão único e ferramentas de múltiplos grãos. Essas ferramentas podem ser estáticas ou dotadas de movimento [2].

As ferramentas estáticas não se movimentam na direção da velocidade tangencial do rebolo durante a afiação. Elas se apresentam como ferramentas de grão único ou múltiplos grãos. Ferramentas de grão único são as mais conhecidas em aplicações onde exatidão de forma é exigida tais como retificação plana, cilíndrica, *centerless* e interna. É importante observar que estes dressadores de ponta simples de diamante, quando usadas em rebolos muito duros, largos, de grande diâmetro, podem ficar com áreas achatadas, as quais cegam o rebolo nas operações subseqüentes de dressagem. Nas ferramentas de múltiplos grãos estáticos, estão os prismas de abrasivos (Al_2O_3 ou SiC) ligados, sendo utilizados para remover a carga de rebolos

diamantados, para rebolos de afiação de ferramentas e para quebrar cantos em rebolos utilizados em retificas sem centros (*centerless*) [39].

Ferramentas rotativas são aplicadas quando forma e precisão dimensional com estreitas tolerâncias são exigidas. Nessas ferramentas, deve-se levar em consideração a velocidade relativa (q_d) entre a velocidade do rolo dressador (v_r) e a velocidade do rebolo (v_{sd}). Valores convencionais para a velocidade relativa se encontram na faixa de 0,8. Quando a velocidade relativa atinge o valor igual a 1, o processo é chamado de *crushieren*. O rolo dressador exerce grande pressão sobre o rebolo e acarreta na quebra dos grãos abrasivos mais protusos. O processo visa estabelecer uma condição homogênea de altura dos grãos para que os mesmos não sejam sobrecarregados durante a usinagem e venham a falhar [2].

O dressamento é realizado sempre que o rebolo perde a sua capacidade de gerar peças dentro dos padrões de qualidade para os quais se aplica. Com este procedimento fica disponível uma camada de grãos novos, recupera-se a porosidade e produzem-se também gumes novos através da fratura dos grãos abrasivos [2]. Em média, apenas 10% do volume ativo da ferramenta convencional é usado em operações de retificação e 90% é removida do rebolo por operações de dressamento [8].

Em ferramentas convencionais, os grãos abrasivos apresentam, depois do processo de condicionamento, apenas 20 a 30% de seu diâmetro acima do nível do ligante o qual é utilizado para remover material [4].

2.2.4 Ferramentas superabrasivas

O custo dos superabrasivos é muito maior que o dos abrasivos convencionais. Em decorrência, surge à necessidade da otimização das ferramentas de retificação. Os rebolos superabrasivos são caracterizados por um corpo de ferramenta sobre o qual é aplicado o conjunto ligante-grão. As ferramentas com superabrasivos empregam tanto ligantes resinóides, vitrificados, como também metálicos. Nestes a espessura de material abrasivo sobre o substrato pode atingir até 10 mm, representando várias camadas de

grãos abrasivos. O interesse maior neste trabalho se concentra nos revestimentos superabrasivos de apenas uma camada de grãos que podem se apresentar com ligante galvânico e com ligante brasado.

a) Ferramentas galvânicas

Com dimensões inferiores a 1 mm até com mais de 1000 mm, as ferramentas galvânicas de CBN (

Figura 11) representam o maior segmento de rebolos com uma única camada de abrasivos. Distingue-se a deposição galvânica positiva e deposição galvânica negativa. As aplicações de ferramentas galvânicas positivas encontram-se em campos variados, como na odontologia e especialmente em aplicações automotivas e aeronáuticas onde altas velocidades de retificação são exigidas [6]. Ferramentas obtidas na técnica de deposição galvânica negativa são aplicadas predominantemente na fabricação de dressadores rotativos de elevada exatidão geométrica.

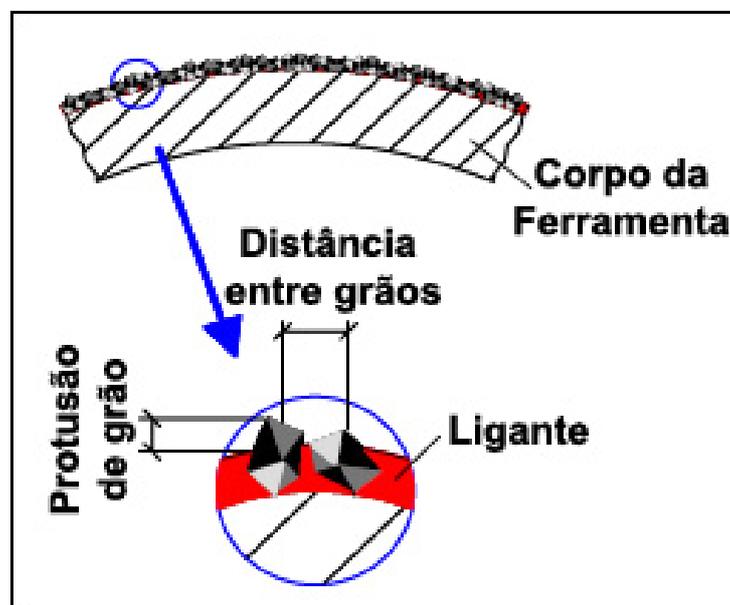


Figura 11 - Seção transversal e vista superficial de um disco galvânico coberto

A ligação do grão abrasivo em ferramentas galvânicas positivas se dá mecanicamente e apresenta uma protusão de grão em torno de 30 a 50% da dimensão média do grão [4]. Esta protusão de grão, comparada com a protusão em rebolos convencionais, possibilita um aumento no volume de poros para o cavaco removido durante o processo de corte, aumentando a eficiência da ferramenta. No entanto, sendo a distribuição vertical dos grãos não homogênea, parte dos grãos não é suficientemente coberta ou então apresenta uma protusão de grão inferior à protusão necessária para o grão iniciar o corte durante a retificação, característica negativa em se tratando de ferramentas com grãos superabrasivos de custo elevado.

Em ferramentas galvânicas positivas, obtidas pelas técnicas convencionais, os grãos abrasivos se distribuem aleatoriamente sobre a parte ativa da ferramenta. Não se tem nenhum controle do posicionamento dos grãos, o que leva a uma grande dispersão da protusão dos gumes sobre o ligante (Figura 12). A ferramenta é agressiva, principalmente no início de sua utilização. A agressividade é reduzida com o desgaste dos grãos mais protusos. O *crushieren* nestas ferramentas só é efetuado quando as estreitas tolerâncias geométricas do componente retificado exigirem tal operação [4].

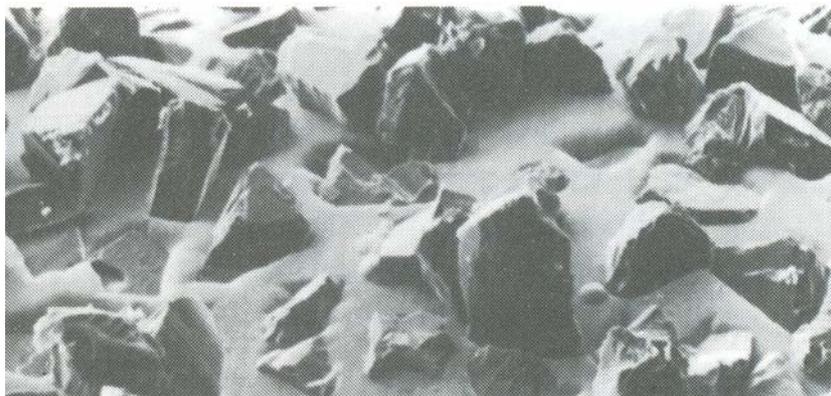


Figura 12 - Ferramenta de diamante galvânica nova (deposição positiva) [4]

b) Ferramentas brasadas

O diamante, o CBN, assim como outros materiais não-metálicos e cerâmicos não são susceptíveis a brasagem. As ligas de brasagem convencionais não apresentam afinidade com estes materiais e em decorrência não se verifica nenhuma ligação química entre grão e ligante. A adição de metais como titânio, zircônio, nióbio ou tântalo à liga de brasagem, torna possível a união química entre materiais dos grãos abrasivos e a liga de brasagem através de um carboneto ou nitreto que se forma na interface [7].

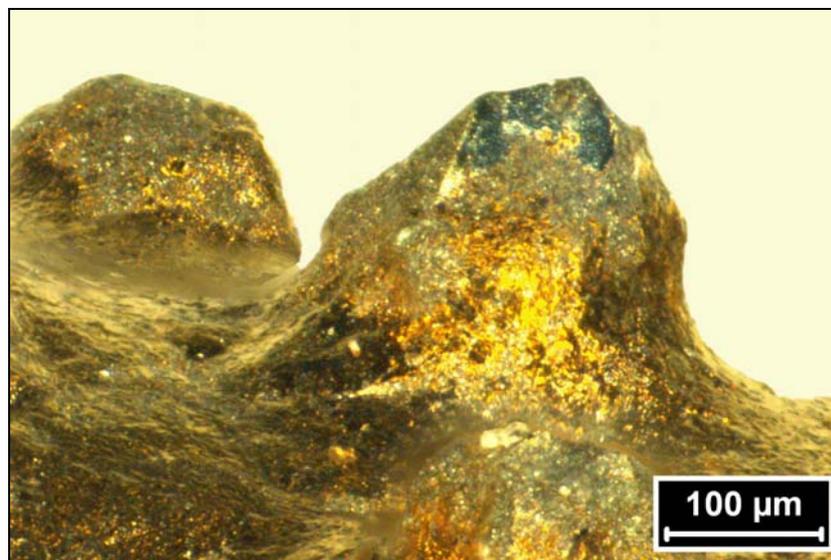


Figura 13 - Grão de CBN brasado

Para a fixação do CBN é aplicado o material de brasagem adicionado da liga cobre-titânio ou níquel-titânio. A ligação com grão de CBN (Figura 13) acontece com a reação do titânio com o nitreto de boro formando elemento de ligação titânio-boro-nitreto $Ti_{2+x}BN$ [27]. O elemento de ligação pode ser empregado em forma de pó (partículas menores que $45 \mu m$) ou folha. Em pó é misturado em ambiente de vácuo com o metal base utilizado na brasagem. Para o processo com folha, o material base é aplicado após a cobertura da ferramenta com uma folha do elemento de ligação. Os grãos abrasivos podem ser aplicados antes ou depois da aplicação da pasta de brasagem. Em seguida, a ferramenta é transferida para um forno onde a temperatura pode ser

controlada com exatidão. Nesse processo, ocorre uma forte ligação química entre o material de brasagem e o grão abrasivo que é mais forte que a ligação galvânica e permite uma protusão de grão de 70 a 80% da dimensão média do grão [7].

O controle da temperatura durante o processo de brasagem é fundamental para a qualidade da ferramenta. A exposição da ferramenta a extremas temperaturas ou mesmo por um longo período pode evaporar componentes da liga de brasagem ou mesmo desenvolver fases intermetálicas não desejadas, que levam a um enfraquecimento da ligação. Os grãos abrasivos empregados devem ser capazes de suportar essa carga térmica sofrida durante o processo [7].

2.2.5 Ferramentas estruturadas

Segundo König e Braun *apud* Pinto [9], para ferramentas de retificação de uma camada de grão abrasivo, cada grão tem a responsabilidade de remover um certo volume de material da peça em cada passagem. No entanto, devido ao processo de fabricação de ferramentas brasadas e galvânicas, estas apresentam uma distribuição estocástica de grãos e protusão não-homogêneos. Em função da protusão não-homogênea, os grãos penetram na peça com diferentes profundidades de corte. Os grãos com uma maior protusão penetram na peça com uma maior profundidade podem sofrer uma sobrecarga e desgaste macroscópico resultando em sua falha completa. Grãos com menor protusão não atingem a profundidade necessária para dar início à formação de cavaco e levam apenas ao atrito, do grão e da peça, resultando em calor. Em função da distribuição estocástica dos grãos, por maior que seja o volume de poros (espaço livre entre os grãos), em função do processo de fabricação (galvânica ou brasada), o fluxo de fluido de corte e cavacos não é otimizado.

Ferramentas estruturadas têm o propósito de aperfeiçoar ferramentas galvânicas e brasadas a partir do posicionamento definido dos grãos abrasivos sobre a superfície de trabalho do rebolo. O posicionamento exige uma

sobreposição dos grãos que garanta uma varredura de toda a largura do rebolo sobre a peça para cada rotação da ferramenta. A sobreposição dos grão é necessária para que não haja contato da base da ferramenta com a peça e ocorra a remoção de material.

O posicionamento dos grãos facilita e induz o fluxo de fluido de corte e de cavacos durante o processo. A melhora desse fluxo reduz problemas térmicos na peça e ferramenta.

Existem várias patentes que descrevem a fabricação de ferramentas galvânicas estruturadas. A fixação dos grãos segue o mesmo princípio de fabricação de ferramentas galvânicas convencionais [12]. As ferramentas são cobertas com um filme de proteção elétrica. Neste filme são gravadas cavidades segundo uma distribuição pré-estabelecida. Em seguida a ferramenta sofre um banho galvânico. Os grão abrasivos são fixos segundo a estrutura previamente determinada [9] (Figura 14).

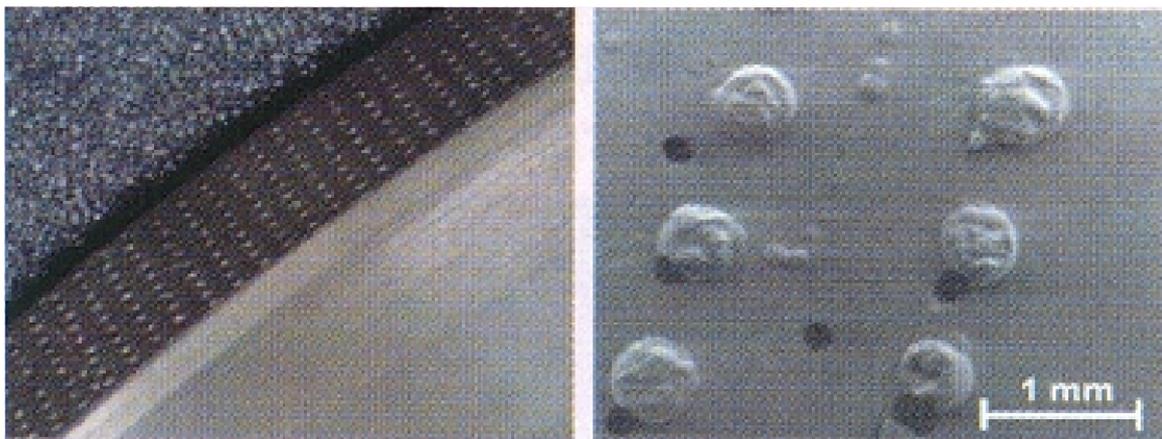


Figura 14 - Ferramenta galvânica estruturada [11]

Como para as ferramentas galvânicas, as ferramentas brasadas também podem ser produzidas por métodos automáticos. Devido ao maior interesse nas ferramentas com fixação dos grãos por brasagem reativa, este processo de fabricação dessas ferramentas é mais detalhado no capítulo 4.

Para os dois casos, o posicionamento dos grãos abrasivos é feito em função da aplicação da ferramenta [9].

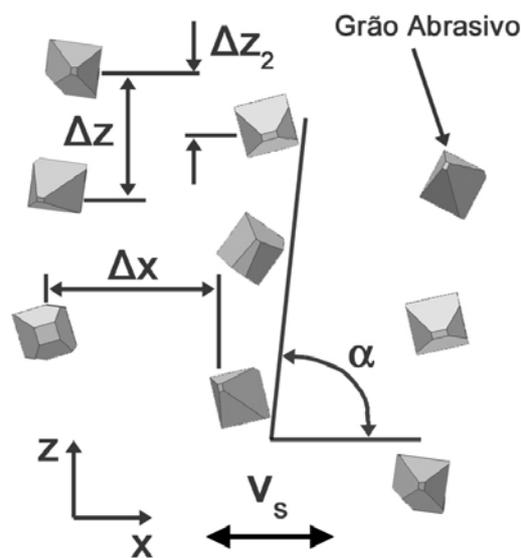


Figura 15 - Parametrização da estrutura [10]

Segundo a parametrização adotada por Pinto [10], a distância entre grãos na direção de rotação do rebolo é denominada como Δx , a distância entre grãos na direção axial do rebolo é ΔZ , o ângulo entre grãos de uma coluna α e atraso entre grãos ΔZ_2 , assim como mostra a Figura 15. Muito importante no ordenamento dos grãos abrasivos é o espaço livre entre grãos. Esse espaço é oferecido para cavacos produzidos e para o fluxo de fluido de corte na área de trabalho. O resultado é um melhoramento no fluxo de fluido de corte, remoção de cavacos mais efetiva durante o processo e melhora na refrigeração na área de corte [7].

Em comparação com ferramentas convencionais, a redução do número de grãos abrasivos distribuídos nas ferramentas estruturadas e o seu posicionamento segundo estruturas (*patterns*) aumenta a porcentagem de grãos em ação durante o processo, aumenta o espaço para cavaco, melhora o transporte de fluido de corte na área de contato, reduz as forças ativa e passiva, assim como prevê uma melhora na qualidade superficial [9].

Foi desenvolvido no Instituto de Máquinas-Ferramenta e Produção (IWF) por Burkhart [7] um sistema semi-automatizado que é capaz de gerar estruturas em ferramentas. O sistema foi desenhado para viabilizar a produção semi-automatizada de ferramentas estruturadas com ligante brasado e assim, tentar garantir a competitividade econômica dessa tecnologia. Através de um

microdosador, gotas de cola são alocadas no corpo da ferramenta. Em seguida, os grãos abrasivos são projetados no corpo da ferramenta e permanecem fixos aos pontos de cola. A ferramenta passa então, pelo ciclo de brasagem.

A Figura 16 mostra um exemplo de uma ferramenta brasada com posicionamento de grãos produzida pela metodologia proposta por Burkhard [7]. Ferramentas estruturadas ainda estão em fase de testes para avaliar sua capacidade e identificar seu campo de aplicação.

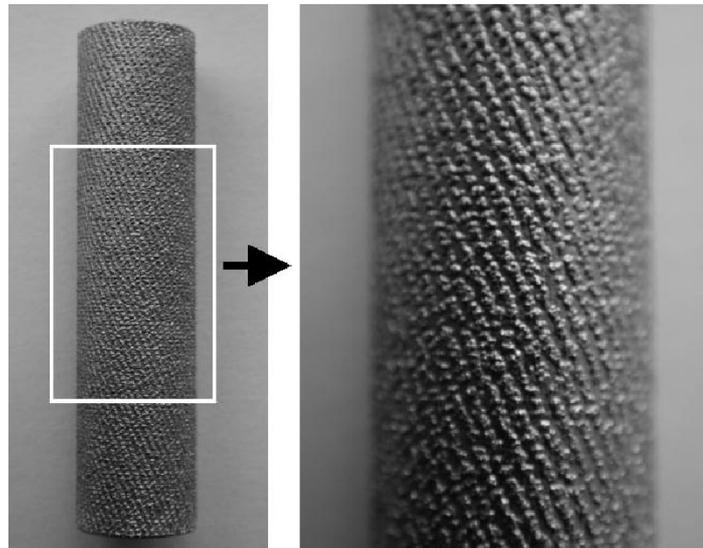


Figura 16 - Ferramenta estruturada produzida com o método de Burkhard [7]

2.3 Embasamento Cinemático

A atuação de ferramentas de retificação pode ser dividida em microscópica e macroscópica. Analisando o processo de retificação de maneira microscópica, e considerando as diferentes deformações que nele ocorrem, é mostrada na Figura 17 a dependência funcional entre a espessura média do cavaco não-deformado (\bar{h}_{cu}) e as variáveis de entrada velocidade periférica do rebolo (v_s), velocidade tangencial da peça (v_w) e penetração de trabalho (a_e), bem como o diâmetro equivalente do rebolo (d_{se}) e a distribuição estática de gumes no rebolo (C_{stat}). Essa dependência é descrita pela seguinte função exponencial (equação 1) [2]:

$$\bar{h}_{cu} \approx k \cdot \left[\frac{1}{C_{stat}} \right]^\alpha \cdot \left[\frac{v_w}{v_s} \right]^\beta \cdot \left[\frac{a_e}{d_{se}} \right]^\gamma \quad (1)$$

Onde k é um fator de proporcionalidade e α , β e γ são constantes determinadas experimentalmente, tendo valores situados entre 0 e 1.

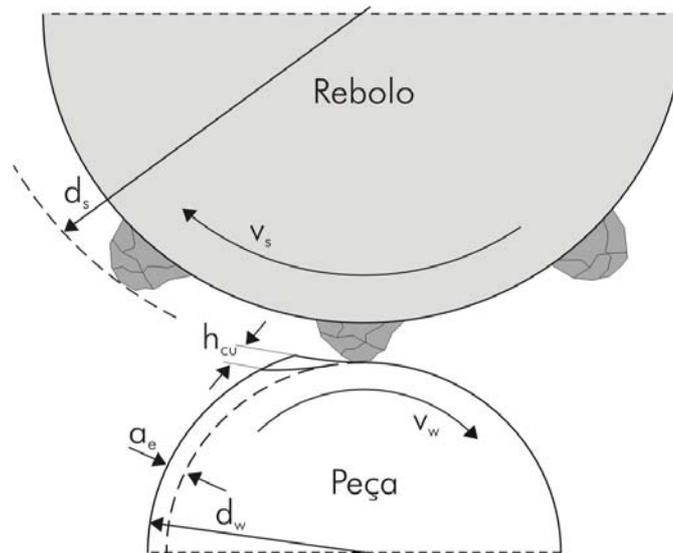


Figura 17 – Dependência entre a espessura de usinagem e as variáveis de entrada e condições de contato [2]

A distribuição dos gumes estáticos (C_{stat}) é definida como o número de gumes por unidade de área do reboleto até uma profundidade de 1mm. Um mesmo grão pode apresentar vários gumes e, por isso, o afastamento dos gumes estáticos não é igual ao afastamento entre os grãos. Ainda, alguns gumes estáticos estão tão recuados na estrutura do reboleto ou em função das condições de corte que não chegam a entrar em contato com a peça. Nem todos os gumes participam efetivamente na remoção de material da peça. Os gumes que participam do processo são chamados de gumes cinemáticos [2].

