



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA**

FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU

ALESSANDRO HIROSHI SAKAMOTO

**“DESGASTE DE DRESSADORES DE PONTA ÚNICA
FABRICADOS COM DIAMANTES CVD E SUA
INFLUÊNCIA NA RUGOSIDADE”**

BAURU - SP

2016



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA**

FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU

ALESSANDRO HIROSHI SAKAMOTO

**“DESGASTE DE DRESSADORES DE PONTA ÚNICA
FABRICADOS COM DIAMANTES CVD E SUA
INFLUÊNCIA NA RUGOSIDADE”**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Estadual Paulista, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, sob a orientação do Prof. Dr. **Eduardo Carlos Bianchi**.

BAURU - SP

2016

Sakamoto, Alessandro Hiroshi.

Desgaste de dressadores de ponta única fabricados com diamantes CVD e sua influência na rugosidade/
Alessandro Hiroshi Sakamoto, 2016
99 f.

Orientador: Eduardo Carlos Bianchi

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2016

1. Dressagem. 2. Retificação. 3. Desgaste do dressador. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE ALESSANDRO HIROSHI SAKAMOTO, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA.

Aos 29 dias do mês de julho do ano de 2016, às 14:00 horas, no(a) Anfiteatro da Seção Técnica de Pós-graduação da FEB, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. EDUARDO CARLOS BIANCHI - Orientador(a) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. GILBERTO DE MAGALHÃES BENTO GONÇALVES do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. CARLOS EIJI HIRATA VENTURA do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Universidade Federal de São Carlos, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de ALESSANDRO HIROSHI SAKAMOTO, intitulada **DESGASTE DE DRESSADORES DE PONTA ÚNICA FABRICADOS COM DIAMANTES CVD E SUA INFLUÊNCIA NA RUGOSIDADE**. Após a exposição, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: Aprovado. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. EDUARDO CARLOS BIANCHI

Prof. Dr. GILBERTO DE MAGALHÃES BENTO GONÇALVES

Prof. Dr. CARLOS EIJI HIRATA VENTURA

*Dedico este trabalho a minha esposa Liliane, a meu
filho, aos meus queridos pais e familiares.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da vida, pelas bênçãos, sabedoria, força e a paciência e disposição para o desenvolvimento deste trabalho.

À minha esposa Liliane Aparecida Carneiro Sakamoto, pelo seu apoio e compreensão nessa caminhada.

Ao meu filho Bernardo Hiroshi Carneiro Sakamoto.

Aos meus pais José Yoshio Sakamoto e Darci da Cunha Sakamoto aos quais devo toda minha vida e gratidão, por me ensinarem valores e sempre me incentivarem a buscar novas conquistas.

Ao meu irmão Fábio Minoru Sakamoto pelo apoio e carinho.

Ao meu orientador Prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi por todo auxílio, pela amizade, pela confiança desde o início do meu trabalho, expresso minha gratidão por todos os conhecimentos que foram compartilhados.

Ao aluno de iniciação científica Arminio Frech Junior, pelo grande apoio e empenho.

Ao técnico do Laboratório de Materiais de Construção Mecânica Hamilton José de Mello pelo inestimável auxílio.

Ao programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista campus Bauru pela oportunidade que me foi concedida.

Aos professores e funcionários da Faculdade de Engenharia de Bauru, agradeço pelo auxílio e respeito com que sempre fui tratado.

À Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista - *campus* de Bauru, por ceder os Laboratórios de Usinagem por Abrasão e de Materiais para a elaboração deste trabalho.

FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, pelo apoio.

As empresas NORTON e Royall Diamond pelo suporte técnico e utilização dos recursos para realização desta pesquisa.

Ao grupo de pesquisa de usinagem por abrasão pelo grande apoio.

Agradeço à empresa Açúcar e Alcool Bandeirantes S/A, em especial ao Gustavo Gil Cocco pela grande contribuição para realização desse trabalho.

Aos colegas de trabalho que sempre me apoiaram e toda compreensão na realização desse trabalho.

Agradeço ao Senai – Santo Antônio da Platina, à coordenação e em especial ao Rodrigo Lupatelli José e a toda equipe pelo apoio e compreensão na realização deste trabalho.

Aos meus familiares e amigos que sempre me apoiaram em minhas escolhas diretamente e indiretamente.

“Nenhuma mente que se abre para uma nova ideia voltará a ter o tamanho original.”

(Albert Einstein)

RESUMO

O processo de retificação é uma das mais importantes operações usadas para a obtenção de peças com altas precisões, sendo a mesma responsável pelo aumento nos custos finais dos produtos. Para que as operações possam ser realizadas com o máximo de eficiência é importante que o rebolo – ferramenta utilizada na operação de retificação – seja dressado em intervalos frequentes para a remoção dos grãos gastos e manter o perfil de sua superfície. A dressagem apresenta várias técnicas, com diversas ferramentas, mas para a maioria dos rebolos, cujos quais são do tipo convencional, a dressagem realizado com a ferramenta de ponta única de diamante é a mais utilizada. Com isso o monitoramento se torna então uma questão para a qualidade da peça, onde o aperfeiçoamento das técnicas de retificação deve ser utilizada para um melhor aproveitamento do rebolo. Foram verificados a geometria de cada formato do diamante presente no dressador de ponta única, sendo a forma geométrica do dressador piramidal e trapezoidal. Neste trabalho foi avaliado a rugosidade da peça, após a retificação da peça em aço VP 80, sendo o rebolo dressado com dois tipos de dressadores com diamantes sintéticos CVD um com o tipo piramidal e trapezoidal. As medições de rugosidade foram realizadas em intervalos de 20, 70 e 120 passadas e diferentes parâmetros U_d (igual a 1 e 5), e após cada etapa realizada o rebolo era dressado e novamente era realizada a retificação da peça e, assim, sucessivamente para os demais ensaios, onde foram coletados os dados dos ensaios realizados e armazenados para avaliação de cada etapa que foi realizada. Observou que no decorrer dos ensaios os resultados apresentaram variações na rugosidade para ambos os dressadores e para os diferentes parâmetros de U_d . Baseado nos dados coletados observou que dressador com o formato trapezoidal apresentou menor rugosidade na peça após os intervalos de 70 e 120 passadas e o piramidal só apresentou menor rugosidade no intervalo de 20 passadas, sendo assim os ensaios mostram que o diamante com o formato trapezoidal tendo sua área de recobrimento maior que piramidal, e o parâmetro de U_d maior deixa o rebolo menos agressivo.

Palavras-chave: *Dressagem; retificação; desgaste do dressador, vida útil, rugosidade.*

ABSTRACT

The grinding process is one of the most important operations used for obtaining high precision workpieces being such process responsible for the increase on the final product cost. In order to perform at its high efficiency it is important that the grinding wheel –a tool used in the grinding process – be dressed at frequent intervals for the removal of the worn grains and maintenance of the profile of its surface. The dressing allows several techniques with diversified tools but once most grinding wheels are the conventional types the dressing performed with a single point diamond tool is the most commonly used. Due to such a feature, monitoring becomes a relevant aspect for the quality of the workpiece, where the improvement of the grinding wheel rectification techniques must be used for majoring the use of the grinding wheel. It was verified the geometry of every diamond shape presented in the single point dresser with pyramidal and trapezoidal shapes. In this work it was evaluated the roughness of the workpiece after the rectification with VP 80 steel being the grinding wheel dressed with two kinds of CVD synthetic diamond dressers, both presenting pyramidal and trapezoidal shapes. The roughness measurement was carried out at 20, 70 and 120 spinning intervals and different Ud parameters (equal 1 and 5) and after every stage the grinding wheel was dressed and once again the rectification of the workpiece was performed and that was continuously done with the remaining essays so that the essays data were collected and stored for the evaluation of each stage. It was observed that during the essays process the results presented variations towards both dressers and towards the different Ud parameters. Based on the collected data it became clear that the trapezoidal dresser shape showed less roughness in the workpiece at the 70 and 120 spinning intervals and the pyramidal one only presented less roughness at the 20 spinning interval which leads to the conclusion that once the trapezoidal shape diamond has a wider covered surface than the pyramidal shape diamond, the bigger Ud parameter makes the grinding wheel less aggressive.

Key words: *Dressing; grinding; dresser worn-out; lifespan; roughness.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Tipos de diamantes e seus respectivos ligantes, formas, dureza e aplicação. (Adaptado - Badger, 2010)	5
Figura 2. Relação de velocidades entre rebolo e dressador (Adaptado - Puerto, et al 2013)	7
Figura 3. Ação de grau de recobrimento (Adaptado - Badger, et al 2010).....	8
Figura 4. Ângulo formado entre o diamante e o rebolo (Catálogo T.F.S. Terra Ferramentas Superabrasivas - 2013).	9
Figura 5. Representação do macroefeito.....	10
Figura 6. Representação do microefeito.	11
Figura 7. Dressagem de um rebolo por meio de um dressador de ponta única (MALKIN, 2008 - adaptado).....	12
Figura 8. Esquema da dressagem de rebolos (Machado, 2012 - adaptado).....	13
Figura 9. Desenho esquemático de um dressador de ponta única: 1 - diamante; 2 - suporte (Catálogo T.F.S. Terra Ferramentas Superabrasivas. 2013 - adaptado).	14
Figura 10. Diagrama da deposição química a vapor – CVD (Iness.como.polimi.it/lepecvd.php. 2013 - adaptado).	16
Figura 11. . Micrografia eletrônica por varredura de um filme fino de diamante onde são mostrados numerosos micro cristais multifacetados (CALLISTER, 2013 - adaptado).....	18
Figura 12. Estrutura de um rebolo de retificação (PORTO, 2004 - adaptado).....	23
Figura 13. Sonda para teste da dureza do rebolo (KLOCKE & MERBECKS, 2001- Modificado).....	24
Figura 14. Mecanismos de desgaste do grão abrasivo (Adaptado - König, et al 2010).....	25
Figura 15. Grão abrasivo desgastado (Adaptado - Badger, et al 2010)	26
Figura 16. Parâmetros para determinação estado de superfície.	27
Figura 17. Média da rugosidade Ra (NBR ISO 4287 (2002)).	28
Figura 18. Intensidade do fluxo de calor (Adaptado - Badger, et al 2010)	30
Figura 19. Profundidade da superfície retificada (adaptada - Badger, et al 2010)..	31
Figura 20. Têmpera versus tempo (Adaptado - Badger, et al 2010)	32
Figura 21. Material com queima e retêmpera (BADGER, 2010).....	32
Figura 22. Relações do processo de retificação (Adaptado – Doman, et al 2006). 33	
Figura 23. Máquina retificadora plana modelo 1055E fabricada pela empresa SULMECÂNICA utilizada nos ensaios de dressagem.	34
Figura 24. Rebolo utilizado nos ensaios.	35
Figura 25. Diamante CVD com formato piramidal.	36
Figura 26. Dressador com o diamante CVD no formato trapezoidal.	36
Figura 27. Forma utilizada de medição da rugosidade.....	37
Figura 28. Disposição dos equipamentos para o experimento.	39
Figura 29. Montagem do dressador, com o dressador, suporte do dressador e dos equipamentos de medição conectados a ele.....	40
Figura 30. Ensaio com o dressador composto pelo diamante trapezoidal.	40
Figura 31. Ensaio com o dressador composto pelo diamante tipo piramidal.....	41

Figura 32. Preparação da operação de retificação.	41
Figura 33. Operação de retificação.	42
Figura 34. Operação de dressagem após a retificação.	43
Figura 35. Rugosidade versus número de passadas para o ensaio 1 do diamante de perfil trapezoidal.	46
Figura 36. Rugosidade versus número de passadas para o ensaio 2 do diamante de perfil trapezoidal.	47
Figura 37. Rugosidade versus número de passadas para o ensaio 3 do diamante de perfil trapezoidal.	48
Figura 38. Valores da rugosidade versus número de passadas para os três ensaios com o diamante com o perfil trapezoidal.	49
Figura 39. Valor médio de rugosidade para o ensaio com o diamante trapezoidal, com seu respectivo desvio padrão.	50
Figura 40. Imagens do dressador trapezoidal: (a) Sem desgaste; (b) após 20 passadas; (c) após 70 passadas; (d) após 120 passadas.	51
Figura 41. Rugosidade versus número de passadas para o ensaio 1 do diamante de perfil piramidal.	52
Figura 42. Rugosidade versus número de passadas para o ensaio 2 do diamante de perfil piramidal.	53
Figura 43. Rugosidade versus número de passadas para o ensaio 3 do diamante de perfil piramidal.	54
Figura 44. Valores da rugosidade versus número de passadas para os três ensaios com o diamante com o perfil piramidal.	55
Figura 45. Valor médio de rugosidade para o ensaio com o diamante trapezoidal, com seu respectivo desvio padrão.	56
Figura 46. Imagens do dressador piramidal (a) Sem desgaste; (b) após 20 passadas; (c) após 70 passadas; (d) após 120 passadas.	57
Figura 47. Valores do número de passadas versus rugosidade para os diamantes com perfil trapezoidal e piramidal.	58
Figura 48. Rugosidade versus número de passadas para o ensaio 1 do diamante de perfil trapezoidal.	60
Figura 49. Rugosidade versus número de passadas para o ensaio 2 do diamante de perfil trapezoidal.	61
Figura 50. Rugosidade versus número de passadas para o ensaio 3 do diamante de perfil trapezoidal.	62
Figura 51. Valores da rugosidade versus número de passadas para os três ensaios com o diamante com o perfil trapezoidal.	63
Figura 52. Valor médio de rugosidade para o ensaio com o diamante trapezoidal, com seu respectivo desvio padrão.	64
Figura 53. Imagens do dressador trapezoidal: (a) Sem desgaste; (b) após 20 passadas; (c) após 70 passadas; (d) após 120 passadas.	65
Figura 54. Rugosidade versus número de passadas para o ensaio 1 do diamante de perfil piramidal.	66
Figura 55. Rugosidade versus número de passadas para o ensaio 2 do diamante de perfil piramidal.	67

Figura 56. Rugosidade versus número de passadas para o ensaio 3 do diamante de perfil piramidal	68
Figura 57. Valores da rugosidade versus número de passadas para os três ensaios com o diamante com o perfil piramidal.	69
Figura 58. Valor médio de rugosidade para o ensaio com o diamante trapezoidal, com seu respectivo desvio padrão.	70
Figura 59. Imagens do dressador piramidal: (a) Sem desgaste; (b) após 20 passadas; (c) após 70 passadas; (d) após 120 passadas.	71
Figura 60. Valores do número de passadas versus rugosidade para os diamantes com perfil trapezoidal e piramidal.	72
Figura 61. Relação entre o número de passadas e a rugosidade média obtida para os dois parâmetros de dressagem utilizadas para o perfil trapezoidal.....	74
Figura 62. Relação entre o número de passadas e a rugosidade média obtida para os dois parâmetros de dressagem utilizadas para o perfil piramidal.	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Composição química e norma padrão para o aço VP 80 (Villares Metals, 2013).	38
Tabela 2. Valores de rugosidade, média e desvio padrão para o primeiro ensaio com o diamante de perfil trapezoidal.	45
Tabela 3. Valores de rugosidade, média e desvio padrão para o segundo ensaio com o diamante de perfil trapezoidal.	46
Tabela 4. Valores de rugosidade, média e desvio padrão para o terceiro ensaio com o diamante de perfil trapezoidal.	47
Tabela 5. Valores médios de rugosidade para os três ensaios, com seus respectivos desvios padrões.	48
Tabela 6. Valores de rugosidade, média e desvio padrão para o primeiro ensaio com o diamante de perfil piramidal.	52
Tabela 7. Valores de rugosidade, média e desvio padrão para o segundo ensaio com o diamante de perfil piramidal.	53
Tabela 8. Valores de rugosidade, média e desvio padrão para o terceiro ensaio com o diamante de perfil trapezoidal.	54
Tabela 9. Valores médios de rugosidade para os três ensaios, com seus respectivos desvios padrões.	55
Tabela 10. Valores de rugosidade para os diamantes trapezoidal e piramidal.	58
Tabela 11. Valores de rugosidade, média e desvio padrão para o primeiro ensaio com o diamante de perfil trapezoidal.	59
Tabela 12. Valores de rugosidade, média e desvio padrão para o segundo ensaio com o diamante de perfil trapezoidal.	61
Tabela 13. Valores de rugosidade, média e desvio padrão para o terceiro ensaio com o diamante de perfil trapezoidal.	62
Tabela 14. Valores médios de rugosidade para os três ensaios, com seus respectivos desvios padrões.	63
Tabela 15. Valores de rugosidade, média e desvio padrão para o primeiro ensaio com o diamante de perfil piramidal.	66
Tabela 16. Valores de rugosidade, média e desvio padrão para o segundo ensaio com o diamante de perfil piramidal.	67
Tabela 17. Valores de rugosidade, média e desvio padrão para o terceiro ensaio com o diamante de perfil trapezoidal.	68
Tabela 18. Valores médios de rugosidade para os três ensaios, com seus respectivos desvios padrões.	69
Tabela 19. Valores de rugosidade para os diamantes trapezoidal e piramidal.	72
Tabela 20. Valores de rugosidade média para os dressadores com perfil trapezoidal para o grau de recobrimento 1 e 5.	74
Tabela 21. Valores de rugosidade média para os dressadores com perfil trapezoidal para o grau de recobrimento 1 e 5.	75

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

a – profundidade de corte (μm)

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

a_d - profundidade de dressagem (μm)

Al_2O_3 - óxido de alumínio

ANSI – American National Standards Institute

A_{sd} – área de dressagem (μm^2)

b_d – largura de atuação do dressador (μm)

b_{dr} – largura real de atuação do dressador (μm)

CBN – nitreto de boro cúbico

CVD - chemical vapor deposition

d_c – espessura máxima do cavaco (μm)

D_e – diâmetro equivalente (mm)

D_s – diâmetro do rebolo (mm)

D_w – diâmetro da peça (mm)

E – módulo de elasticidade ou módulo de Young (GPa)

FEPA – Federação Europeia dos Fabricantes de Produtos Abrasivos

F_n – força normal de corte (N)

F_t – força tangencial de corte (N)

G – relação entre volume de material removido e volume de rebolo gasto

H – dureza do material (GPa)

h_{eq} – espessura de corte equivalente em retificação (mm)

HV – Dureza Vickers (GPa)

l_c – comprimento de contato (μm)

ISO - International Organization for Standardization

K_{Ic} – tenacidade à fratura ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)

K_s – pressão específica de corte (N/m^2)

K_n – tensão de escoamento do material (N/m^2)

L – espaçamento entre grãos abrasivos (μm)

MEV - microscópio eletrônico de varredura

N – número de encontros dos grãos abrasivos ativos com a peça

NIST – National Institute of Standards and Technology dos Estados Unidos

P – força normal aplicada aos grãos abrasivos (N)

PCD – diamante policristalino

p_b – probabilidade do grão ser desalojado devido à fratura do aglomerante

Q_w – taxa de remoção de material (mm^3/s)
 Q'_w – taxa específica de remoção de material (mm^2/s)
 R – fator de resistência ao desgaste
 r_p – raio de ponta do dressador (mm)
 S_d – passo de dressagem (mm/rev)
 SiC – carboneto de silício
 t – tempo de retificação (s)
 t_s – tempo de centelhamento (s)
 U_d – grau de recobrimento na dressagem de rebolos
 V – volume de material removido por unidade de distância de deslizamento (mm^3/m)
 V_f – velocidade de mergulho ou avanço (mm/min)
 V_s – velocidade tangencial do rebolo (m/s)
 V_w – velocidade da peça (mm/min)
 W – peso médio de cada grão (g)
 w_t – ondulação teórica (macroefeito) (μm)
 ZrO_2 – óxido de zircônia
 Z_s – volume de rebolo consumido (mm^3)
 Z_w – volume de material removido (mm^3)
 ξ – constante adimensional
 δ - desgaste radial do rebolo (μm)
 σ - tensão de ruptura (MPa)
 y - constante que relaciona o tamanho da falha com o tamanho da amostra
 γ_i - energia superficial por unidade de área para iniciar a fratura (J/m^2)
 α = constante independente do material

Sumário

LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE TABELAS	xivv
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivos	2
1.2. Justificativa	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA COMPLEMENTAR	4
2.1. Dressagem.....	4
2.1.1. Dressagem com dressador de ponta única.....	8
2.1.2. Construção de dressadores de ponta única.....	13
2.1.3. Diamantes sintéticos.....	15
2.1.4. Desgaste de dressadores.....	20
2.2 Processo de Retificação	21
2.3 Rebolo	22
2.3.1. Dureza do rebolo	23
2.3.2. Estrutura do rebolo.....	24
2.4 Desgaste do rebolo	25
2.5 RUGOSIDADE	26
2.6 Efeitos da Temperatura na Retificação	29
2.7 Principais Variáveis e Parâmetros Envolvidos No Processo De Retificação Plana	33
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	34
3.1. Tipo de rebolo	34
3.2. Tipo de dressador	35
3.3. Rugosímetro	37
3.4 Corpo de prova.....	38
3.5. Metodologia	39
3.6. Parâmetros utilizados.....	44
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
4.1 Dressagem com diamante com perfil trapezoidal para o parâmetro $U_d = 1$	45
4.1.1 Diamante com perfil piramidal para o parâmetro $U_d = 1$	51
4.1.2 Comparação entre os dois diamantes	58
4.2 Dressagem com diamante com perfil trapezoidal para o parâmetro $U_d = 5$	59
4.2.1 Diamante com perfil piramidal para o parâmetro $U_d = 5$	65
4.2.2 Comparação entre os dois diamantes	72

4.3 Comparação entre os dressadores com parâmetros $U_d = 1$ e $U_d = 5$	73
4.3.1 Perfil trapezoidal	73
4.3.2 Perfil piramidal	75
5. CONCLUSÃO	77
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78

1. INTRODUÇÃO

A retificação é um dos processos mais largamente utilizados tanto para a remoção de material quanto para a produção de componentes com alta precisão. Com seu uso, assim como qualquer outra ferramenta de corte, a superfície abrasiva do rebolo gradualmente perde sua eficiência. E consequência, as características geométricas e funcionais do rebolo devem ser restauradas periodicamente por um processo conhecido como dressagem. Devido à natureza irregular do processo de dressagem é difícil encontrar uma relação entre os parâmetros de dressagem com os outros parâmetros de retificação. Entretanto, o processo de dressagem não pode ser discutido isoladamente, já que é uma parte essencial do processo de retificação, apresentando profundos efeitos no ato de remoção de metais e na superficial topográfica da peça trabalhada (BUTTERY *et al.*, 2001).

A ferramenta mais simples utilizada na dressagem é a de ponta única de diamante. O diamante é cravado numa matriz de metal com aproximadamente um terço do diamante exposto. Diamantes de alta qualidade podem ser usados em qualquer uma das quatro faces e as ferramentas podem ser reutilizadas mais vezes. Apesar de o custo inicial ser alto, os diamantes de maior qualidade apresentam um maior custo benefício em relação ao preço, qualidade final da dressagem e tempo de vida útil da ferramenta. Para os casos em que a dressagem é pouco usada ou não é requerido uma qualidade muito boa, os diamantes de menor qualidade são suficientes. O tamanho do diamante pode variar e quanto maior, mais agressiva e pesada será a dressagem (MARINESCU *et al.*, 2007).

O diamante foco de estudos atualmente para a utilização nos dressadores de ponta única é o sintético policristalino. Suas principais características são quimicamente inerte, ter excelente condutividade térmica, juntamente com excelente desgaste e resistência à oxidação. Possui o mesmo formato do diamante natural e com as mesmas propriedades gerais, que o tornam um material excelente para a engenharia, como para aplicações

mecânicas dentro do setor ferramenta de dressagem e corte. As propriedades principais são o material mais duro conhecido, alta resistência à abrasão; extremamente inerte quimicamente; um baixo coeficiente de expansão térmica; sofre grafitização apenas à temperaturas muito elevadas – maiores que 700°C; alta resistência física e ao choque térmico; ótimo isolante elétrico e; material com altíssima pureza (ELEMENT SIX, 2011).

O monitoramento do processo de retificação se torna, então, uma questão de qualidade, onde o aperfeiçoamento das técnicas de retificação deve ser utilizado para a obtenção de um melhor rendimento do rebolo. Ela é a ferramenta principalmente aplicada para garantir alta precisão e qualidade (GAO *et al.*, 2007). Com o monitoramento em prática, buscando a melhoria no processo, consegue-se uma peça com rugosidade menor, onde foram comparados os dois tipos de dressadores piramidal e trapezoidal.

1.1. Objetivos

Este trabalho tem como objetivos verificar o quanto a geometria do diamante instalado no dressador de ponta única influência na rugosidade da peça retificada. Os formatos dos diamantes são do tipo piramidal e trapezoidal. Deste modo, além da avaliação dos desgastes dos diamantes, serão realizados ensaios de usinagem, medindo-se a rugosidade da peça no final de cada ensaio.

1.2. Justificativa

O processo de retificação permitirá a realização dos ensaios e a identificação de qual dos dressadores com diamantes sintéticos apresenta melhor rugosidade sobre a peça.

A dressagem é de extrema importância para que a retificação aconteça em condições ideais. A dificuldade quanto à dressagem é devido a se tratar de

um processo pouco estudado ao longo dos anos e que, até a pouco tempo, era deixado em segundo plano.

Com o rápido desenvolvimento industrial dos países emergentes, a concorrência entre as indústrias de usinagem aumentou consideravelmente.

Com a ideia de produzir melhor, mais rápido e com menor custo, as indústrias buscaram métodos e alternativas para que a produção pudesse ser melhorada. Uma das medidas encontradas foi o de melhorar o acabamento no processo de retificação, porém sem aumentar os custos, ou seja, sem grande investimento na melhoria das máquinas retificadoras. Dessa forma, passou-se a olhar o processo de dressagem com mais cuidado. Obtendo uma dressagem melhor é possível aumentar a vida útil e a qualidade do rebolo, impulsionando o processo de retificação.

O Brasil é um dos dezenove países no cenário internacional que dispõe de tecnologia para desenvolvimento, e produção de diamantes sintéticos de alta qualidade. Atualmente, os diamantes sintéticos de produção nacional são principalmente utilizados na indústria odontológica e do petróleo.

São de extrema importância as pesquisas científicas voltadas para a área dos diamantes sintéticos, que em um futuro cada vez mais próximo, possam tomar o lugar dos diamantes naturais para uso industrial, reduzindo o uso de minérios sobrevividos de áreas de extração e exploração de diamantes.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA COMPLEMENTAR

A seguir é apresentada uma complementação da revisão bibliográfica na expectativa de fornecer subsídios para a avaliação ainda mais consistente dos resultados a serem obtidos.

2.1. Dressagem

Dressadores são as ferramentas utilizadas para produzir no rebolo a topologia necessária de acordo com as necessidades de acabamento para as peças. Os diamantes naturais monocristalinos são bastante utilizados na fabricação destas ferramentas, mas já existem tecnologias mais avançadas que produzem melhores resultados, principalmente quanto ao custo x benefício da operação. Dressadores estáticos são normalmente chamados de Fliesen, porém este é um tipo específico de dressador composto por pequenos diamantes aglomerados em uma liga metálica, que permite a dressagem de rebolos com abrasivos convencionais com alta precisão. Segundo Malkin (2008) o fliesen pode ser utilizado para retificadoras centerless, plano e cilíndrico.

Novas tecnologias em dressagem utilizam variados tipos de diamantes. Além dos diamantes naturais monocristalinos, são utilizados dressadores sintéticos e diamante policristalinos com ou sem ligante. Cada um destes tipos de diamantes, seus formatos e durezas são levados em consideração na definição de um processo de dressagem (Figura1). Fabricantes deste tipo de ferramentas têm suas indicações baseados em estudos realizados em laboratório (Badger, 2010).

