

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR EDIVALDO JOSÉ
VISQUE E APROVADA PELA
COMISSÃO JULGADORA EM 05/11/98.


ORIENTADOR

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MATERIAIS E PROCESSOS

UMA CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DO PROCESSO DE BRUNIMENTO

Autor : Edivaldo José Visque

Orientador: Olívio Novaski

Curso: Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Materiais e Processos

Dissertação de Mestrado apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Campinas, 1998

S.P. - Brasil

V826c

36524/BC

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

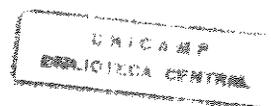
**UMA CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DO
PROCESSO DE BRUNIMENTO**

Autor : Edivaldo José Visque

Orientador : Prof. Dr. Olívio Novaski

33/98

T607065



UNIDADE	BC
N.º CHAMADA:	V826c
V.	Ex.
TRABALHO BC/	36524
PERÍODO	22/9/99
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	06/02/99
N.º CPD	

CM-0012071B-9

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

V826c Visque, Edivaldo José
 Uma contribuição ao estudo do processo de
 brunimento. / Edivaldo José Visque.--Campinas, SP:
 [s.n.], 1998.

Orientador: Olívio Novaski
 Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
 Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Brunidura. 2. Retificação e polimento. 3.
 Abrasivos. 4. Aspereza de superfície. I. Novaski, Olívio.
 II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
 Engenharia Mecânica. III. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MATERIAIS E PROCESSOS

Dissertação de Mestrado

UMA CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DO PROCESSO DE BRUNIMENTO

Autor : Edivaldo José Visque

Orientador: Prof. Dr. Olívio Novaski



Prof. Dr. Olívio Novaski, Presidente
UNICAMP



Prof. Dr. Eugênio José Zoqui
UNICAMP



Prof. Dr. Dalberto Dias da Costa
Universidade Federal do Paraná

Campinas, 05 de Novembro de 1998

“Deus de nossos Pais, e Senhor de misericórdia,
que todas as coisas criastes pela vossa palavra,
e que, por vossa sabedoria, formastes o Homem
para ser o senhor de todas as vossas criaturas,
governar o mundo na santidade e na justiça,
e proferir seu julgamento na retidão de sua alma
dai-me a Sabedoria que partilha vosso trono,
e não me rejeiteis como indigno de ser um de vossos Filhos,
sou, com efeito, vosso servo e filho de vossa serva,
um Homem fraco, cuja existência é breve,
incapaz de compreender vosso julgamento e vossas leis;
porque qualquer Homem, mesmo perfeito, entre os Homens,
não será nada, se lhe falta a Sabedoria que vem de vós.
Ora, vós me escolhestes para.....(Oração individual, para cada
pessoa, deste ponto em diante)”

Livro da Sabedoria (Sab. 9, 1-7)

Aos meus Pais José e Doraci Visque pelo apoio e incentivo nos momentos mais difíceis

AGRADECIMENTOS

A Deus pela inspiração, auxílio, amor, confiança, presteza e muito mais.

Ao Prof. Dr. Olívio Novaski, que ao longo destes anos, mais do que um orientador, foi e é um amigo.

À toda a minha família principalmente aos meus pais pelo incentivo, apoio e amor, sem os quais tudo teria sido mais difícil.

Ao CNPq pela bolsa de estudos e demais incentivos.

Aos técnicos dos laboratórios da UNICAMP em especial ao Miro, e ao Ari pelo seu apoio.

À Empresa Ermeto equipamentos industriais que participou da realização deste trabalho cedendo a máquina brunidora utilizada para a elaboração dos ensaios, confecção dos corpos de prova e pelo auxílio nas demais condições que se fizeram necessárias para a realização dos experimentos.

Agradecendo especialmente ao Eng^o. Rodolfo Tuacek e ao Eng^o. Mauricio da Empresa Ermeto pelos auxílios na realização deste projeto.

Agradecendo especialmente ao Senhor Cláudio do Departamento de Controle de Qualidade da Empresa Ermeto pelas medições realizadas nos corpos de prova.

A todos os funcionários do Laboratório de Metrologia Dimensional (LAMEDI) da UNICAMP que auxiliaram nas medições, Eng^o. Naoyuki Sugimori, Eng^o. Msc. Sérgio Zarpeillon, e aos técnicos Wilson e Sérgio.

À bibliotecária do Centro de Tecnologia da UNICAMP, Célia, pelos auxílios na localização das referências bibliográficas utilizadas para a elaboração deste trabalho.