Macroscopicamente a atuação de ferramentas de retificação pode ser classificada segundo o tipo do processo que a mesma realiza. Uma vez que os parâmetros de entrada influenciam diretamente na formação do cavaco, surge a necessidade de separar o processo de retificação segundo sua cinemática. Como mostrado na

Figura 18, a retificação se apresenta como: cilíndrica, plana ou rotativa.

	Cilíndrica Externa	Cilíndrica Interna	Plana	Rotativa
Circunferencial de Mergulho				
Circunferencial longitudinal				
Lateral de mergulho				
Lateral longitudinal				

Figura 18 - Parâmetros variáveis de entrada para os principais processos de retificação [2]

Na Figura 19 são mostrados os parâmetros variáveis de entrada para o processo de retificação cilíndrica externa de mergulho, conforme a norma DIN 8589 [1].

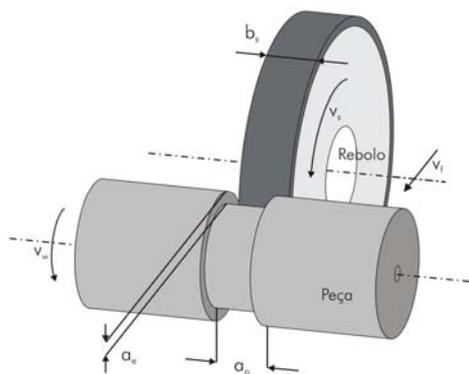


Figura 19 – Retificação cilíndrica externa de mergulho [4]

Os movimentos de corte são caracterizados pela velocidade periférica do rebolo (v_s), que freqüentemente é denominada velocidade de corte (v_c), pela velocidade tangencial da peça (v_w) e pela velocidade de avanço (v_{fr}). A penetração de trabalho pode ser indicada por a_e , quando o movimento de penetração é feito em uma direção paralela à superfície de referência, ou por a_p , quando o movimento é feito em uma direção normal à superfície de referência que, por definição, é normal ao eixo do rebolo.

Para o processo de retificação externa cilíndrica de mergulho, a taxa de retificação pode ser calculada pela equação 2:

$$Q_w = \pi \cdot d_w \cdot v_f \cdot S_b \quad (2)$$

Para uma real avaliação do potencial de trabalho do processo, a grandeza Q_w deve ser tornada independente da largura efetiva S_b , que é a largura do rebolo que efetivamente remove material da peça. Deste modo, após a divisão de Q_w por S_b , é obtida a grandeza taxa de retificação específica (Q'_w) [$\text{mm}^3/(\text{mm} \cdot \text{s})$].

Na retificação externa cilíndrica de mergulho, a taxa de retificação específica só pode ser alterada mediante a variação da velocidade de avanço do rebolo (v_{fr}), uma vez que quando o número de rotações da peça (n_w) é aumentado, ocorre uma diminuição proporcional da penetração de trabalho (a_e). Isto porque na retificação externa cilíndrica de mergulho a penetração de trabalho é definida como sendo a espessura de material removida por rotação da peça [2]:

$$a_e = \frac{v_{fr}}{n_w} \quad (3)$$

2.4 Geometria da Superfície

A geometria da superfície retificada é função das características da ferramenta, no que diz respeito aos grãos abrasivos, ligante, macro e micro geometrias, condicionamento e da cinemática do processo. Diferentes valores

de rugosidade e diferentes texturas são obtidos a partir de variações na ferramenta e no processo.

A qualidade da superfície retificada é essencial para o cumprimento da função para a qual foi projetada. Diferentes condições de atrito, desgaste, reflexão, condutividade, lubrificação, dentre outros, são verificadas em função da qualidade da superfície de peças.

Existem dois fatores básicos que determinam a superfície do ponto de vista do processo. O elemento de corte, no caso da retificação o relolo, e como este está presente espacialmente diante da superfície e como o elemento de corte afeta a superfície durante o corte. Uma idéia da superfície pode ser obtida segundo a cinemática da ferramenta em atuação no processo. Mais detalhadamente, a superfície também é descrita segundo as propriedades físicas do material usinado e dos grãos abrasivos. A superfície retificada é, portanto, resultante de efeitos geométricos e físicos [30].

Para a descrição da superfície, são muitos os fatores que devem ser considerados, dentre os quais se destacam:

- A aleatoriedade do processo: distribuição vertical e horizontal dos grãos;
- A forma dos grãos;
- A maneira que os grãos interagem com a superfície: eficiência do corte, dureza do material da peça.

A rugosidade pode ser detectada qualitativamente através da sensibilidade do ser humano como, por exemplo, pelo toque de superfícies com a ponta da unha ou apenas pela visão e também de maneira quantitativa através instrumentos que mapeiam a microtopografia das superfícies. A avaliação do perfil obtido se dá de acordo com as necessidades de cada aplicação.

Segundo Bet *apud* Weingärtner [31], uma série de parâmetros são utilizados para a caracterização de uma superfície, entre os quais é importante citar os parâmetros verticais, que fornecem informações sobre a ordem de grandeza das ordenadas do perfil de rugosidade. Dentre eles, os parâmetros R_a , R_q , R_y , R_z e R_{max} são os mais difundidos devido a sua simplicidade de

processamento nos instrumentos de medição e processamento de dados de rugosidade. Os parâmetros verticais não fornecem nenhuma informação com relação à forma de evolução do perfil e, por esta razão, devem ser usados preferencialmente na comparação de superfícies geradas por processos de fabricação semelhantes.

O desvio médio aritmético da rugosidade, R_a , é o parâmetro bastante aplicado industrialmente. É utilizado em praticamente todos os processos de fabricação e todos os equipamentos convencionais de medição de textura o tem como opção. É definido como a média dos valores absolutos das distâncias “y” da linha média ao perfil de rugosidade dentro do trecho de medição. Isto tem o mesmo significado da altura do retângulo cujo comprimento é igual ao comprimento total de medição l_m e cuja área “ A_g ” é igual à soma entre as áreas limitadas pela linha média e o perfil de rugosidade (área dos picos “ A_p ” e área dos vales “ A_v ”). A Figura 20 apresenta de maneira esquemática a definição do desvio médio aritmético da rugosidade, e as equações 4 e 5 reforçam a definição apresentada anteriormente [32].

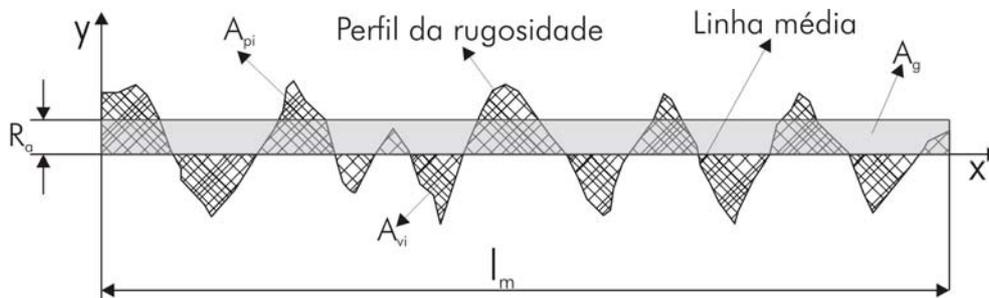


Figura 20 - Desvio médio aritmético da rugosidade [31]

$$\sum A_{pi} = \sum A_{vi} \quad (4)$$

$$A_g = \sum A_{pi} + \sum A_{vi} = R_a \cdot l_m \quad (5)$$

O parâmetro R_a apresenta algumas desvantagens que limitam sua aplicação. Como ele representa uma média, um pico ou vale atípico não muda substancialmente o seu valor. Desta forma, é importante avaliar a superfície

com base em outros parâmetros além do R_a , como, por exemplo, a profundidade média da rugosidade R_z e profundidade máxima da rugosidade, R_{max} , ou ainda a profundidade da rugosidade R_t (PV) [16]. Estes parâmetros são mais sensíveis à presença de defeitos na peça. O R_t é definido como a maior distância pico-vale ao longo de todo comprimento de medição [33].

2.5 Simulação de processos

Normalmente, costuma-se desenvolver e experimentar com modelos de simulação objetivando o encaminhamento de uma solução a um dado problema. As razões mais comuns para se experimentar com modelos simulados, segundo Freitas *apud* Boeira [24], são as seguintes:

- Sistema modelado ainda não existe: neste caso a simulação poderá ser usada para planejar o futuro sistema;
- Experimentar com o sistema é dispendioso: o modelo poderá indicar a viabilidade ou não de implementação do sistema real, com custos muito menores;
- A experimentação com o sistema real é inapropriada: quando é inviável a realização de testes com o sistema real.

Uma definição atual, segundo Boeira [24], é que simulação é todo o método experimental que segue buscando:

- Descrever o comportamento do sistema;
- Construir teorias e hipóteses considerando as observações efetuadas;
- Prever o comportamento futuro, isto é, os efeitos produzidos por alterações no sistema ou nos métodos empregados em sua operação.

O processo de retificação é visto como um sistema muito complexo, uma vez que nele ocorre a interação de muitos parâmetros simultaneamente. Tal característica desperta o interesse na simulação do processo como uma maneira econômica de prever tendências nos resultados como, por exemplo, rugosidade final da peça, força de retificação, dentre outros.

A modelagem e simulação do processo deve começar com a visualização do sistema. Com um sistema de equações, a técnica de retificação deve ser descrita através da modelagem da ferramenta utilizada, da cinemática do processo e da interação da ferramenta com o material da peça. A modelagem deve seguir um sistema de coordenadas cartesianas como, por exemplo, o equacionamento desenvolvido por Warnecke [25] na Figura 21 e equação 6.

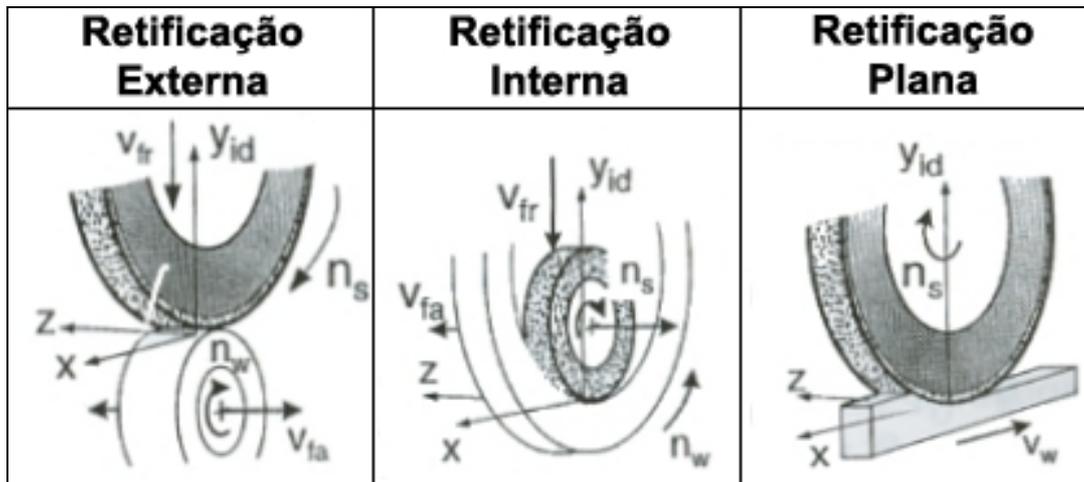


Figura 21 – Modelo matemático da cinemática para diferentes técnicas de retificação [25]

$$y_1 = \frac{q^2 - a_1 \frac{r_s}{r_w} \cdot (1 + 2 \cdot a_2 \cdot q)}{2 \cdot r_s \cdot (1 + a_2 \cdot q)^2} \cdot x_1^2 - \frac{v_{fr}}{v_s + (a_2 \cdot v_w)} \cdot x_1 \tag{6}$$

Onde:

$a_1 = 1$: retificação externa	$a_2 = -1$: concordante	$a_2 = 1$: discordante
$a_1 = 0$: retificação plana	r_s = raio da ferramenta	$q = \frac{v_s}{v_w}$
$a_1 = -1$: retificação interna	r_w = raio da peça	
x = coordenada no eixo x;		$s = \frac{a_e}{r_w + r_s}$
z = coordenada no eixo z;		
$y_{id}(x,z)$ = coordenada no eixo y;		

As ferramentas convencionais modeladas admitem uma distribuição aleatória dos grãos abrasivos na periferia do rebolo [18]. Nos modelos

apresentados na literatura, como por exemplo, os modelos de Nguyen [13], Chen [14], e Lorz [15], para ferramentas convencionais são na maioria modelos que descrevem a cinemática do processo com uma distribuição aleatória de grãos na superfície. Importante salientar é a descrição da geometria do grão abrasivo segundo os autores que se dá por: elipses, esferas ou ainda octaedros. A adoção dessa geometria simplificada decorre do fato de que os grãos abrasivos convencionais individualmente apresentam forma definida, mas quando agrupados, nenhuma tendência com relação à forma é verificada. Nesses modelos, os grãos são ainda modelados segundo duas ou três dimensões (2D e 3D). A escolha da modelagem 2D ou 3D é dependente da aplicação do modelo.

Há, ainda, modelos que são desenvolvidos pelo mapeamento da superfície retificada. Por regressão dos valores obtidos, a ferramenta é simulada [17]. Esses modelos requerem muitos dados experimentais, no entanto, a margem de erro por eles apresentada é em torno de 5% do valor da rugosidade.

Nos casos onde a simulação variáveis que devem ser geradas aleatoriamente durante os ciclos, a simulação de Monte Carlo é uma opção a ser aplicada. Com a simulação de Monte Carlo, valores aleatórios são gerados. Como dado de saída é apresentado um número entre 0 e 1. Esse valor pode ainda ser transformado para que sua probabilidade de incidência acompanhe distribuições: normal, retangular, dentre outras [38]. A simulação de monte Carlo gera continuamente valores randômicos para variáveis durante a simulação de um modelo [34].

A adequação dos modelos quanto à cinemática do processo e, por conseqüência, a deformação plástica sofrida pelo material é modelada, segundo Nguyen [13], por exemplo, como sendo um triângulo isóscele onde o ângulo base α é calculado em relação ao ângulo de ataque da ferramenta.

Com a evolução do processo de retificação em relação à aplicação de grãos abrasivos especializados e, por conseqüência, com formas melhor definidas, e o desenvolvimento de ferramentas com o posicionamento de

grãos, surge à possibilidade de modelar a ferramenta de retificação de maneira mais realística.

A simulação de ferramentas estruturadas apresenta como vantagem principal a capacidade de avaliação de parâmetros de construção (Δx , Δz) e parâmetros de aplicação (v_s , v_{fr} , a_e) em operações específicas, sem a necessidade da fabricação da ferramenta.

Uma vez que as ferramentas estruturadas ainda estão em fase de desenvolvimento, não se pode contar com um modelo que englobe as características estruturais da ferramenta com a particularidade da forma do grão superabrasivo e seu efeito ao entrar em contato com a peça.

CAPÍTULO 3

Objetivos

Ferramentas estruturadas com ligante brasado representam uma nova geração de ferramentas de corte. O objetivo é o máximo rendimento do rebolo em conjunto com um fluxo otimizado de fluido de corte e remoção de cavacos da área de trabalho durante o processo. Isso resulta na redução dos danos térmicos tanto na ferramenta quanto na peça e, ao mesmo tempo, garante qualidade da peça usinada. Outras vantagens apresentadas por ferramentas estruturadas são a redução da força de retificação e a manutenção de uma condição homogênea de corte.

A produção dessas ferramentas ainda é laboratorial e as mesmas ainda estão em fase de testes para identificação de sua capacidade e potencial de aplicação. Elementos como estrutura da ferramenta, tamanho de grão, geometria da ferramenta, parâmetros de processo – taxa de remoção de material, velocidade de corte, espessura de material removido - e características do material da peça são exemplos que evidenciam a quantidade de parâmetros que podem ser variados em busca de uma ferramenta otimizada para um processo específico, o que torna o processo experimental muito caro.

Uma alternativa para viabilizar a identificação da estrutura é o desenvolvimento de uma ferramenta computacional que aborde as características particulares de construção do rebolo e que, junto com a cinemática e o mecanismo de formação de cavacos, identifique a qualidade da superfície usinada, capacidade e durabilidade da ferramenta. Esse é o tema do projeto “Modelagem do processo de retificação com ferramentas de grãos posicionados” desenvolvido no Instituto de Máquinas Ferramentas e Produção, IWF, na *Eidgenössische Technische Hochschule Zürich* (Universidade Tecnológica de Zurique), ETH, Suíça em cooperação com Laboratório de Mecânica de Precisão LMP da Universidade Federal de Santa Catarina UFSC, Florianópolis, Brasil. O projeto faz parte da tese de doutorado do mestre em engenharia mecânica Fábio Wagner Pinto.

O projeto objetiva:

- Um melhor entendimento da relação entre o posicionamento dos grãos abrasivos em determinadas estruturas e parâmetros de corte;
- A identificação de influências da estrutura no fluxo de fluido de corte e cavacos;
- Caracterizar a superfície da peça usinada;
- Avaliar do colapso das ferramentas;
- Otimizar o sistema de fabricação e de posicionamento de grãos desenvolvido no IWF;
- Validar o modelo através de ensaios experimentais.

O modelo descreve ferramentas estruturadas e suas atuações em diferentes processos de retificação. A simulação é feita para diferentes características da ferramenta e parâmetros de processo e resulta nas suas respectivas influências sobre a qualidade da superfície retificada. Assim, a ferramenta é identificada para aplicações específicas.

A estrutura do projeto é mostrada na Figura 22.

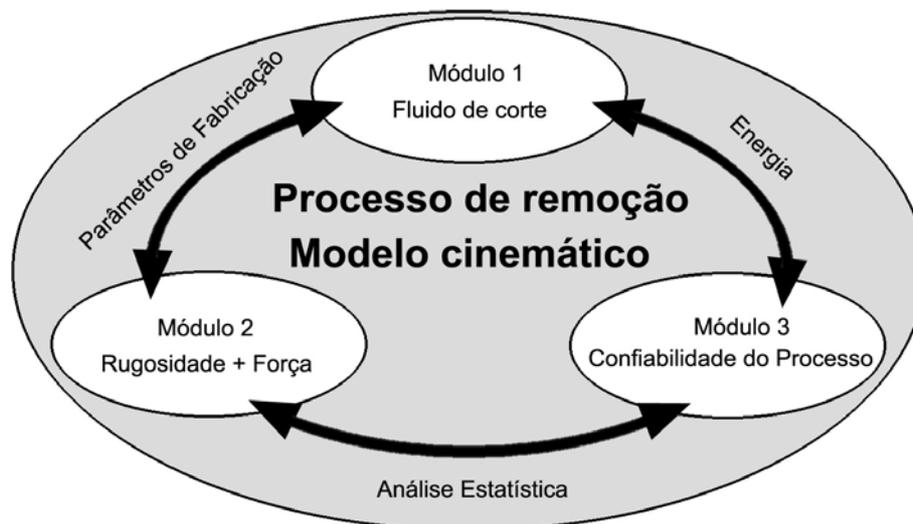


Figura 22 – Estrutura do projeto de avaliação de rebolos estruturados

O projeto é dividido em três módulos. O módulo 1 corresponde à análise do fluxo de fluido de corte em relação ao tipo de estrutura adotada. O módulo 2 corresponde à força que atua no processo e a qualidade da superfície obtida

na peça trabalhada com diferentes estruturas. O módulo 3 corresponde à determinação da vida estimada da ferramenta. Os três módulos são interligados com o intuito de encontrar uma estrutura otimizada para aplicações específicas.

A modelagem foi construída empregando-se os softwares comerciais MATLAB e ANSYS.

Como parâmetros de entrada tem-se a cinemática do processo e características da ferramenta e da peça. Os parâmetros de saída do modelo são: parâmetros da rugosidade resultante, a força de retificação, uma estimativa da confiabilidade da ferramenta e sua vida aproximada.

Essa dissertação de mestrado tem como alvo a modelagem da ferramenta e do processo de corte para a obtenção da rugosidade da peça trabalhada com ferramentas estruturadas. A modelagem considera características específicas dos grãos abrasivos como forma, tamanho e seu posicionamento na ferramenta de corte. As dimensões da ferramenta também são variáveis de entrada no modelo. O processo de corte abordado é a retificação de desbaste cilíndrica de mergulho. A modelagem cinemática da ferramenta em processo objetiva a identificação das influências dos parâmetros de corte na rugosidade.

No capítulo seguinte, são abordadas as metodologias para a construção do modelo numérico de ferramentas estruturadas e das ferramentas usadas para a pré-validação dos resultados de rugosidade simulados.

CAPÍTULO 4

Metodologia e Métodos

4.1 Modelagem da ferramenta e processo de corte

A modelagem da ferramenta e do processo de retificação foi subdividida em: geometria e posicionamento, cinemática, processo de corte e condicionamento. A ferramenta modelada deve, ainda, apresentar as características de uma ferramenta real e, para tanto, algumas análises devem ser realizadas.

4.1.1 Geometrias e Posicionamento

O desenvolvimento do modelo de ferramentas de retificação inicia com a análise das principais características da ferramenta. Em relação à geometria, essa análise parte da definição da macro geometria e da micro geometria. Por macro geometria se entende diâmetro e largura da ferramenta. Por micro geometria a forma, o tamanho e o posicionamento do gume do grão.

A macro geometria é definida pelas características do processo. A definição da micro geometria depende da escolha do par grão abrasivo - ligante. Alta dureza e resistência ao desgaste são as principais características apresentadas pelos superabrasivos sintéticos (diamante e CBN), tipicamente aplicados na retificação de alta potência. Uma vez que grande parte das ferramentas de alta potência são empregadas na usinagem de aço, os grãos de CBN apresentam vantagem em relação ao diamante.

Os grãos de CBN são divididos em classes devido às suas diferentes características físicas. A classe ABN800 se destaca pela elevada estabilidade térmica bem como pela manutenção da resistência ao impacto mesmo quando aquecido a temperaturas superiores a 1100°C [29].