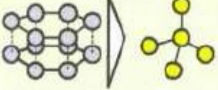
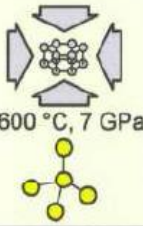
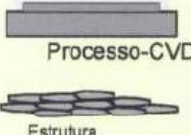
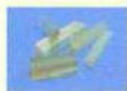
	Diamantes mono-cristalinos		Diamantes poli-cristalinos (PKD)	
	Diamante natural	MCD	com ligante	sem ligante
Fabricação	À. 4 bilhões de anos à 150-300 km de prof.  Surgimento: Austrálie, Zaire, Botswana, Sudafrica	 1600 °C, 7 GPa	 Diamante (2...25 µm) Matriz de Co	H₂ + 1% CH₄ MW-Plasma Processo-CVD  Estrutura
Forma				
Dureza [Knoop]	6000 - 9000	8000-9000	4000-5500	8500-9000
Aplicação	Todas as ferr. diamantadas	Dressadores fixos	Reforço de discos dressadores	Discos dress. com ângulos e raios peq.

Figura 1. Tipos de diamantes e seus respectivos ligantes, formas, dureza e aplicação. (Adaptado - Badger, 2010)

A dressagem definirá a topografia do rebolo, segundo Puerto, *et al* (2013), caracteriza a agressividade do rebolo, que proporcionará diferentes rugosidades na peça dependendo do nível de agressividade alcançado pelos efeitos da dressagem. Puerto, *et al* (2013) explica que o macro efeito da dressagem é a formação de uma rosca na superfície do rebolo, produzindo uma grande agressividade, esta característica dependerá principalmente da área do dressador em contato com a peça e pelo avanço longitudinal durante a dressagem. Já o micro efeito da dressagem é causado pela fratura dos grãos de rebolo, criando novos gumes de corte e promovendo também agressividade ao rebolo.

Para os dressadores estáticos pode-se fazer uma analogia ao processo de torneamento, onde o dressador é fixo em um dispositivo e o rebolo ou o próprio dressador se desloca longitudinalmente com uma profundidade e avanço definidos, proporcionando a dressagem (PUERTO, *et al*, 2013).

Na dressagem com dressadores rotativos além do movimento longitudinal entre rebolo e dressador, também há a rotação do dressador que influenciará na agressividade do rebolo e conseqüentemente na qualidade final da peça-obra (PUERTO, *et al*, 2013).

Esta relação de velocidades entre rebolo e dressador é definida como s_d . Segundo Puerto, *et al* (2013) q_d é o quociente entre as velocidades periféricas do dressador e do rebolo. O fator q_d será positivo quando o dressamento for concordante, ou seja, quando as velocidades do dressador e do rebolo tiverem o mesmo sentido. Para sentidos contrários, o dressamento é dito discordante e q_d será negativo, expresso na equação 1.

$$q_d = \frac{V_r}{V_{sd}} \quad (1)$$

Onde V_r é a velocidade periférica do dressador e V_{sd} a velocidade periférica do rebolo. Conforme Puerto, *et al* (2013), o ângulo de encontro entre o rebolo e do dressador na dressagem concordante, é muito maior, exigindo uma alta carga compressiva para fratura dos grãos abrasivos, o que gera gumes mais vivos. Desta forma a dressagem concordante gera uma superfície bastante rugosa no rebolo, promovendo grande agressividade ao mesmo. Em contrapartida, na dressagem discordante o número de grãos cisalhados é muito maior que o número de grãos fraturados, assim a superfície do rebolo ficará mais lisa, ou seja, com menor agressividade (PUERTO, *et al*, 2013).

A agressividade do rebolo é inversamente proporcional à rugosidade desejada para peça, uma vez que um rebolo agressivo tem grãos bastante afiados e com gumes vivos, gerando maior arranchamento de material da peça obra e consequentemente, rugosidade maior (PUERTO, *et al*, 2013).

A Figura 2 mostra a previsão de rugosidade em função da relação de velocidades no dressamento (q_d), e da direção de corte entre o rebolo e o disco dressador. À esquerda da figura pode-se visualizar que a dressagem circundante produz maior rugosidade, esta aumentando quanto maior a relação de velocidades q_d . À direita da figura indica a direção de corte concordante, e menor variação de rugosidade em função da relação de velocidades (PUERTO, *et al*, 2013).

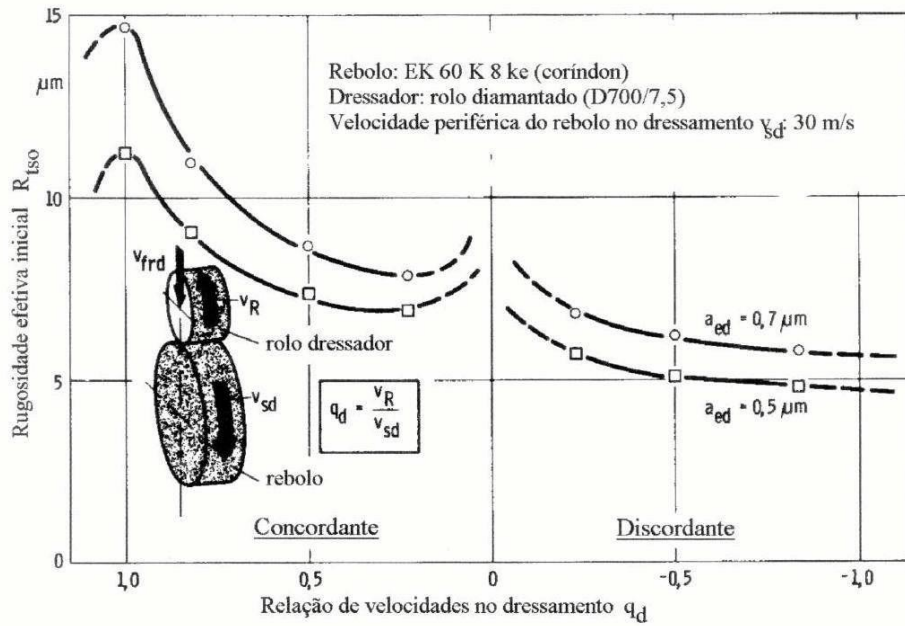


Figura 2. Relação de velocidades entre rebolo e dressador (Adaptado - Puerto, et al 2013)

Para caracterizar a agressividade do rebolo, Puerto, *et al*(2013) indicam o cálculo do grau de recobrimento U_d , que é a relação entre a largura do dressador b_d e o avanço por rotação S_d , expresso na equação 2

$$U_d = \frac{b_d}{S_d} \quad (2)$$

O conceito do grau de recobrimento é bastante utilizado por considerar simultaneamente o avanço por rotação, a profundidade de dressagem e a geometria do dressador, sendo a geometria também fator de grande impacto na topologia do rebolo. Considerando um dressador de largura constante, ou seja, b_d constante, e variando o avanço por rotação S_d , visualiza-se na Figura 3 a topologia do rebolo conforme o grau de recobrimento U_d , utilizado na dressagem. Quanto maior o grau de recobrimento, menor a distância entre cada passagem do dressador, gerando menor agressividade na superfície do rebolo. Em contrapartida, diminuindo o grau de recobrimento através de um maior avanço por rotação, a agressividade do rebolo aumenta (PUERTO, *et al*, 2013).

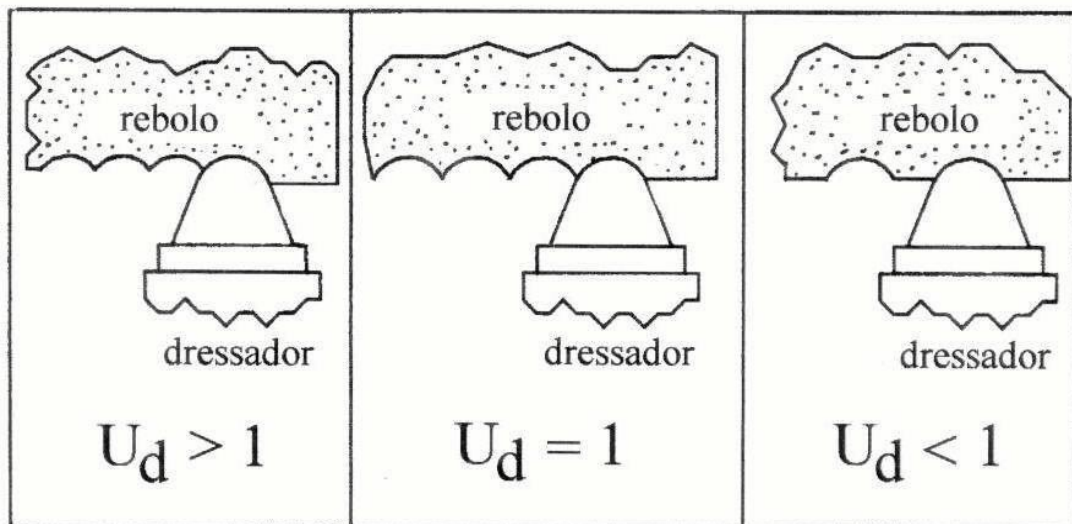


Figura 3. Ação de grau de recobrimento (Adaptado - Badger, et al 2010).

2.1.1 Dressagem com Dressador de ponta única

É a ferramenta de dressagem mais simples (MARINESCU *et al.*, 2007). A dressagem através de um diamante de ponta única também é especificada por dressagem mecânica (HARIMKAR *et al.*, 2006).

O dressador de ponta única leva um único diamante, e necessita ter um ângulo formado entre o diamante e o rebolo. O diamante de ponta única desbasta a partir da extremidade do rebolo e deve ter um ângulo de ataque limpo para que o processo de dressamento seja eficaz (SALMON, 1992). Esse ângulo de posicionamento é representado na figura 4.

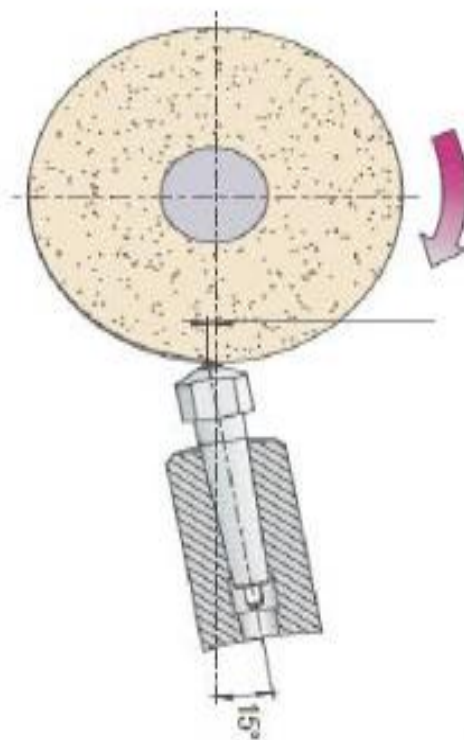


Figura 4. Ângulo formado entre o diamante e o rebolo (Catálogo T.F.S. Terra Ferramentas Superabrasivas - 2013).

Caso o dressador estiver perpendicular para dressar o rebolo, o diamante ficará rapidamente gasto. Se o ângulo do diamante for igual ao ângulo superficial da ponta produzirá muito calor (SALMON, 1992).

Algumas das desvantagens da técnica de dressagem de ponta única esta no desgaste do diamante, no tempo de parada da operação e no aumento do custo por parada do processo por diversas dressagens (HARIMKAR *et al.*, 2006).

Caso ocorra o lascamento na ponta do diamante ou deformidades causadas pela falta de cuidado, a precisão do sistema estará criticamente comprometida (SALMON, 1992).

A dressagem de ponta única produz um estado de tensão nos grãos abrasivos causando profundas trincas. Devido a estas tensões, incide na perda de pedaços dos grãos, o que diminui no número de cantos ativos, consequentemente a dressagem não produzirá uma adequada topografia no

rebolo, não necessitando ser usada para essa intenção (JACKSON *et al.*, 2007).

Segundo Malkin (2008), a operação de dressagem de ponta única, mecânica, produz ao rebolo superfícies de trabalho compostas de macro e micro efeitos que são definidos como:

a) Macroefeito: é originado em função do formato do dressador, da profundidade de penetração do dressador e do passo de dressagem em que é realizada a operação.

Este fenômeno determina a posição em que as arestas dos grãos abrasivos estão situadas na superfície do rebolo, conforme é demonstrado na figura 5.

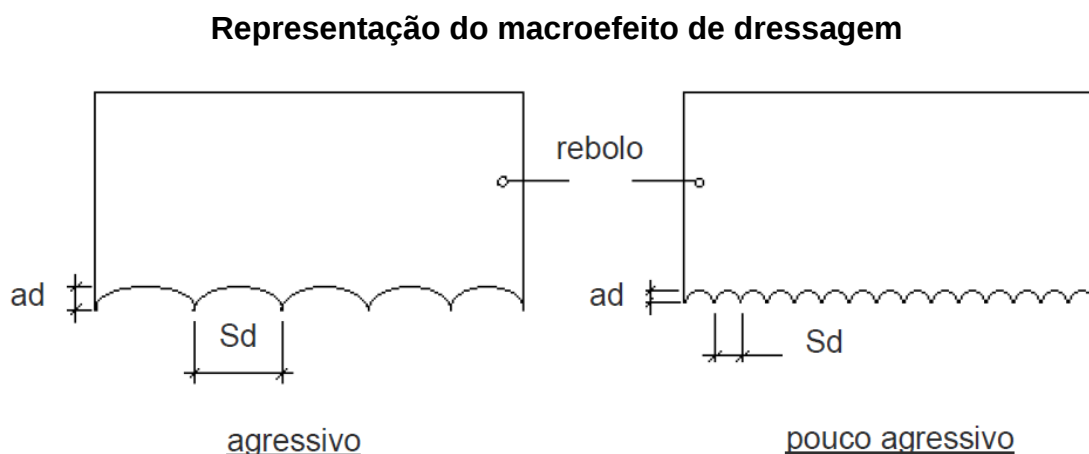


Figura 5. Representação do macroefeito.

O macroefeito torna a superfície do rebolo mais agressiva, onde existe uma pequena parcela de grãos abrasivos que estão ativados e que são responsáveis por retirar grandes quantidades de material. Nesta condição, os esforços sobre cada grão será grande, etapa essa que não impede a boa atuação do processo pelo fato das reduções das perdas com deformações plásticas e elásticas do material na área de corte minimizando a energia absoluta envolvida neste processo (HASSUI *et al.*, 2003).

b) Microefeito: é formado pela retirada dos grãos desgastados com baixa ancoragem na liga e fratura dos grãos que não se desgastaram por completo, onde novas arestas de corte são geradas pelo dressador, conforme é apresentado na figura 6.

Representação do microefeito de dressagem

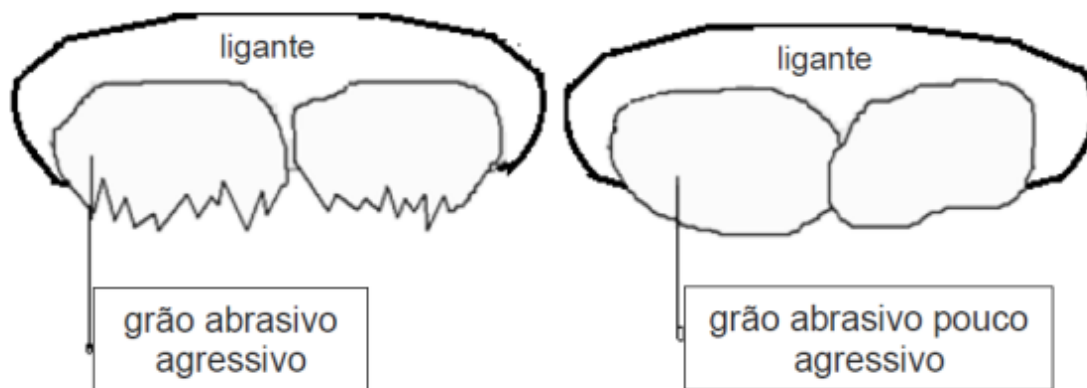


Figura 6. Representação do microefeito.

No microefeito, a agressividade das arestas depende das condições de dressagem e em grande parte da friabilidade do grão abrasivo. Na dressagem fina, por exemplo, onde há baixa profundidade de dressagem e o avanço do dressador ocorre à remoção ou fratura de grãos muito pequenos, o que proporciona a formação de planos nas superfícies de corte dos mesmos tornando-os mais agressivos ou não em função de sua granulometria. Analisando os extremos em termos de dressagem, a dressagem grossa com elevada profundidade de avanço do dressador, uma grande parte dos grãos abrasivos são quebrados, formando maiores arestas e mais afiadas (HASSUI *et al.*, 2003).

Na dressagem de rebolos convencionais é comum o uso da ferramenta de dressagem se deslocando transversalmente em relação ao rebolo rotacionado, conforme visualizado na figura 7.

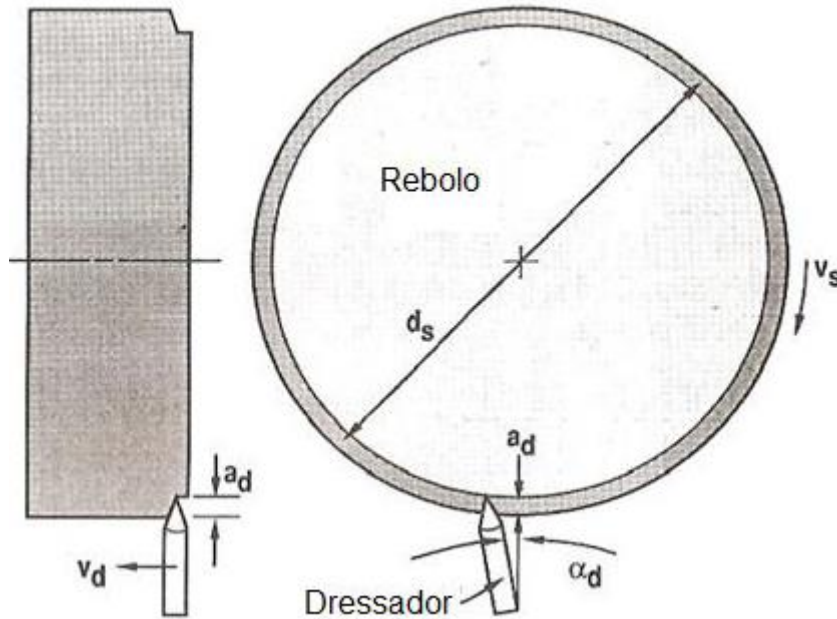


Figura 7. Dressagem de um rebolo por meio de um dressador de ponta única (MALKIN, 2008 - adaptado).

Segundo Malkin (2008), em cada deslocamento transversal do dressador no rebolo, é retirada uma profundidade a_d do raio do rebolo. Este tipo de movimento de dressagem é comparável ao de torneamento. Sendo o avanço da ferramenta de dressagem por revolução é chamado de passo de dressagem, S_d , e é dado pela equação 3.

$$S_d = \frac{\pi \cdot d_s \cdot v_d}{v_s} \quad (3)$$

Onde:

V_d [mm/s] é a velocidade de dressagem do dressador pelo rebolo;

V_s [mm/s] é a velocidade de corte do rebolo;

d_s [mm] é o diâmetro do rebolo.

A figura 8 representa um esquema de dressagem onde o parâmetro sd pode ser visualizado facilmente.

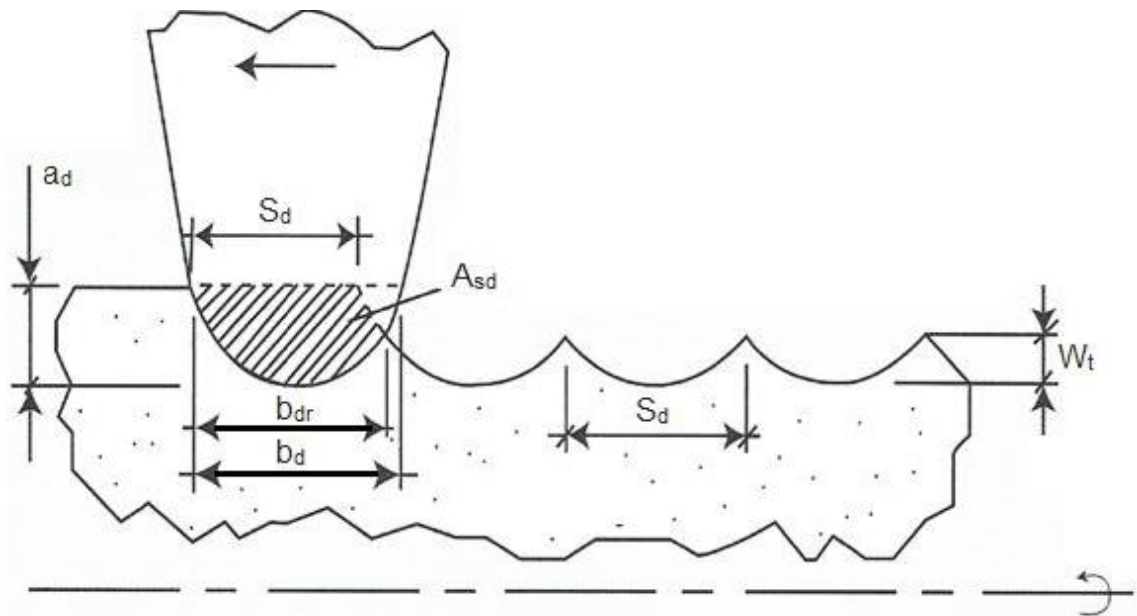


Figura 8. Esquema da dressagem de rebolos (Machado, 2012 - adaptado).

Onde:

b_{dr} - largura real de atuação do dressador

b_d - largura de atuação do dressador (μm)

r_p - raio de ponta do dressador (mm)

W_t - ondulação teórica (macroefeito)

S_d - passo de dressagem (mm/rev)

A_d - profundidade de dressagem (μm)

A_{sd} - área de dressagem (μm^2)

É evidente que as variáveis do processo podem ser necessárias mais passadas para remover cavacos e sobras de retificações passadas (MALKIN, 2008). A etapa de faiscamento ou centelhamento do rebolo é usada na retificação externa de mergulho, mas a necessidade dessa operação se dá em quase todos os processos de retificação (DINIZ, 2013).

2.1.2 Construção de dressadores de ponta única

Em comum, a constituição do dressador é semelhante com a de um lápis, combinado por itens compostos de materiais de elevada dureza como

diamantes e insertos, suporte – fixador, (Element Six, 2011). O elemento que merece maior consideração na ferramenta é o perímetro de fases de interação entre o compósito de material super duro e a matriz que desempenha um papel muito importante na estrutura do dressador evitando vibrações (NUSSBAUM, 1988), a figura 9 ilustra um desenho esquemático de um dressador de ponta única.

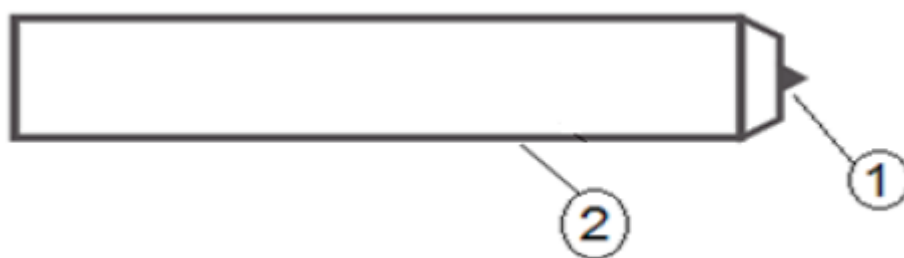


Figura 9. Desenho esquemático de um dressador de ponta única: 1 - diamante; 2 - suporte (Catálogo T.F.S. Terra Ferramentas Superabrasivas. 2013 - adaptado).

A dressagem de rebolos é seguida de uma grande variação de temperatura, esforços relativamente grandes e cargas dinâmicas de alta frequência que se concentram em um pequeno volume no dressador. Por esse motivo, na parte de contato ocorre uma grande liberação de calor, que tem temperaturas em volta de $726.85\text{ }^{\circ}\text{C} \cong 1000\text{ K}$, necessitando assim de refrigeração. Por esta razão, os meios de corte do dressador além de alta resistência, a dureza, a resistência à fratura, devem possuir alta condutividade térmica, disposição calorífica e resistência térmica (PRICKEN, 2005).

Os esforços residuais que surgem devido aos diferentes níveis de expansão térmica dos materiais que são utilizados nesta construção composta reduzem a capacidade do dressador, que é feito através de processos de metalurgia de sinterização sob elevadas temperaturas.

O exame do resultado dos dressadores como elemento de corte constituído de diamante garante que apenas a simples permuta do diamante natural pelo policristalino de diamante sintético não consente resolver o problema técnico. Esta incoerência está vinculada com o fato de que o policristalino diamantado com altas propriedades mecânicas e termo

resistência têm índices de condutividade térmica e capacidade calorífica menores do que os do diamante natural (HARANO *et al.*, 2012).

O conhecimento sanciona que a questão da substituição de diamantes naturais por sintéticos em ferramentas de afiação podem ser resolvidos atendendo exclusivamente as condições do funcionamento da ferramenta, que é constituída de elementos com funções variáveis ou de conjunto de uma peça só e não de somente pelo elemento de corte isolado (ZHANG *et al.*, 2003). Ou seja, usando a solução complexa que se recomenda na:

- Preparação do material sintético de elevada dureza para a componente de corte onde as propriedades permitam suprir os diamantes naturais;
- A construção com todo esmero da ferramenta de afiação o dressador;
- No processo de desenvolvimento de uma tecnologia de produção que cubra os índices técnicos econômicos correspondentes, tanto na fabricação como no seu funcionamento.

2.1.3 Diamantes sintéticos

A partir do surgimento no mercado do diamante sintético por volta de 1957 produzido pela General Electric Co. (EUA), a sua disponibilidade comercial tem sido um dos principais contribuintes para os grandes avanços verificados durante os últimos 57 anos, tanto na tecnologia de ferramentas abrasivas de diamante, quanto na gama de aplicações em que são solicitados. Além disso, o abastecimento restrito de diamante natural atrapalhava o desenvolvimento de novas ferramentas de diamante (BAILEY, 2000).

A tecnologia de fabricação dos diamantes sintéticos em altas pressões já estava em andamento e dominada por várias empresas desde a metade da década de 50. Estas pressões constituíam-se acima de 60.795 bar e a temperaturas acima de 1726,85 °C. Suas principais aplicações para o diamante sintético eram em ferramentas de corte e para polimento de superfícies. Na década de 70 começaram a surgir trabalhos de pesquisas acadêmicas com ênfase em obter pequenas camadas de diamantes a partir de gases que possuíam carbono em seu arranjo (BROOKES, 2010). A figura 10 representa um exemplo de deposição química a partir de gases.