Resumo

Visque, Edivaldo José, Uma Contribuição ao Estudo do Processo de Brunimento, : Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade estadual de Campinas, 1998. 79p. dissertação (mestrado)

O processo de brunimento apresenta vários parâmetros de usinagem, cujas influências necessitam ser melhor conhecidas. Tais parâmetros compreendem a velocidade de corte, a pressão de contato e a velocidade de avanço, cujas influências se fazem sentir nos desvios macro e micro geométricos. O presente trabalho procurou analisar as influências da velocidade de corte e da pressão de contato, mantendo-se invariável a velocidade de avanço. Os experimentos foram divididos em três fases, quais sejam, a fase I, onde para um determinado valor de velocidade de corte, de velocidade de avanço e pressão de contato, utilizadas no processo normal de brunimento em análise, verificou-se o efeito da pré-usinagem. A fase II teve o propósito de verificar a influência da pressão de contato e a fase III objetivou a verificação da influência da velocidade de corte nos desvios. Os resultados mostram que, os desvios iniciais influenciam na porcentagem de correção dos mesmos. Da mesma maneira, a variação dos parâmetros estudados influenciam os resultados finais, sendo que, no presente caso, o aumento de tais parâmetros, atuou de maneira positiva.

Palavras Chave : Brunimento, Pedras Abrasivas, Brunidura, Retificação e polimento, Rugosidade superficial,

Abstract

Visque, Edivaldo José, A Contribution to the Study of the Honing Process, : Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade estadual de Campinas, 1998. 79p. dissertação (mestrado)

The honing process presents several manufacturing parameters, whose influences need to be known better. Such parameters comprehend the cutting speed, the contact pressure and the infeed speed, whose influences appear in the macro and micro geometric deviations. The present study tried to analyze the influences of the cutting speed and the contact pressure, keeping invariable the infeed speed. The experiments were divided in three to phases. Phase I, at a certain value of cutting speed, infeed speed and contact pressure, used in the normal process of honing analyzed, the pre-manufacturing effect was verified. The purpose of phase II was to verify the contact pressure influence and the phase III aimed the influence verification of the cutting speed at the deviations. The results showed that, the initial deviations influence this correction percentage in the same way, the variation of the studied parameters influence the final results and at the present case, the increase of such parameters acted in a positive way.

Key Words : Honing, Abrasive Stones, Hone, Grinding and polishing, Surface Rughness

ÍNDICES

Índice de Figuras.....	i
Índice de Tabelas.....	iii
Índice de Quadros.....	iii
Nomenclatura.....	iv
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO 2 - O PROCESSO DE BRUNIMENTO.....	4
2.1 - TIPOS DE BRUNIMENTO.....	16
2.1.1 - BRUNIMENTO MANUAL.....	16
2.1.2 - BRUNIMENTO Automatizado.....	17
2.2 - BASTÕES E PEDRAS ABRASIVAS.....	17
2.2.1 - COMPOSIÇÃO E ESPECIFICAÇÃO DAS PEDRAS e BASTÕES :.....	17
2.2.1.1 - ÓXIDO DE ALUMÍNIO:.....	18
2.2.1.2 - CARBONETO DE SILÍCIO:.....	20
2.2.1.3 - Nitreto Cúbico de Boro (CBN).....	20
2.2.1.4 - Diamante:.....	21
2.3 - GRANULOMETRIA:.....	23
2.3.1 - POROSIDADE:.....	24
2.3.2 - DUREZA.....	25
2.4 - Aglomerantes.....	26
2.4.1.1 - Aglomerantes orgânicos.....	26
2.4.1.1.1 - Aglomerantes de borracha vulcanizada.....	26
2.4.1.1.2 - Aglomerantes resinóides.....	26
2.4.1.1.3 - Aglomerantes à base de goma laca.....	26
2.4.1.2 - Aglomerantes Inorgânicos.....	27
2.4.1.2.1 - Aglomerantes cerâmicos ou vitrificados.....	27
2.4.1.2.2 - Aglomerantes de silicato.....	27
2.4.1.3 - Aglomerantes Metálicos.....	27
2.4.1.3.1 - Aglomerantes de metal sinterizado.....	27
2.4.1.3.2 - AGLOMERANTES DE METAL ELETRODEPOSITADO.....	27
2.5 - agressividade de uma pedra abrasiva.....	28
2.5.1 - Fatores de influência na agressividade de uma pedra abrasiva.....	29
2.6 - MATERIAIS QUE PODEM SER BRUNIDOS.....	31
2.7 - APLICAÇÃO DOS ABRASIVOS.....	31
2.8 - PRESSÃO DE BRUNIMENTO.....	32
2.9 - FERRAMENTAS.....	33
2.9.1 - FERRAMENTAS PARA BRUNIMENTO MANUAL.....	35
2.9.2 - FERRAMENTAS COM FIXAÇÃO PARA SUPERFÍCIES INTERNAS.....	36
2.9.3 - FIXAÇÕES PARA BRUNIMENTO.....	38
2.9.4 - PRINCÍPIOS GERAIS DE FIXAÇÃO.....	39
2.10 - CONTROLE DIMENSIONAL:.....	39
2.10.1 - DISTORÇÃO DO MATERIAL.....	42
2.11 - BRUNIMENTO EM “PLATEAU”.....	43
2.12 - BRUNIMENTO COM FERRAMENTAS EXPANSIVAS “DORNHONEN”.....	44
2.13 - PARÂMETROS DO PROCESSO.....	45
CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	55
3.1 - A METODOLOGIA.....	55