A as formas geométricas dos grãos superabrasivos CBN é mostrada de forma esquemática na Figura 23.

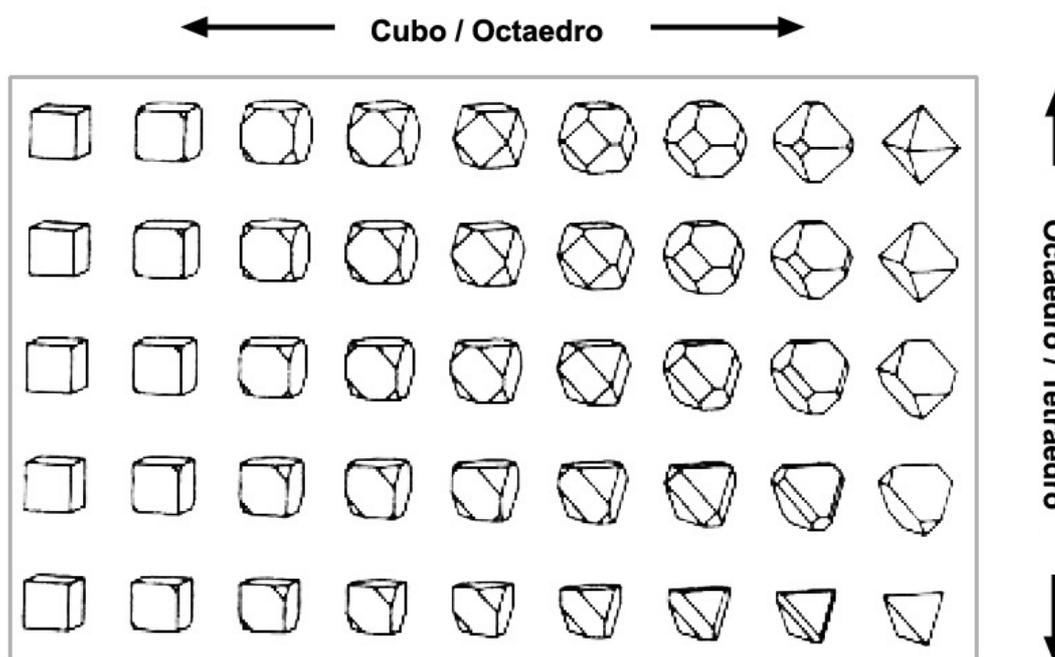


Figura 23 – Morfologia dos cristais de CBN [29]

Seguindo da esquerda superior para a direita superior da figura é mostrada a evolução do cubo para o octaedro, e na coluna da direita é mostrada a evolução do octaedro para o tetraedro. O grão ABN800 se apresenta geometricamente pelo tetraedro e formas intermediárias entre o tetraedro e octaedro. Essas formas são geradas geometricamente partindo de um tetraedro gerado tridimensionalmente. Um fator chamado de chanfro é reduzido de cada aresta simultaneamente, partindo dos vértices. Esse chanfro parte do valor zero, quando a forma geométrica é de um tetraedro, até que esse fator se iguale à metade da aresta do tetraedro, quando a forma do octaedro é obtida. Exemplos de grãos de ABN800 B251 e dos grãos modelados são mostrados na Figura 24, sendo que um código de cores é adotado para diferenciação da forma do grão abrasivo.

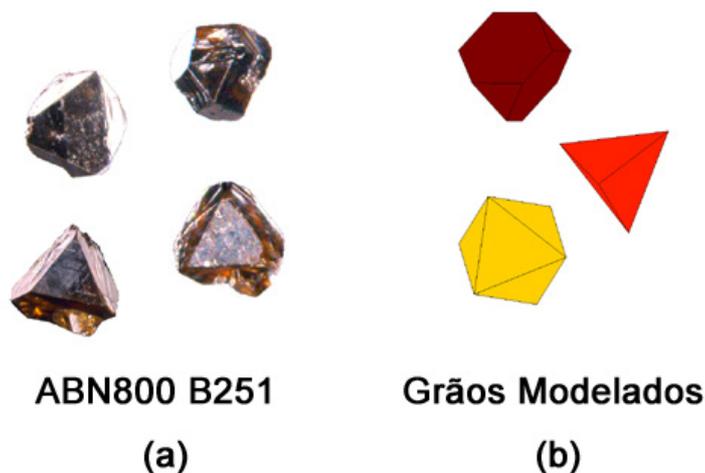


Figura 24 – a) Exemplos de grãos de ABN800 B251 b) grãos modelados

O modelo admite o tamanho da aresta inicial fixo e diferentes tamanhos de chanfros gerados aleatoriamente. À medida que o tamanho do chanfro aumenta, o tamanho final do grão é reduzido. Com base nessa redução, uma correção no valor da aresta é aplicada para que o tamanho final do grão abrasivo corresponda aos tamanhos regulamentados pela norma ISO 6106.

A norma ISO 6106 determina o tamanho das peneiras superiores e inferiores utilizadas para a classificação do tamanho dos grãos. Os tamanhos superior e inferior das peneiras são aqui adotados como limites do tamanho dos grãos. Os valores intermediários são, para cada grão e dentro de uma distribuição uniforme, aleatoriamente escolhidos.

A morfologia dos grãos abrasivos é outra variável na classe ABN800. Uma análise da distribuição dos grãos em uma amostra de ABN800 B251 foi feita para identificar as formas mais incidentes. Os grãos foram observados, qualitativamente, no microscópio Leica modelo MZ16A.

O posicionamento dos grãos modelados deve representar o processo de fabricação real da ferramenta. Um sistema de fabricação aplicável na indústria deve ser viável economicamente e de atuação rápida. O sistema desenvolvido por Burkhardt [7] é baseado na aplicação de pontos de cola sobre o corpo do rebolo por meio de um sistema de microdosagem de cola. São aplicados em seguida os grãos e o material de brasagem e a ferramenta é submetida ao ciclo de brasagem.

Com esse método de posicionamento, três principais fontes de divergência entre o posicionamento ideal e nominal são identificadas:

- A real posição do gume se encontra dentro de uma região ao redor da posição do ponto nominal;
- Mais que um grão abrasivo pode aderir a um ponto de cola (*cluster*);
- Em alguns casos, nenhum grão abrasivo está presente no ponto de cola.

Considerando que o processo de brasagem traz influências na altura dos gumes dos grãos e não na posição dos grãos abrasivos e que o corpo da ferramenta é fabricado numa tolerância tal que erros de forma não induzam erros de posicionamento na ferramenta, desvios da posição do gume nominal e real são atribuídos ao sistema de posicionamento. A importância da identificação desse desvio resulta do fato que, no modelo, o grão abrasivo é posicionado na ferramenta segundo o gume.

As principais fontes de incerteza identificadas nesse posicionamento, segundo Pinto [10], são:

- Variação do tamanho do ponto de cola;
- Desvio da posição do centro do ponto de cola real e nominal;
- Desvio do gume, nesse caso o ponto mais alto do grão, ao centro do ponto de cola.

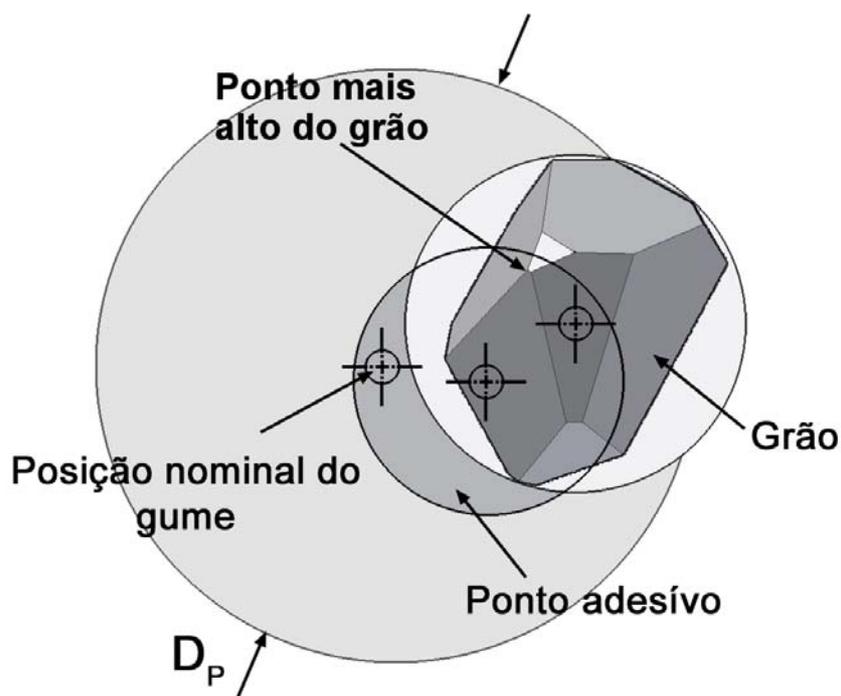


Figura 25 - Desvio entre o ponto nominal e real do gume de corte [10]

Os erros de posição podem ser separados em sistemáticos e aleatórios. Erros sistemáticos, contrário dos aleatórios, podem ser corrigidos. A região D_p (Figura 25) é uma região onde, com um nível de confiança de 95%, todas as partes aleatórias são consideradas.

Para adicionar esse desvio aleatório do posicionamento D_p ao modelo, uma análise estatística da distribuição dos grãos na ferramenta foi feita. Três ferramentas foram construídas segundo o procedimento padrão de construção e o erro foi analisado tanto na direção do eixo x como z. A análise foi feita no Microscópio Leica modelo MZ16A, anteriormente citado, e com o auxílio dos softwares MATLAB e Auto Desk 10.

A análise quantitativa dos desvios nos eixos e no tamanho do ponto adesivo foi feita em MATLAB e consistiu na elaboração de um eixo de referência visualizado na Figura 26 b) sob a cor vermelha. As linhas de cor verde representam a melhor reta obtida pela seqüência de pontos. A diferença entre as distâncias dos centros dos pontos de cola em cada direção foi calculada segundo uma média e um desvio padrão. O diâmetro de cada ponto de cola também foi medido. Tal procedimento foi efetuado para cada segmento e em seguida os mesmos foram comparados entre si, assim como entre as três ferramentas.

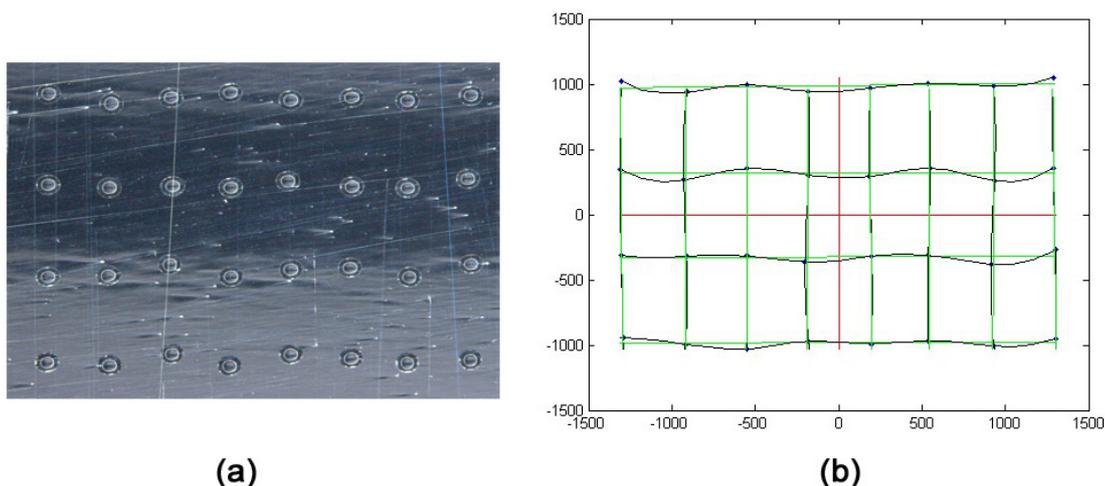


Figura 26 – (a) Amostra de pontos de cola e (b) representação e análise do posicionamento dos centros dos pontos de cola em MATLAB

Três ferramentas foram fabricadas com valor semelhante de Δx e Δz . Os pontos de cola foram aplicados e em seguida as ferramentas foram fotografadas no microscópio. Cada ferramenta foi dividida em 5 segmentos contendo cada uma 8 pontos na direção z e 4 na direção x. As fotos foram analisadas no software MATLAB.

Em seguida foi analisada a posição da área de corte do grão abrasivo em relação ao centro do ponto de cola. Para isso três métodos foram adotados:

- O primeiro método assume que a região de corte do grão abrasivo se encontra no centro de cada grão.
- O segundo método consiste na localização de uma região que se encontra na extremidade superior do grão e a partir dessa região o centro de geométrico desse ponto é comparado com o centro do ponto de cola.
- O terceiro método consiste na identificação do ponto mais alto do grão abrasivo e esse é comparado com o centro do ponto de cola.

As ferramentas para o teste tanto da posição do ponto de cola quanto dos grãos abrasivos foram construídas segundo o procedimento padrão de fabricação.

No primeiro método foi feita uma foto da superfície do disco com os pontos de cola e em seguida os grãos foram aplicados. Uma segunda foto foi tirada, já com os grãos posicionados. Para a análise, as duas figuras foram sobrepostas e com auxílio do software Auto Desk 10 foi gerada uma circunferência circunscrita em torno de cada ponto de cola e outra em torno da projeção de cada grão. A distância entre os centros foi determinada (Figura 27).

circunscrita ao ponto de cola, assim como é descrito no modelo de simulação (Figura 29).

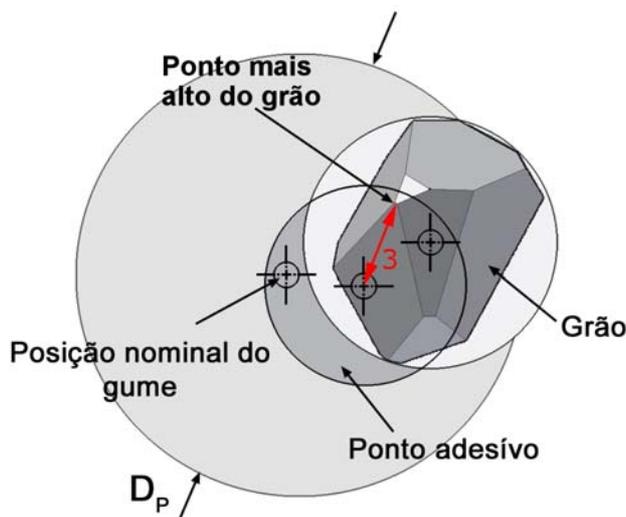


Figura 29 - Representação da análise feita no terceiro método

Atenção especial em EGT também é dada à ocorrência de múltiplos grãos sobre um ponto de cola, aqui chamado de *cluster*, assim como a falta de grão abrasivo no ponto de cola, indesejados em ferramentas estruturadas. A evidência de *clusters* torna desconhecida a posição do gume e ainda introduz grãos desnecessários à ferramenta. A ocorrência de *clusters* se dá principalmente pela relação entre as dimensões do ponto adesivo e do grão abrasivo. Já a falta de grãos ocorre, pois alguns pontos de cola acabam não recebendo grão abrasivo durante a fabricação, ou mesmo o intenso choque de grãos abrasivos pode deslocar alguns grãos depois de fixos. Quando o grão abandona a ferramenta ele leva grande quantidade de adesivo o que diminui a possibilidade que um próximo grão possa vir a ser alojado no mesmo lugar.

Tanto *clusters* quanto a falta de grão têm uma influência direta na rugosidade da peça. A eliminação desses defeitos torna a ferramenta muito cara e essas imperfeições devem ser retratadas no modelo.

A análise estatística da ocorrência de *clusters* e da falta de grãos no ponto adesivo foi feita a partir de uma ferramenta estruturada, construída segundo o procedimento padrão de construção desenvolvido no IWF e posteriormente analisada em microscópio.

O posicionamento final dos grãos modelados na ferramenta de corte considerando os desvios de posicionamento, presença de *clusters* e falta de grãos é mostrado na Figura 30.

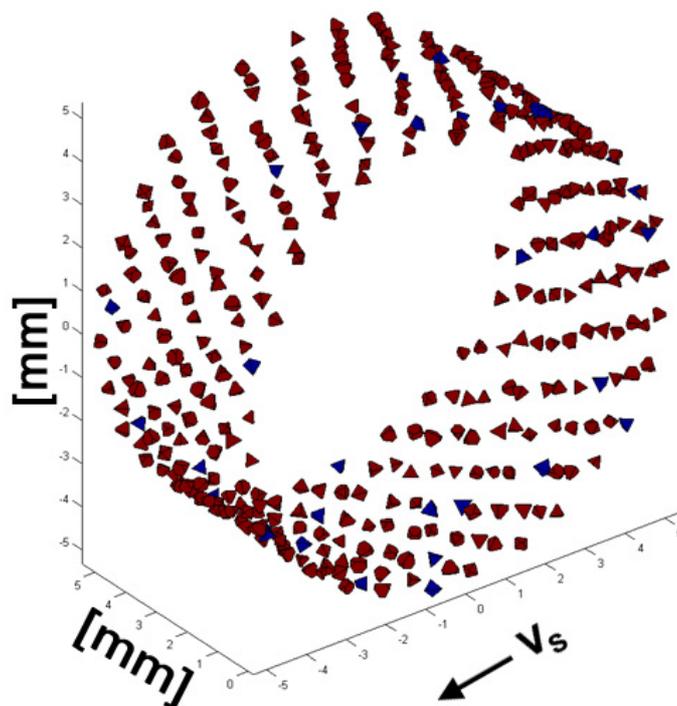


Figura 30 - Ferramenta modelada

4.1.2 Cinemática do processo de retificação

A atuação da ferramenta estruturada é diretamente influenciada pela cinemática do processo. Modelos cinemáticos de ferramentas convencionais da literatura consideram a distribuição estocástica dos grãos abrasivos [13], [14] e [15]. A vantagem da modelagem de ferramentas estruturadas sobre a das convencionais é justamente a possibilidade de retratar com maior exatidão a remoção específica de cada grão, pois suas posições e geometrias são previamente determinadas. A aplicação da simulação de Monte Carlo [34], nesse caso, permite que mesmo que a ferramenta apresente um padrão definido de estrutura, desvios aleatórios relativos a pequenas variações no posicionamento dos grãos, ângulo do grão na ferramenta, entre outros, sejam abordados.

A modelagem cinemática é composta por equações que permitem a identificação das influências dos parâmetros de processo no carregamento dos grãos e, assim, no resultado de retificação da peça. O modelo desenvolvido é dedicado à retificação cilíndrica externa de mergulho. A Figura 31 apresenta esquematicamente este processo e os principais parâmetros atuantes.

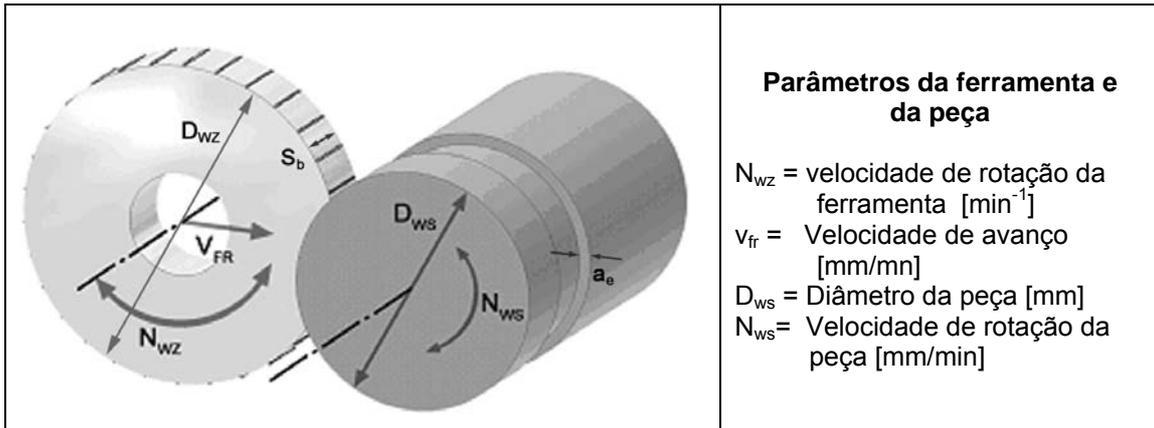


Figura 31 – Representação esquemática do processo de retificação cilíndrica externa

Com a posição do gume determinada, é possível estimar a profundidade de corte (h_{cu}) para cada grão com as equações que descrevam a cinemática do processo. Segundo a Figura 32, o contato do primeiro grão com a peça determina a distância angular θ_1 percorrida pelo grão abrasivo do início ao fim do contato (equação 7).