Baixo consumo de energia plasma-intensificado
Deposição química a vapor (LEPECVD)

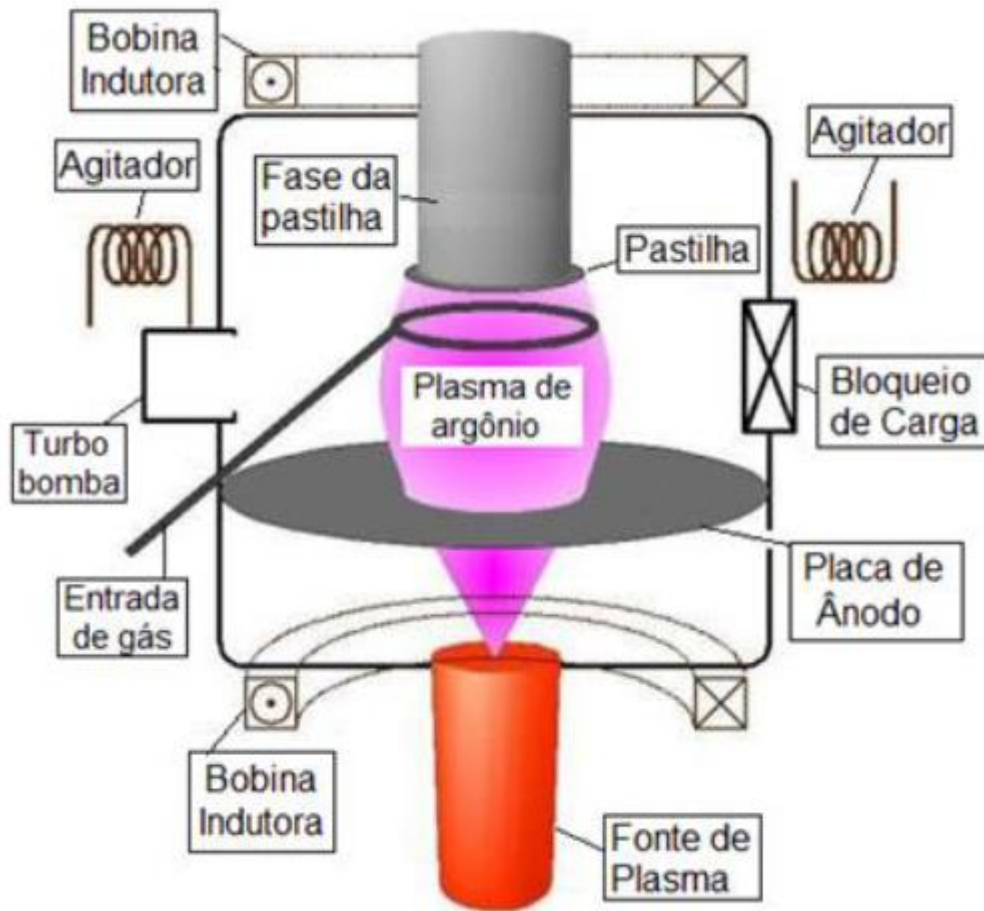


Figura 10. Diagrama da deposição química a vapor – CVD
(Iness.como.polimi.it/lepecvd.php. 2013 - adaptado).

Estas pequenas camadas, chamadas de filmes, eram produzidas em pressões menores do que uma atmosfera e em temperaturas abaixo de 926,85 °C, com substratos revestidos com pó de diamante. A partir disso, a técnica de obtenção de diamante a partir de um gás precursor se disseminou pelo mundo, como um método muito mais fácil e produtivo do que o utilizado nas décadas de 50 e 60. Este diamante sintético sucedido desta técnica passou a se chamar diamante CVD (ANGUS *et al.*, 1995).

O amplo interesse pela composição do diamante é de suas propriedades físico-químicas, sendo esse o material mais duro conhecido pela escala Mohs igual a 10, possui baixa densidade 3,52 g/cm³, baixo coeficiente

de expansão térmica $0,8 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ a $19,85 \text{ } ^\circ\text{C}$, alto índice de refração 2,42, condutividade térmica maior do que qualquer outro material à temperatura ambiente $20 \text{ W cm}^{-1} \text{ K}^{-1}$. É opticamente transparente nas regiões do visível e do infravermelho do espectro eletromagnético e tem alto índice de refração, excelente isolante elétrico, inerte quimicamente, oferece compatibilidade biológica e quando dopado torna-se um bom semicondutor (ANGUS *et al.*, 1995).

São várias as técnicas e procedimentos utilizados para a obtenção do diamante CVD, que se diferem fundamentalmente pelo processo usado na decomposição e ativação da mistura gasosa, que resultará num gás ionizado, conhecido como plasma. As tecnologias conhecidas são o plasma gerado por micro-ondas – MWCVD, filamento quente – HFCVD, chama de acetileno e oxigênio – ATCVD, jato de plasma – AJCVD – (OHTAKE *et al.*, 1990).

Embora o amplo número de técnicas utilizadas para a obtenção de filmes com boa qualidade para esta tecnologia continua em fase de prosseguidos testes, onde uma ampla quantidade de trabalhos está sendo publicado (TRAVA-AIROLDI *et al.*, 2002).

A produção dos filmes de diamantes sintéticos pode ser dividida em duas etapas: a nucleação e o crescimento. Na nucleação ocorre o desenvolvimento de nano cristais de diamante a partir da fase vapor. De uma percepção, a densidade de núcleos no processo CVD esta amarrado de tal maneira ao material do substrato e do seu preparo quanto dos parâmetros de deposição. Na etapa de nucleação, o percentual de sobrevivência dos núcleos é crítico, portanto, eles necessitam passar de um tamanho crucial para que o seu crescimento seja mais acelerado que o seu desgaste pelo ataque químico e por difusão no substrato (BROOKES, 2010).

Posteriormente a etapa inicial de nucleação, a fase de crescimento dos núcleos podem ser divididas em duas etapas. A primeira etapa está na junção de partes que se encontravam separadas, onde os núcleos crescem até se tocarem cobrindo toda a superfície do substrato. A segunda etapa vai desde a junção destas partes até a conclusão da deposição. Neste momento, o filme evolui em espessura crescendo em forma de coluna, onde plano cristalino expõe uma taxa de crescimento particular, resultando em diferentes

morfologias que dependem da razão entre a taxa de crescimento dos planos. Esta razão depende, principalmente, da concentração dos gases e da temperatura do substrato (KIM *et al.*, 1990). A figura 11 ilustra os micro cristais de um filme de diamante.



Figura 11. . Micrografia eletrônica por varredura de um filme fino de diamante onde são mostrados numerosos micro cristais multifacetados (CALLISTER, 2013 - adaptado).

Para reduzir estas dificuldades, é necessário que as propriedades químicas do substrato recebam outros materiais, entre eles, lâminas de silício que formarão substratos com planos altamente completos. Porém o processo se torna mais lento apenas início, depois de um longo período de tempo (WILLIAMS *et al.*, 1988). Outros substratos também podem ser empregados, como o molibdênio (Mo), tântalo (Ta) e o tungstênio (W).

Se o carbono que aborda a superfície seja retirado rapidamente por propagação no substrato, a nucleação torna-se demorada. As reações químicas entre o substrato e os gases reagentes, como o carbono e o hidrogênio atômico e molecular, tem enorme influência na nucleação (JOFFREAU *et al.*, 1988).

Estrias na superfície de substratos metálicos e cerâmicos produzidos por fragmentos de diamante, ou outros materiais duros, elevam a densidade de nucleação do diamante (BROOKES, 2010).

Porém, nenhuma das películas que já foram produzidas possui uma regularidade cristalina em larga escala dos diamantes naturais. As propriedades mecânicas, elétricas e óticas das películas de diamante já sintetizados se aproximam daquelas do diamante bruto, mas ainda não de forma altamente satisfatória (CALLISTER, 2013).

A fabricação em larga escala do diamante sintético proporcionou dois benefícios. Primeiro, existia a disponibilidade potencialmente indefinida de diamante industrial em comparação com os volumes restritos de material natural apropriada e em segundo, a ocasião de melhorar os materiais de engenharia com propriedades específicas apropriadas para determinadas aplicações nos setores industriais.

Como visto o uso do diamante para fins industriais atualmente chega a cerca de 90% na composição sintética e os demais 10% do diamante natural. Sendo seu principal uso em forma de grãos de diamantes aplicado na usinagem a corte e em perfurações em geral. Dimensões mais refinadas do diamante são amplamente aplicadas na área de abrasão, polimento, serragem, cerâmica, carboneto de tungstênio e em uma série muito vasta da engenharia, principalmente em materiais não ferrosos e outros demais materiais industriais (BAILEY, 2000).

O diamante sintético CVD – do inglês “Chemical Vapour Deposition” (Deposição química a vapor), tem como produção atual uma avançada metodologia que utiliza micro-ondas de plasma para a síntese e refino do diamante. É possível sintetizar diamantes com distintos formatos e tamanhos para que sejam empregados nas mais variadas formas. O processo de fabricação baseia-se necessariamente na decomposição de gases que contenham moléculas de carbono, tais como o acetileno, metano ou o dióxido de carbono, em pressões muito abaixo da atmosfera terrestre e depositados com pequenos diamantes que são fundamentais para a geração de substratos que formarão as camadas dos diamantes sintéticos (ELEMENT SIX, 2011).

A utilização do diamante em áreas especializadas, como exemplo, na usinagem de alta precisão de materiais com formatos finos e a dressagem de rebolos abrasivos convencionais por várias décadas foi se usado o diamante natural. Mas na década de 80, a tecnologia para uma produção econômica de grandes cristais de diamante sintéticos foi ampliada, ou seja, aprimorada, e peças completas de cristais sintéticos ou cortados da ordem de vários milímetros de tamanho são utilizadas para estas aplicações industriais de alta precisão (BAILEY, 2000).

O uso do diamante sintético empregado nas ferramentas de corte, de abrasão, em protetores de superfícies contra corrosão, ferramentas odontológicas, protetores ópticos e outras aplicações. No início da década de 90, já se enxergava nos Estados Unidos um negócio de bilhões de dólares, como acontece nos dias de hoje (ERENO, 2012).

2.1.4 Desgaste de dressadores

O desgaste dos dressadores é especialmente influenciado pelos parâmetros de dressamento. No processo de retificação a rugosidade é altamente dependente do nível de desgaste dos grãos abrasivos (PORTO, 2004).

Desgaste demorado e contínuo da ferramenta de diamante é o ponto para alcançar condições do plano do rebolo consistente e um resultado de retificação seguro (SHIH, 2001).

No desgaste do dressador de ponta única sua largura efetiva vai se alterando para mais, paralelamente ao momento que as etapas se propagam, resultando no aumento do raio de curvatura do diamante. Para manter o grau de recobrimento em uma constante, é necessário neste caso, suavizar o avanço axial. No dressador com diamantes em forma de grão, esse problema igualmente acontece, mas com menor intensidade (MESSER, 2003).

Os grãos de diamante ao entrarem em contato com o rebolo se arredondam e abafam a sua capacidade de corte, sendo necessário serem

retirados da matriz. Isso acontece devido ao acréscimo das forças operando sobre eles, deixando que os grãos com cortes afiados, situados na camada logo abaixo, possam agir. Como consequência, sucede uma leve alteração nos resultados de dressamento, o que é percebível em metodologias de precisão. De outra maneira, caso os grãos desgastados não forem extraídos, o dressador perde o poder de corte e não consegue mais abrir a estrutura do rebolo, passando praticamente a alisá-lo (MURAKAWA *et al.*, 2001).

2.2 Processo de Retificação

O processo de retificação é utilizado como a técnica mais eficiente e eficaz para dar acabamento e precisão a uma peça usinada. É uma operação que acontece geralmente após um torneamento, furação e fresamento (FITZPATRICK *et al.* 2013).

Segundo Malkin (1989), retificação é a designação para processos de usinagem que utilizam partículas abrasivas duras como o meio de corte. Isto é, o material é removido por meio da ação de grãos abrasivos que possuem alta dureza e que apresentam arestas que possuem formas e orientação irregulares.

Os métodos de retificação são similares, pois geralmente é um rebolo o qual é pressionado contra uma peça com uma força perpendicular à zona de contato, e assim, o material é removido da interação peça e a ferramenta (LINDSAY, 1995).

A retificação ocupa posição de destaque e é uma das mais importantes operações de usinagem empregada na produção de peças com dimensões mais exatas e de ótimo acabamento. A sua utilização é tanto para remover sobremetal em peças com geometria especiais quanto para introduzir geometria desejada e propriedades superficiais, as quais geralmente não poderiam ser obtidas por outros processos convencionais, com geometria definida, ou até mesmo por processos não convencionais de usinagem. A retificação, que já foi considerada somente como uma operação secundária de

acabamento, tem sido amplamente empregada em varias etapas de fabricação (SHAW, 1996).

Processo este muito utilizado na indústria metal mecânica, sendo integrante na maior parte, das últimas etapas do processo de fabricação de uma peça. Como conhecida por ter a característica de garantir tolerâncias dimensionais na ordem de IT4 e IT6, e baixas rugosidades Ra de 0,2 a 1,6 μm , no geral é um processo de acabamento (DINIZ *et al.* 2013).

A tendência mundial é produzir peças sempre mais sofisticadas com tolerâncias mais apertadas e com acabamento superficial de alta qualidade (MONICI *et al.*, 2006).

As principais vantagens da retificação são: elevada exatidão das peças e a usinagem de materiais duros e frágeis. Porém, apesar dessas vantagens, esse processo não é isento de problemas, sendo os mais comuns nas operações os danos térmicos na peça, difícil controle da rugosidade, vibrações excessivas e desgaste prematuro da ferramenta abrasiva (MARINESCU *et al.*, 2007).

2.3 Rebolo

É uma ferramenta de corte empregada na retificação, constituído por grãos abrasivos, material ligante também chamado de aglomerante e poros. Deve ser relativamente poroso, de modo a permitir o alojamento do fluído de corte e de cavacos, principalmente em operações onde o comprimento de contato do rebolo com a peça é mais extenso (MACHADO *et al.*, 2012).

A fabricação dos rebolos destinados à retificação apresentam diversos tipos de grãos, com diferentes tamanhos e combinados com vários tipos de ligantes com composições distintas (MALKIN, 2008).

Os grãos que o constituem possuem arestas de corte de geometria indefinida. Sendo assim, para a escolha do rebolo, os elementos a serem considerados estão em suas características, no seu desempenho onde se relaciona ao material do grão abrasivo, tamanho do grão, dureza, estrutura do rebolo e da liga aglomerante (DINIZ *et al.* 2013).

Sua composição está em três elementos, grão abrasivo de contato de material e remoção, poros e o aglomerante para reter os grãos abrasivos no rebolo e a cavidade intergranular para a armazenagem do material removido. Os rebolos são caracterizados pelo seu material abrasivo e classificados como rebolos convencionais (óxido de alumínio) e rebolos superabrasivos (nitreto de boro cúbico – CBN e diamante). Para rebolos resinóides e rebolos metálicos sua estrutura e o espaço intergranular devem ser criados dentro do processo de cura, essa estrutura está representada na figura 12.

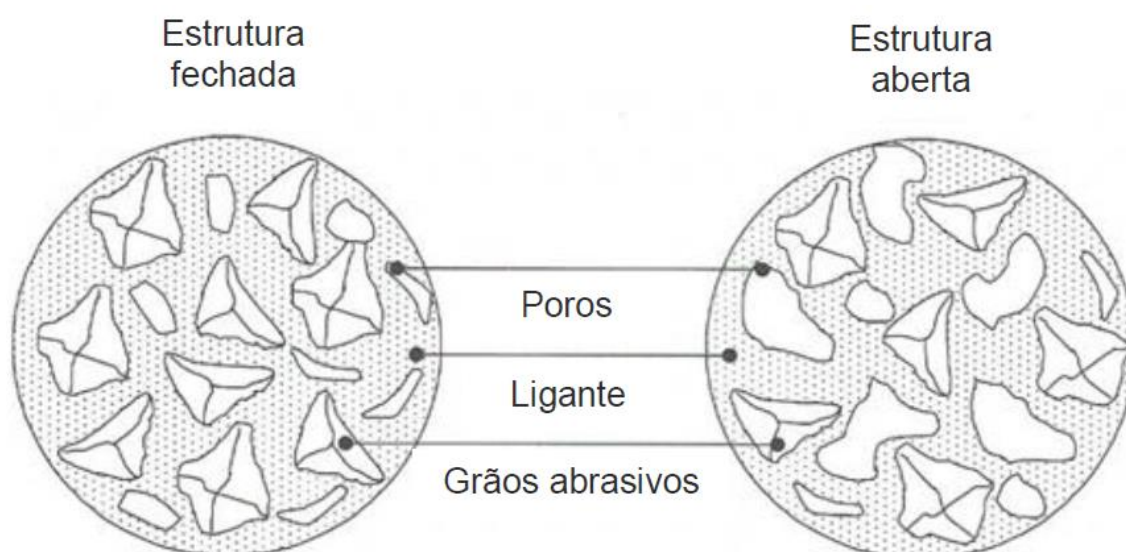


Figura 12. Estrutura de um rebolo de retificação (PORTO, 2004 - adaptado).

2.3.1. Dureza do rebolo

Segundo Salmon (1992), a quantidade de ligante misturado com o grão irá determinar a dureza do rebolo. Tal dureza é a força com que o ligante retém o grão na sua posição sob as forças de retificação.

Klocke & Merbecks (2001), citados por Webster & Tricard (2007), criaram um método para medir a dureza do ligante usando uma sonda mecânica, conforme a figura 13. Esse processo permite visualizar problemas de homogeneidade, variação de dureza, variação de concentração e comportamento inconsistente do rebolo. O sistema atinge diretamente o grão individualmente para ver com que força o ligante se fratura. Nesse caso, o grão pode fraturar como pode se desprender. Usando um sensor de emissão

acústica e, com base no sinal produzido, pode-se conhecer o mecanismo de falha na interface grão/ligante.

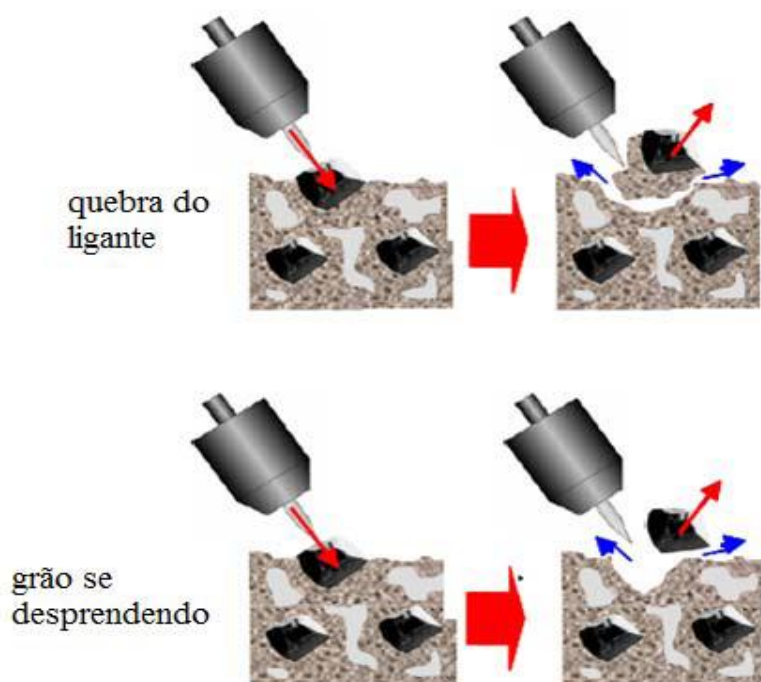


Figura 13. Sonda para teste da dureza do rebolo (KLOCKE & MERBECKS, 2001- Modificado).

2.3.2. Estrutura do rebolo

Uma propriedade adicional aos rebolos é sua estrutura: densidade de grãos e porosidade. Se uma quantia de grãos muito finos for misturada com uma quantia grande de ligante sob elevada pressão, baixa porosidade irá resultar. Entretanto, se for uma quantia de grãos grossos, resultará em uma estrutura mais aberta e, conseqüentemente, mais porosa. Para induzir a porosidade no rebolo, podem ser usados elementos voláteis durante um estágio da fabricação, chamado estágio verde, antes do forno (SALMON, 1992).

Webster & Tricard (2007) descrevem a porosidade como a medida de espaçamento entre os grãos abrasivos. A porosidade pode ser descrita, também, como um efeito local na estrutura do rebolo fazendo com que haja

fluxo de fluido e acomodação do cavaco. Grande porosidade é boa para alojar cavacos grandes quando se retifica materiais dúcteis.

2.4 Desgaste Do Rebolo

Conforme Malkin (2008) são três os tipos de desgastes que sofre um rebolo durante o processo de retificação: por atrito, fratura do grão e fraturado ligante. Estes desgastes ocorrem de forma simultânea em maior ou menor grau. Na Figura 14 estão indicadas as formas de desgaste do rebolo, iniciando como desgaste da ligação, desgaste do grão por achatamento, micro fissuras e rachaduras do grão e posterior rompimento tanto dos grãos abrasivos quanto da ligação entre eles.

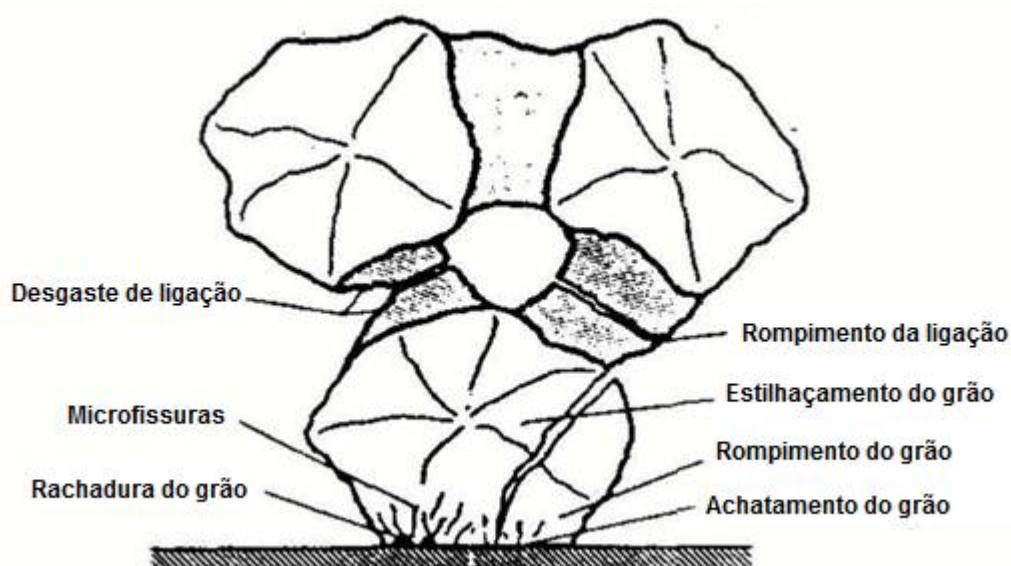


Figura 14. Mecanismos de desgaste do grão abrasivo (Adaptado - König, et al 2010)

Quando há desgaste do grão abrasivo, forma-se um platô na superfície do grão, conforme a Figura 15, aumentando as forças de corte, o atrito e a temperatura na região de corte, o que pode gerar problemas metalúrgicos ao material. Quando os grãos abrasivos se desgastam pela ação da usinagem, é necessária uma nova dressagem para proporcionar aos grãos abrasivos do rebolo, novos gumes de corte (FERNÁNDEZ, et al 2011).

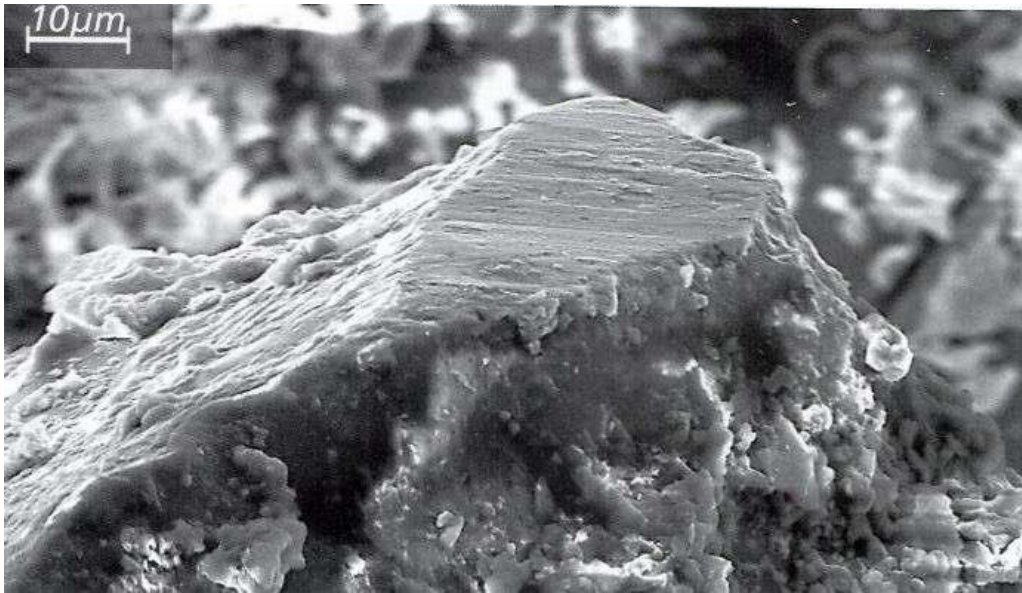


Figura 15. Grão abrasivo desgastado (Adaptado - Badger, et al 2010)

2.5 RUGOSIDADE

Rugosidade são imperfeições contidas em uma superfície, podendo ser mensurada com recursos e equipamentos apropriados. A importância do acabamento superficial aumenta quando cresce a precisão de ajuste entre as peças. Uma menor tolerância de ajuste não é suficiente para garantir a funcionalidade do par acoplado (MARTINS, 2008).

Quando as superfícies são observadas com recursos apropriados, revelam irregularidades. As orientações das irregularidades dependem do tipo de processo que deu origem a superfície (OLIVEIRA, 2004).

O comportamento de componentes mecânicos é bastante influenciado pela rugosidade. Dentre estas influências podemos destacar:

- qualidade de deslizamento;
- resistência ao desgaste;
- resistência à corrosão e à fadiga;
- vedação;
- possibilidade de ajustes de montagem com maior precisão;
- aparência.

A norma NBR ISO 4287 (2002), que substituiu a NBR 6405 (1988), especifica termos, definições e parâmetros para determinação do estado da

superfície (rugosidade, ondulação e perfil primário) pelo método do levantamento do perfil. Um sistema de coordenadas cartesianas positivo é utilizado nesse método, tendo o comprimento de avaliação (l_n) no eixo X, perpendicular ao eixo Y dentro da superfície real e o eixo Z dirigido do material para o meio ambiente de acordo com a figura 16.

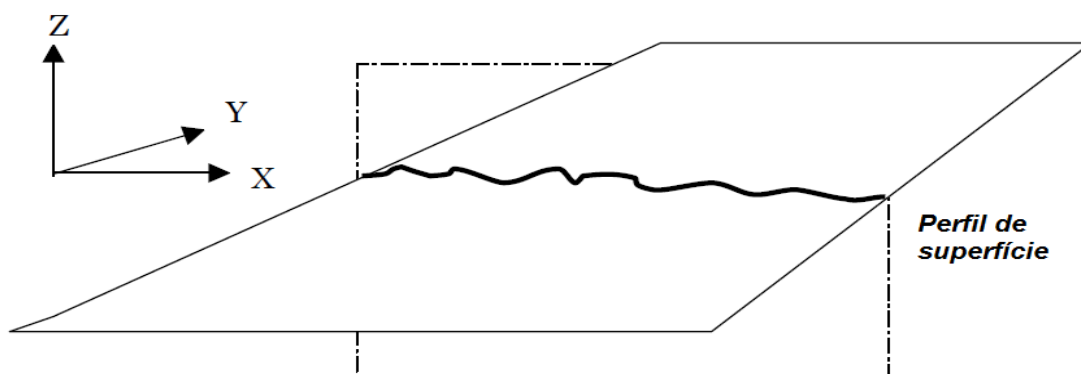
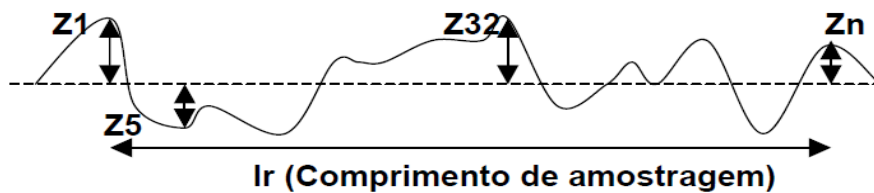


Figura 16. Parâmetros para determinação estado de superfície.