3.2 - CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS	57
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES	60
4.1 - RESULTADOS OBTIDOS PARA A FASE I	60
4.1.1 - AVALIAÇÃO DA CIRCULARIDADE PARA a FASE I	60
4.1.2 - AVALIAÇÃO DA RETITUDE PARA A FASE I	62
4.1.3 - AVALIAÇÃO DA RUGOSIDADE PARA A FASE I	63
4.2 - RESULTADOS PARA A FASE II – VARIAÇÃO DA PRESSÃO DE CONTATO.....	64
4.2.1 - AVALIAÇÃO DA CIRCULARIDADE PARA A FASE II.....	64
4.2.2 - AVALIAÇÃO DA RETITUDE PARA A FASE II	66
4.2.3 - - AVALIAÇÃO DA RUGOSIDADE PARA A FASE II	67
4.3 - RESULTADOS PARA A FASE III – VARIAÇÃO DA VELOCIDADE DE COR-TE.....	68
4.3.1 - AVALIAÇÃO DA CIRCULARIDADE PARA A FASE III.....	68
4.3.2 - AVALIAÇÃO DA RETITUDE PARA A FASE III	70
4.3.3 - AVALIAÇÃO DA RUGOSIDADE PARA A FASE III.....	71
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES	73
5.1 - conclusões.....	73
5.2 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	74
CAPÍTULO 6 - BIBLIOGRAFIA	75
6.1 - Referências Bibliográficas.....	75
6.2 - Referências Bibliográficas estudadas mas não referenciaedas neste trabalho	78

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Representação esquemática da entrada do grão abrasivo na peça	5
Figura 2.2 – Forma de desgaste no grão	5
Figura 2.3 – Influência do volume específico usinado na velocidade de desgaste radial	6
Figura 2.4 - Brunimento de pequeno curso (superacabamento).....	8
Figura 2.5 – Brunimento de longo curso (Brunimento).....	9
Figura 2.6 - Desvios macrogeométricos possíveis de ser corrigidos pelo processo de brunimento	10
Figura 2.7 - Processo Retificação	13
Figura 2.8 - Processo Brunimento	13
Figura 2.9 - Cruzamento em forma de "X"	14
Figura 2.10 – Estrutura de pedras abrasivas tendo-se: a) estrutura equilibrada; b) estrutura com maior volume de pontes e menos de poros (mais dura e menos porosa); c) estrutura com maior volume de grãos e menor de poros (dureza normal menos porosa); d) estrutura com maior volume de grãos e menos pontes (mais mole); e) estrutura com maior volume de grãos, maior de pontes e menor de poros (mais dura, menos porosa).....	25
Figura 2.11 – Tipos de acionamento do cabeçote brunidor : a) acionamento mecânico; b) acionamento hidráulico.....	33
Figura 2.12 - Ferramenta de uma pedra para brunir furos longos com pequeno diâmetro	34
Figura 2.13 - Ferramenta de uma pedra para brunir furos longos com pequeno diâmetro	34
Figura 2.14 - (a) Ferramenta para corte manual, (b) Corte com a ferramenta	36
Figura 2.15 - (a) Sistema de expansão da ferramenta, (b) corte com a ferramenta	37
Figura 2.16 - Ferramenta com junta universal.....	38
Figura 2.17 - Dimensionamento por dois pontos.....	41
Figura 2.18 - Tem-se barras de medidas flutuando no corpo da ferramenta.....	41
Figura 2.19 - Controle de medida por ar.....	42
Figura 2.20 - Traçado característico da operação de brunimento, utilizando-se, (a) Diamante, (b) Carboneto de Silício, (c) CBN.....	43
Figura 2.21 - Perfil de rugosidade, no brunimento tipo “plateau”.....	44
Figura 2.22 – Brunimento utilizando-se ferramentas do tipo espiga (“Dornhonen”).....	45
Figura 2.23 - Influência do comprimento da pedra brunidora sobre o desvio de circularidade	46
Figura 2.24 - Influência da largura da pedra brunidora sobre a circularidade.....	47
Figura 2.25 - Grandezas de influência no brunimento.....	48
Figura 2.26 – Solicitação do Grão abrasivo no processo de brunimento de curso curto	50
Figura 2.27 - Influência do comprimento da pedra de brunimento sobre o desvio de circularidade.....	51
Figura 2.28 – Comprimento útil da ferramenta de brunir e pressão de contato sobre o comprimento da peça.....	52
Figura 2.29 - Resultados obtidos por Tönshoff, variando-se a pressão de contato e mantendo- se os demais parâmetros constantes, obtidos para o aço St 35 (~ SAE 1010). 54	54
Figura 3.1 - Dimensões do corpo de prova, a) área da medição da circularidade, b) área da medição da retitude, c) área da medição da rugosidade R_a	56
Figura 4.1 – Percentual de correção do desvio de circularidade, em função da circularidade advinda do processo anterior.	61
Figura 4.2 – Percentual de correção do desvio de retitude, em função da retitude advinda do processo anterior.	62
Figura 4.3 – Percentual de correção do desvio de rugosidade, em função da rugosidade advinda do processo anterior.	63