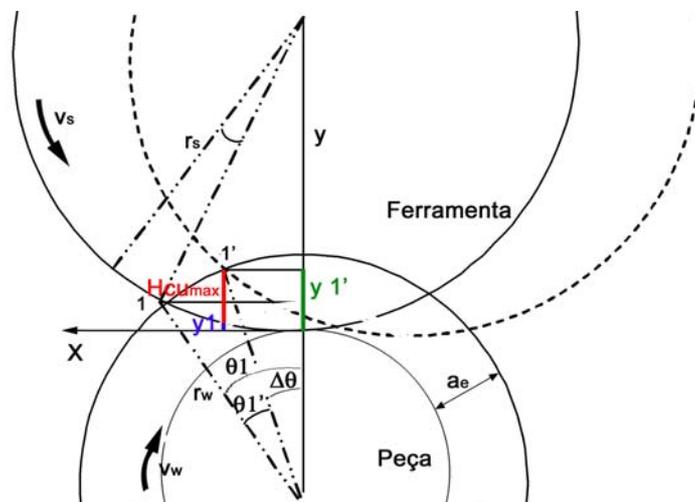


Figura 32 – Representação da cinemática do processo

$$\theta_1 = a \tan\left(\frac{\sqrt{r_s^2 - (r_s - a_e + r_s \cdot s)^2}}{r_w - a_e + (r_w \cdot s)}\right) \quad (7)$$

A diferença entre θ_1 e a distância angular percorrida na peça segundo dois grãos abrasivos consecutivos, $\theta_{1'}$ (equação 8), determina a distância angular $\Delta\theta$ do ponto 1' e o eixo de coordenadas. Por $(p(i+1)-p(i))$ refere-se à diferença angular entre dois grãos consecutivos.

$$\theta_{1'} = \frac{(p(i+1) - p(i))}{r_w \cdot q} \quad (8)$$

A distância de 1' em relação ao eixo y (equação 9) é subtraída da distância do eixo de coordenada à altura referente a esse deslocamento percorrido pelo ponto 1, segundo a equação 10 de Warnecke [25].

$$y_{1'} = (\cos \Delta\theta \cdot r_w) - r_w + a_e \quad (9)$$

$$y_1 = \frac{q^2 - a_1 \frac{r_s}{r_w} \cdot (1 + 2 \cdot a_2 \cdot q)}{2 \cdot r_s \cdot (1 + a_2 \cdot q)^2} \cdot x_{1'}^2 - \frac{v_{fr}}{v_s + (a_2 \cdot v_w)} \cdot x_{1'} \quad (10)$$

Uma correção ao modelo é aplicada para que as equações sejam compatíveis e a máxima espessura de cavaco resulta da equação 11.

$$h_{cu} = y_{1'} - y_1 - (y_1(x_1) - \sqrt{r_w^2 - x_1^2} - (r_w - a_e)) \quad (11)$$

Onde:

$a_1 = 1$: retificação externa	$a_2 = -1$: concordante	$a_2 = 1$: discordante
$a_1 = 0$: retificação plana	r_s = raio da ferramenta	$q = \frac{v_s}{v_w}$
$a_1 = -1$: retificação interna	r_w = raio da peça	
x = coordenada no eixo x;		$s = \frac{a_e}{r_w + r_s}$
z = coordenada no eixo z;		
$y(x,z)$ = coordenada no eixo y;		

Tendo o valor da máxima espessura de cavaco calculado, a interação da ferramenta e da peça ocorre pela intersecção do grão e da ferramenta. Em decorrência da rotação do rebolo, o grão interfere com a peça e segundo sua trajetória e geometria específica e remove uma determinada quantidade de material.

4.1.3 Processo de corte

A modelagem de ferramentas estruturadas considera a forma do grão e seu posicionamento segundo os desvios já abordados. A atuação dessa ferramenta deve levar em consideração ainda que a remoção de material é dependente da profundidade de corte em cada grão. O início da produção de cavaco é precedido de outros dois estágios no material que são dependentes, entre outros, da velocidade de corte empregada no processo.

No mecanismo de penetração do grão abrasivo na peça se observam três estágios: região de deformação elástica pura; deformação elástica e plástica sem formação de cavaco efetiva; e região de deformação elástica e plástica com formação de cavaco [2]. A modelagem desta interação é complexa e requer o conhecimento das fases descritas, de forma que se possa alimentar o modelo com as condições de contorno adequadas.

No presente trabalho, uma simplificação necessária do processo considera a remoção do material apenas função da máxima interferência geométrica e não dos mecanismos físicos acrescidos da interferência geométrica. A remoção é dada como ideal e toda a porção de material que interfere com o grão abrasivo é removida. O perfil de rugosidade é representado em um plano que representa a projeção de todas as interferências sobre o plano de projeção.

A Figura 33 mostra, de forma esquemática, a variação do perfil da rugosidade como função de mais uma interferência de um grão abrasivo no processo de remoção de material.

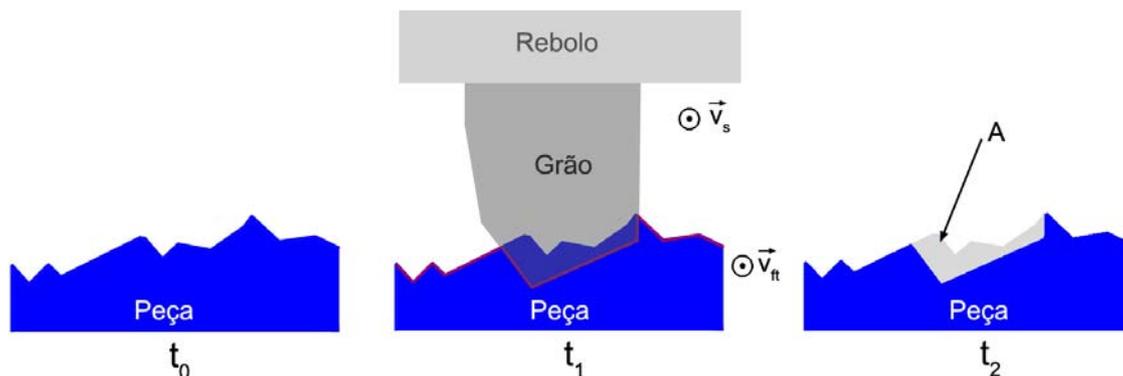


Figura 33 – Representação esquemática da remoção de material no modelo

Em t_0 é mostrado o perfil da rugosidade imediatamente anterior à remoção. A peça já apresenta uma rugosidade inicial. Em t_1 o grão abrasivo está na posição de máxima interferência com a peça e remove uma quantidade de material de acordo com sua geometria. Em t_2 o novo perfil de rugosidade é identificado. O perfil de rugosidade final é o resultado da projeção de todas as interferências dos grãos após uma rotação completa de ferramenta.

4.1.4 Condicionamento da ferramenta

Em ferramentas estruturadas o grão abrasivo não pode sofrer carregamento excessivo para não ser sobrecarregado e falhar. A falha de um grão em uma ferramenta otimizada pode desencadear a falha total da ferramenta. Com o objetivo de prevenir tal falha e analisar a diferença obtida nas peças retificadas com ferramentas que sofreram ou não condicionamento, um algoritmo foi desenvolvido para detectar a altura dos grãos e efetuar o condicionamento. Uma faixa que compreende as alturas mínima e máxima dos grãos é identificada e na altura média desse intervalo é feito o *crushieren* (Figura 34). *Crushieren* é aqui representado como o achatamento perfeito dos grãos abrasivos.

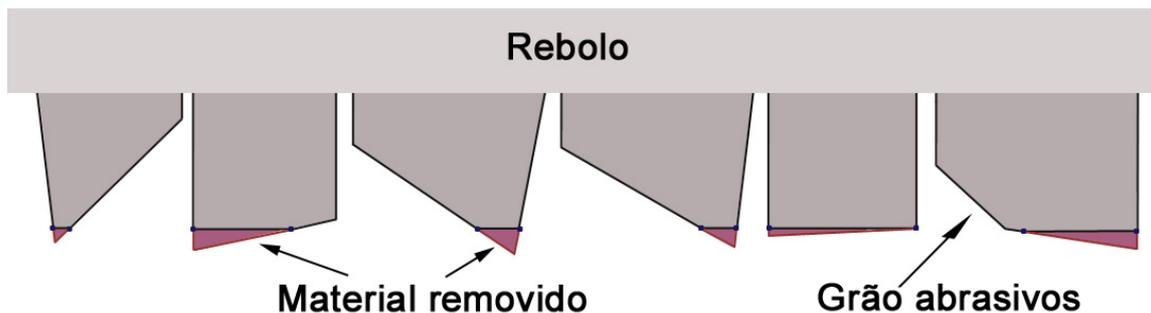


Figura 34 – Representação esquemática da operação de *crushieren*

O perfil da peça simulada é mostrado na Figura 35.

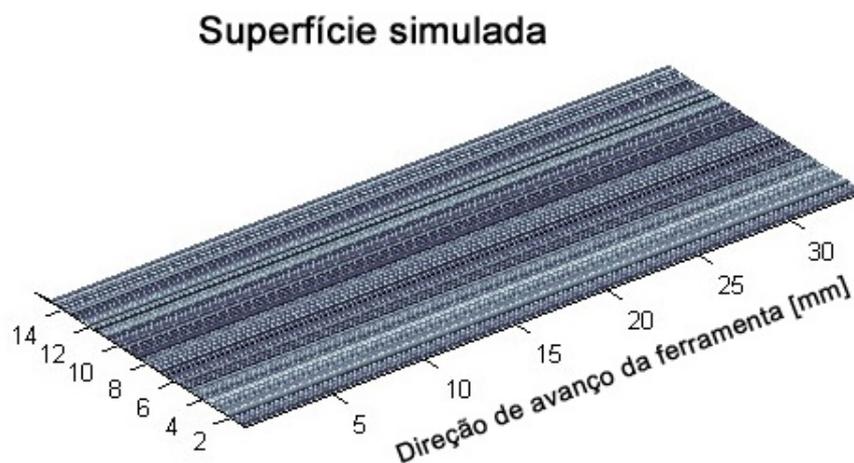


Figura 35 – Perfil da peça retificada

O módulo 2, com respeito à rugosidade, termina com a identificação da rugosidade da peça segundo a norma ISO 4287 após uma rotação completa da ferramenta de corte. Os conceitos de rugosidade adotados nesse trabalho, R_a e R_t , foram escolhidos em função da grande aplicação do valor de R_a na indústria e pela possibilidade de identificação de problemas na peça indicados por R_t . Uma vantagem da simulação do processo é que, uma vez que o perfil geral é determinado de maneira correta, qualquer outro valor de rugosidade pode ser obtido.

Os dados fornecidos para a simulação, assim como os resultados obtidos com a simulação, são armazenados em um arquivo mostrado na Figura 36.

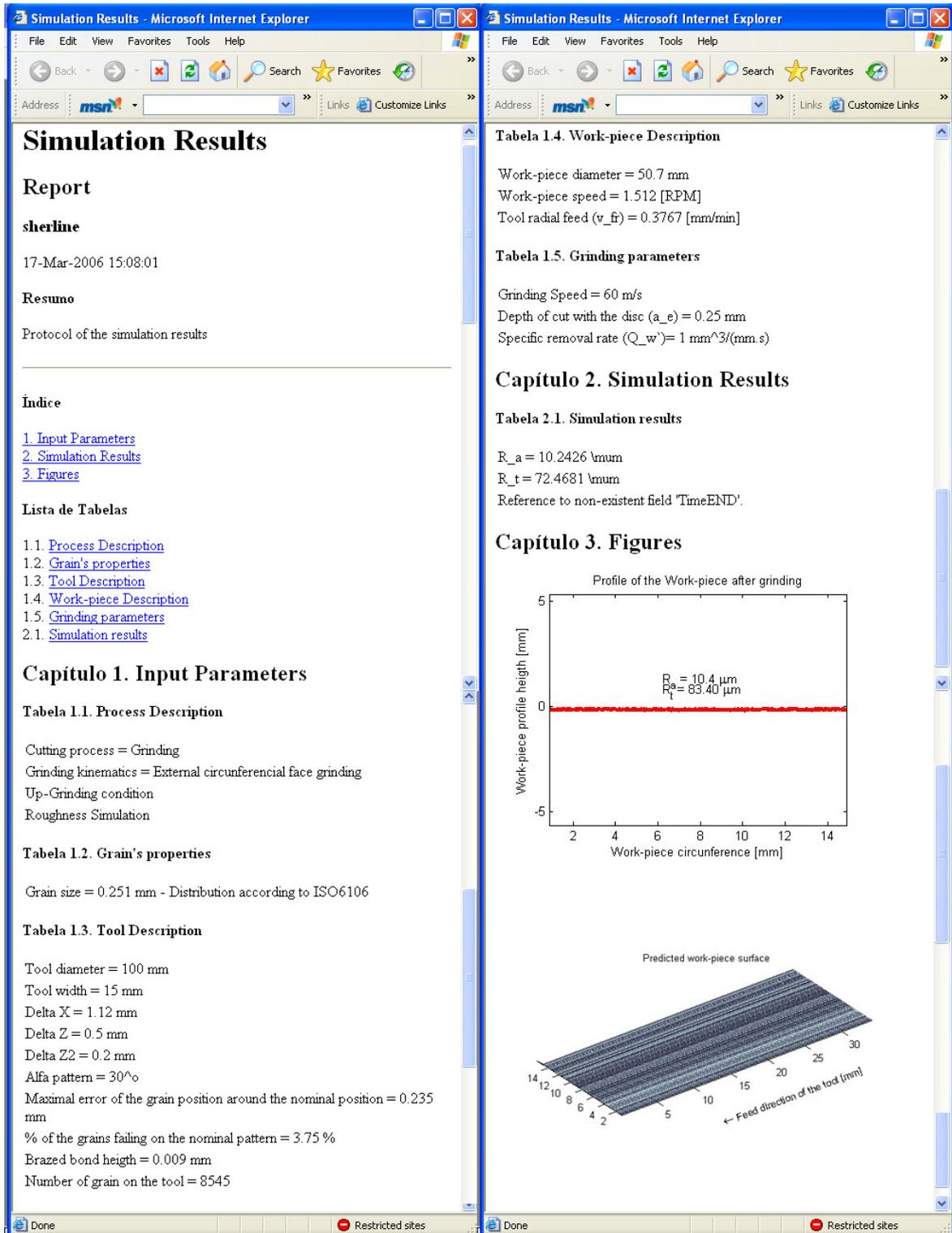


Figura 36 - Apresentação dos resultados de simulação

4.2 Fabricação de ferramentas estruturadas

Para a verificação dos resultados obtidos pela simulação, ensaios com ferramentas estruturadas são essenciais. No IWF um sistema de posicionamento dos grãos abrasivos na ferramenta foi desenvolvido por Burkhard [7]. O sistema é baseado num sistema microdosador - Microdrop, que projeta uma gota de adesivo (solúvel em octil acetato) no corpo da ferramenta segundo estruturas específicas. Em temperatura ambiente este adesivo permanece líquido até ser aquecido a 65°C, permitindo que os grãos abrasivos sejam aplicados e brasados na ferramenta.

4.2.1 Microdrop

O impacto provocado por uma gota grande ao atingir uma superfície líquida gera uma coroa com diversas outras gotas satélites de menor tamanho. Como mostrado na Figura 37, resultado de uma simulação computacional, bastante similar ao comportamento real.

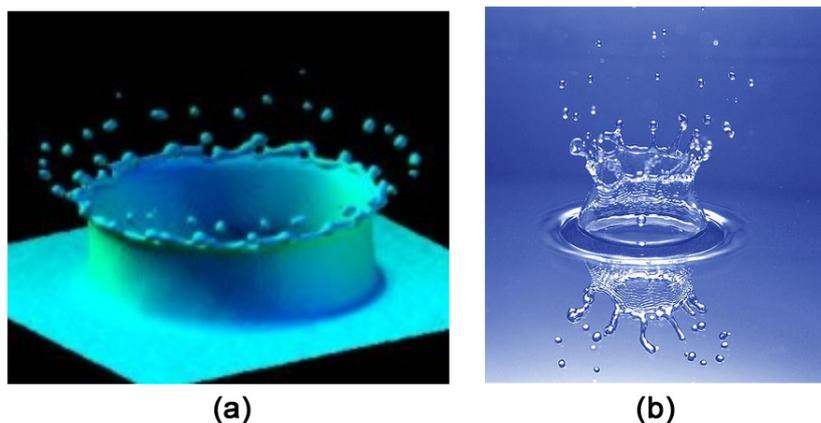


Figura 37 – Impacto a) simulado e b) real de uma gota numa superfície de um líquido

Uma gota pequena lançada sobre uma superfície sólida pelo *microdrop* (Figura 38 b) não gera uma coroa e gotas satélites. Há apenas a formação de pequenas ondas na superfície. O motivo é que não há energia suficiente para formar gotas secundárias. Para a velocidade de impacto gerada pelo sistema

microdrop as gotas com diâmetro menor que $100\mu\text{m}$ têm mais energia superficial que cinética [35].

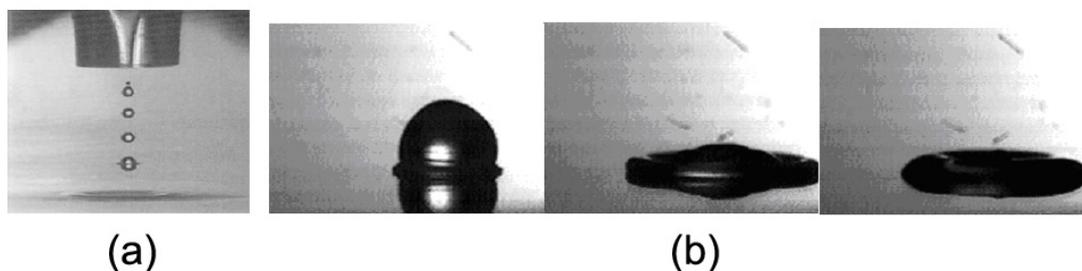


Figura 38 – a) Impacto de gotas produzidas pelo *microdrop* em um líquido e b) Gota de adesivo em contato com uma superfície

O mecanismo de formação e desprendimento de gotas consiste na superação da tensão superficial. Uma das formas de superar tal força é com o auxílio da força da gravidade, mas as gotas resultantes apresentam um diâmetro muito grande. Outra possibilidade é a excitação acústica gerada por um transdutor piezoeletrico onde o líquido é acelerado e desacelerado [35].

O núcleo do *microdrop* consiste de um capilar de vidro que é circulado por um transdutor de pressão. Quando um pulso elétrico é aplicado, o transdutor cria uma diferença de pressão no fluido interno ao capilar. Uma vez que a aceleração é muito grande, uma pequena gota é desprendida do sistema.

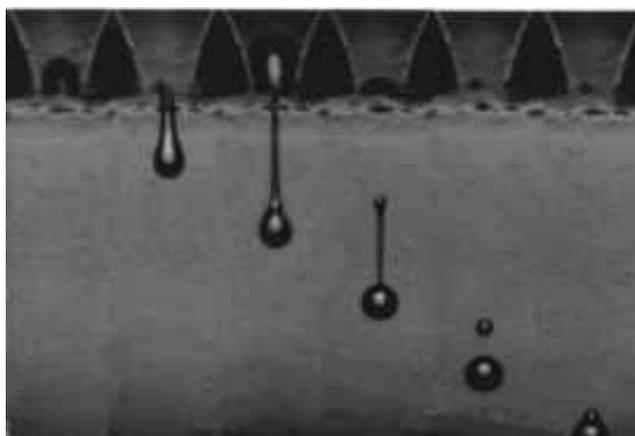


Figura 39 - Formação e percurso da gota de fluido [35]

As imagens da Figura 39 foram feitas com uma iluminação estroboscópica e dependendo do atraso ajustado no potenciômetro, pode-se verificar desde a formação da gota, seu desprendimento e o trajeto por ela percorrido.

A Figura 40 mostra o acionamento e uma representação do microdosador e seus componentes.

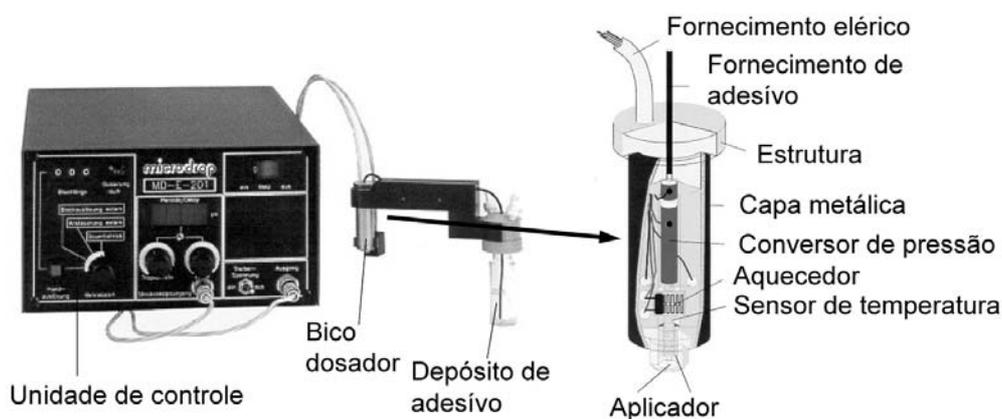


Figura 40 - Foto do acionamento eletrônico MD-E-201 e desenho esquemático identificando os componentes do aplicador de fluido

No caso do líquido não apresentar as características recomendadas de viscosidade, pode-se promover o aquecimento do fluido alterando, assim, sua viscosidade. Um termo atuador promove o controle de temperatura e, conseqüentemente, sua viscosidade. O controle de temperatura é garantido segundo uma variação de temperatura de 1°C.

4.2.2 Sistema de posicionamento

O sistema, inicialmente, desenvolvido por Burkhard [7], compreende um eixo de rotação e um eixo de translação paralelo ao eixo de rotação. O corpo do rebolo é montado coaxialmente no eixo de rotação e o bico dosador no eixo de translação do sistema. A sincronização da rotação da ferramenta com o movimento axial do bico dosador (*microdrop*) sob uma freqüência constante de formação da gota (Figura 41) permite obter uma distribuição dos pontos de cola conforme o projeto da ferramenta.

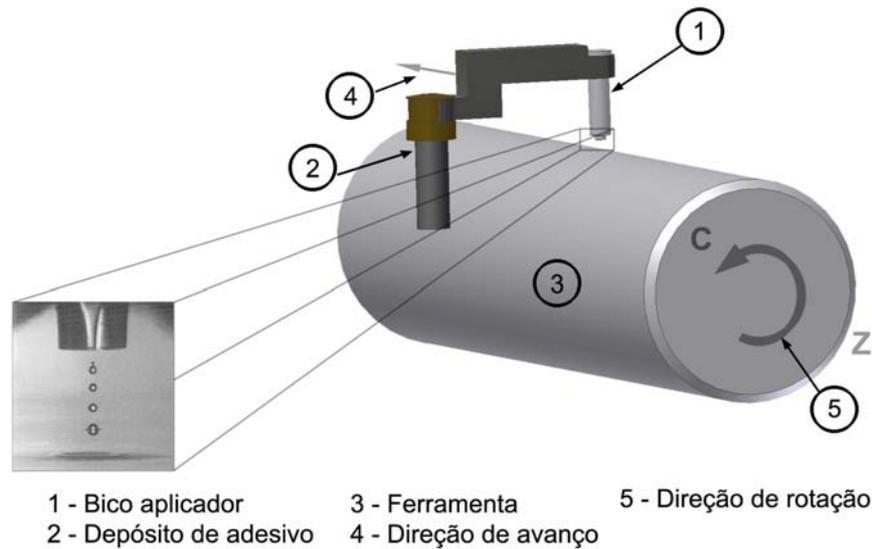


Figura 41 - Sistema dosador do processo de posicionamento de grãos

Uma otimização deste sistema foi obtida pela medição da rotação do corpo do rebolo com auxílio de um tacômetro incremental digital. Com isto se tornou possível corrigir imperfeições do padrão de pontos decorrentes de erros do movimento de rotação pela variação da frequência de aplicação das gotas, bem como gerar padrões de pontos com distribuição variável, exemplificado na Figura 42.