O comprimento de avaliação de rugosidade (l_n) pode conter um ou mais comprimentos de amostragem (l_r). Os responsáveis pela separação dos componentes de ondas longas e curtas são os filtros de perfil (λ_s , λ_c , λ_f) que possuem comprimentos de onda limite diferentes (cut-off). O perfil de rugosidade é derivado do perfil primário utilizando o filtro λ_c que define a separação entre os componentes da rugosidade e ondulação. Dentre os parâmetros de rugosidade do perfil e suas definições, pode-se destacar:

Ra - Média aritmética do somatório dos valores absolutos das ordenadas $Z(x)$ em relação à linha média, no comprimento de amostragem, como mostra a figura 17.



Parâmetro Ra (Rugosidade média).
$$Ra = \frac{Z1 + Z2 + Z3 + Z4 + \dots + Zn}{N}$$

Figura 17. Média da rugosidade Ra (NBR ISO 4287 (2002)).

O comprimento de medição da rugosidade é chamado de cutt-off e deve-se tomar o perfil efetivo de uma superfície a ser medida e o valor do cutt-off é determinado por uma expectativa de rugosidade. Assim o valor do cutt-off utilizado deve ser testado, convergindo para um valor de rugosidade esperado, pois como o perfil apresenta rugosidade e ondulação, o comprimento de amostragem (cutt-off) filtra esta ondulação (LIU, *et al* 2013).

Existem vários parâmetros para medição de rugosidade, R_a , R_z e R_{max} são os mais utilizados. Segundo Liu, *et al* (2013), o R corresponde à média aritmética dos cinco valores de rugosidade parcial.

Em geral, uma peça usinada é examinada em termos macrogeométricos (direção, forma e orientação) e microgeométricos (rugosidade). Ela é examinada depois da operação de usinagem, ou mesmo durante, de acordo com as tolerância de rugosidade especificadas no projeto (MACHADO, *et al* 2011).

Na retificação pode-se avaliar a eficiência do processo ou proporção de grãos que perderam a afiação, analisando-se, assim a rugosidade da peça. Normalmente, ondulações e falhas devem ser evitadas na fabricação de uma superfície, pois representam erros de fabricação (MACHADO, *et al* 2011).

A retificação também influencia diretamente na rugosidade, sendo este um fator essencial na inspeção em várias aplicações industriais, como a produção e processamento de metais, semicondutores, cerâmicas, papel e plástico (DHANASEKAR *et al.*, 2008).

A retificação automática e inteligente é utilizada por indústrias para a produção com alta qualidade de acabamento e geometria e, neste cenário,

destaca-se a rugosidade como um dos fatores mais importantes para se avaliar a condição da peça durante o processo de acabamento (SAMHOURI *et al.*, 2005).

2.6 Efeitos da Temperatura na Retificação

Queima de retífica é um termo usado para descrever qualquer tipo de dano térmico ocorrido na peça obra durante a retificação, porém existem diversos defeitos e cada um ocorre em situações diferentes que influenciam de várias formas a qualidade final da peça (BADGER, 2010).

A queima é esperada quando uma temperatura crítica ($\sim 720^{\circ}\text{C}$) é ultrapassada na zona de contato da peça com o rebolo (MALKIN, 1989; NATHAN *et al.*, 1999; KWAK *et al.*, 2001).

Ocorrendo a queima, há a tendência de um aumento da dureza superficial e queda da dureza subsuperficial. Este aumento de dureza se deve a reaustenitização, seguida de formação de martensita não revenida (MALKIN, 1989).

Estes danos térmicos ao material durante a retificação são gerados em função das altas temperaturas da região de corte, pelo grande atrito dos grãos abrasivos do rebolo com a peça-obra. Na Figura 18 pode-se verificar a distribuição da temperatura na região de corte, que muitas vezes não consegue ser resfriada adequadamente pelo fluido, podendo gerar problemas metalúrgicos para o componente retificado (BADGER, 2010).

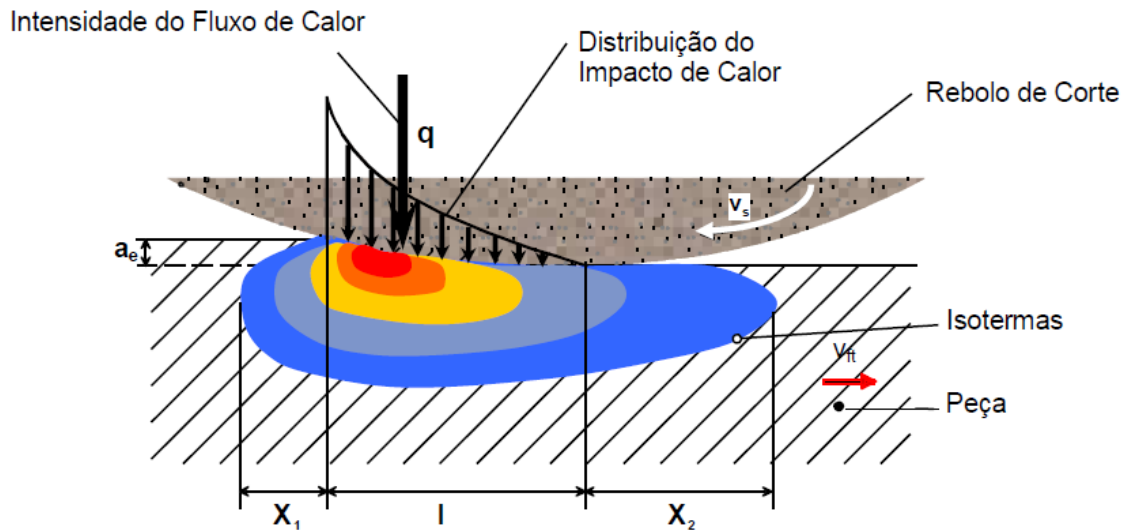


Figura 18. Intensidade do fluxo de calor (Adaptado - Badger, et al 2010)

A queima associada à retêmpera é o dano mais comum, podendo causar desde uma redução na vida útil até mesmo o colapso total do componente retificado (BADGER, 2010).

O dano térmico de queima e retêmpera, segundo Badger, *et al*(2010) ocorrem quando a peça obra é afetada pela temperatura quando esta chega a níveis superiores ao de têmpera do material.

Com ação do fluido refrigerante o material é resfriado de forma rápida em sua superfície e mais lentamente no interior da peça. Desta forma a queima simples é mais interna, causada pelo resfriamento lento da região, gerando uma superfície menos dura que a original e a região mais externa é retemperada, atingindo dureza acima da original (BADGER, 2010).

A Figura19 mostra esquematicamente a diferença de durezas após um dano térmico de retificação.

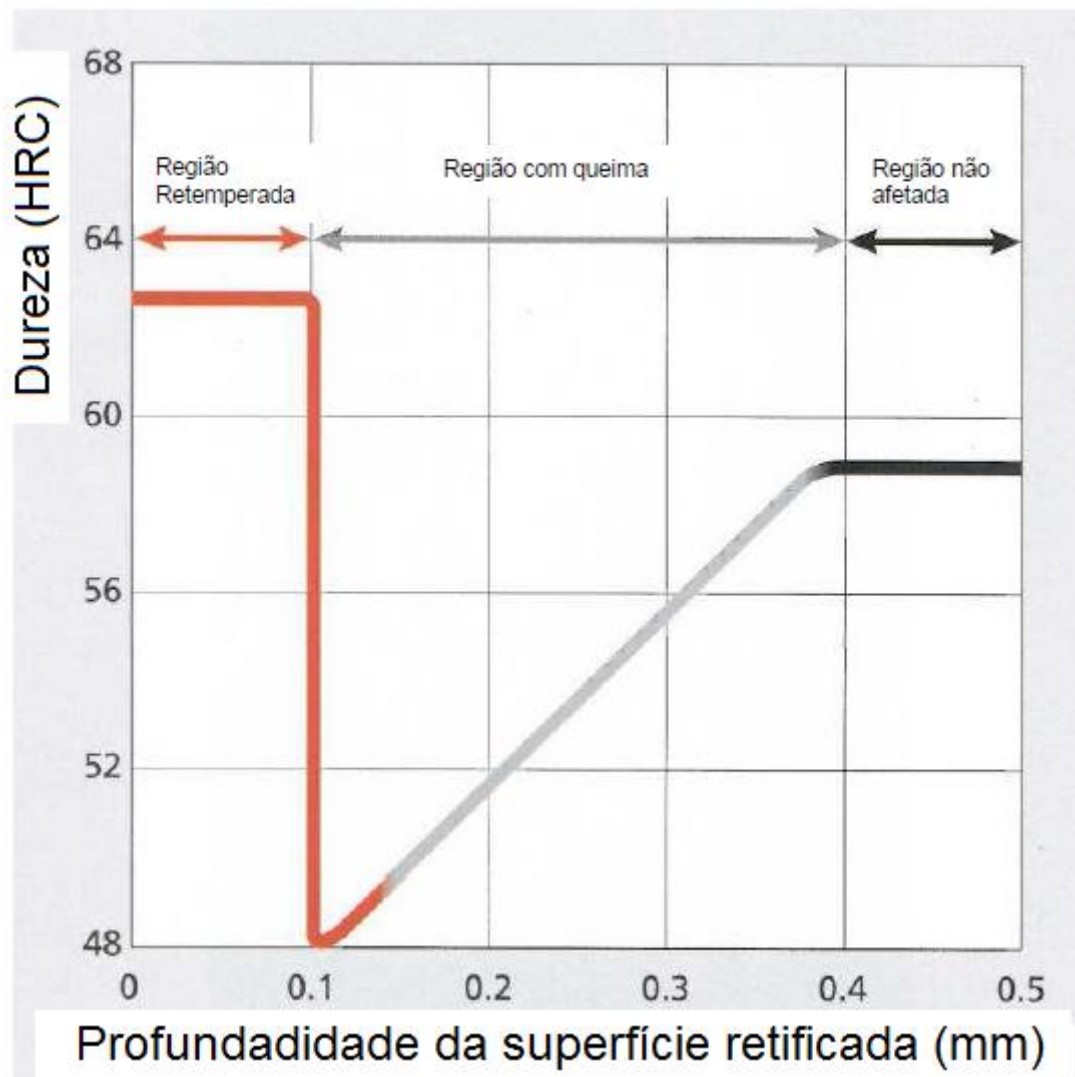


Figura 19. Profundidade da superfície retificada (adaptada - Badger, et al 2010).

Na Figura 20 é mostrado um gráfico da temperatura gerada na região de corte em função do tempo. Para valores de temperatura acima da temperatura de transformação de fase do material (T_{tf}) e após um resfriamento rápido gerado pelo fluido de corte ou refrigerante tem-se a retemper, e com resfriamento lento a queima (BADGER, 2010).

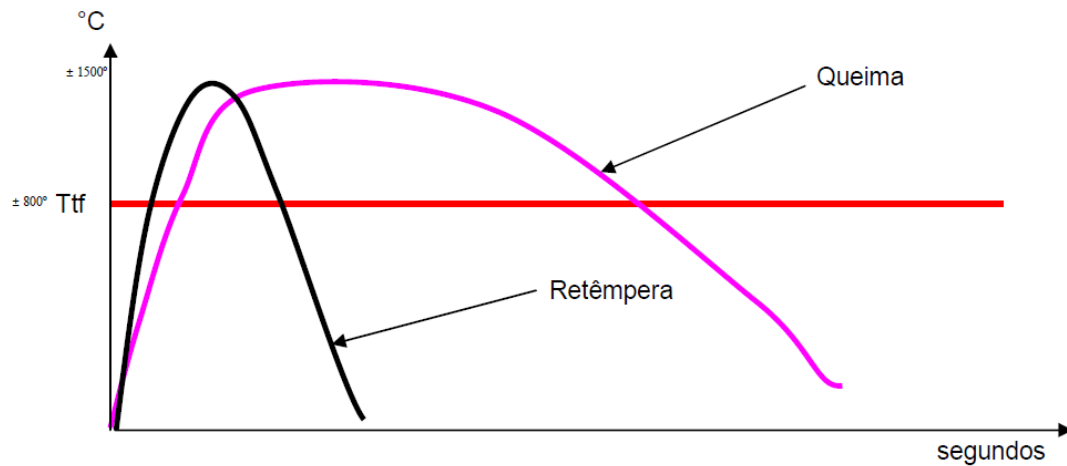


Figura 20. Têmpera versus tempo (Adaptado - Badger, et al 2010)

A identificação dos defeitos de queima e retêmpera só pode ser visualizada através de um exame metalográfico destrutivo. O material deve ser cortado, embutido, polido, atacado quimicamente e posteriormente visualizado em um microscópio a sua microestrutura. Uma diferença de colocação na micro-estrutura do material indica a presença ou não de queima e retêmpera (BADGER, 2010).

A Figura 21 mostra uma peça com danos metalúrgicos desse tipo.

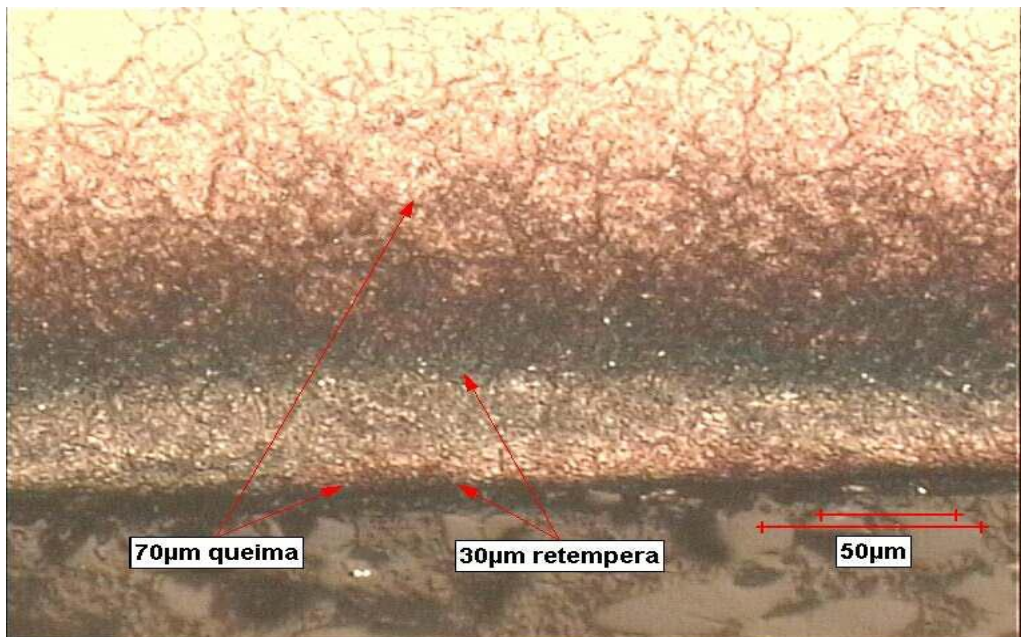


Figura 21. Material com queima e retêmpera (BADGER, 2010)

2.7 Principais Variáveis e Parâmetros Envolvidos No Processo De Retificação Plana

Existem relações muito fortes entre as variáveis de entrada e saída do processo de retificação que devem ser verificadas antes da usinagem. Para um resultado satisfatório devem-se distinguir as variáveis de entrada da máquina e entradas do processo. Os parâmetros típicos de entradas das máquinas retificadoras são: taxa de avanço, velocidade do rebolo e da peça, profundidade de dressagem e tempo de centelhamento (spark-out) (DOMAN, *et al* 2006). A Figura 22 mostra as relações do processo de retificação, as entradas e saídas do processo.



Figura 22. Relações do processo de retificação (Adaptado – Doman, et al 2006).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios foram realizados no laboratório de usinagem e abrasão (LUA), da Faculdade de Engenharia Mecânica – UNESP – *Campus* de Bauru.

Onde foi utilizado uma retificadora plana (Figura 23), fabricada pela empresa SULMECÂNICA, modelo: RAPH-1055, série nº AP-I, ano: 1997, tensão 380/220 v. A máquina contém uma base magnética para a fixação da peça e controle de velocidade tangencial e na retificadora são acoplados dois motores: o motor de rotação do rebolo e o motor do fuso.



Figura 23. Máquina retificadora plana modelo 1055E fabricada pela empresa SULMECÂNICA utilizada nos ensaios de dressagem.

3.1. Tipo do rebolo

O rebolo fabricado pela empresa NORTON (figura 24) tem as seguintes características:

- Abrasivo convencional de óxido de alumínio: é utilizado em rebolos para retificar materiais ferrosos; é o abrasivo convencional de menor dureza, sendo relativamente resistente ao impacto.

- Ligante vitrificado: mantém o grão preso, até que este perca a capacidade de corte em decorrência do processo de usinagem.
- Dureza L (média): é a capacidade de reter os grãos.
- Granulometria 150 (muito fino): grãos mais finos são utilizados para o polimento e lapidação.
- Estrutura (dimensões 355.6 x 25.4 x 127 mm): tem relação direta com a densidade e com o espaçamento médio entre os grãos abrasivos.



Figura 24. Rebolo utilizado nos ensaios.

3.2. Tipo de dressador

O dressador a ser analisado é um dressador de ponta única de diamante sintético CVD. Este diamante foi o que apresentou melhores resultados com

análise dos dados obtidos e comparados. Um dos dressadores será com o diamante CVD num formato piramidal (figura 25) e outro no formato trapezoidal (figura 26).

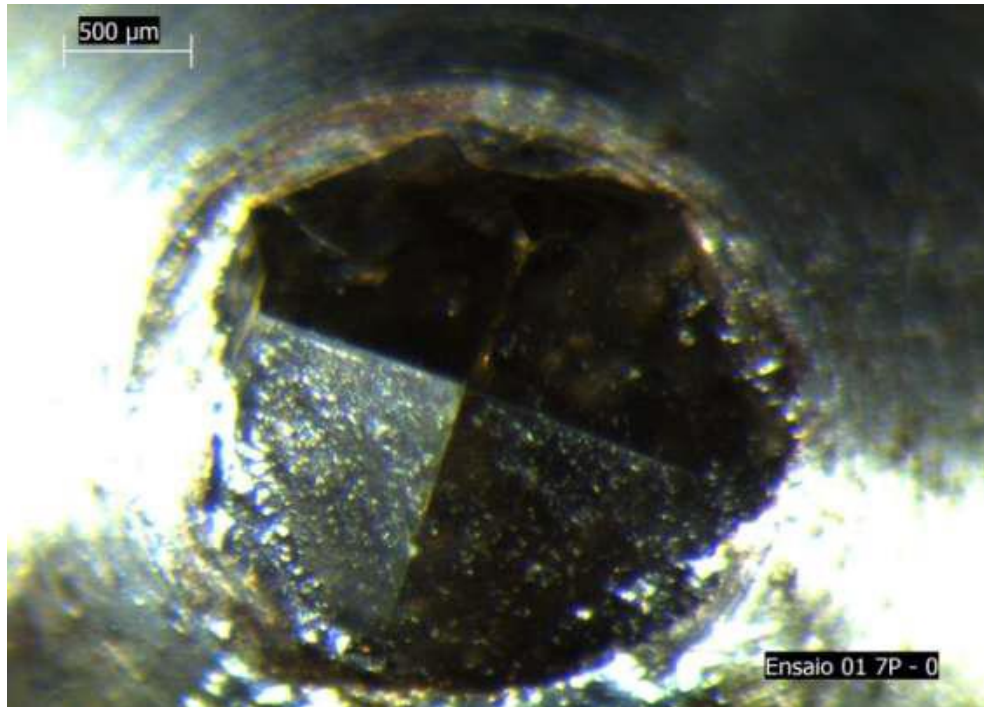


Figura 25. Diamante CVD com formato piramidal.

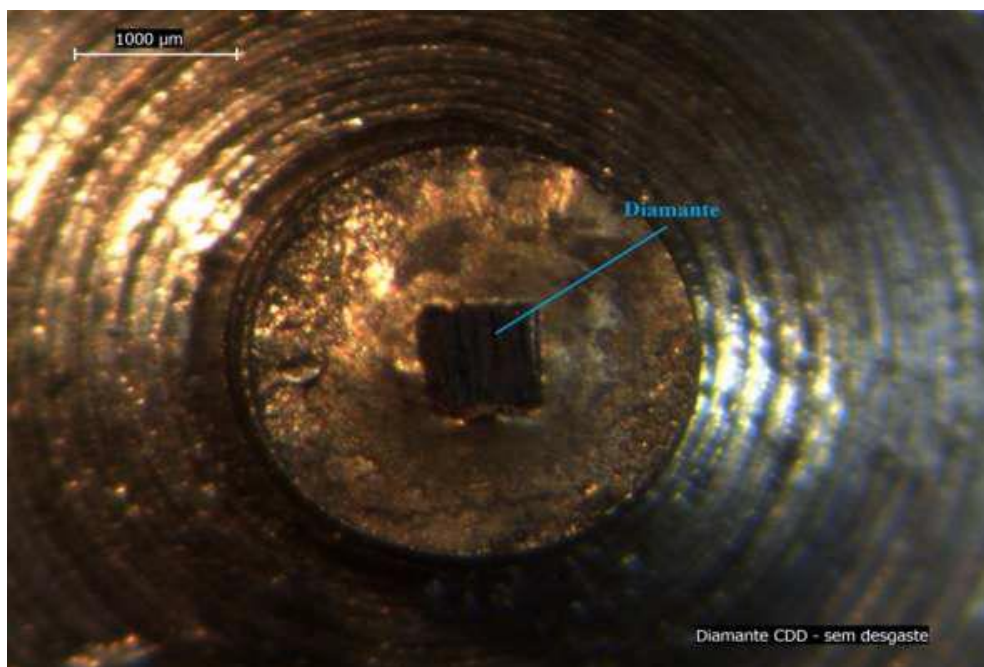


Figura 26. Dressador com o diamante CVD no formato trapezoidal.

3.3. Rugosímetro

Para a medição da rugosidade media das peças (Ra), utilizou-se um aparelho da marca *Taylor Hobson*, modelo *Surtronic 3+*.

A medição foi realizada na direção perpendicular a superfície de retificação (Figura 27). O rugosímetro foi ajustado para efetuar as medidas com um comprimento de medição (*cut-off*) igual a 0,25 mm. Realizaram-se cinco medições em posições distintas na região retificada da peça retificada no ensaio.

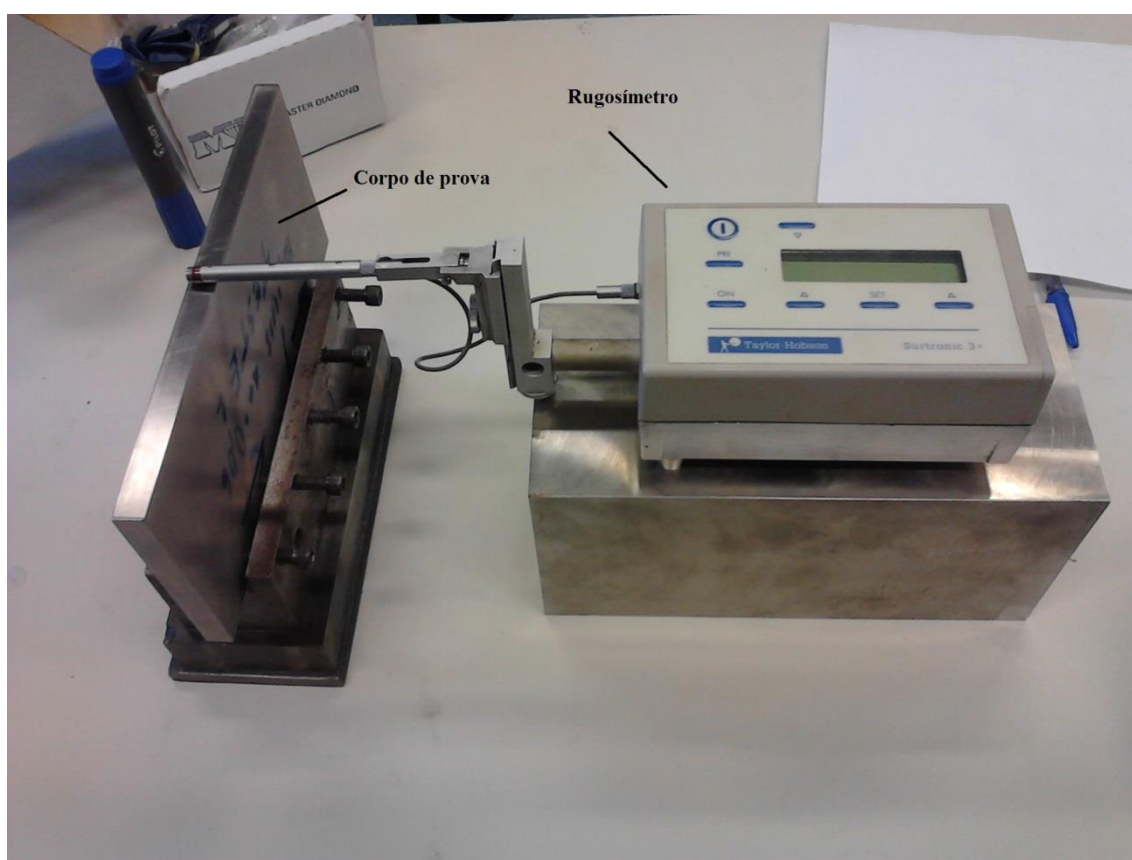


Figura 27. Forma utilizada de medição da rugosidade.

Antes de cada medição a peça foi limpa de forma a retirar as impurezas e registrar as medidas da melhor rugosidade com mínimos erros e desvios padrão. O procedimento de limpeza consistiu em primeiro limpar com o querosene, depois passar uma camada de solvente e por fim passar álcool etílico.

3.4 Corpo de prova

O corpo de prova utilizado foi o de aço VP 80. Ele é um aço inoxidável endurecível por precipitação, desenvolvido especialmente para fabricação de moldes para conformação de polímeros termoplásticos. Por ser inoxidável, permite aplicação em processos corrosivos, como a conformação de polímeros clorados. Fornecido no estado solubilizado. Após usinagem, o envelhecimento pode ser realizado para uma faixa de dureza entre 35 e 48 HRC e então levado ao polimento final (Villares Metals, 2013). As principais vantagens são:

- Excelente resistência à corrosão.
- Excelentes propriedades mecânicas, uniformes em todas as direções.
- Elevado grau de pureza.
- Boa usinabilidade.
- Excelente polibilidade e resposta à texturização.
- Boa resistência ao desgaste.
- Excelente soldabilidade.
- Excelente estabilidade dimensional e de forma.

É produzido pelo processo de refusão VAR (refusão a vácuo), possuem baixo nível de segregação, excelente microestrutura bruta de solidificação, alta isotropia e teores muito baixos de gases dissolvidos, que torna suas propriedades uniformes e promove altíssima polibilidade. A tabela 1 mostra suas principais características (Villares Metals, 2013).

Tabela 1. Composição química e norma padrão para o aço VP 80 (Villares Metals, 2013).