Figura 4.4 – Percentual de correção do desvio de circularidade, em função da pressão de brunimento.....	65
Figura 4.5 - Percentual de correção do desvio de retitude, em função da pressão de brunimento.....	66
Figura 4.6 – Percentual de correção da rugosidade, variando-se a pressão de contato	67
Figura 4.7 – Percentual de correção da circularidade, em função da velocidade de corte.....	69
Figura 4.8 – Percentual de correção da retitude, em função da velocidade de corte.....	70
Figura 4.9 – Percentual de correção da rugosidade, em função da velocidade de corte.....	71

ÍNDICES DE TABELAS E QUADROS

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1- Parâmetros operacionais na operação de brunimento de metais e ligas	19
Tabela 2.2 – PRINCIPAIS MATERIAIS USINADOS PELO DIAMANTE, CBN E SUAS LIGAS.....	22
Tabela 2.3 - Classificação da Pedra Abrasiva Segundo a Granulometria.....	23
Tabela 2.4 - Granulometria da pedra e aplicação	29
Tabela 3.1 - CONDIÇÕES DE TRABALHO UTILIZADAS NA FASE I.....	58
Tabela 3.2 - CONDIÇÕES DE TRABALHO UTILIZADAS NA FASE II, VARIANDO-SE APENAS A PRESSÃO DE CONTATO.....	58
Tabela 3.3 - CONDIÇÕES DE TRABALHO UTILIZADAS NA FASE III, VARIANDO-SE APENAS A VELOCIDADE DE CORTE.....	59

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 - Processos de Brunimento.....	7
---	---

NOMENCLATURA

Letras Latinas

A_p = superfície da pedra em contato com o furo	mm^2
A_{pa} = área da pedra abrasiva	mm^2
F_C = Força de corte	Kgf/cm^2
F_F = Força axial	Kgf/cm^2
h_{ca} = espessura de corte	mm
KF = Área do pistão	mm^2
P_C = Pressão de contato	Kgf/cm^2
R_a - Rugosidade	μm
t_c = tempo de corte	seg.
V_B = Volume do aglomerante	mm^3
v_c = Velocidade de corte	m/min
v_e = Velocidade efetiva	m/min
v_f = Velocidade do curso	m/min
V_K = Volume dos grãos	mm^3
V_P = Volume dos poros	mm^3

Letras Gregas

α - Ângulo de cruzamento no brunimento	$(^\circ)$
α_1 - Ângulo de expansão dos cones na pedra	$(^\circ)$
ϕ - Fator de determinação da porosidade	(adimensional)
η - Ângulo da direção efetiva	$(^\circ)$

Letras Gregas-Latinas

μm – micron	
ΔV = volume usinado	mm^3

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

O processo de brunimento, embora não seja muito difundido é empregado na indústria automobilística, na de rolamentos, na de máquinas ferramentas, na de refrigeração, entre outras. Peças que terão certo grau de liberdade, peças de equipamento de deslizamento, como por exemplo : cilindros hidráulicos (movimento entre o êmbolo da haste do pistão e o corpo do cilindro), rolamento (movimento entre as esferas ou os roletes montados entre o anel interno e o externo), corpos de válvula (movimento entre o eixo de desvio do fluxo do fluido hidráulico e o corpo), motor de combustão interna (movimento entre os anéis do pistão e a camisa), etc., são componentes típicos, brunidos.