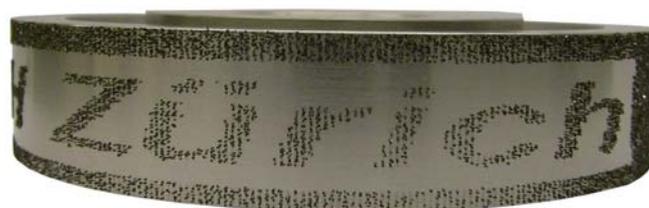


Figura 42 – Padrão de distribuição livre de grãos sobre o corpo do rebolo

O sistema aprimorado por Pinto [9] permite a construção de ferramentas com valores de ângulos variáveis e distância entre grãos segundo funções matemáticas, como mostrado na Figura 43.

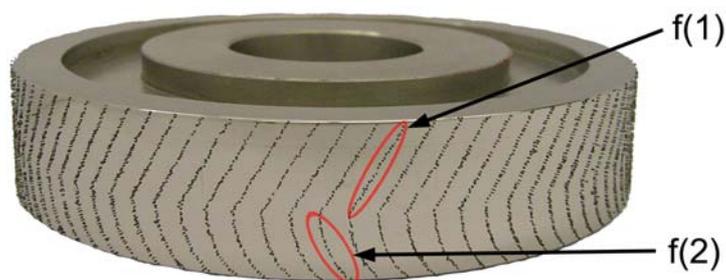


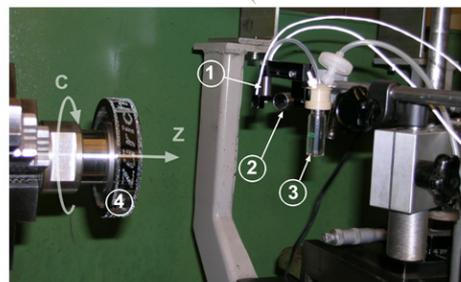
Figura 43 – Padrão de distribuição de grãos que obedece a uma função matemática

O sistema completo para a fabricação das ferramentas pode ser visualizado na Figura 44.



1 - Computador
2 - Osciloscópio

3 - Bico dosador
4 - Ferramenta



1 - Bico dosador
2 - Camera de vídeo
3 - Depósito de adesivo
4 - Ferramenta

Figura 44 – Protótipo do sistema para fabricação de ferramentas estruturadas montado em um torno universal

4.2.3 Projeção dos grãos abrasivos na ferramenta

Após a aplicação dos pontos de cola em toda a periferia da ferramenta é procedida a aplicação dos grãos abrasivos nos pontos de cola. Os grãos abrasivos selecionados são dispostos em uma bandeja acoplada a um sistema

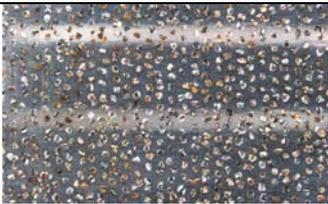
de vibração, montado sob o corpo do rebolo. A distância da bandeja à superfície de interesse do rebolo é de aproximadamente 10mm. A amplitude e frequência do sistema de vibração são selecionadas de tal forma que os grãos abrasivos dispostos na bandeja são projetados a uma altura de 10 a 15mm. O corpo do rebolo é posto em movimento de rotação e o sistema de vibração é ligado. Uma vez que a ferramenta apresenta os pontos de adesivo muito menores que o tamanho de grão, apenas um grão abrasivo adere a cada ponto de cola. O método adotado apresentou os melhores resultados quanto à formação de clusters.

As ferramentas seguem então para o ciclo de brasagem em uma empresa especializada [36].

4.3 Pré-validação do modelo

A pré-validação do modelo se deu com a comparação dos resultados obtidos na simulação e nos testes práticos efetuados com rebolos especificamente fabricados para estes ensaios. Um total de seis ferramentas foram fabricadas com três diferentes valores de Δx , parâmetro estrutural do rebolo que tem influência direta sobre a rugosidade.

Tabela 1 - Estrutura dos protótipos

Parâmetro de análise	Rebolo antes do processo de brasagem
$\Delta x = 0,5\text{mm}$	
$\Delta x = 1,25\text{mm}$	
$\Delta x = 2,0\text{mm}$	

Os valores de Δx são apresentados na Tabela 1.

Os outros parâmetros estruturais e os parâmetros de processos escolhidos para a realização da pré-validação são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros estruturais e de processo dos ensaios de pré-validação

Diâmetro da ferramenta	= 100mm
Largura da ferramenra	= 25mm
Δx	= 0,5; 1,25; 2,0mm
Δz	= 0,5mm
α	= 30°C
Máxima falha de grãos	= 3,75%
Presença de <i>clusters</i>	= 4,6%
Altura máxima dos grãos	= 0,08mm
Grão abrasivo	= ABN800 B251 forma selecionada
Material de solda	= CuSnTi based braze powder
Média da protusão dos grãos	= 66% do tamanho do grão
Q'_w	= 1mm ³ /(mm.s)
v_s	= 60m/s
a_e	= 0,25mm
Diâmetro da peça	= 50,7mm
Largura da peça	= 6 mm
Rotação da peça	= 1,5min ⁻¹

Os testes com protótipos foram realizados na retificadora S-31 do fabricante Fritz Studer AG, Figura 45. O processo de retificação escolhido foi a retificação de mergulho cilíndrica externa de desbaste. O material das peças utilizado foi aço ferramenta 1.2510 endurecido a 56 Rockwell C. Os ensaios consistiram na remoção de 156 mm³/mm, objetivando a impressão da topografia inicial do rebolo nas peças. Como a largura do rebolo é maior que a largura da peça, mais de um ensaio pode ser realizado para cada rebolo. Como fluido de corte, foi utilizado óleo de baixa viscosidade (especificações em anexo).



Figura 45 – Retificadora Studer S-31

Os corpos de prova foram analisados no Rugosímetro Taylor-Robson Form Talysurf Series 2 PGI, Figura 46. O apalpador utilizado nas medições tinha o raio de 0,2mm. As peças foram medidas na região logo após o último contato do rebolo. Quatro medições foram feitas para cada corpo de prova. A dispersão dos valores obtidos não foi significativa, assumindo-se apenas um valor de rugosidade para a análise.

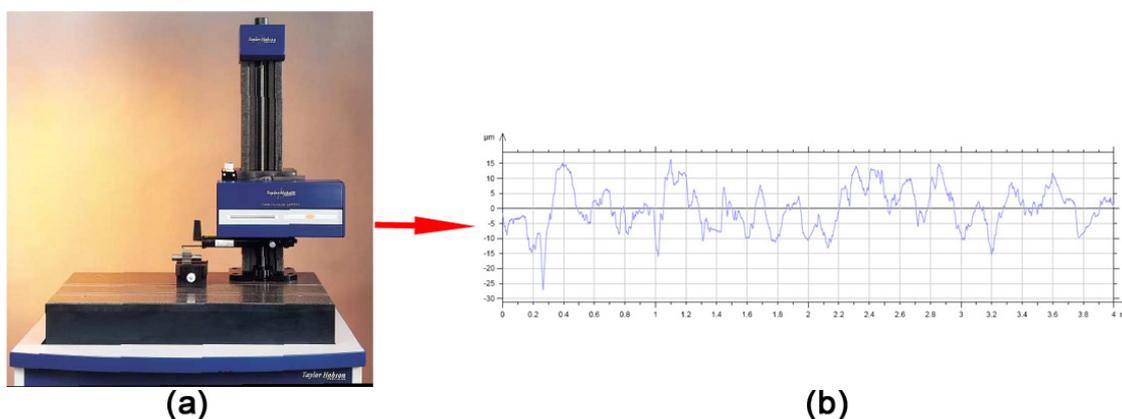


Figura 46 – a) Rugosímetro Taylor-Robson Form Talysurf Series 2 PGI e b) Exemplo de perfil medido no microscópio

Após a pré-validação do modelo, simulações de diferentes parâmetros foram realizadas. Cada parâmetro foi variado individualmente segundo a tabela Tabela 3.

Tabela 3 – Relação dos Parâmetros usados na simulação

Parâmetro	Valor	Unidade
Δx	[0,5 1,0 1,5 2,0]	mm
Δz	[0,5 0,75 1,0]	mm
D_p	[0 0.235 0,7 1,0]	mm
Altura do grão	[0 0,04 0,08]	mm
Ausência de grão	[0 3,75 5,0 8,0 10,0]	%
Presença de <i>clusters</i>	[0 4,61 10 15]	%
Velocidade de corte	[20 40 60 80 100 120]	m/s
Profundidade de corte	[0,1 0,25 0,5 1,0]	mm
Taxa de retificação	[0,5 1,0 5,0 10,0]	mm ³ /(mm.s)
Diâmetro da peça	[20 50 75 100]	mm
Tamanho do grão	[151 251 356]	μm
Forma do grão	*	
Condicionamento	[sem com]	

* As formas escolhidas para a realização das simulações foram 5 formas entre o cubo e o tetraedro em seguida apresentadas.

CAPÍTULO 5

Resultados

5.1 Resultados das análises das ferramentas

5.1.1 Formas do ABN800

Para obter uma informação sobre a distribuição das formas dos grãos de CBN fornecida pelo fabricante ELEMENT 6 (DeBeers) [29] com a especificação ABN800 B251, foi avaliada uma amostra de 224 grãos, segundo as formas de grão mostradas na Figura 47.

	ABN605				
	ABN200				ABN800
					
Forma	1	2	3	4	5
Incidência %	2,67	5,80	29,02	41,07	14,73

Figura 47 - Resultado da análise de forma de uma amostra de ABN800 B251

A forma de grão 4 apresentou a maior parcela dos grãos, contando com uma participação de 41,07%, seguido da forma de grão 3, com 29,02% e a forma de grão 5 com 14,73%. 2,67 % dos grãos se apresentaram da forma de octaedro perfeito (forma 1) e 5,8 % da amostra apresentaram a forma de grão 2. 6,71% dos grãos não puderam ser classificados segundo as formas mostradas na tabela da figura 47. A análise foi feita qualitativamente através da observação os grãos através do microscópio.

Numa primeira iteração do modelo matemático foi adotada uma distribuição da forma dos grãos uniforme, de acordo com informações fornecidas pelo fabricante (33% para cada uma das três formas do ABN800 B251). Para considerar a distribuição verificada na amostra real, se fizeram necessárias adequações do modelo adotado. A variação da forma do grão de octaedro para tetraedro (variação do tamanho do chanfro) que era determinada aleatoriamente dentro de uma distribuição uniforme é adequada pela equação 12 para a distribuição da amostra dos grãos de ABN800 B251 analisada.

$$\text{Chanfro} = -0,2326 \cdot \ln(\text{rand}) + 0,3 \quad (12)$$

Onde *rand* representa um número entre 0 e 1 gerado aleatoriamente pelo programa.

A parcela de grãos com a forma de grão 5 (tetraedro) mostrou uma porcentagem que não se adequou ao modelagem matemático, Figura 48. Para que fosse possível gerar aleatoriamente valores significativos dos resultados modelados, foi necessário inserir os valores de entrada separadamente para a forma cinco. Quando o valor aleatório gerado automaticamente se situava entre 0 e 0,1473 a forma de grão gerada era de forma tetraédrica. Para valores entre 0,1474 e 1,0000 a forma de grão era gerada segundo a equação 12.

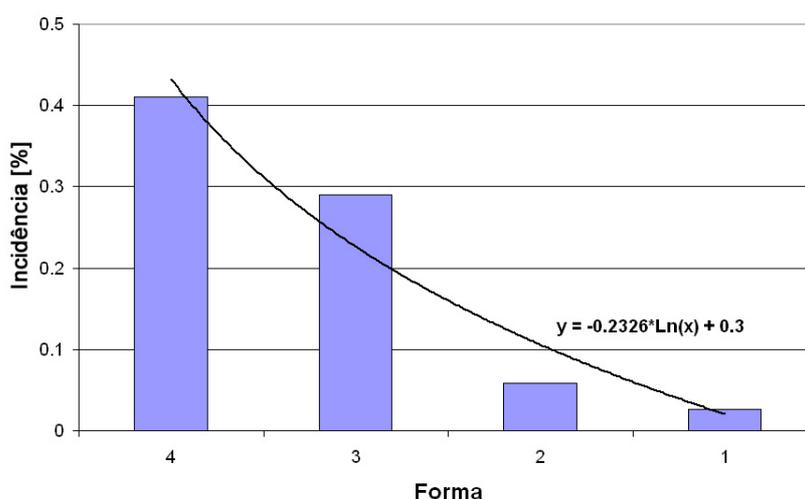


Figura 48 - Gráfico da distribuição da forma dos grãos de uma amostra de ABN800 B251

5.1.2 Distribuição dos pontos de cola

A distribuição dos pontos de cola sobre a ferramenta se apresenta com regularidade, porém se verificam desvios em relação à distribuição projetada. Na análise do posicionamento das gotas de adesivo real e nominal, feita segundo Montgomery [37], os segmentos analisados em cada ferramenta, bem como a comparação da distribuição das posições dos pontos de cola entre as ferramentas mostraram uma dispersão pequena. A distância entre os pontos de cola havia sido projetada com um afastamento de $370\mu\text{m}$ no eixo x e o resultado das medições mostra uma maior concentração dos afastamentos com $375\mu\text{m}$. A repetibilidade do posicionamento dos pontos de cola é verificada com uma segurança de 95%. Em todos os segmentos a distribuição dos pontos se mostrou normal.

A média da distância entre colunas e linhas não foi analisada por se tratar de um erro sistemático e corrigível no sistema de posicionamento. Para um total de 420 medições o desvio padrão obtido na direção x foi de $14\mu\text{m}$ e com 361 medições na direção z de $28\mu\text{m}$.

O diâmetro do ponto de cola nos segmentos analisados apresentou um diâmetro de $120\mu\text{m}$ como resultado um desvio de $3,7\mu\text{m}$ em seu raio.

5.1.3 Distribuição dos grãos

A projeção do grão abrasivo não coincide necessariamente com a projeção do ponto de cola. A análise do posicionamento dos grãos ainda deve levar em consideração a posição do gume ativo e sua projeção em relação ao centro do ponto de adesivo. O posicionamento do gume ativo é dependente ainda do tamanho do grão abrasivo e da dimensão do ponto de cola. Os três métodos descritos no item 4.1.1 foram avaliados para a determinação do desvio na posição do gume em relação à posição do ponto de cola. O método 1, apresentado na Figura 49, é o método de mais fácil implementação. Por superposição da fotografia da ferramenta com os pontos de cola (Figura 49 a)

e da fotografia da ferramenta com o grão abrasivo aplicado (Figura 49 b), foram quantificadas as distâncias entre o centro do ponto de cola e o centro da circunferência circunscrita à projeção do grão, (Figura 49 c).

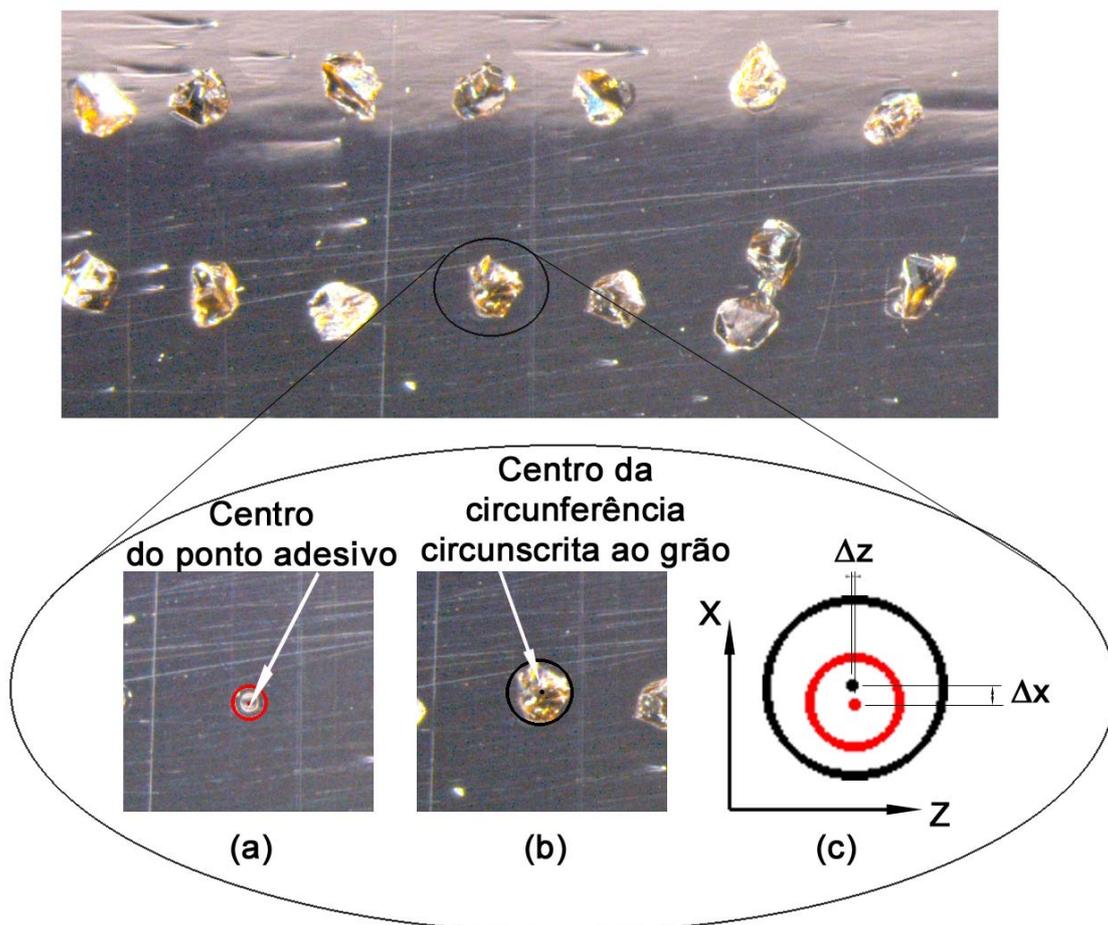


Figura 49 – Análise do posicionamento dos grãos pelo método 1 (circunferências circunscritas)

O método 2 consistiu na determinação da distância do centro do ponto de cola (Figura 50 a) ao centro da projeção do centro de geométrico da área superior do grão abrasivo (Figura 50 b). A identificação do centro de geométrico do topo dos grãos e a distância entre os dois centros (Figura 50 c) foi efetuada com auxílio do programa MATLAB.

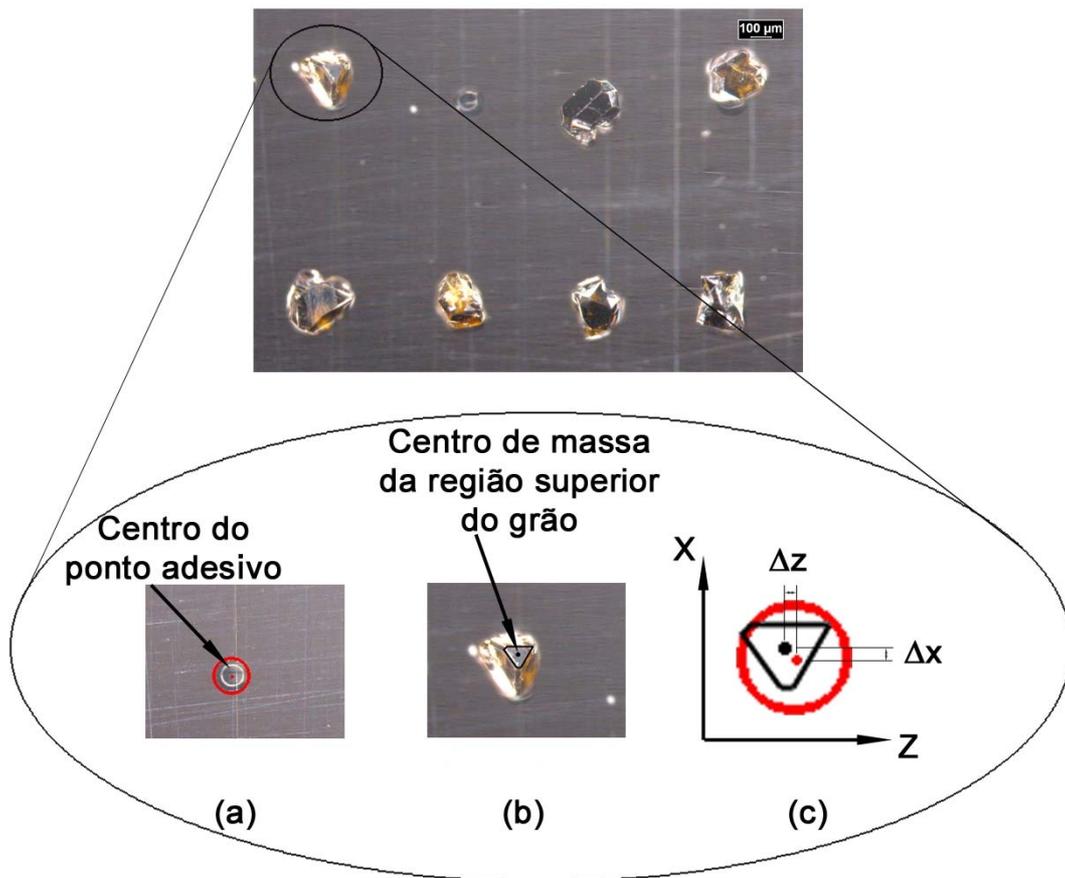


Figura 50 - Determinação da distância do centro do ponto de cola ao centro da projeção do centro de geométrico da área superior do grão abrasivo

O terceiro método consistiu na determinação da distância entre o centro do ponto de cola e a projeção do gume ativo do grão (maior elevação do grão), Figura 51.