Composição química aço VP 80					Norma
C	Cr	Ni	Al	Si	AISI
0,03	12,0	7,8	1,2	0,25	D6

Suas principais utilizações são (Villares Metals, 2013):

- Moldes para injeção de termoplásticos clorados e não clorados. Pode ser aplicado, por exemplo, para conformação de poliacetato e PVC.

- Matrizes para extrusão de termoplásticos clorados e não clorados.
- Moldes para termoplásticos reforçados com carga e Plásticos de Engenharia.
- Trabalho ou estocagem em condições de atmosfera úmida ou corrosiva.

3.5. Metodologia

O dressador foi posicionado conforme mostrado nas figuras 28 e 29.

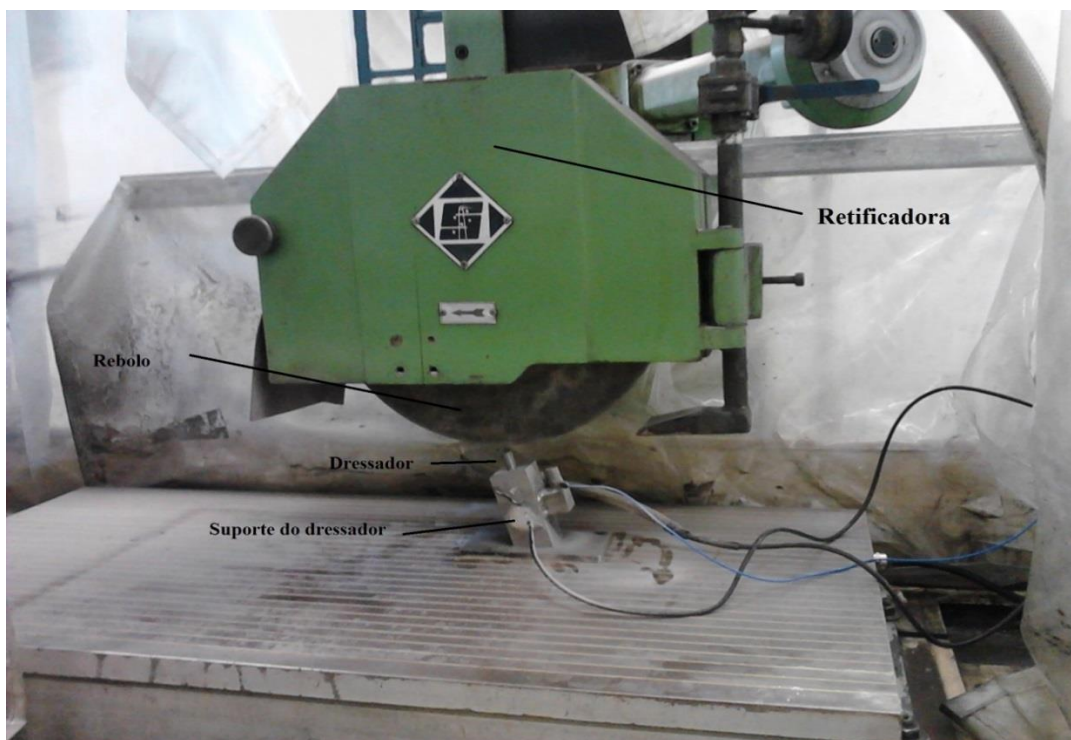


Figura 28. Disposição dos equipamentos para o experimento.

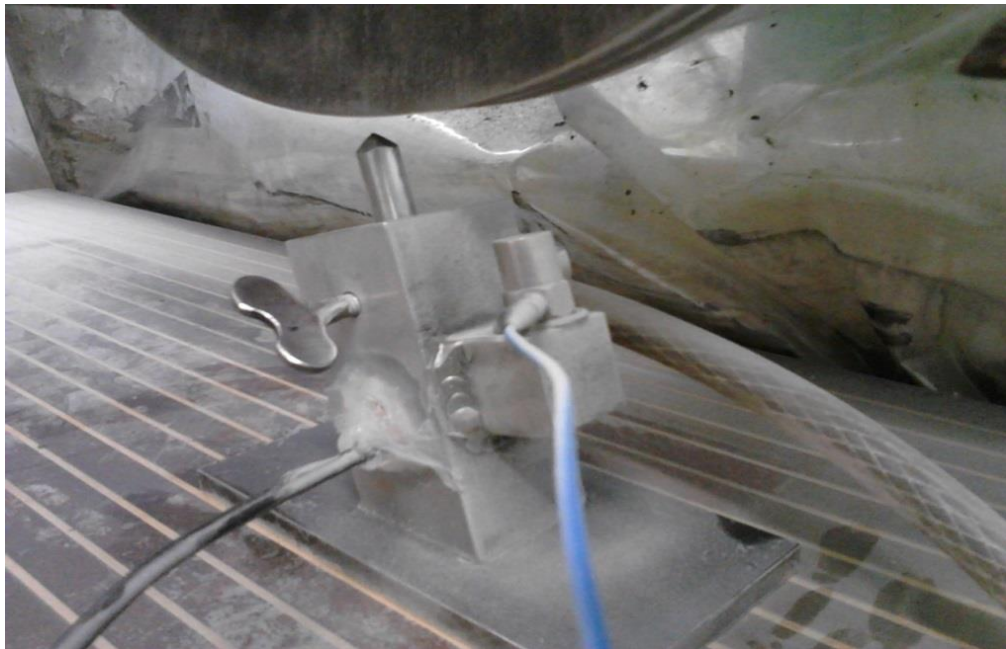


Figura 29. Montagem do dressador, com o dressador, suporte do dressador e dos equipamentos de medição conectados a ele.

Foi realizada uma dressagem a cada 20 passadas com cada tipo de formato geométrico (trapezoidal e piramidal) e com parâmetros U_d iguais a 1 e 5 (figura 30 e 31).



Figura 30. Ensaio com o dressador composto pelo diamante trapezoidal.

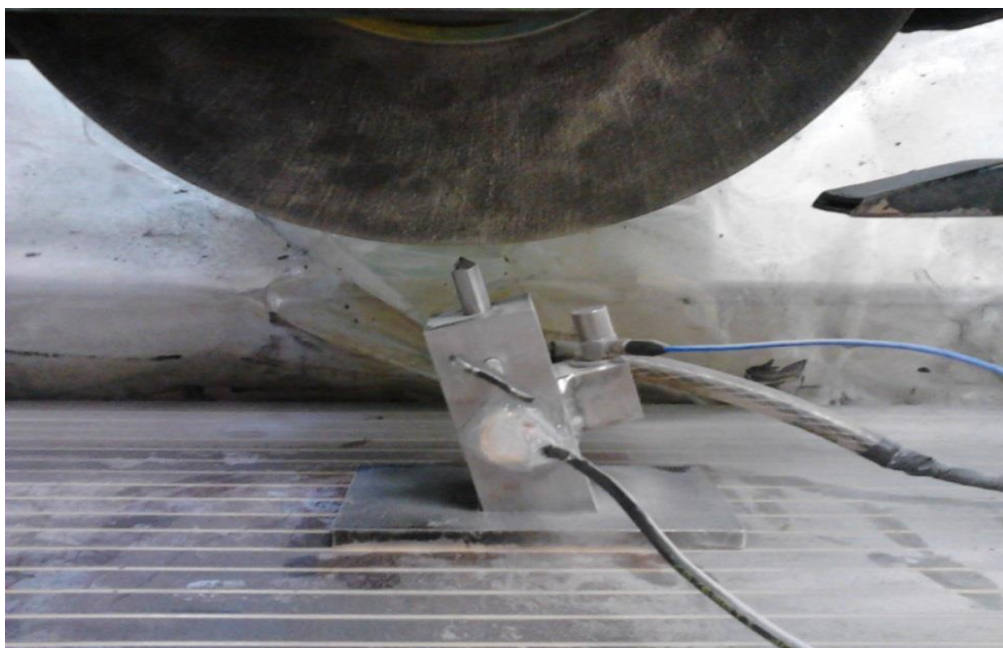


Figura 31. Ensaio com o dressador composto pelo diamante tipo piramidal.

Após a dressagem, foi feita uma retificação plana nas condições de usinagem determinadas e constantes, com cerca de 20 passadas (figuras 32 e 33). Terminada a retificação foi medida a rugosidade do corpo de prova (aço VP 80).

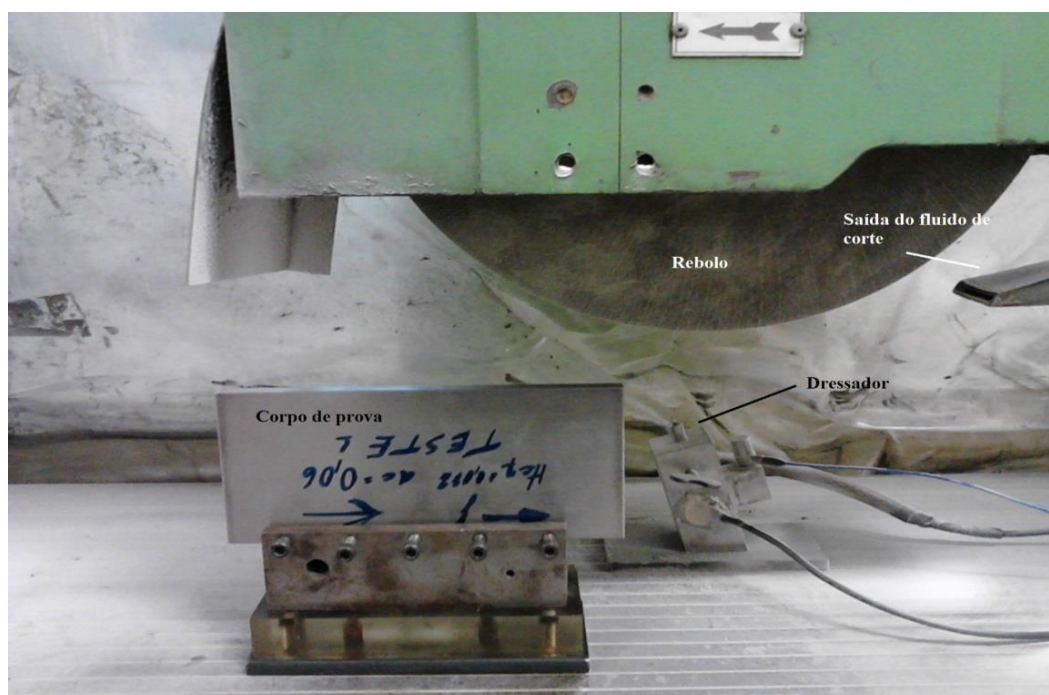


Figura 32. Preparação da operação de retificação.

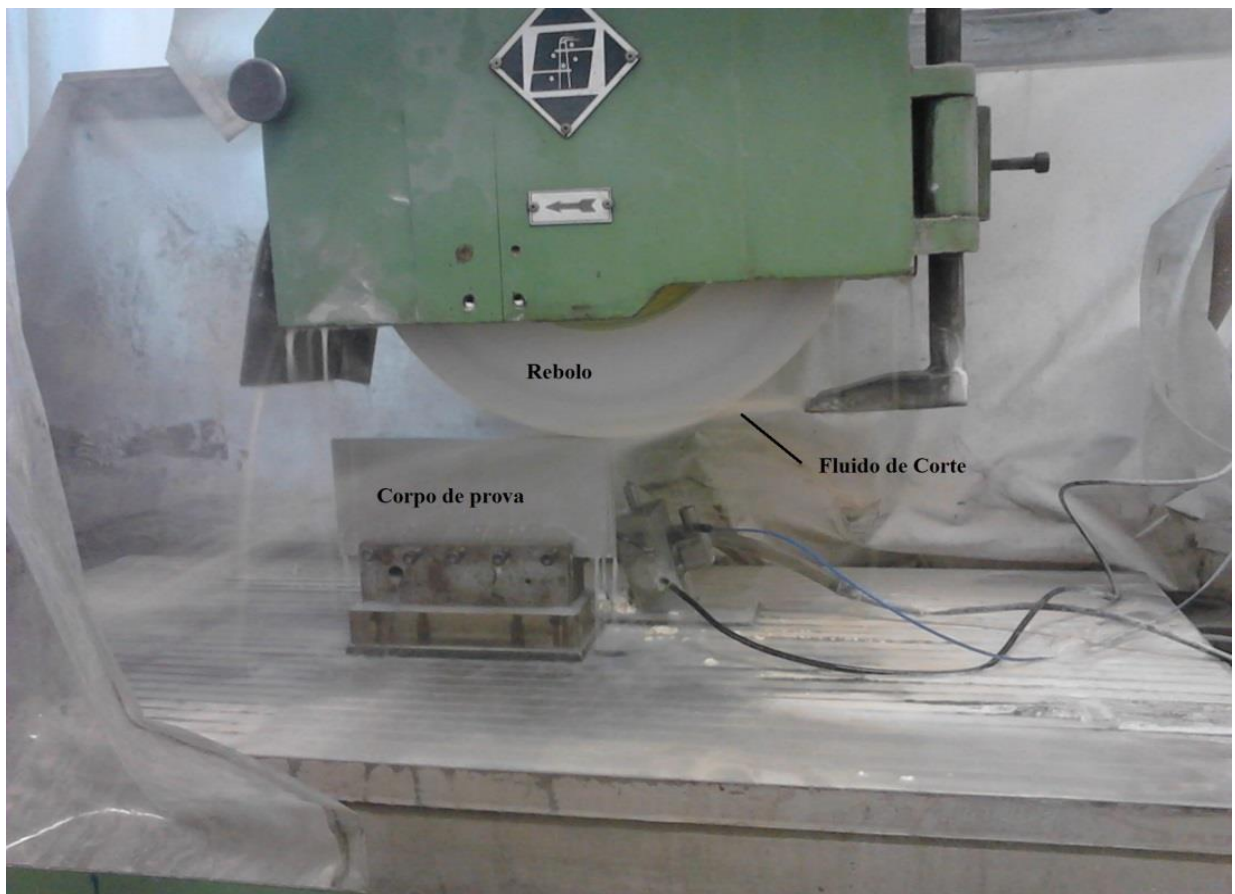


Figura 33. Operação de retificação.

Após a retificação, foi realizada uma nova dressagem do rebolo (figura 34), com diamante num formato diferente do usado anteriormente. Todo o procedimento de medição foi novamente efetuado.

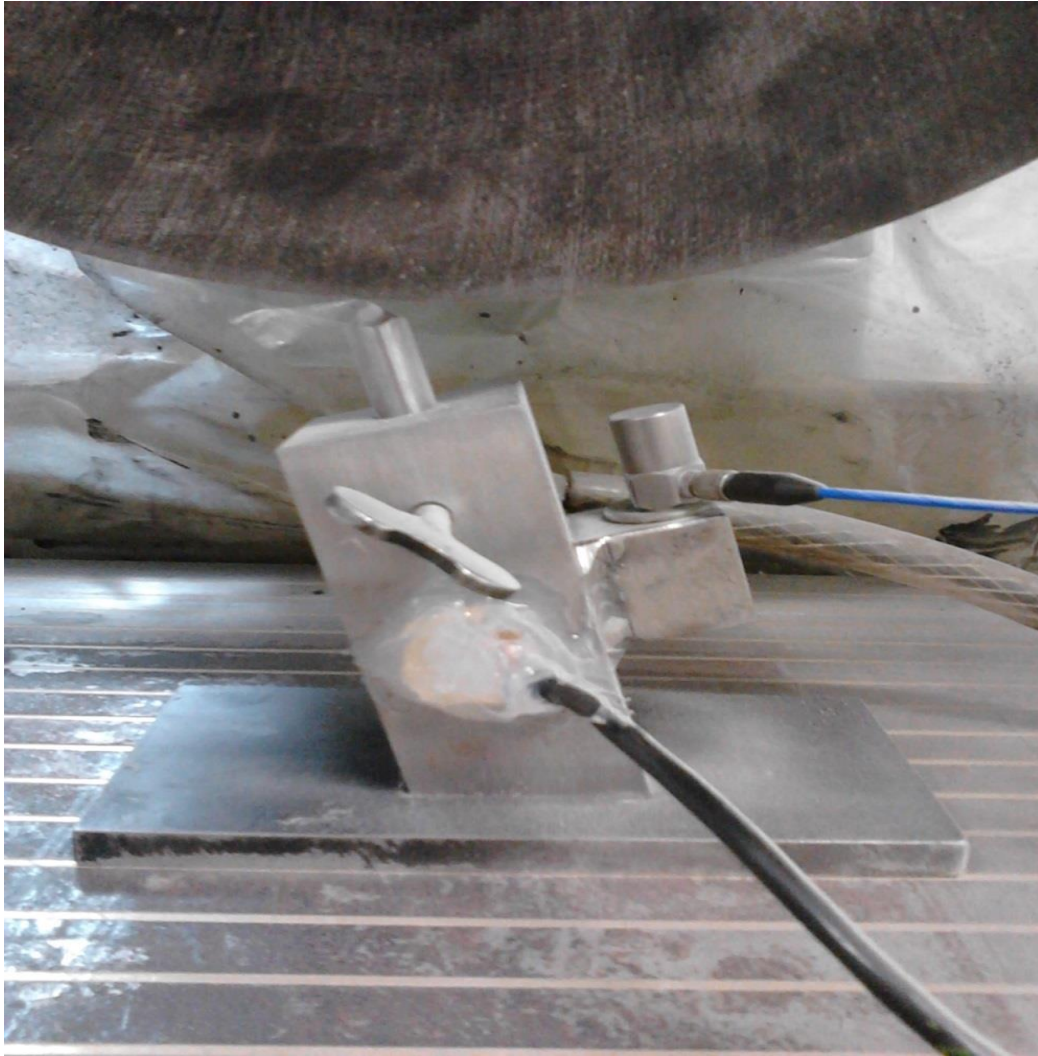


Figura 34. Operação de dressagem após a retificação.

Por fim, o parâmetro de dressagem U_d foi modificado e mais dois ensaios foram realizados, para cada um dos tipos de formatos geométricos.

Cada tipo de dressador foi ensaiado três vezes para uma condição de usinagem ($U_d = 1$) e outras três vezes para a outra condição de usinagem ($U_d = 5$).

Assim, ao total, foram realizados doze ensaios, com suas respectivas rugosidade a serem comparadas.

3.6. Parâmetros utilizados

Dentre os principais parâmetros de retificação e dressagem utilizados, tem-se a velocidade transversal do rebolo, mantida constante para os ensaios dos dois tipos de dressadores. A velocidade e frequência do inversor do motor da retificadora também foram constantes para os ensaios dos dois tipos de dressadores.

Assim, tem-se a velocidade transversal do dressador igual a 3,45 mm/s, a rotação do motor igual a 450 rpm. A profundidade de dressagem (a_d) foi constante e igual a 40 μm .

O parâmetro de dressagem do grau de recobrimento (U_d) foi de 1 e 5, porém, para o início dos testes foi utilizado U_d igual a 1. A partir dos parâmetros utilizados, foi estipulado o tempo de dressagem de 7,3 segundos para o $U_d= 1$, e para o parâmetro de $U_d= 5$ foi utilizado o tempo de dressagem de 36,5 segundos.

A velocidade da mesa foi ajustada rotineiramente, de acordo com a diminuição do diâmetro do rebolo, mantendo a operação de retificação uniforme.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, serão realizadas três abordagens: em primeiro serão apresentados os resultados da relação entre o número de passadas e a rugosidade obtida para o dressador com diamante de perfil trapezoidal, e depois para o de perfil piramidal, ambos para $U_d = 1$. Após isso, será analisado os dois diamantes em conjunto. Na segunda etapa, serão analisados os dados da relação entre o número de passadas e a rugosidade obtida para o dressador, com diamante de perfil trapezoidal e depois para o de perfil piramidal, ambos para $U_d = 5$. Por fim, serão analisados os dois diamantes em conjunto. Na terceira etapa é feita a comparação dos resultados obtidos para ambos os parâmetros de dressagem.

4.1 Dressagem com diamante com perfil trapezoidal para o parâmetro $U_d=1$

Foram realizados três ensaios para o diamante sintético nacional CVD de perfil trapezoidal e, após 20, 70 e 120 passadas, foram realizadas retificações com o rebolo dressado. Foram retiradas cinco (5) medidas de rugosidade para cada uma das três etapas de cada um dos três ensaios.

A tabela 2 apresenta os valores de rugosidade obtidos para o ensaio 1 com o diamante sintético nacional CVD perfil trapezoidal.

Tabela 2. Valores de rugosidade, média e desvio padrão para o primeiro ensaio com o diamante de perfil trapezoidal.

Número de Passadas	Rugosidade (μm)						
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5	Média	Desvio padrão
20	0,46	0,42	0,40	0,46	0,50	0,45	0,0390
70	0,28	0,22	0,30	0,24	0,28	0,26	0,0329
120	0,32	0,24	0,32	0,26	0,26	0,28	0,0374

A figura 35 mostra os valores contidos na tabela 3 disposta em um eixo cartesiano.

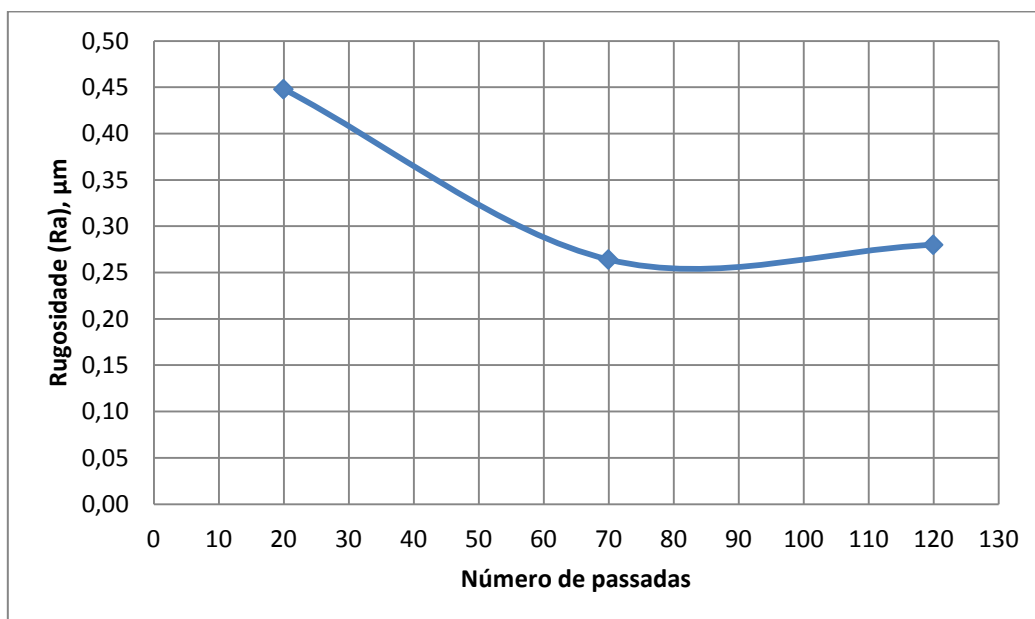


Figura 35. Rugosidade versus número de passadas para o ensaio 1 do diamante de perfil trapezoidal.

Observando os valores contidos na tabela 2 e mostrados na figura 35, é possível perceber que para este primeiro ensaio, a rugosidade nas 20 primeiras passadas foram maiores que para as demais. A rugosidade para as passadas 70 e 120 foram muito semelhantes, mostrando uma tendência bastante linear e constante da rugosidade. O desvio padrão mostrou-se pequeno, com baixa dispersão dos dados obtidos.

A tabela 3 apresenta os valores de rugosidade obtidos para o ensaio 2 com o diamante sintético nacional CVD perfil trapezoidal.

Tabela 3. Valores de rugosidade, média e desvio padrão para o segundo ensaio com o diamante de perfil trapezoidal.

Número de Passadas	Rugosidade (μm)						
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5	Média	Desvio padrão
20	0,62	0,52	0,50	0,54	0,48	0,53	0,0540
70	0,26	0,36	0,24	0,28	0,26	0,28	0,0469
120	0,24	0,38	0,22	0,20	0,26	0,26	0,0707

A figura 36 mostra os valores contidos na tabela 3 disposta em um eixo cartesiano.

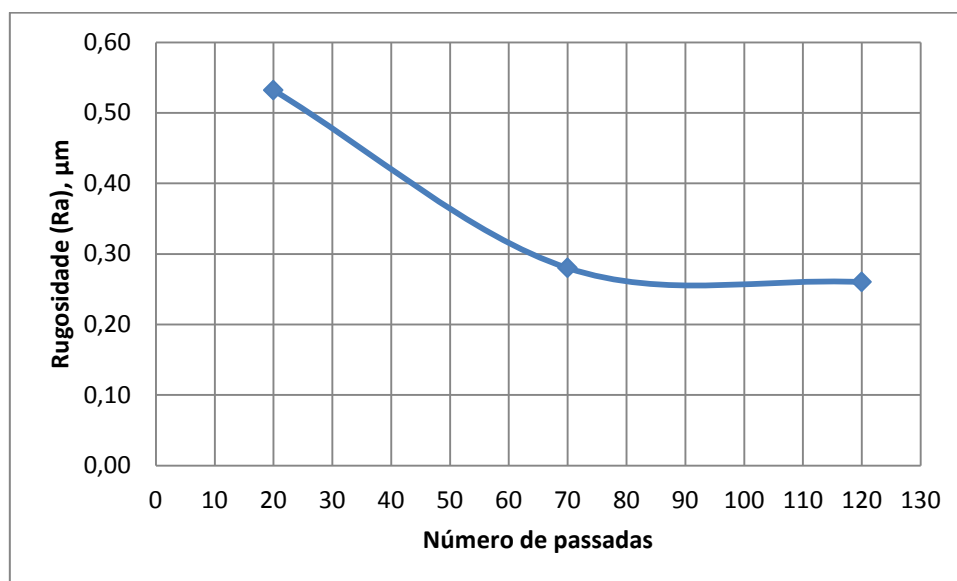


Figura 36. Rugosidade versus número de passadas para o ensaio 2 do diamante de perfil trapezoidal

Pelos dados apresentado na tabela 3 e mostrados no gráfico da figura 36, pode-se perceber que os resultados apresentaram tendência de queda na rugosidade após 20 passadas e uma tendência linear e constante entre 70 e 120 passadas. O desvio padrão apresentado pelos valores foram pequenos, salvo o ponto 120 que apresentou um desvio padrão um pouco maior que os demais. Porém, os dados apresentaram baixa dispersão.

A tabela 4 apresenta os valores de rugosidade obtidos para o ensaio 3 com o diamante sintético nacional CVD perfil trapezoidal.

Tabela 4. Valores de rugosidade, média e desvio padrão para o terceiro ensaio com o diamante de perfil trapezoidal.

Número de Passadas	Rugosidade (μm)						
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5	Média	Desvio padrão
20	0,476	0,469	0,548	0,557	0,424	0,49	0,0564
70	0,328	0,334	0,301	0,316	0,315	0,32	0,0128
120	0,244	0,225	0,262	0,26	0,351	0,27	0,0485

A figura 37 mostra os valores contidos na tabela 4 disposta em um eixo cartesiano.