No motor de um veículo, por exemplo, estrias profundas deixadas, pelo processo, irão propiciar o “vazamento” do lubrificante para a câmara de combustão, causando uma queima irregular do combustível, aumentando a emissão dos gases poluentes, poluindo o meio ambiente ao redor do veículo.

Ainda no motor, se a profundidade das estrias for insuficiente, não haverá um filme constante de lubrificante, criando condições para o contato metálico entre os componentes, aumentando o aquecimento por atrito vindo a fundir o motor.

O processo de brunimento, em si, por não ser um processo de uso geral, tal como o torneamento, o fresamento e a retificação, dentre outros, não é objeto de constantes pesquisas, fora do âmbito das empresas produtoras de equipamentos. Neste sentido, um dos trabalhos de maior relevância, foi o trabalho de Tönshoff [*Tönshoff, 1970*], objeto de seu doutorado. Tönshoff procurou estudar, em sua tese, a influência dos vários parâmetros de usinagem e dos diversos desvios de forma, na peça final, no aço St 35 (\approx SAE 1010). Posteriormente, uma contribuição adicional, na mesma linha de pesquisa, completando o trabalho de Tönshoff, foi feita por Zettel [*Zettel, 1974*], objeto, também, de seu doutorado. Tönshoff estudou mais os aspectos relacionados com as taxas de remoção do material e suas influências nos desvios macro e microgeométricos. Zettel, 1974, se ateu mais com as influências dos parâmetros. Estes dois trabalhos conjugados serviram de base para o estudo em questão.

Um dos autores mais citados, sobre o assunto é o Prof. Dr. Ing. G. Haasis mas, por pertencer ao quadro de colaboradores da Nagel GmbH, suas publicações estão relacionadas mais ao desenvolvimento de dispositivos e/ou equipamentos [*Haasis, 1979; Haasis, 1987; Haasis, 1991*]. Outros trabalhos publicados tais como o de Michelski e Pawlus, 1993 se preocuparam mais com a caracterização e descrição do perfil de rugosidade obtido. Do encontro intitulado “Entendendo os Conceitos Básicos do Brunimento”, promovido pela SAE, em Michigan, onde houveram cerca de vinte e cinco trabalhos apresentados, vale a pena mencionar os trabalhos apresentados por Haasis [*Haasis, 1993*], Marvin [*Marvin, 1993*], Stewart [*Stewart, 1993*], Flores e von Sikle [*Flores, et al. 1993*] e Miller [*Miller, 1993*], que apresentam conceitos e informações a respeito do processo.

Este trabalho tem por objetivos :

- Avaliar a correção dos desvios oriundos do processo anterior através da correção dos desvios de circularidade, retitude e rugosidade sem haver a alteração dos parâmetros de corte utilizados pela máquina, denominada como sendo a Fase I;
- Avaliar a correção dos desvios oriundos do processo anterior através da correção dos desvios de circularidade, retitude e rugosidade alterando-se apenas a pressão de contato e mantendo-se os demais parâmetros de corte constantes, denominada como sendo a Fase II;
- Avaliar a correção dos desvios oriundos do processo anterior através da correção dos desvios de circularidade, retitude e rugosidade alterando-se apenas a velocidade de corte e mantendo-se os demais parâmetros de corte constantes, denominada como sendo a Fase III.