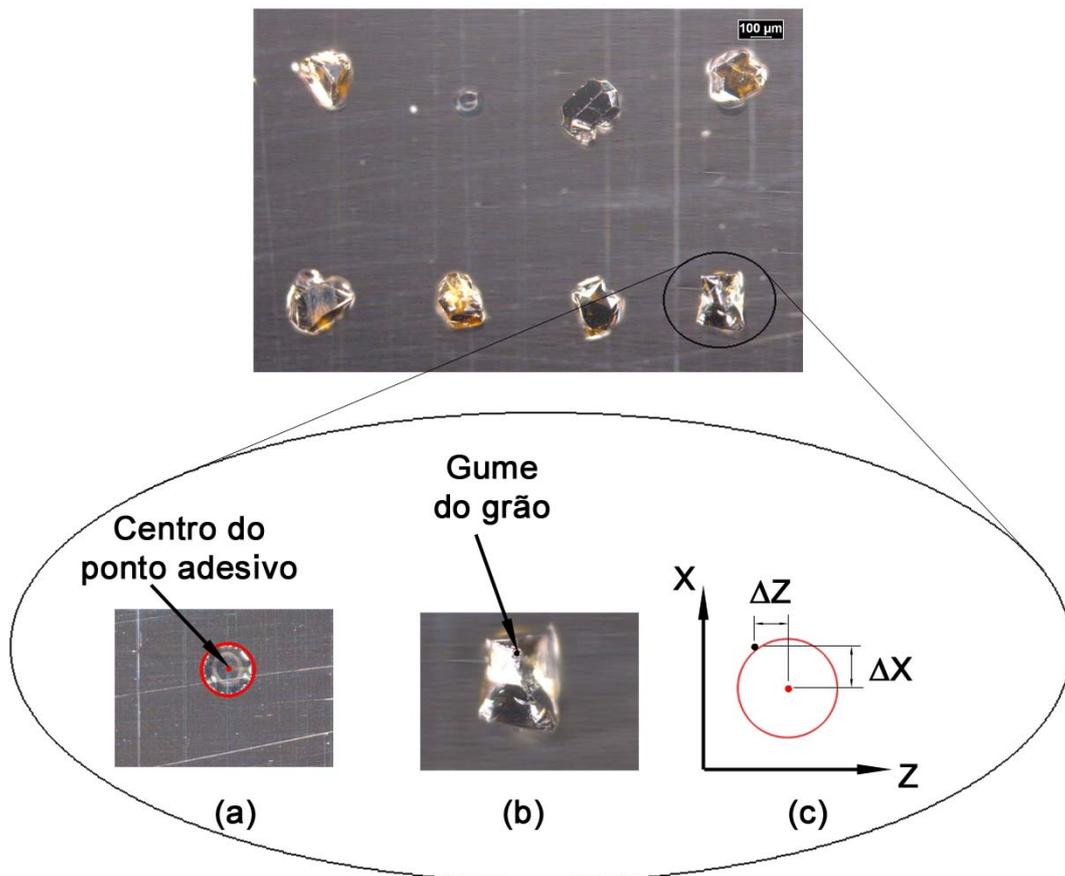


Figura 51 - Determinação da distância entre o centro do ponto de cola e a projeção do gume ativo do grão (maior elevação do grão)

As incertezas do posicionamento do grão, do centro de geométrico da região superior do grão e a posição do gume resultante em relação ao centro do ponto de cola, para cada caso, foram calculadas segundo as equações 13 e 14.

$$u = \sqrt{(u_{\text{diâmetro_grão}}^2 + u_{\text{posiçãoX}}^2 + u_{\text{posiçãoZ}}^2 + u_{\text{gume_grão}}^2)} \quad (13)$$

$$U = 2 \cdot u \quad (14)$$

A incerteza revelada pelo primeiro método foi de 154 μm e pelo segundo método de 175 μm . O maior valor de incerteza foi do método três, de 235 μm . Estes resultados mostram uma boa coincidência entre os métodos 1 e 2. Se for avaliada a interação de um grão abrasivo com a peça num processo de retificação, verifica-se que a região mais protusa do grão é responsável pelo

trabalho de remoção de material, o que valoriza mais o terceiro método de avaliação. Embora este método seja o mais trabalhoso para a determinação da posição da região mais elevada do grão, é o método que mais se aproxima da representação real da posição de um gume ativo na retificação. Por este fator as simulações foram efetuadas com os resultados obtidos pelo método de avaliação 3.

5.1.4 *Clusters* e falta de grão abrasivo

Para verificar irregularidades, como a formação de *clusters* ou a falta de grãos sobre pontos de cola, foram avaliados 1280 grãos posicionados em uma ferramenta construída segundo o procedimento padrão. O resultado desta análise é mostrado na Tabela 4.

Tabela 4 - Análise de clusters e ausência de grãos abrasivos

Número de posições analisados	1280	
Falta de grãos	48	3,75%
Presença de clusters	59	4,61%

5.2 Pré-validação do modelo geométrico

A pré-validação do modelo geométrico foi feita com a comparação de valores de rugosidade obtidos nas simulações e os valores de rugosidade obtidos nos testes práticos de retificação. Os testes práticos foram realizados com os mesmos parâmetros e as mesmas condições em processo que os valores de entrada no modelo numérico. Um total de quatro ensaios foi realizado para cada parâmetro. Para a análise foi usada a variável estrutural da ferramenta Δx abrangendo os valores de 0,5; 1,25 e 2,0mm (Figura 52). Os demais parâmetros estruturais da ferramenta são mostrados na Tabela 5. Nos 12 ensaios realizados verificou-se uma pequena dispersão nos valores das rugosidades medidas, com exceção de um ensaio realizado com o parâmetro

Δx de 1,25mm, no qual se obteve um valor da rugosidade bem acima dos demais. A causa desta elevação do valor da rugosidade foi relacionada ao processo de fabricação do rebolo, podendo ter origem na inclusão de um grão fora do padrão ou um ponto de brasagem mais espesso, elevando a protusão de um ou mais grãos. Em decorrência este ensaio foi desconsiderado.

Tabela 5 – Parâmetros de ferramenta adotados nos rebolos

Diâmetro da ferramenta $D_{wz} = 100\text{mm}$	Falha de grãos = 3,75 %
Largura da Ferramenta $S_b = 25\text{mm}$	Formação de clusters = 4,6 %
Estrutura dos grãos	Grãos = ABN800 B251 (Forma selecionada)
$\Delta x = [0,5; 1,25; 2,0] \text{ mm}$	Material de brasagem = CuSnTi
$\Delta z = 0,5\text{mm}$	Média da protusão do grão = 66% do tamanho do grão
$\alpha = 30^\circ$	

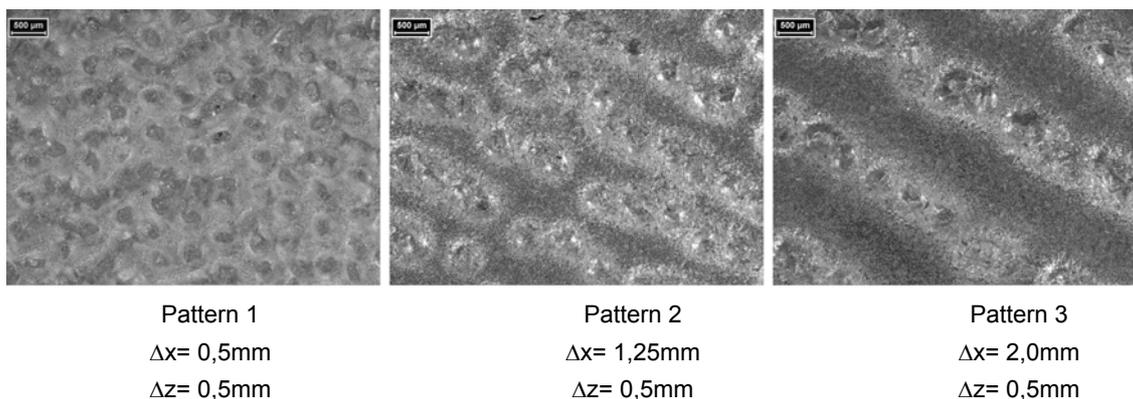


Figura 52 – Exemplos dos rebolos usados na pré-validação do modelo

Uma análise estatística dos valores medidos e simulados foi realizada uma vez que os testes e simulações foram realizados quatro vezes para cada parâmetro. Os valores a mostrados a seguir apresentam um grau de confiança de 95%. Os valores de R_a são apresentados na Figura 53 e as tendências reveladas na simulação se confirmaram nos testes.

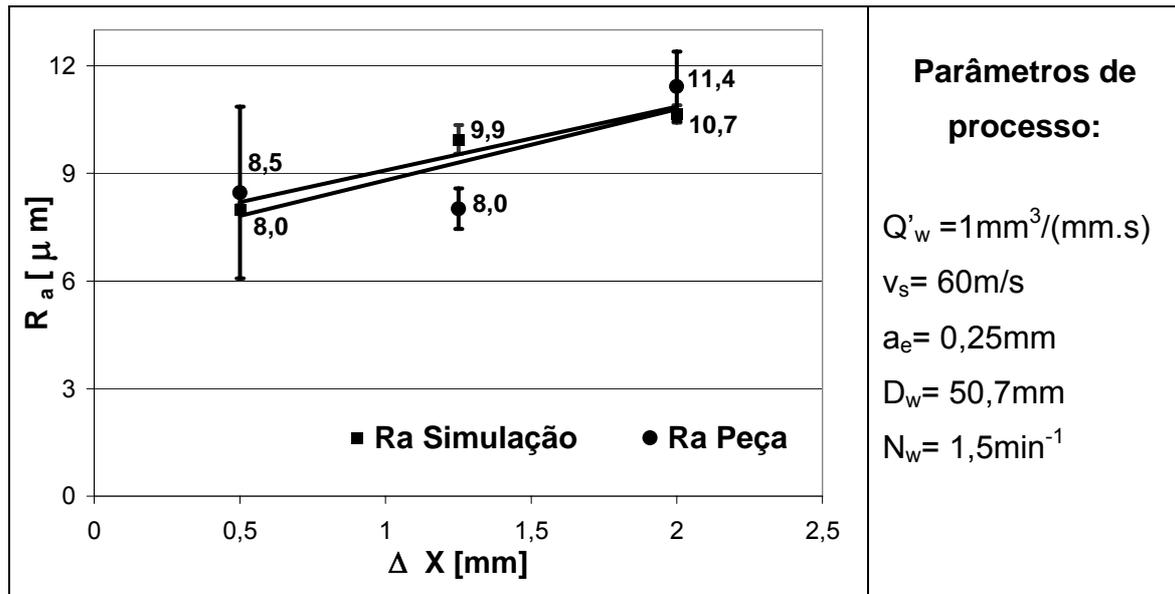


Figura 53 – Comparação dos valores de R_a da peça e obtidos na simulação

Os valores de R_t obtidos são mostrados na Figura 54 e também revelaram tendências semelhante.

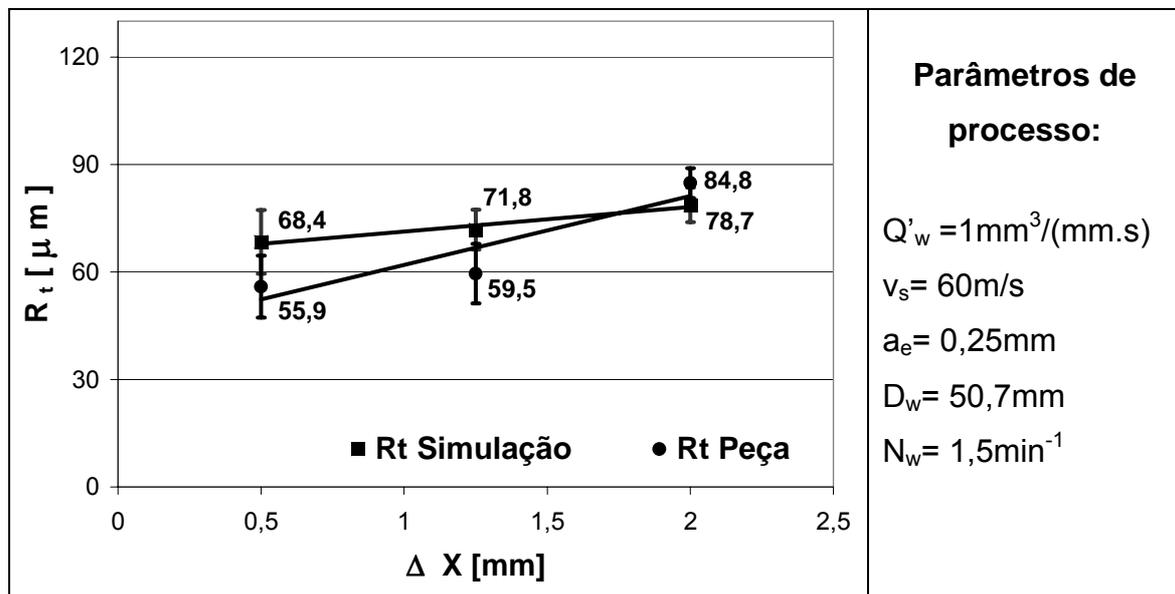


Figura 54 - Comparação dos valores de R_t da peça e obtidos na simulação

O modelo numérico foi pré-validado. Simulações utilizando diferentes parâmetros foram, então, realizadas para avaliar o comportamento de ferramentas estruturadas.

5.3 Simulação numérica da retificação com ferramentas estruturadas

A simulação de ferramentas estruturadas tem por objetivo avaliar as influências dos parâmetros de construção assim como as dos parâmetros variáveis de operação dessas ferramentas. Os parâmetros escolhidos para fazer essa análise foram:

- Parâmetros da ferramenta: Δx , Δz , desvio da posição do gume, altura do grão em relação à base da ferramenta, ausência de grãos abrasivos, porcentagem de *clusters*, forma e tamanho do grão abrasivo;
- Parâmetros de processo: taxa de retificação (Q'_w), velocidade de corte (v_s), profundidade de corte (a_e), diâmetro da peça (D_w) e condicionamento.

Todos os resultados das simulações de ferramentas estruturadas mostrados a seguir consideram os resultados apresentados de desvios de posição, presença de *clusters*, falta de grãos e distribuição da forma dos grãos implementados ao modelo.

A ferramenta modelada considera um comportamento estocástico no posicionamento, forma e tamanho dos grãos. Essa consideração decorre do fato que durante a fabricação de ferramentas, os grãos abrasivos não assumem a posição exata que foi inicialmente projetada. Mesmo possuindo uma posição conhecida, essa posição apresenta um pequeno desvio entre posicionamento teórico e real dentro de uma distribuição uniforme. Por conseqüência, as ferramentas se apresentam diferentes entre si. Uma análise estatística foi efetuada em cada parâmetro para que os resultados apresentem uma faixa de probabilidade de ocorrência com um nível de confiabilidade de 95%. Cada parâmetro foi simulado quatro vezes. O tempo de simulação das ferramentas foi cerca de seis horas por ferramenta, cada uma com 100,0mm de diâmetro e 15,0mm de largura e estruturas base de $\Delta x = 1,0\text{mm}$ e $\Delta z = 0,5\text{mm}$. Ferramentas mais densas como foi o caso das ferramentas com $\Delta x = 0,5\text{mm}$ e $\Delta z = 0,5\text{mm}$ tiveram um tempo de simulação de até quarenta horas por ferramenta. A longa duração das simulações decore do fato do modelo ser

tridimensional. A necessidade de um modelo 3D, nesse caso é, justificada para a futura simulação das forças de retificação (etapa também prevista no projeto).

As características do processo, peça e da ferramenta padrão adotada foram:

Ferramenta

$D_{wz} = 100\text{mm}$, $S_b = 15\text{mm}$, $\Delta_z = 0,5\text{mm}$, $\Delta_{z2} = 0,2\text{mm}$,

Altura do grão = 0mm , $\alpha = 30^\circ$,

Probabilidade de presença de clusters = $4,6\%$,

Probabilidade da ausência de grãos = $3,75\%$,

Grão Abrasivo

ABN800 B251 Forma Seleccionada

Parâmetros de processo

$Q'_w = 1\text{mm}^2/\text{s}$, $v_{fr} = 0,377\text{mm}/\text{min}$, $v_s = 60\text{m}/\text{s}$, $a_e = 0,25\text{mm}$

Peça

$D_w = 50,7\text{mm}$, $v_w = 1,52\text{min}^{-1}$

5.3.1 Avaliação dos parâmetros de estrutura Δx e Δz

Nos parâmetros da estrutura Δx e Δz , a maior distância entre os grãos revelou maior valor da rugosidade. Na adoção de intervalos maiores para as mesmas dimensões de ferramentas, a densidade do rebolo é reduzida e resulta em superfícies mais ásperas.

O aumento do intervalo entre grãos Δx , que é a distância dos grãos na direção de rotação da ferramenta, provoca um maior carregamento nos grãos em função do aumento na profundidade de corte em cada grão. Os valores da rugosidade aumentam com o aumento da distância entre os grãos no eixo de rotação da ferramenta segundo mostra a Figura 55.

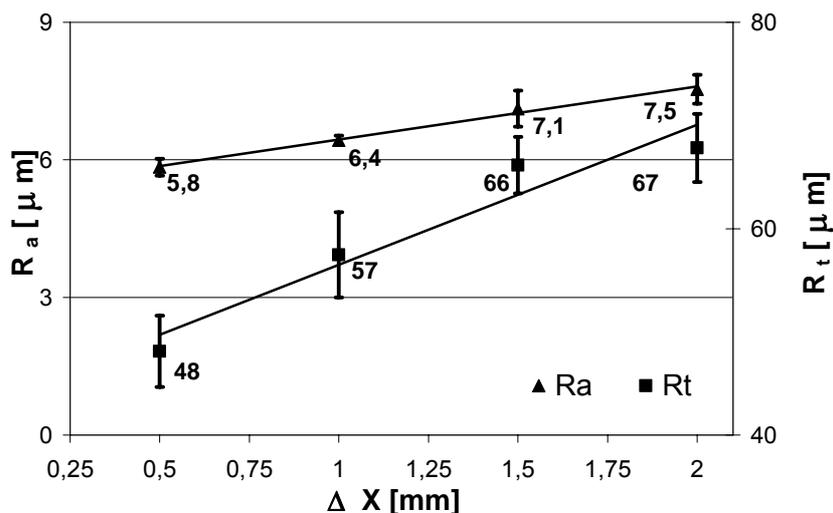


Figura 55 – Resultado da simulação de ferramentas variando o parâmetro Δx

Em ferramentas densas, os grãos abrasivos se sobrepõem durante o processo. Essa sobreposição reduz a quantidade de material removido por grão e revela menores valores de rugosidade. O aumento da distância entre grãos no eixo axial da ferramenta representado por Δz reduz a sobreposição dos grãos na direção de rotação da ferramenta e tende a gerar peças mais ásperas, como mostrado na Figura 56.

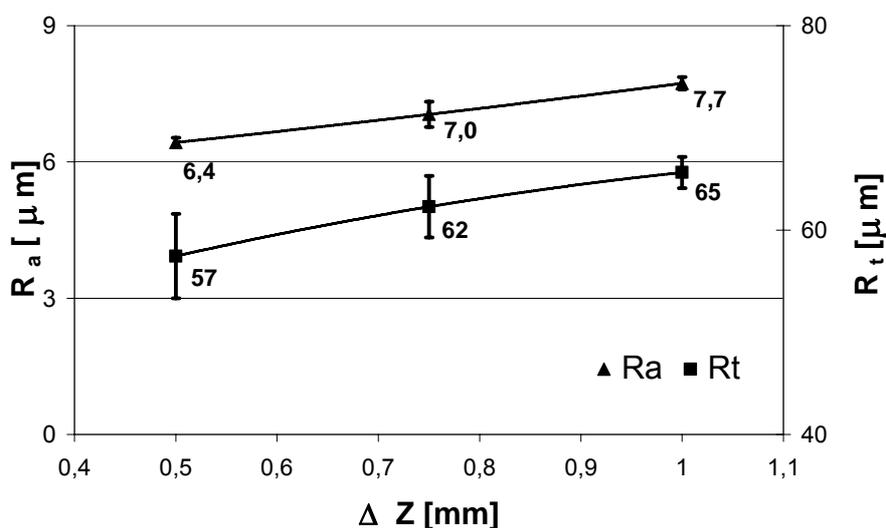


Figura 56 - Resultado da simulação de ferramentas variando o parâmetro Δz

Os resultados obtidos com a simulação de ferramentas estruturadas podem ser comparados com dados da literatura ([4]) que abordam a qualidade da superfície em ferramentas convencionais. Em ferramentas convencionais,

apesar da distribuição de grãos não ser regular, a redução da densidade de grãos da ferramenta resulta no aumento da rugosidade já mostrado na Figura 3.

O aumento da densidade de grãos das ferramentas implica em valores menores de rugosidades, mas também na redução do espaço entre grãos para o fluxo de fluido de corte e para a remoção dos cavacos da área de trabalho. Essa redução de espaço entre os grãos influencia negativamente o desempenho dessas ferramentas desenvolvidas especialmente para altas taxas de remoção de material.

5.3.2 Avaliação do desvio da posição do gume

O aumento do desvio da posição do gume em relação à região D_p reflete uma tendência constante dos valores da rugosidade, Figura 57. É importante ressaltar o aumento do intervalo de confiança dos resultados de R_a à medida que esse desvio cresce.