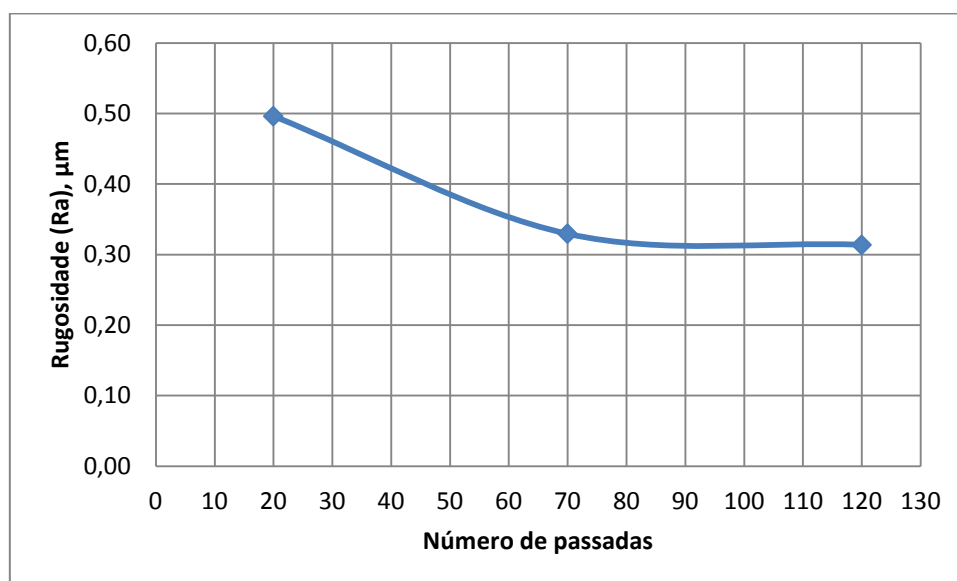


Figura 37. Rugosidade versus número de passadas para o ensaio 3 do diamante de perfil trapezoidal

Para o ensaio, pode ser observado – com o auxílio dos dados da tabela 4 e figura 37 – que a rugosidade para as 20 primeiras passadas foram maiores que as demais, e após a 20ª passada apresentou uma redução, ficando aproximadamente constante entre as passadas 70 e 120. O desvio padrão também foi baixo, com exceção do primeiro ponto que apresentou uma dispersão de dados maior.

A tabela 5 apresenta os valores de média e desvio padrão para os três ensaios realizados.

Tabela 5. Valores médios de rugosidade para os três ensaios, com seus respectivos desvios padrões.

Número de passadas	Rugosidade (Ra), μm				
	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Média	Desvio padrão
20	0,45	0,53	0,49	0,49	0,0400
70	0,26	0,28	0,32	0,29	0,0306
120	0,28	0,26	0,27	0,27	0,0100

A figura 38 sobrepõe os valores de rugosidade média para os três ensaios.

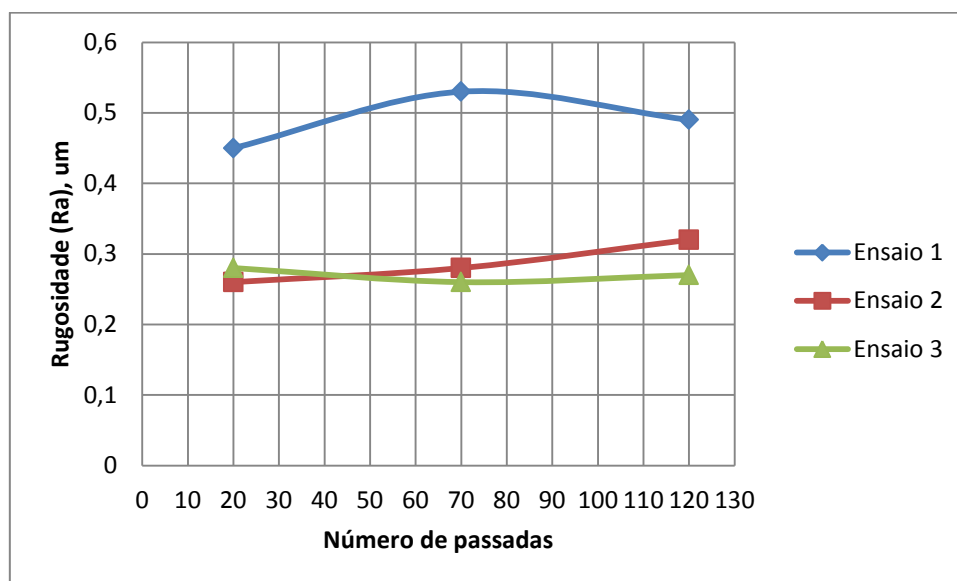


Figura 38. Valores da rugosidade versus número de passadas para os três ensaios com o diamante com o perfil trapezoidal.

Analisando os dados contidos na tabela 5 e figura 38 percebe-se que o ensaio 2 e 3 apresentaram resultados consideravelmente mais próximos, enquanto que o ensaio 1 apresentou uma dispersão maior.

O ensaio 1 apresentou uma tendência mais dinâmica, com um aumento no valor da rugosidade da passada 20 para a 70, de $0,45 \mu\text{m}$ a $0,53 \mu\text{m}$, e depois uma redução nesse valor até a passada 120, de $0,53 \mu\text{m}$ para $0,49 \mu\text{m}$.

O ensaio 2 apresentou um aumento no valor da rugosidade ao longo do número de passadas, porém um aumento bem sutil, quase próximo a uma reta horizontal constante.

Já o ensaio 3 gerou uma redução leve na rugosidade entre as passadas 20 e 70, de $0,28 \mu\text{m}$ a $0,26 \mu\text{m}$, e após isso um aumento até a passada 120, de $0,26 \mu\text{m}$ para $0,27 \mu\text{m}$. Mas novamente, foi uma variação bem leve de rugosidade ao longo do ensaio.

A figura 39 mostra a curva média de rugosidade obtida para o diamante com o perfil trapezoidal.

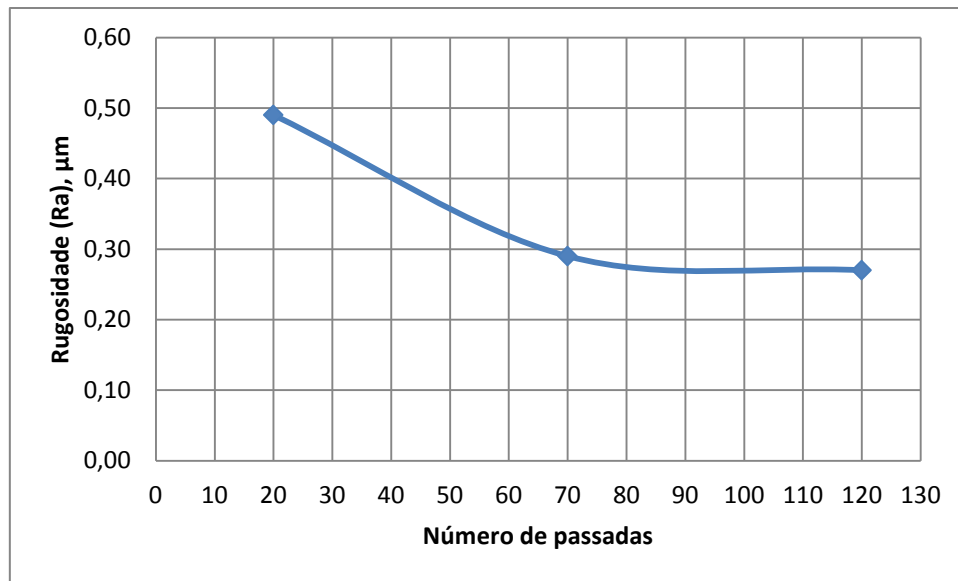


Figura 39. Valor médio de rugosidade para o ensaio com o diamante trapezoidal, com seu respectivo desvio padrão.

Agora, adicionando a análise da figura 36 à tabela 5 e figura 39, é possível perceber uma tendência clara de redução na rugosidade após 20 passadas e de um comportamento de uma reta horizontal constante entre as passadas 70 e 120. O desvio padrão para as médias foram baixas, indicando baixa dispersão dos dados obtidos e validando o experimento.

A Figura 40 (a) mostra o dressador com o diamante no perfil trapezoidal em sua fase inicial sem desgaste, intacto, observando a Figura 40 (b) o dressador após a dressagem de 20 passadas, visivelmente apresentando o desgaste do mesmo, na Figura 40 (c) mostra o Dressador após a dressagem realizadas após 70 passadas, na Figura 40 (d) mostra o dressador após 120 passadas marcando o fim do ensaio da dressagem com o perfil trapezoidal com o parâmetro $U_d = 1$.



Figura 40. Imagens do dressador trapezoidal: (a) Sem desgaste; (b) após 20 passadas; (c) após 70 passadas; (d) após 120 passadas

4.1.1 Dressagem com diamante com perfil piramidal para o parâmetro $U_d=1$

Realizados os três ensaios para o diamante sintético nacional CVD de perfil piramidal e, após 20, 70 e 120 passadas, foram realizadas retificações com o rebolo dressado. Foram retiradas cinco (5) medidas de rugosidade para cada uma das três etapas dos ensaios.

A tabela 6 apresenta os valores de rugosidade obtidos para o ensaio 1 com este diamante.

Tabela 6. Valores de rugosidade, média e desvio padrão para o primeiro ensaio com o diamante de perfil piramidal.

Número de Passadas	Rugosidade (Ra), μm						
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5	Média	Desvio padrão
20	0,36	0,38	0,34	0,36	0,42	0,37	0,0303
70	0,32	0,26	0,32	0,38	0,26	0,31	0,0502
120	0,28	0,24	0,32	0,26	0,28	0,28	0,0297

A figura 41 mostra os valores médios contidos na tabela 6 disposta em um eixo cartesiano.

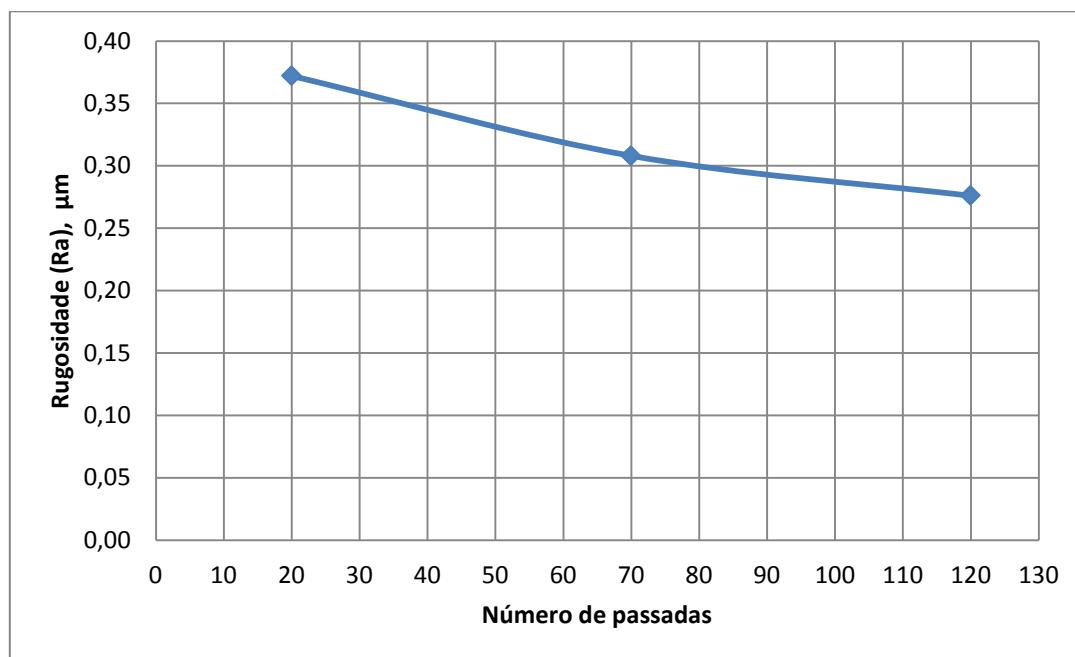


Figura 41. Rugosidade versus número de passadas para o ensaio 1 do diamante de perfil piramidal.

Observando os dados da tabela 6 e da figura 41 é possível perceber que para o ensaio 1 com o diamante de perfil piramidal houve uma redução no valor de rugosidade ao longo do ensaio, com uma redução mais acentuada da passada de 20 vezes para a passada 70 vezes. O desvio padrão é baixo,

porém foi um pouco maior para os dados da passada de número 70 vezes. A dispersão dos dados é baixa. A tendência de queda é perceptível, porém leve.

A tabela 7 apresenta os valores de rugosidade obtidos para o ensaio 2 com este diamante.

Tabela 7. Valores de rugosidade, média e desvio padrão para o segundo ensaio com o diamante de perfil piramidal.

Número de Passadas	Rugosidade (Ra), μm						
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5	Média	Desvio padrão
20	0,32	0,32	0,42	0,30	0,36	0,34	0,0477
70	0,34	0,26	0,40	0,38	0,26	0,33	0,0657
120	0,38	0,30	0,40	0,30	0,34	0,34	0,0456

A figura 42 mostra os valores médios de rugosidade contidos na tabela 7 disposta em um eixo cartesiano, para melhor visualização.

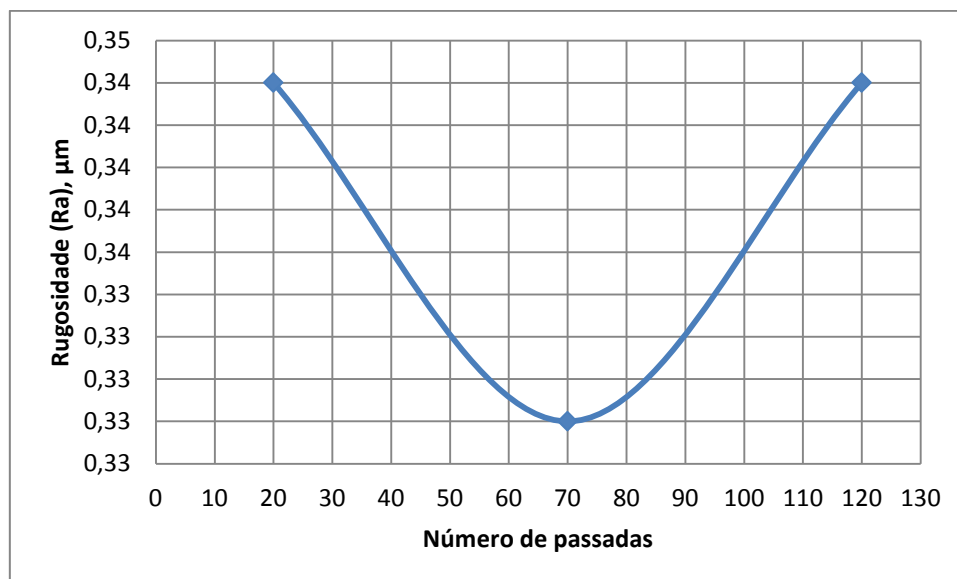


Figura 42. Rugosidade versus número de passadas para o ensaio 2 do diamante de perfil piramidal

Pelos dados mostrados na tabela 7 e pela figura 42 é possível analisar, para este segundo ensaio, que os valores de rugosidade se mantiveram

praticamente constantes ao longo do ensaio, variando muito pouco. Assim, a tendência de uma reta horizontal constante é claramente observada. O desvio padrão e a dispersão dos dados foram baixos.

A tabela 8 apresenta os valores de rugosidade obtidos para o ensaio 3 com este diamante.

Tabela 8. Valores de rugosidade, média e desvio padrão para o terceiro ensaio com o diamante de perfil trapezoidal.

Número de Passadas	Rugosidade (μm)						
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5	Média	Desvio padrão
20	0,35	0,42	0,35	0,38	0,41	0,38	0,0340
70	0,32	0,36	0,36	0,32	0,32	0,33	0,0214
120	0,39	0,36	0,41	0,31	0,33	0,36	0,0426

A figura 43 mostra os valores contidos na tabela 8 disposta em um eixo cartesiano.

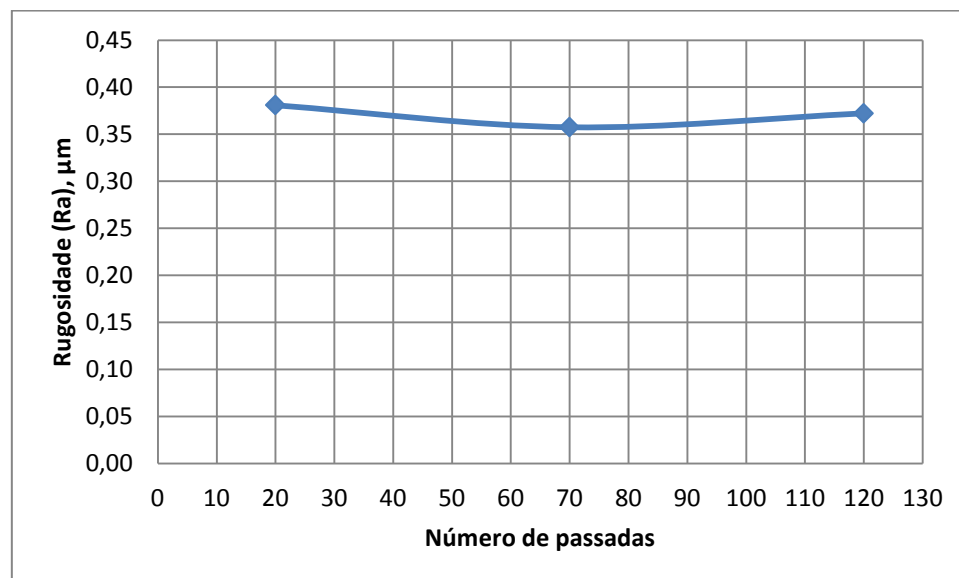


Figura 43. Rugosidade versus número de passadas para o ensaio 3 do diamante de perfil piramidal

Para o terceiro ensaio com o dressador de ponta única com diamante CVD sintético de perfil piramidal, é possível verificar, com base nos dados da tabela 9 e da figura 35, que a rugosidade sofre uma leve queda da passada 20

para a passada de número 70 e, após 70 passadas, sofre uma pequena elevação. Apesar disso, a tendência de desgaste é praticamente constante. O desvio padrão obtido no experimento é baixo, porém um pouco mais acentuado no ponto 70 passadas, mas sem prejudicar a autenticidade dos dados colhidos.

A tabela 9 apresenta os valores de média e desvio padrão para os três ensaios.

Tabela 9. Valores médios de rugosidade para os três ensaios, com seus respectivos desvios padrões.

Número de passadas	Rugosidade (Ra), μm				
	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Média	Desvio padrão
20	0,37	0,34	0,38	0,36	0,0208
70	0,31	0,33	0,33	0,32	0,0115
120	0,28	0,34	0,36	0,33	0,0416

A figura 44 contém os valores de rugosidade média para os três ensaios.

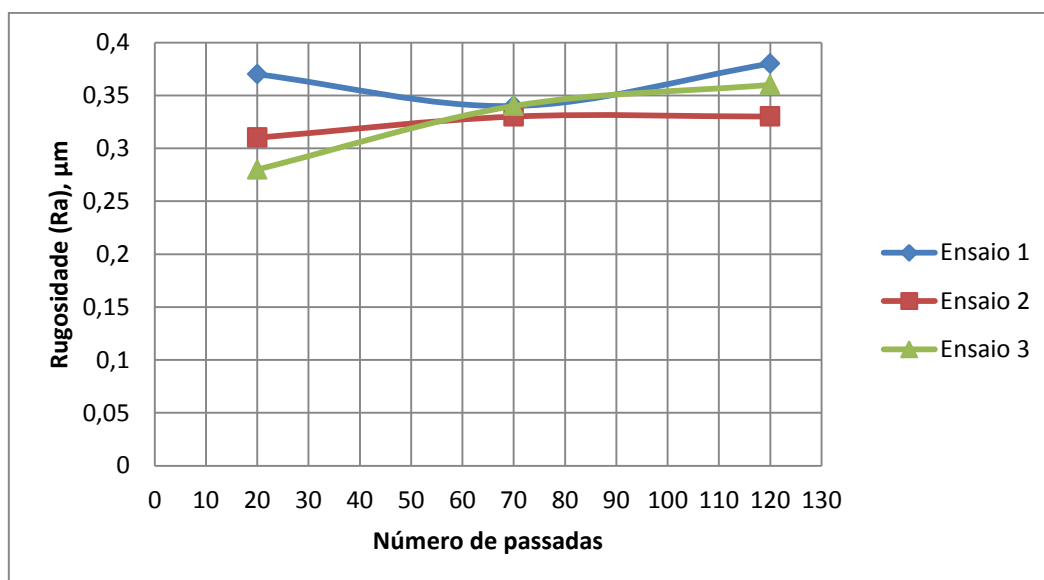


Figura 44. Valores da rugosidade versus número de passadas para os três ensaios com o diamante com o perfil piramidal.

Por meio da tabela 9 e da figura 44 é possível verificar que os três ensaios obtiveram tendências e valores muito próximos. O ponto 70 passadas foi o que apresentou os dados mais parecidos, seguidos pela passada 20 e passada 120 vezes.

A figura 45 contém a curva média de rugosidade obtida para o diamante com o perfil trapezoidal.

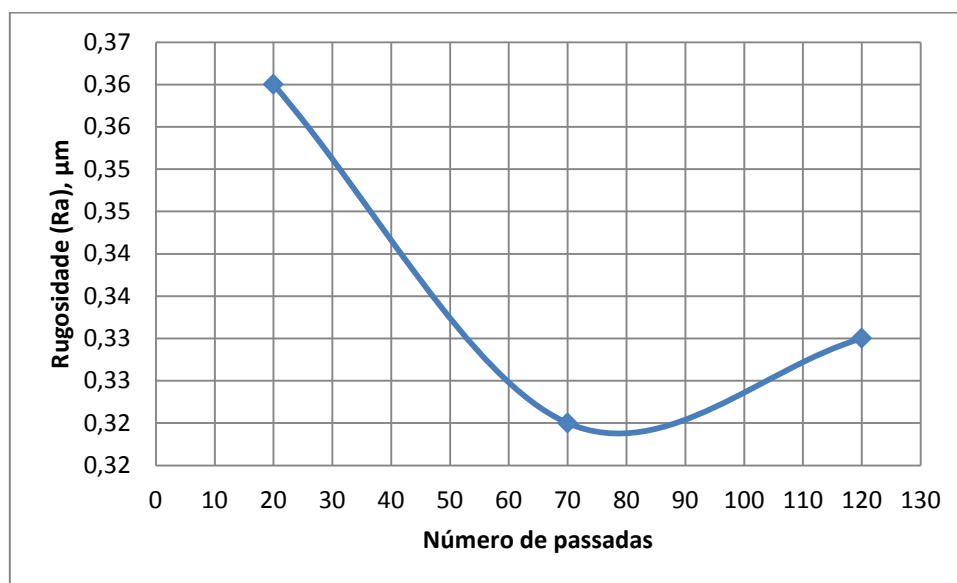


Figura 45. Valor médio de rugosidade para o ensaio com o diamante trapezoidal, com seu respectivo desvio padrão.

Através da figura 45, bem como da tabela 9 e figura 44, mostrou a tendência geral de desgaste para o dressador de ponta única com diamante sintético CVD de face piramidal de fabricação nacional. Ele apresentou uma leve queda entre as passadas 20 e 70, de 0,36 μm para 0,32 μm , e posterior aumento de rugosidade, de 0,32 μm para 0,33 μm . Essas variações nos valores de rugosidade foram bastante leves, o que mostra uma tendência de rugosidade constante ao longo do número de passadas. O desvio padrão das médias é considerado baixo, com baixa dispersão dos dados, validando os dados colhidos.

A Figura 46 (a) mostra o dressador com o diamante no perfil piramidal em sua fase inicial sem desgaste, intacto, observando a Figura 46 (b) o dressador após a dressagem de 20 passadas, visivelmente apresentando o desgaste do mesmo, na Figura 46 (c) mostra o Dressador após a dressagem realizadas após 70 passadas, na Figura 46 (d) mostra o dressador após 120 passadas marcando o fim do ensaio da dressagem com o perfil piramidal com o parâmetro $U_d = 1$.

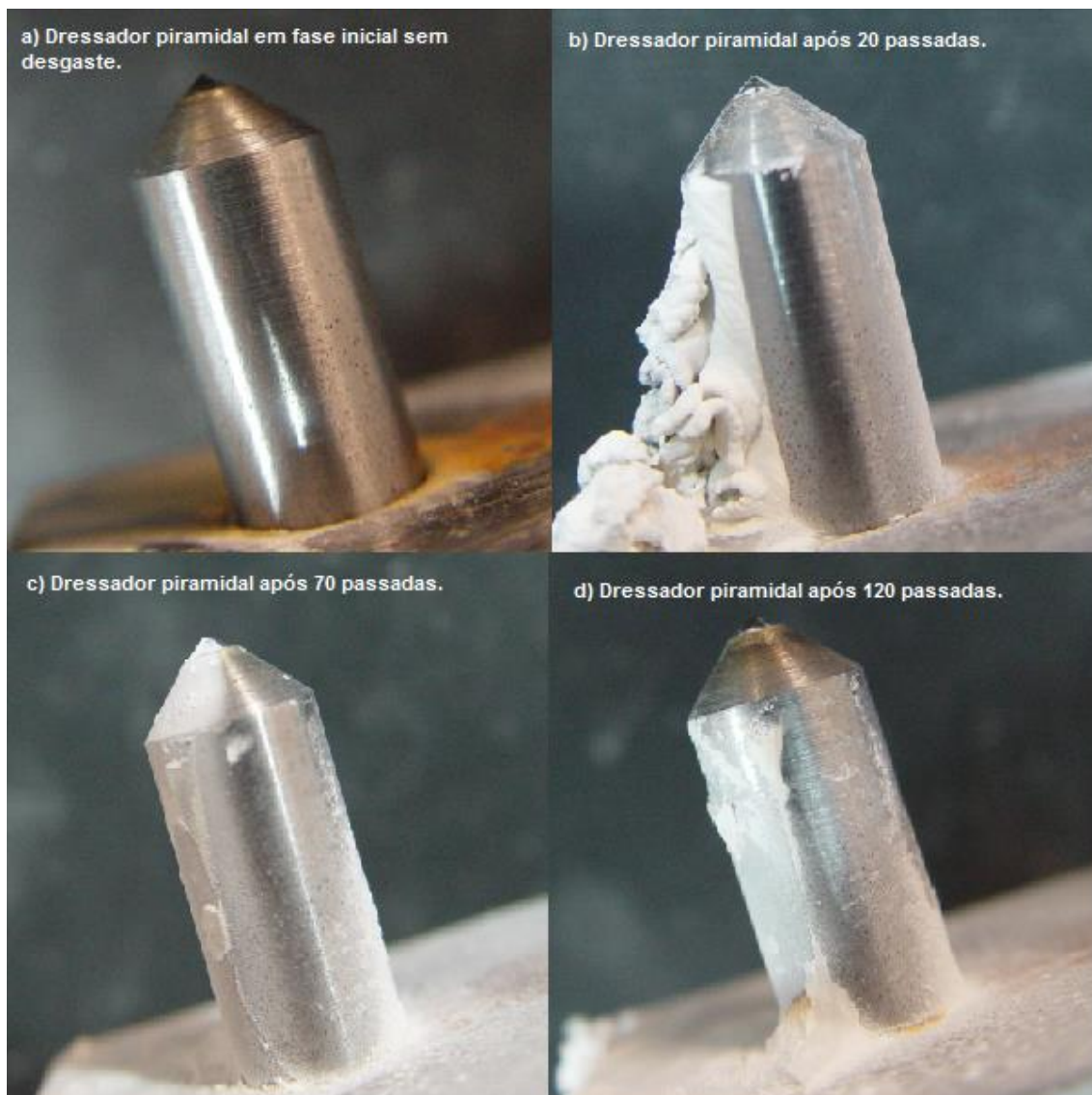


Figura 46. Imagens do dressador piramidal (a) Sem desgaste; (b) após 20 passadas; (c) após 70 passadas; (d) após 120 passadas.

4.1.2 Comparação entre os dois diamantes

A tabela 10 mostra os valores de rugosidade obtidos pelo diamante trapezoidal e piramidal para as passadas 20, 70 e 120.

Tabela 10. Valores de rugosidade para os diamantes trapezoidal e piramidal.

Número de Passadas	Rugosidade (Ra), μm	
	Trapezoidal	Piramidal
20	0,49	0,36
70	0,29	0,32
120	0,27	0,33

A figura 47 mostra os valores da tabela 10 na forma de um eixo cartesiano do número de passadas versus a rugosidade para cada um dos dois diamantes.

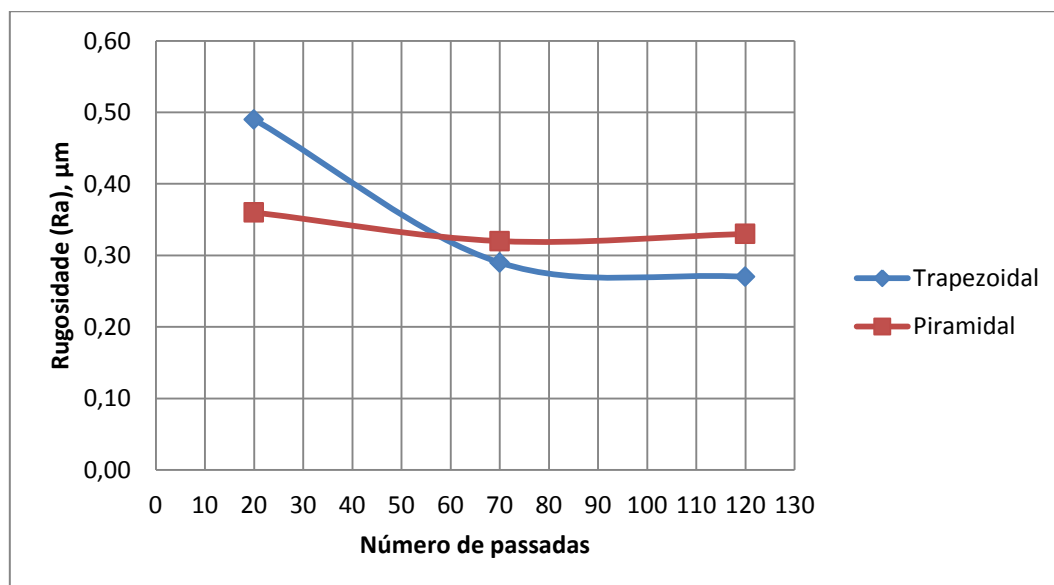


Figura 47. Valores do número de passadas versus rugosidade para os diamantes com perfil trapezoidal e piramidal.

Observando a tabela 10 e a figura 47 é possível analisar e comparar a tendência dos valores de rugosidade para ambos os diamantes. O dressador composto pelo diamante de perfil piramidal apresentou uma tendência de rugosidade ao longo do número de passadas de uma forma mais linear que a apresentada pelo dressador de ponta único composto pelo diamante de perfil trapezoidal.

O diamante trapezoidal apresentou uma queda no valor de rugosidade após 20 passadas, essa queda prevaleceu até o final do ensaio, porém com menor intensidade após 70 passadas.

O diamante piramidal apresentou uma queda leve entre o valor de rugosidade após 20 passadas, seguida um leve aumento neste valor após 70 passadas. No geral, é possível perceber um valor de rugosidade próxima de uma constante para este perfil de diamante.

4.2 Dressagem com diamante com perfil trapezoidal para parâmetro $U_d=5$

Foram realizados três ensaios para o diamante sintético nacional CVD de perfil trapezoidal e, após 20, 70 e 120 passadas, foram realizadas retificações com o rebolo dressado. Foram retiradas cinco (5) medidas de rugosidade para cada uma das três etapas de cada um dos três ensaios.

A tabela 11 apresenta os valores de rugosidade obtidos para o ensaio 1 com este diamante.

Tabela 11. Valores de rugosidade, média e desvio padrão para o primeiro ensaio com o diamante de perfil trapezoidal.

Número de Passadas	Rugosidade (μm)						
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5	Média	Desvio padrão
20	0,46	0,21	0,40	0,46	0,50	0,41	0,115
70	0,14	0,11	0,15	0,12	0,14	0,13	0,016
120	0,16	0,24	0,16	0,26	0,13	0,19	0,057

A figura 48 mostra os valores contidos na tabela 11 disposta em um eixo cartesiano.

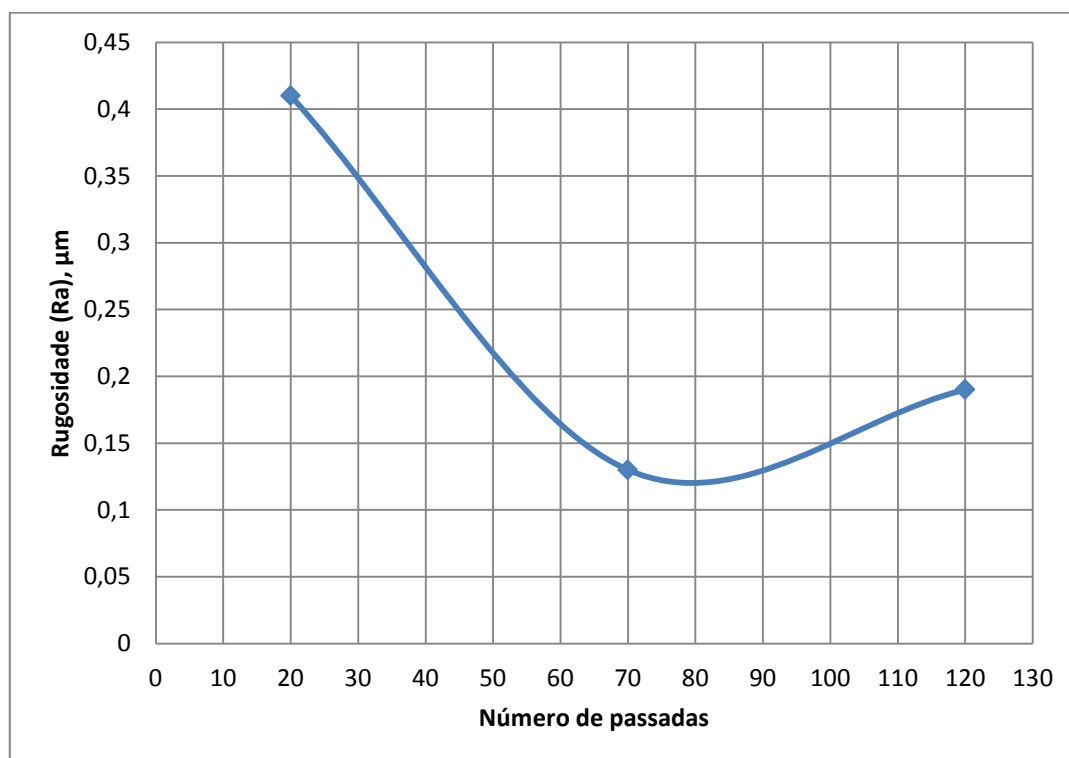


Figura 48. Rugosidade versus número de passadas para o ensaio 1 do diamante de perfil trapezoidal.

Observando os valores contidos na tabela 11 e mostrados na figura 48 é possível perceber que para este primeiro ensaio a rugosidade nas 20 primeiras passadas foram maiores que para as demais. A rugosidade para as passadas 70 e 120 foram muito parecidas, mostrando uma tendência bastante linear e constante da rugosidade. O desvio padrão mostrou-se pequeno, apenas com exceção do primeiro ponto que apresentou um desvio maior. Porém, verificou-se no geral um ensaio com baixa dispersão dos dados obtidos.

A tabela 12 apresenta os valores de rugosidade obtidos para o ensaio 2 com este diamante.

Tabela 12. Valores de rugosidade, média e desvio padrão para o segundo ensaio com o diamante de perfil trapezoidal.

Número de Passadas	Rugosidade (μm)						
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5	Média	Desvio padrão
20	0,62	0,26	0,50	0,27	0,48	0,43	0,156
70	0,26	0,18	0,12	0,14	0,26	0,19	0,066
120	0,12	0,19	0,22	0,10	0,13	0,15	0,051

A figura 49 mostra os valores contidos na tabela 12 disposta em um eixo cartesiano.

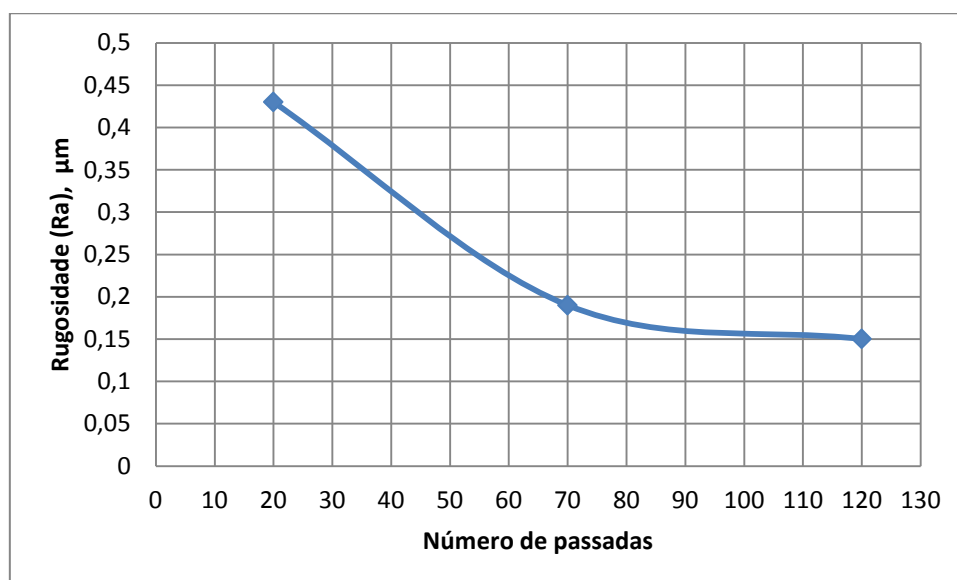


Figura 49. Rugosidade versus número de passadas para o ensaio 2 do diamante de perfil trapezoidal

Pelos dados apresentado na tabela 12 e mostrados no gráfico da figura 49 pode-se perceber que os dados apresentaram tendência de queda na rugosidade após 20 passadas e uma tendência linear e constante entre 70 e 120 passadas. O desvio padrão apresentado pelos dados foram pequenos, salvo o ponto 20 que apresentou um desvio padrão um pouco maior que os demais. Porém, os dados apresentaram baixa dispersão.

A tabela 13 apresenta os valores de rugosidade obtidos para o ensaio 2 com este diamante.

Tabela 13. Valores de rugosidade, média e desvio padrão para o terceiro ensaio com o diamante de perfil trapezoidal.

Número de Passadas	Rugosidade (μm)						
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5	Média	Desvio padrão
20	0,62	0,52	0,50	0,54	0,24	0,48	0,144
70	0,26	0,18	0,12	0,14	0,26	0,19	0,066
120	0,24	0,38	0,11	0,10	0,13	0,19	0,119

A figura 50 mostra os valores contidos na tabela 13 disposta em um eixo cartesiano.

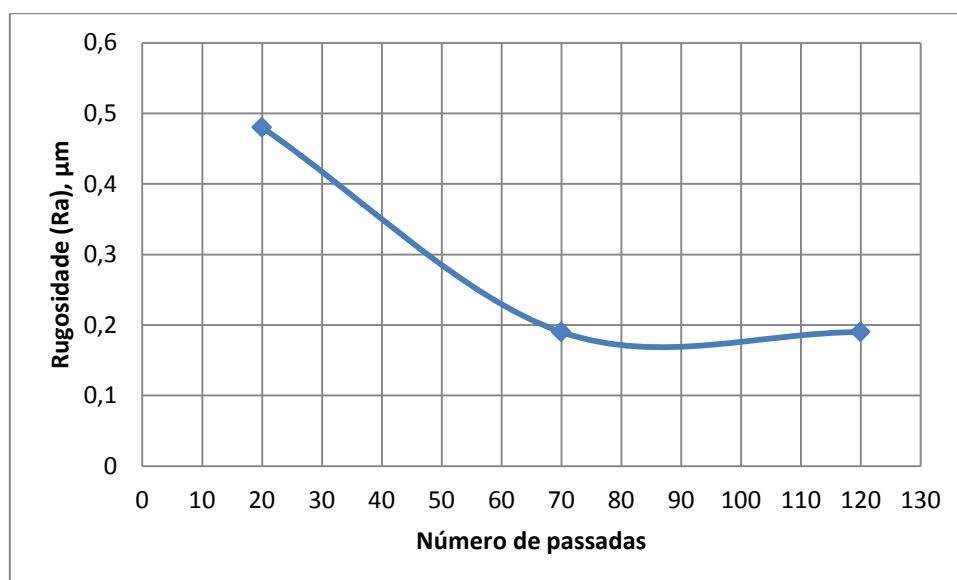


Figura 50. Figura 50. Rugosidade versus número de passadas para o ensaio 3 do diamante de perfil trapezoidal.

Para o ensaio, pode ser observado – com o auxílio dos dados da tabela 13 e figura 50 – que a rugosidade para as 20 primeiras passadas foram maiores que as demais, e após a vigésima passada apresentou uma redução, ficando aproximadamente constante entre as passadas 70 e 120. O desvio padrão também foi baixo, com exceção do primeiro ponto que apresentou uma dispersão de dados maior.

A tabela 14 apresenta os valores de média e desvio padrão para os três ensaios.

Tabela 14. Valores médios de rugosidade para os três ensaios, com seus respectivos desvios padrões.

Número de passadas	Rugosidade (Ra), μm				
	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Média	Desvio padrão
20	0,41	0,43	0,48	0,44	0,0361
70	0,13	0,19	0,19	0,17	0,0346
120	0,19	0,15	0,19	0,18	0,0231

A figura 51 contém os valores de rugosidade média para os três ensaios.

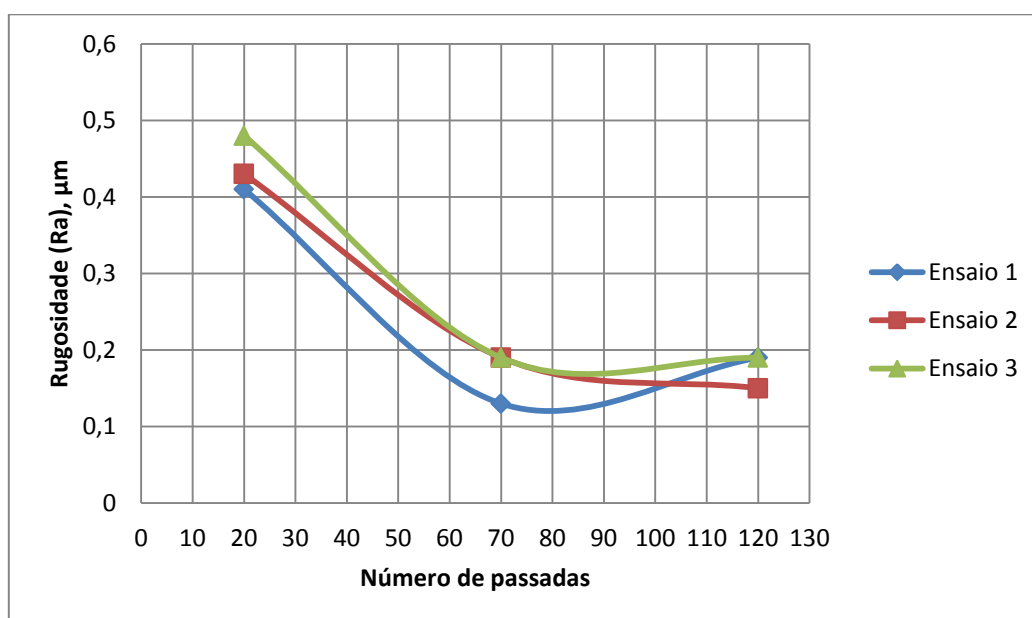


Figura 51. Valores da rugosidade versus número de passadas para os três ensaios com o diamante com o perfil trapezoidal.

Analisando os dados contidos na tabela 14 e figura 51 percebe-se que os três ensaios apresentaram resultados consideravelmente mais próximos.

O ensaio 1 foi o que apresentou a queda mais considerável de rugosidade no intervalo das passadas 20 e 70, com uma queda no valor da rugosidade da passada 20 para a 70, de 0,41 μm a 0,13 μm , e depois um leve aumento nesse valor até a passada 120, de 0,13 μm para 0,19 μm .

O ensaio 2 apresentou uma queda no valor da rugosidade ao longo do número de passadas, porém uma queda sutil de $0,19\text{ }\mu\text{m}$ para $0,15\text{ }\mu\text{m}$ no intervalo entre 70 e 120 passadas.

Já o ensaio 3 gerou uma forte redução na rugosidade entre as passadas 20 e 70, de $0,48\text{ }\mu\text{m}$ a $0,19\text{ }\mu\text{m}$, e após isso o valor se manteve constante em $0,19\text{ }\mu\text{m}$ para a passada 120.

A figura 52 contém a curva média de rugosidade obtida para o diamante com o perfil trapezoidal.

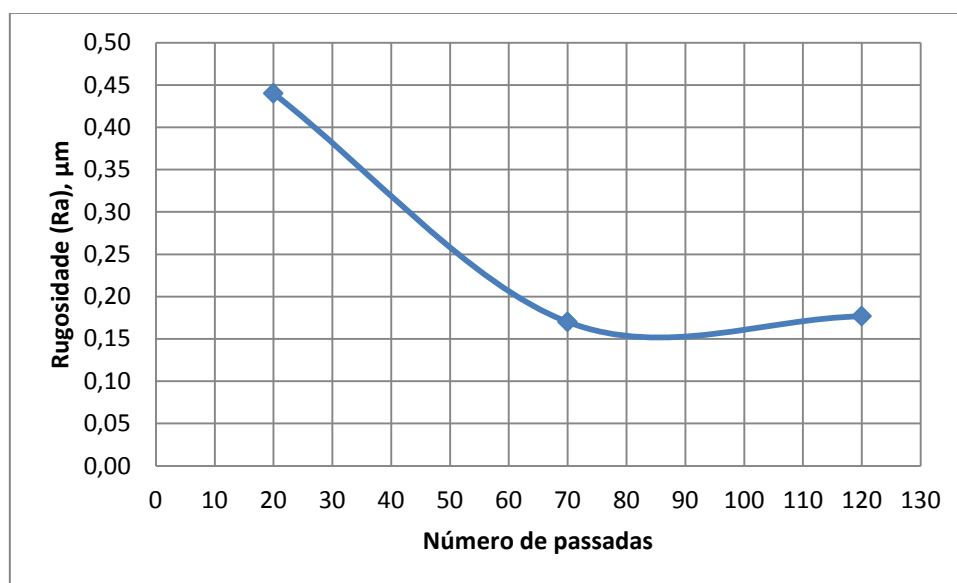


Figura 52. Valor médio de rugosidade para o ensaio com o diamante trapezoidal, com seu respectivo desvio padrão.

Agora, adicionando a análise da figura 51 à tabela 14 e figura 52 é possível perceber uma tendência clara de redução na rugosidade após 20 passadas e de um comportamento de uma reta horizontal constante entre as passadas 70 e 120. O desvio padrão para as médias foram bastante baixas, indicando baixa dispersão dos dados obtidos e validando o experimento.

A Figura 53 (a) mostra o dressador com o diamante no perfil trapezoidal em sua fase inicial sem desgaste, intacto, observando a Figura 53 (b) o dressador após a dressagem de 20 passadas, visivelmente apresentando o desgaste do mesmo, na Figura 53 (c) mostra o Dressador após a dressagem realizadas após 70 passadas, na Figura 53 (d) mostra o dressador após 120

passadas marcando o fim do ensaio da dressagem com o perfil trapezoidal com o parâmetro $U_d = 5$.



Figura 53. Imagens do dressador trapezoidal: (a) Sem desgaste; (b) após 20 passadas; (c) após 70 passadas; (d) após 120 passadas.

4.2.1 Dressagem com diamante com perfil piramidal para o parâmetro $U_d = 5$

Foram realizados três ensaios para o diamante sintético nacional CVD de perfil piramidal e, após 20, 70 e 120 passadas, foram realizadas retificações com o rebolo dressado. Foram retiradas cinco (5) medidas de rugosidade para cada uma das três etapas de cada um dos três ensaios.

A tabela 15 apresenta os valores de rugosidade obtidos para o ensaio 1 com este diamante.

Tabela 15. Valores de rugosidade, média e desvio padrão para o primeiro ensaio com o diamante de perfil piramidal.

Número de Passadas	Rugosidade (Ra), μm						
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5	Média	Desvio padrão
20	0,28	0,30	0,27	0,29	0,29	0,29	0,011
70	0,22	0,22	0,19	0,19	0,20	0,20	0,015
120	0,21	0,19	0,20	0,20	0,22	0,20	0,011

A figura 54 mostra os valores médios contidos na tabela 15 disposta em um eixo cartesiano.

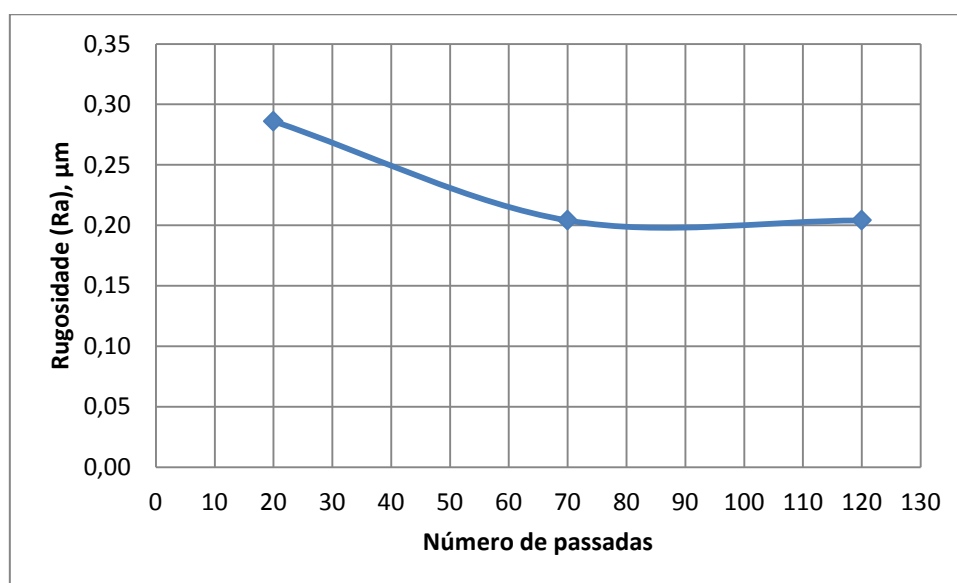


Figura 54. Rugosidade versus número de passadas para o ensaio 1 do diamante de perfil piramidal.

Observando os dados da tabela 15 e da figura 54 é possível perceber que para o ensaio 1 com o diamante de perfil piramidal houve uma redução no valor de rugosidade ao longo do ensaio, com uma redução mais acentuada das

passada 20 para a passada 70. Após 70 passadas o valor de rugosidade tornou-se praticamente constante. O desvio padrão foi bastante baixo graças à baixa dispersão dos dados. A tendência de um valor de rugosidade constante após 70 passadas é perceptível.

A tabela 16 apresenta os valores de rugosidade obtidos para o ensaio 2 com este diamante.

Tabela 16. Valores de rugosidade, média e desvio padrão para o segundo ensaio com o diamante de perfil piramidal.

Número de Passadas	Rugosidade (Ra), μm						
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5	Média	Desvio padrão
20	0,25	0,25	0,28	0,30	0,21	0,26	0,034
70	0,19	0,18	0,23	0,32	0,20	0,22	0,057
120	0,20	0,15	0,22	0,22	0,17	0,19	0,031

A figura 55 mostra os valores médios de rugosidade contidos na tabela 16 disposta em um eixo cartesiano, para melhor visualização.

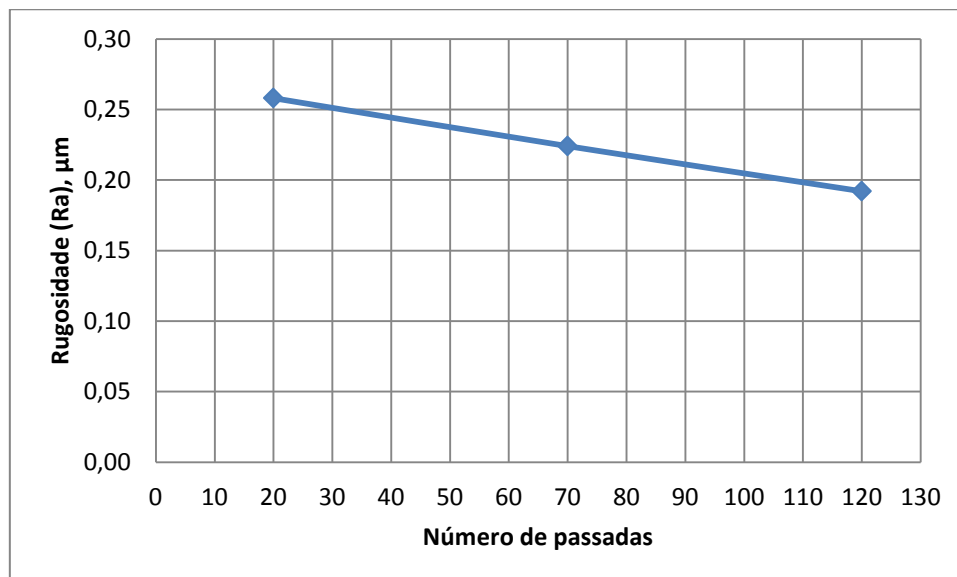


Figura 55. Rugosidade versus número de passadas para o ensaio 2 do diamante de perfil piramidal

Pelos dados mostrados na tabela 16 e pela figura 55 é possível analisar, para este segundo ensaio, que os valores de rugosidade apresentam uma queda ao longo do número de passadas. Assim, a tendência de uma redução no valor da rugosidade conforme se aumenta o número de passadas é observada. O desvio padrão e a dispersão dos dados foram maiores que os observados no primeiro ensaio.

A tabela 17 apresenta os valores de rugosidade obtidos para o ensaio 2 com este diamante.

Tabela 17. Valores de rugosidade, média e desvio padrão para o terceiro ensaio com o diamante de perfil trapezoidal.

Número de Passadas	Rugosidade (μm)						
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5	Média	Desvio padrão
20	0,25	0,26	0,26	0,28	0,22	0,25	0,022
70	0,20	0,18	0,20	0,19	0,21	0,20	0,011
120	0,19	0,27	0,20	0,17	0,17	0,20	0,041

A figura 56 mostra os valores contidos na tabela 17 disposta em um eixo cartesiano.