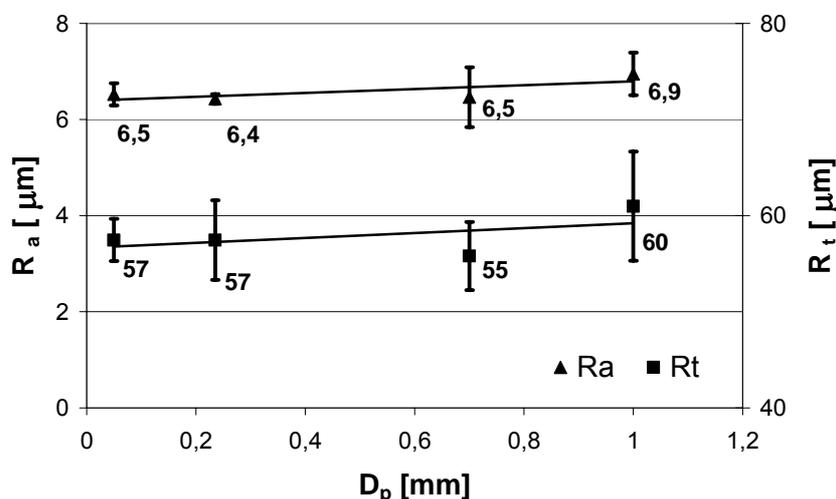


Figura 57 - Resultado da simulação de ferramentas variando o parâmetro desvio de D_p

A manutenção dos valores de rugosidades pode ser explicada em função do número de grãos distribuídos na periferia do rebolo ser o mesmo em todos os casos. Com o aumento da região D_p o carregamento em cada grão é que passa a ser mais irregular, mas o número de grãos em ação é mantido

constante. Sendo os grãos abrasivos posicionados em certa região, esse desvio faz a ferramenta perder as características da estrutura, mas não influencia o seu desempenho.

5.3.3 Avaliação da altura do grão abrasivo em relação à ferramenta

O processo de brasagem provoca variação na altura dos grãos abrasivos em relação ao corpo da ferramenta. Essa elevação na altura do grão se apresenta na variação da altura do gume dos grãos e revela, como esperado, maiores valores de rugosidade (Figura 58).

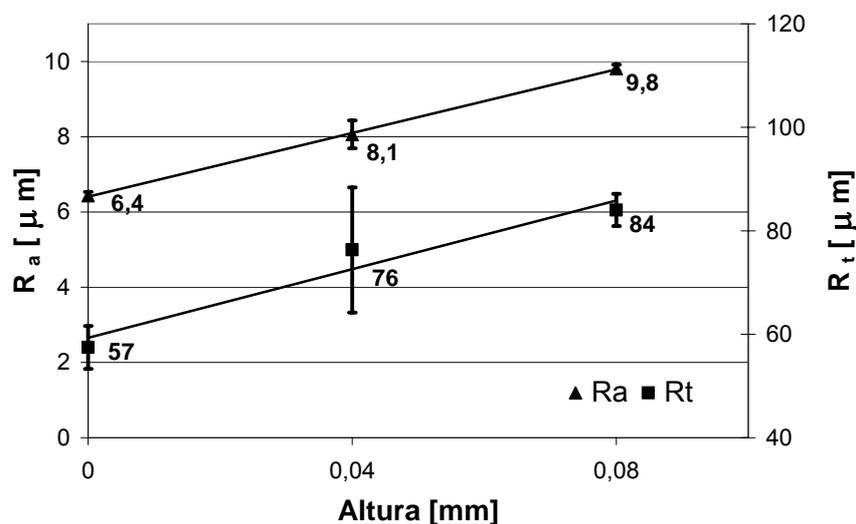


Figura 58 - Resultado da simulação de ferramentas variando o parâmetro altura do grão em relação ao corpo da ferramenta

A altura que o grão está situado na ferramenta tem uma forte influência sobre o resultado da rugosidade e desvios de $80\ \mu\text{m}$ nesse posicionamento podem resultar em diferenças de até 35% no valor final da rugosidade em comparação às ferramentas nas quais os grãos estão localizados diretamente sobre o corpo da ferramenta. A piora na rugosidade resulta da diminuição dos gumes ativos. A variação na altura dos grãos abrasivos em relação à ferramenta é se trata de um defeito no processo de brasagem e pode ser corrigida através do processo de *crushieren*.

5.3.4 Avaliação da ausência de grãos abrasivos

A ausência de grãos abrasivos é crítica quando analisada junto com os esforços aplicados aos grãos durante o processo. A ausência de um grão abrasivo implica na sobrecarga do grão seguinte, o qual deverá remover duas vezes o volume de material para ele projetado. O aumento do volume removido pelo grão seguinte ao ausente resulta no leve aumento da rugosidade, no entanto esse aumento é localizado, Figura 59. Enquanto a perda de grãos é localizada, uniformemente distribuída na periferia do rebolo, a influência sobre a rugosidade é desprezível. Só quando a perda de um grão acarreta a perda de uma fileira de grãos sobre toda a periferia do rebolo, a rugosidade é fortemente influenciada, representando o fim de vida pelo colapso da ferramenta.

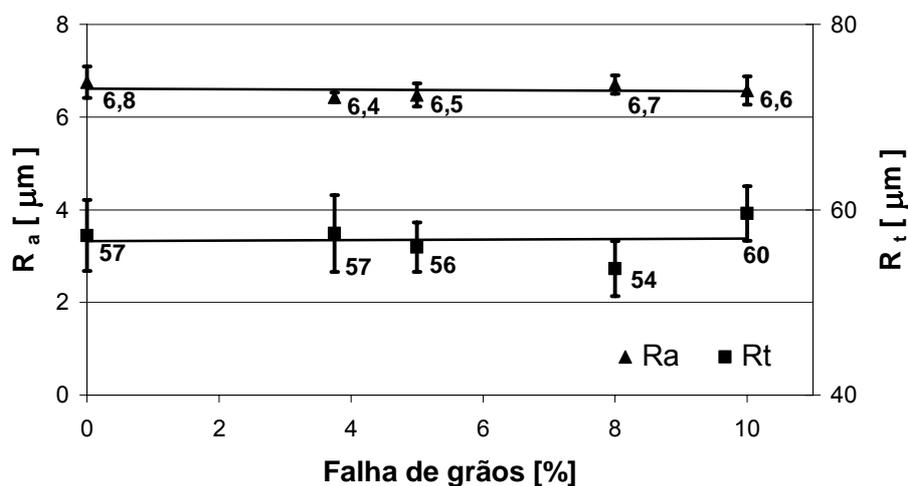


Figura 59 - Resultado da simulação de ferramentas variando o parâmetro falha de grãos abrasivos

A manutenção constante da rugosidade mesmo com a ausência de grãos só indica que o número de gumes ativos, mesmo nas ferramentas estruturadas simuladas, não é muito alterado com a ausência de grãos abrasivos.

5.3.5 Avaliação da presença de clusters

A formação de clusters foi observada com no máximo dois grãos localizados lado a lado sobre um ponto de cola. A formação clusters é

indesejada em ferramentas estruturadas, pois o aumento no número de grãos não agrega qualidade à ferramenta e aumenta o custo devido ao aumento do número de grãos abrasivos empregados. A simulação de ferramentas com *clusters* em até 15% do número total de pontos adesivos mostrou valores médios constantes de rugosidade R_a e R_t , como mostrado na Figura 60.

A presença de *clusters* tem efeito negativo no fluxo de fluido de corte, pois diminui o espaço para fluxo de fluido de corte e cavacos, o que pode levar a sobrecarga térmica na ferramenta. O aumento de gumes não altera o número de gumes ativos e mantém a rugosidade constante. Um efeito negativo é o aumento no custo da ferramenta devido à inclusão desnecessária de grãos superabrasivos.

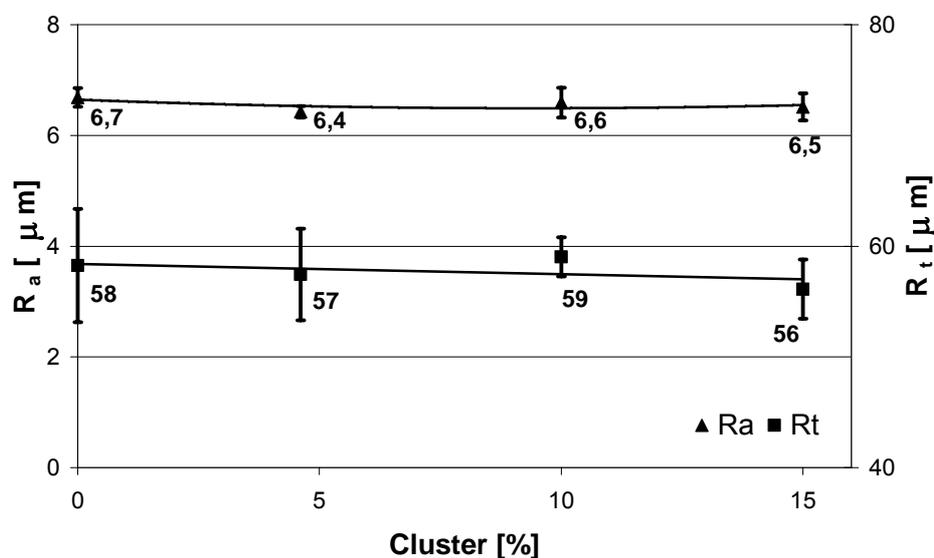


Figura 60 - Resultado da simulação de ferramentas variando o parâmetro *clusters*

5.3.6 Avaliação da forma dos grãos abrasivos

A forma do grão abrasivo revela diferentes agressividades da ferramenta. Rebolos fabricados com grãos bem definidos, como cubo, octaedro e tetraedro resultam em superfícies mais ásperas segundo as simulações apresentadas na Figura 61.

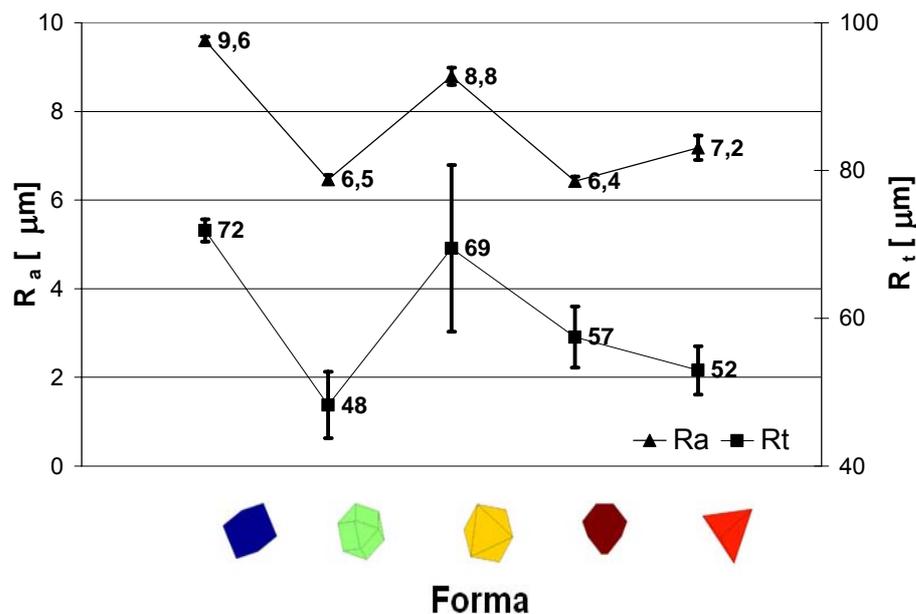


Figura 61 - Resultado da simulação de ferramentas variando o parâmetro forma dos grãos

O valor da rugosidade pode apresentar até 32% de diferença nos valores em função da adoção de grãos abrasivos com diferentes formas. Isso aumenta a importância na escolha também da forma do grão abrasivo quando o objetivo principal das ferramentas é a superfície da peça retificada.

5.3.7 Avaliação do tamanho dos grãos abrasivos

Segundo tendências já citadas no capítulo 1 por Winter [4] (Figura 3), grãos de tamanhos maiores resultam em valores também maiores de rugosidade, aqui (Figura 62) mostrado tanto para R_a quanto R_t .

As simulações foram realizadas com o mesmo valor para a região D_p . Como já abordado, o tamanho dessa região D_p é dependente do tamanho do ponto de cola (que nesse caso é dependente principalmente das condições da superfície da ferramenta) e do tamanho do grão abrasivo. No entanto, os valores de rugosidade se mostraram expressivos com o parâmetro tamanho de grão. Quando o grão abrasivo dobra de tamanho, o valor da rugosidade da superfície também dobra. Isso indica que sem um condicionamento prévio da

ferramenta, a rugosidade desejada na peça é determinada pelo tamanho do grão escolhido.

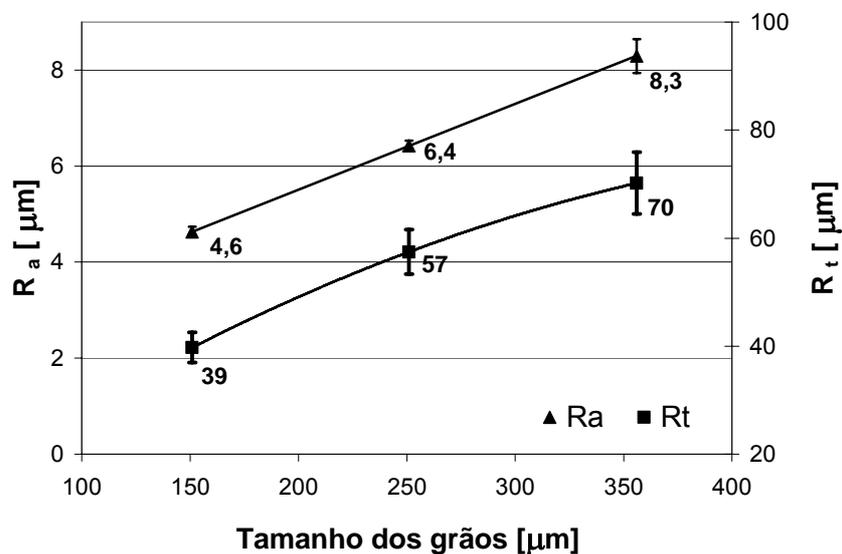


Figura 62 - Resultado da simulação de ferramentas variando o parâmetro tamanho dos grãos abrasivos.

5.3.8 Taxa de retificação (Q'_w)

O aumento da velocidade de mergulho diminui a qualidade da superfície retificada. O aumento da rugosidade decorre do aumento da espessura dos cavacos provocado pela elevação da taxa de retificação específica [3]. O comportamento da rugosidade, assim como outros parâmetros influenciados pela alteração da taxa de retificação específica em ferramentas convencionais, é mostrado na Figura 63.

O comportamento em ferramentas estruturadas acompanhou a mesma tendência crescente dos valores da rugosidade R_a e R_t . Com o aumento da taxa de retificação específica, cada grão remove maior quantidade de material, o que implica em maiores valores de rugosidade (Figura 64).

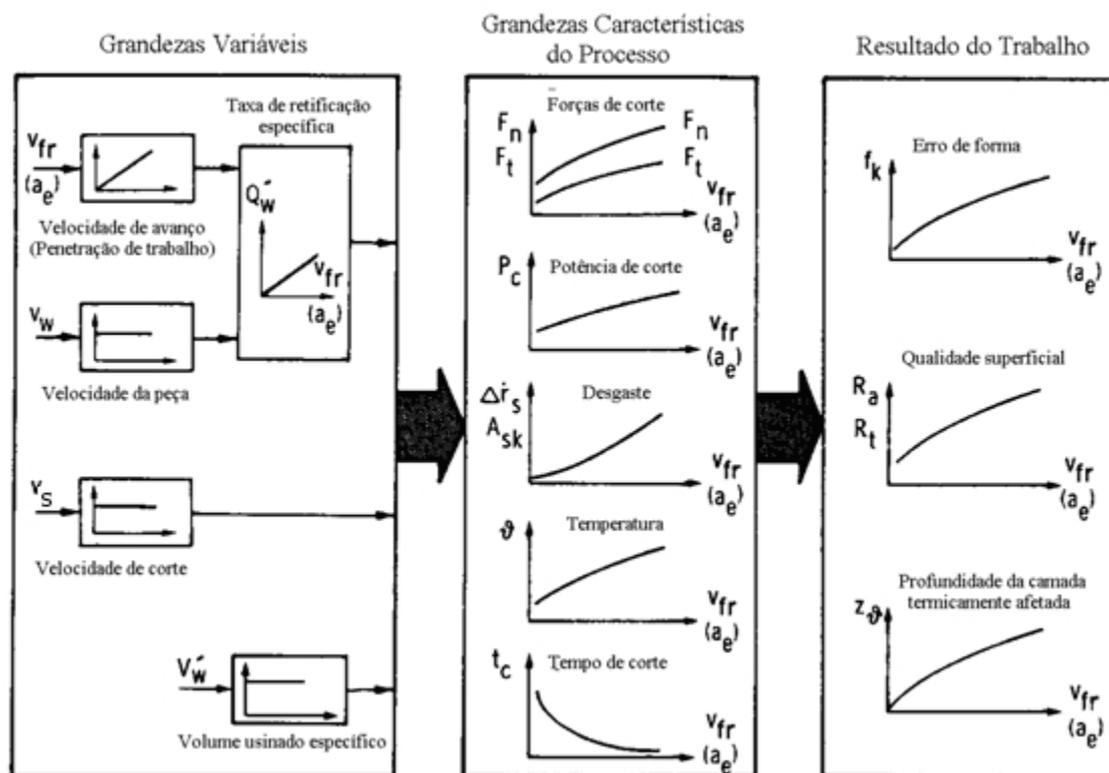


Figura 63 – Influências da variação da taxa de retificação em ferramentas de retificação convencionais [2]

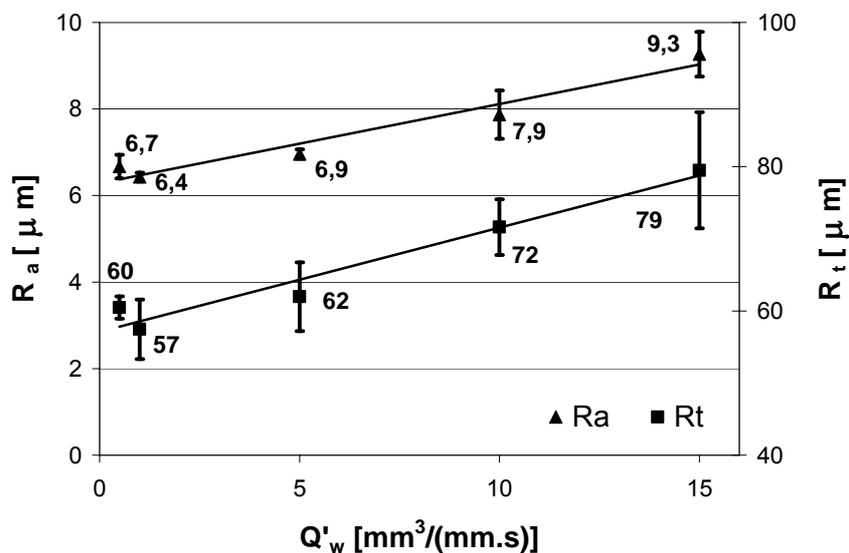


Figura 64 - Resultado da simulação de ferramentas variando o parâmetro taxa de retificação

5.3.9 Velocidade corte (v_s)

O aumento na velocidade de corte em ferramentas convencionais exerce uma influência favorável sobre o desgaste do rebolo e sobre a qualidade da superfície da peça, Figura 65. Uma diminuição da rugosidade é obtida com o aumento da velocidade de corte, causada pelas menores seções de usinagem, que ocorrem apesar da diminuição do número de gumes cinemáticos [3].

Em ferramentas estruturadas, a variação dos valores de rugosidade R_a apresentados com o aumento da velocidade de corte permanecem dentro da faixa de incerteza apresentada pelas simulações (Figura 66). Uma razão para esse valor permanecer constante é a diminuição do número de gumes cinemáticos em ferramentas estruturadas com o aumento da velocidade de corte, praticamente compensando a diminuição da espessura de usinagem observada em ferramentas convencionais dressadas.

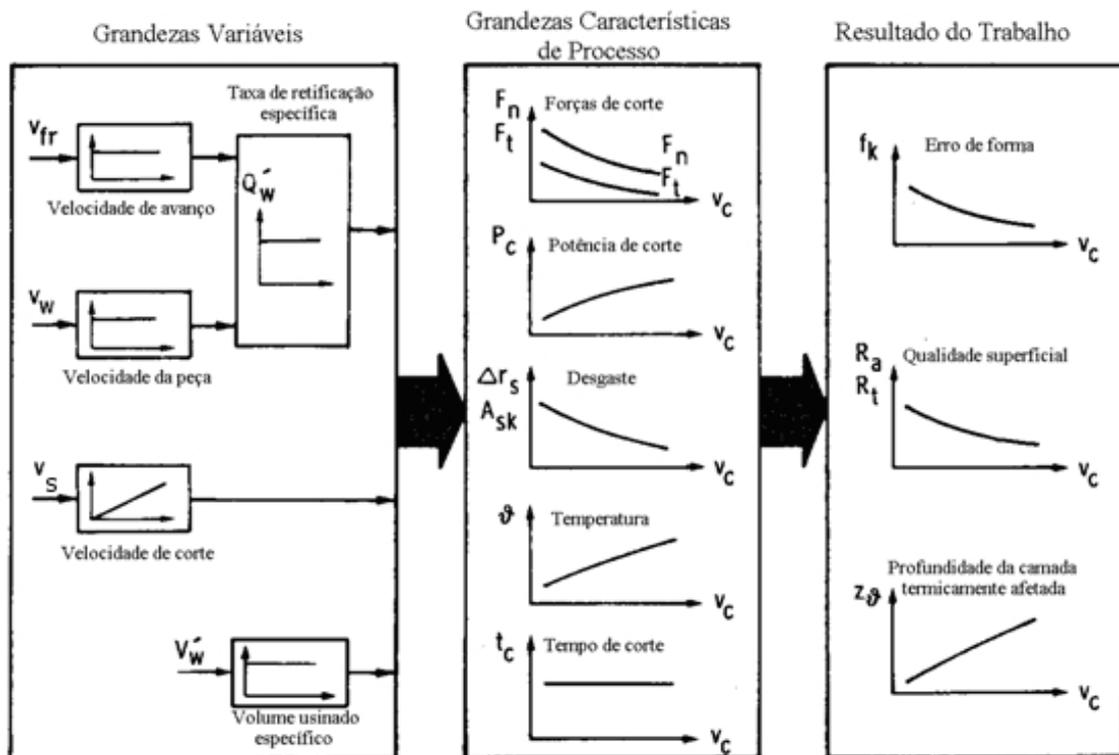


Figura 65 - Influências da variação da velocidade de corte em ferramentas de retificação convencionais [2]

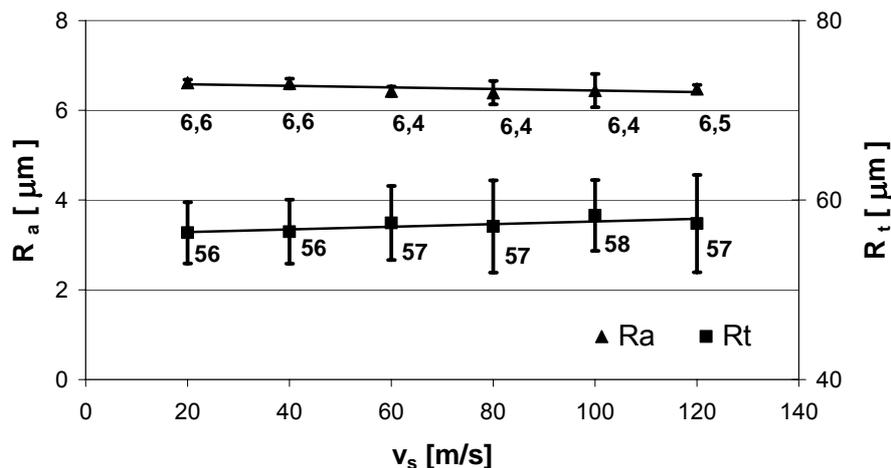


Figura 66 - Resultado da simulação de ferramentas variando o parâmetro velocidade de corte

5.3.10 Penetração de trabalho (a_e)

Com o aumento da penetração de trabalho, mantendo a taxa de retificação constante, a qualidade da superfície retificada é pouco influenciada, pois acarreta numa diminuição da velocidade da peça. Com o aumento da penetração de trabalho e respectiva diminuição da velocidade da peça, verifica-se uma diminuição da espessura de usinagem, acarretando uma diminuição do número de gumes ativos. Estes fatos fazem com que a rugosidade se mantenha aproximadamente nos mesmos valores, Figura 67.