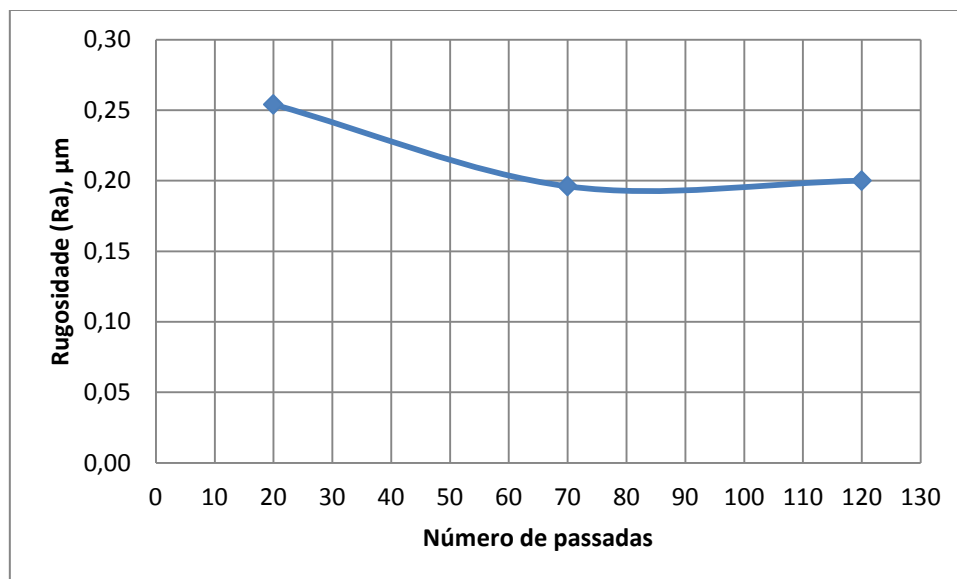


Figura 56. Rugosidade versus número de passadas para o ensaio 3 do diamante de perfil piramidal

Para o terceiro ensaio com o dressador de ponta única com diamante CVD sintético de perfil piramidal é possível verificar, com base nos dados da tabela 18 e da figura 56, que a rugosidade sofre uma queda da passada 20 para a passada de número 70 e, após 70 passadas, mantém praticamente constante. O desvio padrão obtido no experimento é baixo, porém um pouco mais acentuado no ponto 120 passadas, mas sem prejudicar a autenticidade dos dados colhidos.

A tabela 18 apresenta os valores de média e desvio padrão para os três ensaios.

Tabela 18. Valores médios de rugosidade para os três ensaios, com seus respectivos desvios padrões.

Número de passadas	Rugosidade (Ra), μm				
	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Média	Desvio padrão
20	0,29	0,26	0,25	0,27	0,0174
70	0,20	0,22	0,20	0,21	0,0144
120	0,20	0,19	0,20	0,20	0,0061

A figura 57 contém os valores de rugosidade média para os três ensaios.

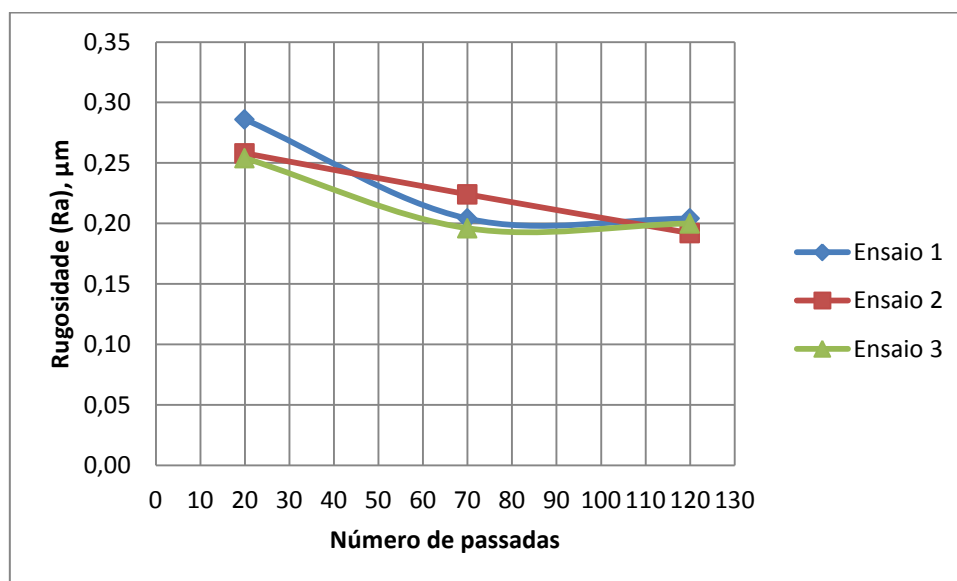


Figura 57. Valores da rugosidade versus número de passadas para os três ensaios com o diamante com o perfil piramidal.

Por meio da tabela 18 e da figura 57 é possível verificar que os três ensaios obtiveram tendências e valores muito próximos. O ponto 70 foi o que apresentou os dados mais parecidos, seguidos pela passada 20 e passada 120. Porém, é claramente observada a tendência no valor da rugosidade ao longo do aumento no número de passadas, uma tendência de queda mais acentuada entre 20 e 70 passadas e um pouco menor entre as passadas 70 e 120.

A figura 58 contém a curva média de rugosidade obtida para o diamante com o perfil trapezoidal.

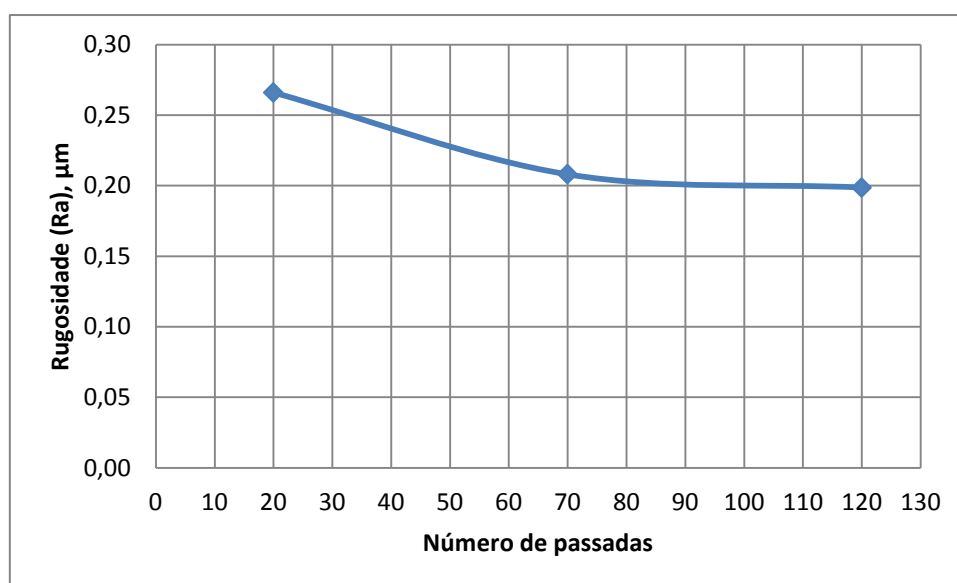


Figura 58. Valor médio de rugosidade para o ensaio com o diamante trapezoidal, com seu respectivo desvio padrão.

Por meio da figura 57, bem como da tabela 18 e figura 58, mostrou a tendência geral de desgaste para o dressador de ponta única com diamante sintético CVD de face piramidal de fabricação nacional. Ele apresentou uma leve queda entre as passadas 20 e 70, de 0,27 μm para 0,21 μm , e posterior redução de rugosidade, de 0,21 μm para 0,20 μm . Essas variações nos valores de rugosidade foram bastante leves, o que mostra uma tendência de rugosidade constante ao longo do número de passadas. O desvio padrão das

médias é considerado baixo, com baixa dispersão dos dados, validando os dados colhidos.

A Figura 59 (a) mostra o dressador com o diamante no perfil piramidal em sua fase inicial sem desgaste, intacto, observando a Figura 59 (b) o dressador após a dressagem de 20 passadas, visivelmente apresentando o desgaste do mesmo, na Figura 59 (c) mostra o dressador após a dressagem realizadas após 70 passadas, na Figura 59 (d) mostra o dressador após 120 passadas marcando o fim do ensaio da dressagem com o perfil piramidal com o parâmetro $U_d = 5$.



Figura 59. Imagens do dressador piramidal: (a) Sem desgaste; (b) após 20 passadas; (c) após 70 passadas; (d) após 120 passadas.

4.2.2 Comparação entre os dois diamantes

A tabela 19 mostra os valores de rugosidade obtidos pelo diamante trapezoidal e piramidal para as passadas 20, 70 e 120.

Tabela 19. Valores de rugosidade para os diamantes trapezoidal e piramidal.

Número de Passadas	Rugosidade (Ra), μm	
	Trapezoidal	Piramidal
20	0,44	0,27
70	0,17	0,21
120	0,18	0,20

A figura 60 mostra os valores da tabela 19 na forma de um eixo cartesiano do número de passadas versus a rugosidade para cada um dos dois diamantes.

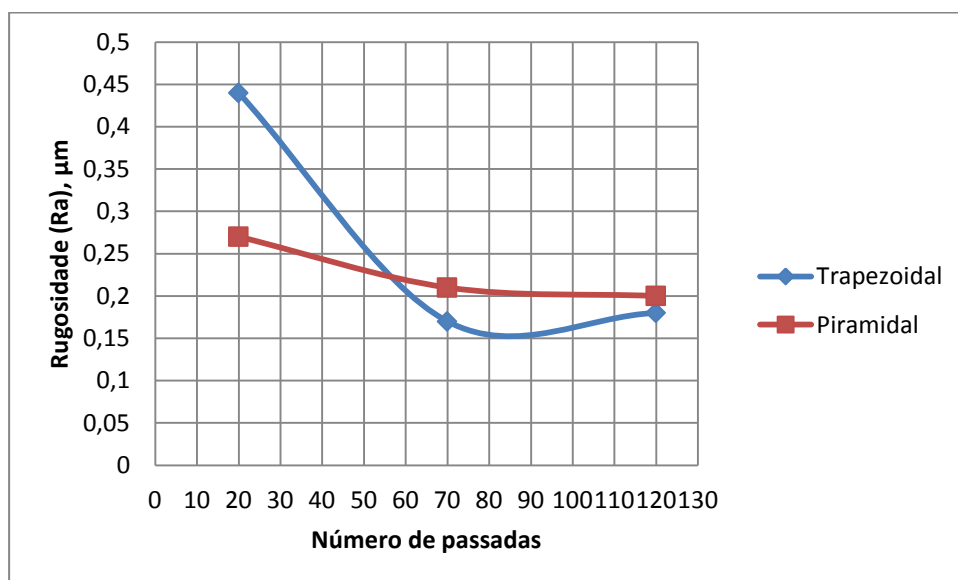


Figura 60. Valores do número de passadas versus rugosidade para os diamantes com perfil trapezoidal e piramidal.

Observando a tabela 19 e a figura 60 é possível analisar e comparar a tendência dos valores de rugosidade para ambos os diamantes. O dressador composto pelo diamante de perfil piramidal apresentou uma tendência de rugosidade ao longo do número de passadas de uma forma mais linear que a apresentada pelo dressador de ponta único composto pelo diamante de perfil trapezoidal.

O diamante trapezoidal apresentou uma grande queda no valor de rugosidade após 20 passadas, essa queda prevaleceu até o final do ensaio, porém com menor intensidade após 70 passadas.

O diamante piramidal apresentou uma queda leve entre o valor de rugosidade após 20 passadas, seguida de um valor constante após 70 passadas. No geral, é possível perceber que após 70 passadas o valor de rugosidade praticamente não se altera com o aumento no número de passadas.

4.3 Comparação entre os dressadores com parâmetros $U_d = 1$ e $U_d = 5$

Agora serão analisados e comparados os comportamentos da rugosidade com relação ao número de passadas na dressagem para os dois parâmetros de grau de recobrimento feitos neste trabalho.

4.3.1 Perfil trapezoidal

A tabela 20 apresenta os dados médios obtidos para o dressador com diamante com perfil trapezoidal para ambos os parâmetros estudados.

Tabela 20. Valores de rugosidade média para os dressadores com perfil trapezoidal para o grau de recobrimento 1 e 5.

Número de passadas	Rugosidade (Ra), μm	
	$U_d = 1$	$U_d = 5$
20	0,49	0,44
70	0,29	0,17
120	0,27	0,18

Os valores contidos na tabela 20 são apresentados na figura 61.

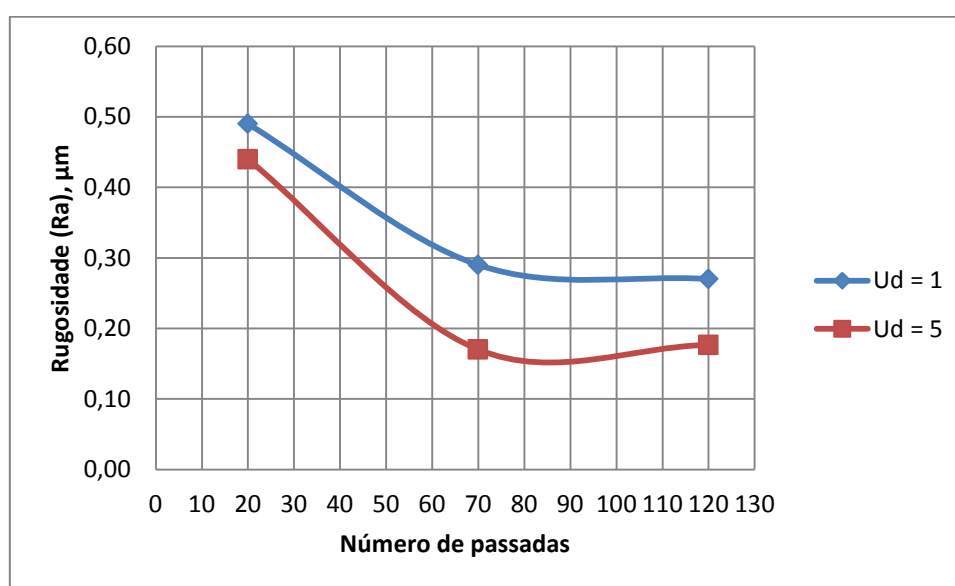


Figura 61. Relação entre o número de passadas e a rugosidade média obtida para os dois parâmetros de dressagem utilizadas para o perfil trapezoidal.

Observando os valores contidos na tabela 20 e apresentados na figura 61 é possível perceber que os dados obtidos para o parâmetro maior são melhores que os obtidos para o parâmetro menor em todos os pontos. A tendência se manteve para ambos os graus de recobrimento, porém os de $U_d = 5$ foram valores menores que os com $U_d = 1$.

4.3.2 Perfil piramidal

A tabela 21 apresenta os dados médios obtidos para o dressador com diamante com perfil trapezoidal para ambos os parâmetros estudados.

Tabela 21. Valores de rugosidade média para os dressadores com perfil trapezoidal para o grau de recobrimento 1 e 5.

Número de passadas	Rugosidade (Ra), μm	
	$U_d = 1$	$U_d = 5$
20	0,36	0,27
70	0,32	0,21
120	0,33	0,20

Os valores contidos na tabela 21 são apresentados na figura 62.

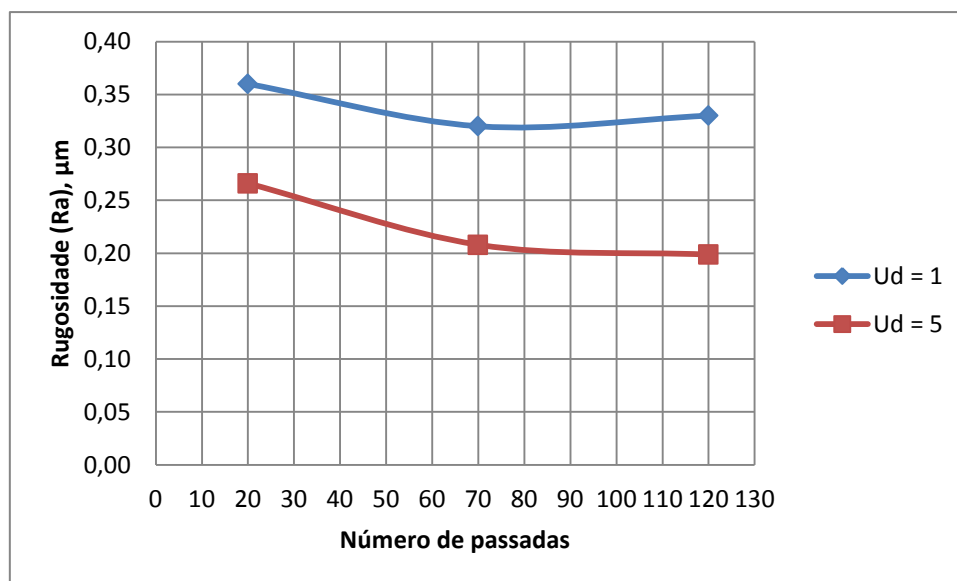


Figura 62. Relação entre o número de passadas e a rugosidade média obtida para os dois parâmetros de dressagem utilizadas para o perfil piramidal.

Observando os valores contidos na tabela 21 e apresentados na figura 62 é possível perceber que os dados obtidos para o parâmetro maior são melhores que os obtidos para o parâmetro menor em todos os pontos. A tendência se manteve para ambos os graus de recobrimento, porém os de $U_d = 5$ foram valores de rugosidade menores que os com $U_d = 1$. O ponto em que a tendência aparenta diferença é no de 120 passadas onde os dados para $U_d = 5$

sofrem redução quando comparado com os valores obtidos para 70 passadas, enquanto que para o parâmetro $U_d = 1$ o valor da rugosidade sofre um leve aumento no intervalo 70 e 120 passadas.

5. CONCLUSÕES

Com a realização dos ensaios conclui-se que:

- a) O rebolo dressado com o parâmetro de $U_d = 1$ apresentou o macroefeito, o dressador com o perfil piramidal proporcionou menor rugosidade na peça com valores inferiores a 70 passadas, no entanto, ao longo dos ensaios apresentou valores constantes na rugosidade acima de 70 passadas não alterando significativamente a rugosidade da peça.
- b) No perfil trapezoidal proporcionou maiores valores de rugosidade no início da retificação, corresponde a 20 passadas.
- c) Comparando-se os resultados com a geometria piramidal, conforme o rebolo era dressado (aumentando o número de passadas dos dressadores sobre o rebolo), ao aproximar-se de 70 passadas houve uma queda considerável nos valores da rugosidade, sendo estes resultados melhores que os obtidos com o perfil piramidal, indicando que acima de 70 passadas o perfil trapezoidal gerou menor rugosidade.
- d) Nas dressagens com o parâmetro de $U_d = 5$ ocorreu o microefeito, onde os resultados foram semelhantes aos obtidos com o parâmetro de dressagem menor, pois o perfil trapezoidal apresentou menores valores após 70 passadas, e o perfil piramidal menores valores inferiores a 70 passadas.
- e) A dressagem realizada de forma mais agressiva gerou menor rugosidade na peça para os dois tipos de perfis dos diamantes, mas em destaque o perfil trapezoidal que gerou os menores valores de rugosidades em ambos os parâmetros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANGUS, U. C.; BUCK, F. A.; SUNKARA, M.; GROTH, T. F.; HAINAN, C. C. **“Diamond growth at low pressure”**. MRS Bull, October, 1995.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Norma NBR ISO 4287**: Especificações geométricas do produto (GPS) – Rugosidade: Método do perfil – Termos, definições e parâmetros da rugosidade. Rio de Janeiro. ABNT; 2002.

BADGER, J., **The book of grinding** by the grinding doc. Trinity College, 2010.

BAILEY, M. W. Section 1 of **Diamond Materials and their Applications, in Handbook of ceramic Hard Materials**, R. Riedel (Ed.), Wiley-VCH, Weinheim, p. 479 - 485, 2000.

BIANCHI, E. C.; OLIVEIRA, J. F. G. **Ação das condições de dressagem na vida de rebolos na retificação de precisão**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 11. *Anais*. São Paulo, v.3, p.341-344, 1991.

BROOKES, C. A. “Diamond in perspective: a review of mechanical properties of natural diamond”. **Diamond and Related Materials**. Vol. I, p. 13-17. 2010.

BUTTERY, T. C., STATHAM, A., PERCIVAL, J. B., HAMED, M. S., **Some effects of dressing on grinding performance**. International Journal of Machine Tools and Manufacture, (2001) 193-208.

CALLISTER Jr, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 8° ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

ÇOLAC, O.; KURBANOGU, C.; KAYACAN, M.C. **Milling surface roughness prediction using evolutionary programming methods**. Materials & Design, Oxford, v.28, n.2, p.657-666, 2005.

DHANASEKAR, B., MOHAN, N.K., BHADURI, B., RAMAMOORTHY, B., **“Evaluation of surface roughness based on monochromatic speckle correlation using image processing,”** Precision Engineering 32, 196 – 206, 2008.

DOMAN, D., WARKENTIN, A., BAUER, R. J., **A survey of recent grinding wheel topography models**. International Journal of Machine Tools and Manufacture;46:343–52, 2006.

DURGUMAHANTI, U. S. P., VIJAYENDER, P. S., VENKATESWARA, R. A New Model for Grinding Force Prediction and Analysis. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**. Vol. 50, pp. 231–240, 2010.

ELEMENT SIX - **Catálogo da empresa ELEMENT SIX** (Irlanda), 2011. Acesso em 20 de julho de 2011. Disponível em: <

http://www.e6.com/wps/wcm/connect/e6_content_en/home/materials+and+products/materials+and+products >.

ERENO, D. **Diamantes versáteis**. Revista FAPESP, Edição Especial 50 anos, p. 166 – 169, 2012.

FERNÁNDEZ, R., IRIARTE, A., PUERTO, P., GALLEGU, I., ARRAZOLA, P.J., **Analysis of the behaviour of grinding wheels in surface grinding**. Proc. Of MESIC 2011: 4th Manufacturing Society International Conference. Cádiz, Spain, 2011.

GAO, R. X. **“Monitoring Systems for Grinding Processes, Springer Series in Advanced Manufacturing”**, p. 83 - 107, 2007.

HARANO, K.; SATOH, T.; SUMIYA, H. Cutting performance of nanopolycrystalline Diamond. **Diamond & Related Materials** - 24, p. 78 - 82, 2012.

HASSUI, A.; DINIZ, A.E.; OLIVEIRA, J.F.G.; FELIPE, J.; GOMES, J.J.F. **Experimental evaluation on grinding wheel wear through vibration and acoustic emission**. Wear, 217, p.7-14, 1998.

JACKSON, M. J.; MILLS, B. **Microscale wear of vitrified abrasive materials**. Journal of Materials Science. no 39, p.2131-2143, 2004.

JEYAPOOVAN, T., MURUGAN, M. **Surface roughness classification using image processing**. Measurement, vol. 46, pp. 2065-2072, 2013.

JOFFREAU, P.O.; HAUBNER, R.; LUX, B. **Journal Reference Metalic - Hard Metals**. Vol. 7, n. 4, pp. 186, 1988.

KIM, J. S.; KIM, M. H.; PARK, S. S.; LEE, J. Y. **Journal of Applied Physics**. Vol. 67, p. 3354, 1990.

KWAK, J. & HA, M., **Neural network approach for diagnosis of grinding operation by acoustic emission and power signals**, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 147, pp. 65–71, 2004.

LIU, Y., WARKENTIN, A., BAUER, R., GONG, Y., **Investigation of different grain shapes and dressing to predict surface roughness in grinding using kinematic simulations**, Precision Engineering 37, 758– 764, 2013.

MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; SILVA, M. B., **Teoria da usinagem dos materiais, 2 ed.**Blucher, **Teoria da usinagem dos materiais**, p. 299 – 313, 2011.

MALKIN, S. **Grinding Technology: theory and applications of machining with abrasives**. 2 ed. Industrial Press, New York, 2008.

MALKIN, S., “**Grinding Mechanisms e Grinding Temperatures and Thermal Damage**,” In: MALKIN, S. *Grinding Technology: theory and applications of machining with abrasives*. 1.ed. Chichester, Ellis Horwood Limited, 1989.

MARINESCU, I. D., HITCHINER, M., UHLMANN, E., ROWE, W. B., INASAKI, I., **Handbook of machining with grinding wheels**. 1a Ed. Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2007.

MARTINS, P. S., “**Avaliação dos sistemas de fixação hidráulica e térmica de brocas de metal duro em furação do cabeçote do motor Fire**,” Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Tese de Mestrado, 2008.

MESSER, J. **Abrichten konventioneller Schleifscheiben mit stehenden Werkzeugen**, p. 1 - 110, 2003.

MURAKAWA, M.; TAKEUCHI, S. Forming of a grinding wheel using a dresser with brazed diamond film. **Materials Science and Engineering**, A140, 759 - 763, 2001.

NATHAN, D. R., VIJAYARAGHAVAN, L., KRISHNAMURTHY R., “**In-process monitoring of grinding burn in the cylindrical grinding of steel**,” *Journal of Materials Processing Technology*, 91, 1999, 37–42.

NUSSBAUM, Guillaume Ch. **Rebolos e Abrasivos: tecnologia básica**. Volume I, II e III. São Paulo. Editora Icone. 1988.

OHTAKE, N.; YOSHIKAWA, M. “**Journal of Electrochemical Society**”. Vol 137, n. 2, pp. 717, 1990.

OLIVEIRA, J.F.G., VALENTE, C.M.O, 2004. “**Fast Grinding Process Control with AE Modulated Power Signals**,” *CIRP Annals: Manufacturing Technology*. v. 53, Issue 1, 267-270.

OLIVEIRA, M. A., FILHO, J. V., LOPES V. J. & INMAN D. J., “**Damage Detection Based on Electromechanical Impedance Principle and Principal Components**,” *Conf. Proc. Soc. Exp. Mech. Ser.*, vol. 7, pp. 207–315, 2014.

PORTO, A. J. V.; SILVA, H. A. T.; DUDUCH, J. G.; RÚBIO, J. C. C.; MONTANARI, L.; JASINEVICIUS, R. G.; ALMEIDA, R. M.; SCHROETER, R. B. **Usinagem de Ultraprecisão**. São Carlos: Editora RIMA, FAPESP, 2004.

PRICKEN, W. **Dressing of vitrified bond wheels with CVD dress and monodress**. *IDR 3*, p. 226 - 231, 2005.

PUERTO, P, FERNÁNDEZ, R., MADARIAGA, J., ARANA, J., GALLEGO, I. **Evolution of surface roughness in grinding and its relationship with the dressing parameters and the radial wear**, *The Manufacturing Engineering Society International Conference, MESIC 2013*.

SALMON, S. C. **Modern Grinding Process Technology**. MacGraw-Hill, 1992.
VILLARES METALS, **catálogo de aços 2013**. Disponível em: <
http://www.villaresmetals.com.br/portuguese/files/FT_14_VP80.pdf >, acesso
em 22 de setembro de 2013.

SAMHOURI, M.S., SURGENOR, B.W., “**Surface roughness in grinding:
online prediction with adaptive neuro-fuzzy inference system**”.
Transactions of NAMRI/SME 33, 57–64, 2005.

SHIH, A. J.; AKEMON, J. L. Wear of the blade diamond tools in truing vitreous
bond grinding wheels. **Wear**, 250, p. 587–592, 2001.

TRAVA-AIROLDI, V. J.; CORAT, E. J.; SANTOS, L. V.; DINIZ, A. V.; Moro, J.
R.; LEITE, N. F. “**Diamond Related Materials**”. Vol. 11, p. 532, 2002.

WEBSTER, J. A.; CUI, C.; MINDEK Jr, R. B. **Grinding fluid application
system design**. Annals of CIRP, v. 44/1, p. 333-338, 1995.

WILLIAMS, B. E.; GLASS, J. T.; DAVIS, R. F. **Micro-optoeletronica materials**,
Vol. 877, p. 56 - 60, 1988.

VILLARES METALS, **catálogo de aços 2013**. Disponível em: <
http://www.villaresmetals.com.br/portuguese/files/FT_14_VP80.pdf >, acesso
em 22 de setembro de 2013.

ZHANG, C.; SHIN, Y. C. Wear of diamond dresser in laser assisted truing and
dressing of vitrified CBN wheels. **International Journal of Machine Tools and
Manufacture**, v. 43, n. 1, p. 41 - 49, 2003.