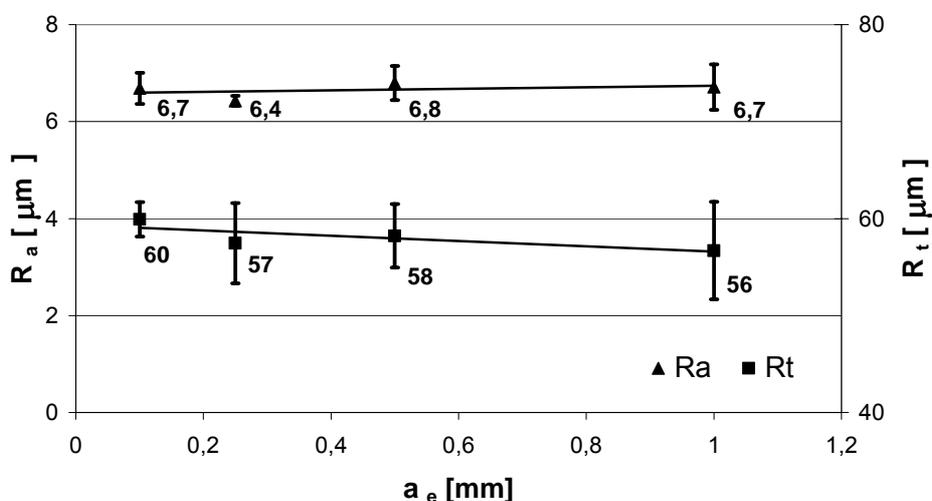


Figura 67 - Resultado da simulação variando o penetração de trabalho com manutenção da taxa de retificação

5.3.11 Diâmetro da peça

Na retificação cilíndrica de mergulho, mantendo-se a taxa de retificação constante, um aumento do diâmetro da peça leva a um aumento no comprimento de contato entre o rebolo e a peça, diminuindo a espessura de usinagem (\bar{h}_{cu}). O efeito de diminuição de rugosidade provocado pela diminuição da espessura de usinagem é compensado pela diminuição do número de gumes ativos, que eleva a rugosidade. Com a superposição desses dois efeitos, a rugosidade simulada se mantém praticamente constante, Figura 68.

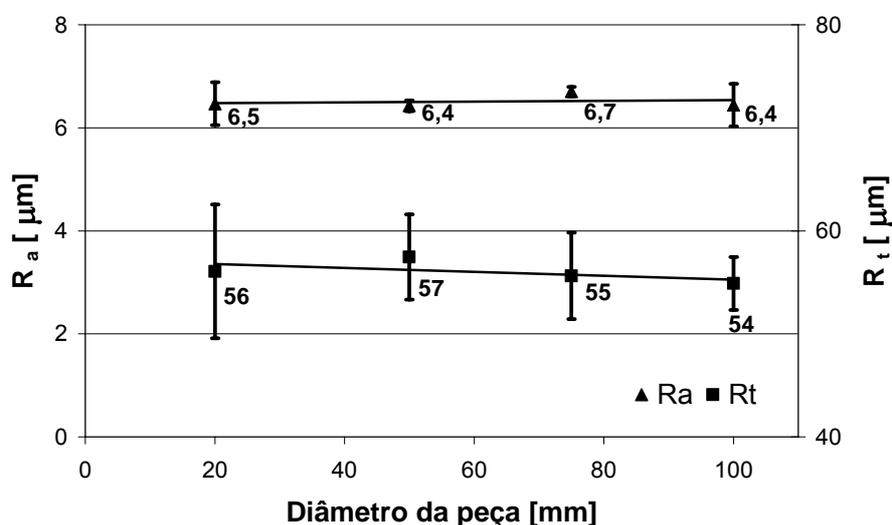


Figura 68 - Resultado da simulação de ferramentas variando o diâmetro da peça

5.3.12 Condicionamento

O objetivo da operação de *crushieren* da ferramenta estruturada antes do primeiro uso é a uniformização da protusão dos gumes. Uma vez que os gumes apresentam a mesma protusão, a remoção de material por grão é bastante uniforme. Essa uniformização resulta numa substancial redução do valor da rugosidade na peça assim como observado na Figura 69. Na simulação foi gerada uma ferramenta com distribuição de grãos, conforme efetuado nas simulações anteriores. Com a distribuição irregular da protusão foram gerados os valores da rugosidade R_t e R_a de $50,38\mu\text{m}$ e $7,22\mu\text{m}$, respectivamente. Simulando o com *crushieren* desta mesma ferramenta, ou

seja, mantendo a distribuição e densidade de grãos, obtiveram-se valores de rugosidade R_t e R_a de $1,79\mu\text{m}$ e $0,26\mu\text{m}$, respectivamente. A redução na rugosidade apresentada depois do condicionamento é bastante considerável se mostrando cerca de 30 vezes menor depois da operação. Esse resultado chama a atenção para a importância desse processo antes da utilização da ferramenta.

De acordo com o volume de material removido da peça ocorre a redução da rugosidade da superfície em função do desgaste dos grãos que tendem a apresentar alturas semelhantes entre si. Essa semelhança na altura também confere estabilidade à ferramenta. Uma vez que essa homogeneização na altura dos grãos é feita antes do início da utilização da ferramenta, o rendimento do rebolo será aumentado.

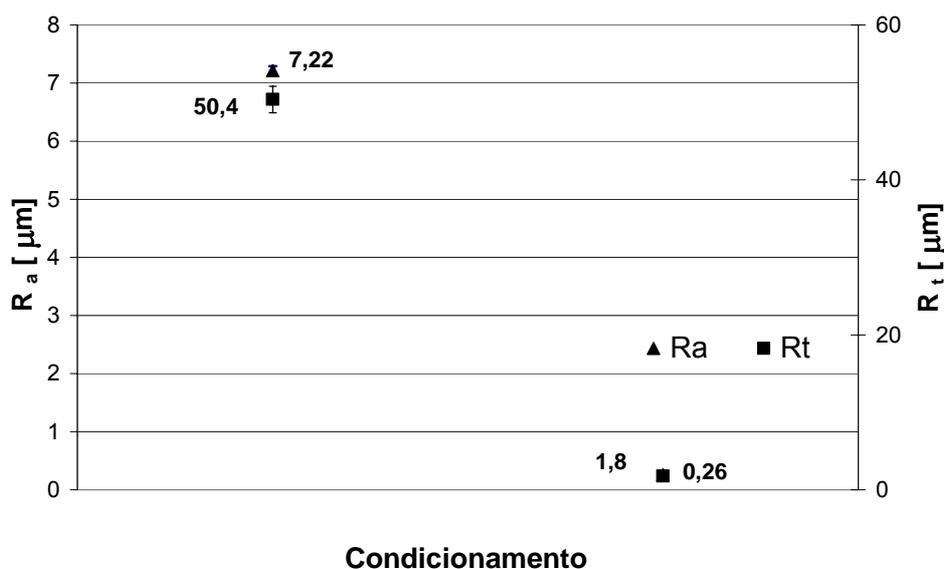


Figura 69 - Resultado da simulação de ferramentas variando o parâmetro de condicionamento da ferramenta

CAPÍTULO 6

Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

6.1 Conclusões

Um modelo geométrico para a determinação da superfície da peça gerada na retificação de mergulho cilíndrica externa com ferramentas estruturadas, EGTs, foi desenvolvido. O modelo de ferramentas estruturadas considera como variáveis: a variação na forma e tamanho dos grãos abrasivos, a orientação destes grãos na periferia do rebolo, a posição do gume em relação ao centro do ponto de cola, a presença de *clusters* e a falta de grãos abrasivos. O modelo aplica o método de simulação de Monte-Carlo, que gera continuamente valores aleatórios para variáveis na simulação de um modelo. A interferência dos grãos abrasivos com a peça, típica para o processo de retificação foi considerada apenas geometricamente no modelo, empregando equacionamentos desenvolvidos para a modelagem de ferramentas convencionais adaptados para EGTs. Efeitos resultantes de deformações não foram considerados nesse trabalho.

A distribuição dos grãos abrasivos quanto à forma foi implementada ao modelo assim como a área em que o gume do grão está posicionado ao redor do centro do ponto de cola. Esta área foi verificada usando-se três diferentes metodologias. A posição exata do gume em relação ao centro de cola demanda tempo, mas se mostrou mais eficaz que as outras metodologias estudadas. Avaliações quanto à presença de *clusters* e falha de grão também foram realizadas e consideradas no modelo.

A pré-validação do modelo foi feita com testes práticos efetuados com rebolos especificamente fabricados para estes ensaios. Valores de R_a e R_t foram simulados e testados para mesmos parâmetros estruturais e de processo adotados na modelagem. Os registros de rugosidade apresentaram a mesma tendência, confirmando a validade do modelo desenvolvido. Divergências nos valores simulados e medidos da rugosidade são atribuídas à adoção de um

modelo apenas geométrico que não considera as deformações plásticas não associadas à formação de cavacos, nem as propriedades do material usinado.

Os resultados de simulações com as diferentes variáveis de entrada do modelo mostraram as mesmas tendências que as ferramentas convencionais. O tamanho de grão se mostrou o parâmetro com a segunda maior influência sobre a rugosidade, ficando atrás somente da operação de *crushieren*. Uma duplicação do tamanho do grão leva ao mesmo aumento nos parâmetros de rugosidade. Outro fator com grande influência sobre a rugosidade da peça é a espessura da camada de ligante entre o grão e a superfície evolvente do corpo do rebolo que leva à variação da altura da crista do grão.

Os resultados da modelagem obtidos para a variação dos parâmetros de processo mostraram as mesmas tendências verificadas para as variações destes parâmetros em experimentos mostrados na literatura para a retificação com rebolos convencionais. Uma diminuição da espessura de usinagem leva sempre a uma diminuição da rugosidade, independente de qual a combinação de variáveis que tenha levado a esta diminuição da espessura de usinagem. Valores constantes da rugosidade na avaliação da presença de *clusters* e na falta de grãos abrasivos indicam que, mesmo nas ferramentas estruturadas simuladas, nem todos os grãos participam ativamente do processo.

O condicionamento da ferramenta foi o parâmetro que mostrou maior influência sobre a rugosidade na peça. O aumento do número de grãos cinemáticos depois da operação de condicionamento melhorou cerca de 30 vezes a rugosidade da peça. Além de mostrar excelentes resultados na superfície da peça, com o condicionamento a ferramenta apresenta maior estabilidade. Estabilidade é muito importante em ferramentas estruturadas, pois com a otimização da posição dos grãos abrasivos cada grão passa a ser responsável pela remoção de determinado volume de material. Se o material não é removido, o grão seguinte é sobrecarregado, pode quebrar ou ser arrancado para fora da estrutura do rebolo e um efeito dominó levará a falha total da ferramenta.

O aumento da porcentagem de grãos ativos em relação ao número total de grãos nas ferramentas estruturadas que, comparado com ferramentas convencionais, permite a fabricação de ferramentas com um menor número de grãos superabrasivos, reduz o custo e otimizada as ferramentas levando a um

menor custo de produtos. A disponibilização destas ferramentas para a indústria metal-mecânica representará um novo marco para a tecnologia de fabricação.

6.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

O modelo desenvolvido parte do princípio que a remoção de material é ideal. Em trabalhos futuros deverão ser implementados da deformação plástica não associada à formação de cavacos ao modelo.

Assume-se, também, que o processo de brasagem reativa não induz desvios no posicionamento dos gumes ativos. O estudo deste processo e a verificação dessa afirmação se mostram necessários na determinação exata da posição do gume após o processo de brasagem.

Uma biblioteca com os valores já simulados deve ser implementada ao programa para evitar que simulações sejam repetidas desnecessariamente.

A modelagem inversa, na qual o usuário entra com o valor da rugosidade requerida, e a simulação gera um arquivo com diversas opções de fabricação de um rebolo, auxiliará o usuário a minimizar os custos de fabricação, pois poderá escolher a opção mais conveniente para a fabricação.

O desempenho de ferramentas condicionadas se mostrou excelente na simulação. Esses dados deverão ser testados em ensaios com ferramentas estruturadas que sofreram crushieren para a pré-validação dessas primeiras simulações.

CAPÍTULO 7

Referências

- [1] Deutsches Institut für Normung. DIN 8589: **Fertigungsverfahren Spanen**: Teil 11: Schleifen mit rotierendem Werkzeug – Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Berlin, 2003. 18 p.
- [2] KÖNIG, W. **Fertigungsverfahren: Schleifen, Honen, Läppen**. 4. ed. Berlin: Springer - Verlag, 2005. 494 p.
- [3] WEINGAERTNER, W. L. **Retificação**. Laboratório Mecânica de Precisão, Florianópolis. Apostila. 1998. Trabalho não publicado.
- [4] WINTER, E., & Sohn(Hrsg.). **Schleifen mit Diamant und CBN**. 2. ed. Norderstedt: Brendes & Langhans, 1988. 172 p.
- [5] FRÖMMER, G.; STEINMÜLLER, A. **Metalltechnik Fachbildung. Zerspantechnik**. 3. ed. Haan-Gruiten: Verlag Europa-Lehrmittel, 2004. 452p.
- [6] WEBSTER, J.; TRICARD, M. Innovations in abrasive products for precision grinding. **Annals of the CIRP**, v. 53/2, s. 1-21, 2004.
- [7] BURKHARD, G. **Spanen mit definierten angeordneten Hartstoffkörnern**. Fortschr.-Ber. VDI Reihe 2 Nr. 591. Düsseldorf: VDI Verlag, 2001.
- [8] MARINESCU, J. D., ROWE, W. B., DIMITROV, B., INASAKI, I. K. **Tribology of Abrasive Machining Processes**. Ichiro: William Andrew Publishing, 2004. 746 p.
- [9] PINTO, F. W.; VARGAS, G. E. **Prozessmodellierung von Schleifwerkzeugen mit definiert angeordneten Schleifkörner**. Institute of Machine Tools and Manufacturing, Dept. of Mechanical and Process Engineering - Swiss, 2005. 49p.
- [10] PINTO, F. W.; WEGENER, K.; KUSTER F.; WUNDER S.; KISER, M. Model to Optimise the Grain Pattern of Grinding Discs with Controlled Positions of the Abrasives. **8 CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations**; pp 349-360; Chemnitz 2005; ISBN: 3-937524-24-X.

- [11] BRAUN, O.; WARNECKE, G.; AURICH, J.C.: Simulationsgestützte Entwicklung von CBN-Schleifscheiben mit definierter Kornanordnung. **Industrial Diamond Review**. 38 Nr. 1, s. 26-32, 2004.
- [12] DUNGEN, J.: **Abrasive tools with precisely controlled abrasive array and method of fabrication**. EP 1 371 451 A1, 17.12.2003.
- [13] NGUYEN T.A., BUTLER D.L. Simulation of precision grinding process, part 2: interaction of the abrasive grain with the workpiece. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 45, edição 11, p 1321-1328; 2005.
- [14] CHEN X., ROWE W.B. Analysis and Simulation of the Grinding Process. Part II: Mechanics of Grinding. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 36, edição 8, p 883-896; 1996.
- [15] LORZ W. A Model of the Cutting Mechanism in Grinding. **Wear**, v. 53, edição 1, p 115-128, 1979.
- [16] KÖNIG, W. **Fertigungsverfahren Band 1: Drehen, Bohren, Fräsen**. 7. ed. Berlin: Springer, 2002. 471 p.
- [17] WANG Y. MOON K. S. A methodology for the multi-resolution simulation of grinding wheel surface. **Wear**, v.211, edição2, p 218-225. 1997.
- [18] NGUYEN T.A., BUTLER D.L. Simulation of precision grinding process, part 1: generation of the grinding wheel surface. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 45, edição 11, p 1321-1328. 2005.
- [19] KLOCKE, F.; KÖNIG, W. Appropriate Conditioning Strategies Increase the Performance Capabilities of Vitrified-Bond CBN Grinding Wheels. **Annals of the CIRP**, v. 44, n. 1, p. 305-310, 1995.
- [20] KOHLI, D.; GUO, C.; MALKIN, S. Energy partition to the workpiece for grinding with aluminum oxide and CBN abrasives wheel. **ASME, Journal of engineering for industry**, v. 117, p. 160-168, 1995.
- [21] ROWE, W.; BLACK, S.; MILLS, B. Temperatures in CBN grinding. **Industrial Diamond Review**, v. 4, p. 165-169, 1995.
- [22] GUO, C.; WU, V.; VARGHESE, V.; MALKIN, S. Temperatures and Energy Partition for Grinding with Vitrified CBN Wheels. **Annals of the CIRP**, v. 48, n. 1, p 247-254, 1999.

- [23] CHEN, X.; ROWE, W. B.; CAI, R. Precision grinding using CBN wheels. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 42, p. 585-593. 2002.
- [24] BOEIRA, A.M.G. **Modelagem e Simulação do fresamento Externo Excêntrico de Virabriquins**. Florianópolis. 2002. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina.
- [25] WARNECKE, G.; ZITT,U. Kinematic Simulation for Analyzing and Predicting High-Performance Grinding Process. **Annals of the CIRP**, v. 47, n.1, p 265-270, 1998.
- [26] LEOPOLD, J. **Werkzeuge für die Hochgeschwindigkeitsbearbeitung**. Hanser, Wien 1999. 300p.
- [27] ZIGERLIG, B. **Funktionen / Reaktionen Binder und Aktivlot**. Zigerlig TEC, Suíça, 10p. Trabalho não publicado.
- [28] BREDER, K.,CORBIN, N., CHINNAKARUPPAN, P., HARTLINE S. The Influence of Grinding Conditions on the Performance of Different cBN Types. **High Performance Materials Reserch & Development**, 2004.
- [29] ELEMENT SIX: Disponível em: < <http://www.e6.com> >. Acesso em 15 abril 2005.
- [30] WHITEHOUSE DJ; **Handbook of Surface Metrology**. Institute of Physics Publishing Bristol and Pliadelphia, 1994. 353p.
- [31] WEINGÄRTNER, E. **Influência do sistema de alimentação de fluido lubri-refrigerante na retificação com rebolos de CBN**. Florianópolis. 2005. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina.
- [32] BET, L. **Estudo da medição da textura de superfícies com sondas mecânicas e com sondas ópticas tipo seguidor**. 1999, 243p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [33] WARNECKE, H.J.;DUTSCHKE, W., **Fertigungs-messtechnik**. Berlin: Springer-Verlag, Heidelberg, 1984. 812p.

-
- [34] **What is Monte Carlo Simulação.** Disponível em: <<http://www.decisioneering.com/monte-carlo-simulation.html>>. Acesso em 15 Janeiro 2006.
- [35] MICRODROP: **MicroDrop Mikrodosier-System.** Disponível em: <<http://www.microdrop.com>>. Acesso em: 20 abril 2005.
- [36] ZIEGERLIG TEC. Disponível em: <<http://www.ziegerligtec.ch>> Acesso em: 12 dezembro 2005.
- [37] MONTGOMERY, D.C.; RUNGER, G.C. **Applied Statistics and Probability for Engineers.** John Wiley & Sons, Inc. 2003. 706p.
- [38] Monte Carlo Simulação. Disponível em: <<http://www.mathematik.uni-ulm.de/stochastik/lehre/ss03/markov/skript/node23.html>>. Acesso em 11 de julho de 2006.
- [39] König, W.; Schlich, J.; Yegenouglu, K. **Abrichten von CBN-Profilschleifscheiben mit Diamantrollen.** Sonderdruck Ind. – Anz. n.18. 1982.

ANEXO

Anexo A

Especificação do óleo Lubrificante

Blasogrind HC 5	
Descrição	óleo mineral para retificação de alta potência
Área de aplicação	Processo: retificação plana, Retificação cilíndrica, retificação de perfis, polimento
	Materiais: aço, aço endurecido, HSS, metal duro e aço inoxidável.
Dados físicos e químicos	Especificações
viscosidade à 40°C	5mm ² /s
densidade à 20°C	0,85 g/cm ³
Ponto de fulgor	144°C
concentração de esteres	6%
concentração de cloro	0%
concentração de zinco	0%
porção total de enxofre	0,20%
corrosão	1 a (3h à 60°C)
Cor	amarelo claro