Para a consecução de tais objetivos, dividiu-se o trabalho nos seguintes capítulos :

- Capítulo 1 : Introdução;
- Capítulo 2 : O Processo de Brunimento – aqui apresenta-se uma revisão bibliográfica, bem como a conceituação do processo, a classificação e as características das pedras abrasivas, as ferramentas de brunir, o processo de controle, os parâmetros do processo;
- Capítulo 3 : Metodologia Experimental – aqui apresenta-se a Metodologia Experimental adotada, para a consecução dos objetivos propostos;

-
- Capítulo 4 : Resultados e Discussões – aqui analisa-se os resultados obtidos, nas três fases da Parte Experimental;
 - Capítulo 5 : Conclusões – aqui apresentam-se as conclusões inerentes ao trabalho e as sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2 - O PROCESSO DE BRUNIMENTO

O processo de brunimento é o processo de usinagem feito com ferramentas tendo arestas de corte com geometria não definida, multicortantes, com grãos abrasivos que se mantêm em constante contato com a superfície usinada, com o objetivo de se aumentar a exatidão dimensional, a forma e a qualidade superficial de componentes pré-usinados. Entre o componente e a ferramenta ocorre uma mudança no sentido longitudinal. A superfície acabada revela um padrão paralelo cruzado [*DIN 8589, 1982; Klink, 1983*].

Trata-se, portanto de um processo realizado com inúmeras arestas cortantes, cujas características geométricas diferem entre si e são de difícil determinação. Uma vez que uma grande quantidade de grãos abrasivos atua simultaneamente, a quantidade de material usinada resulta da soma de inúmeros cavacos produzidos pelas arestas [*König, 1980; Salje, 1989*]. Portanto, os grãos abrasivos necessitam ter uma dureza tal que, seja maior que a do material a ser usinado, de forma que, são compostos de materiais cristalinos duros. Estes materiais são, por natureza, frágeis, e na produção dos grãos, se partem em pequenas partículas, sem uma forma definida, composta de arestas pontiagudas. Assim, somente as partes mais salientes das superfícies dos grãos penetram na peça, durante a usinagem, formando com isto, as arestas planas dos mesmos.

Durante o processo de usinagem os grãos abrasivos provocam inicialmente, uma deformação plástica do material (Figura 2.1). No início do contato não se forma, portanto, nenhum cavaco. O material da peça forma rebarbas ou flui com a aresta cortante. Somente quando a aresta penetra o suficiente na peça, com uma espessura de corte h_{cu} , se inicia realmente a formação dos cavacos [*Steffens et al, 1978*]. A determinação da espessura de corte atuante em cada grão depende uma série de parâmetros e não é de fácil determinação [*König, 1980*].

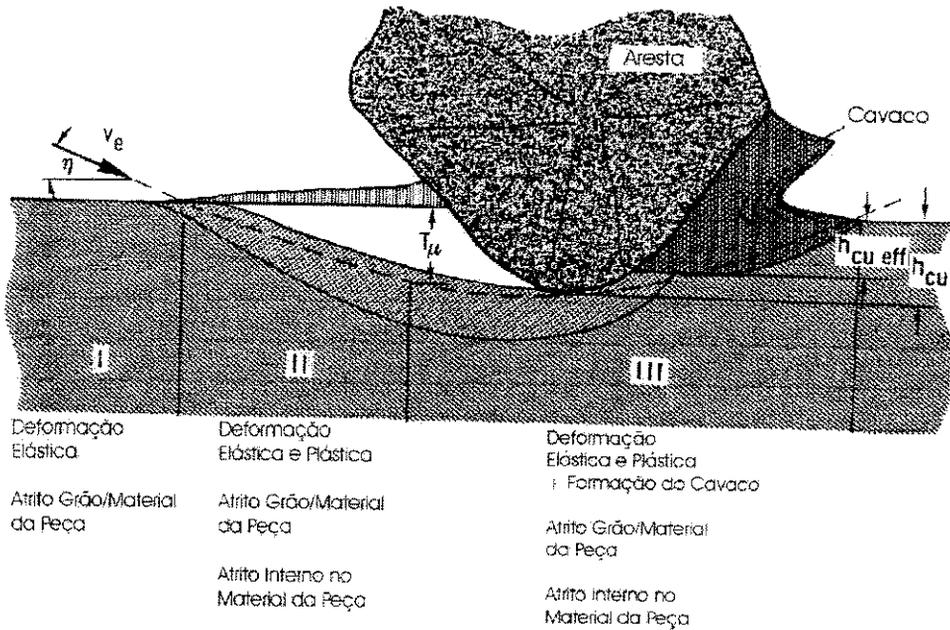


Figura 2.1 – Representação esquemática da entrada do grão abrasivo na peça

FONTE : König, 1980

Os desgastes que ocorrem nos grãos abrasivos se iniciam nas camadas cristalinas dos cristais, que se situam próximas à superfície dos grãos (figura 2.2). Nesta região, atuam extremas pressões e temperaturas, conduzindo a processos de oxidação e difusão.

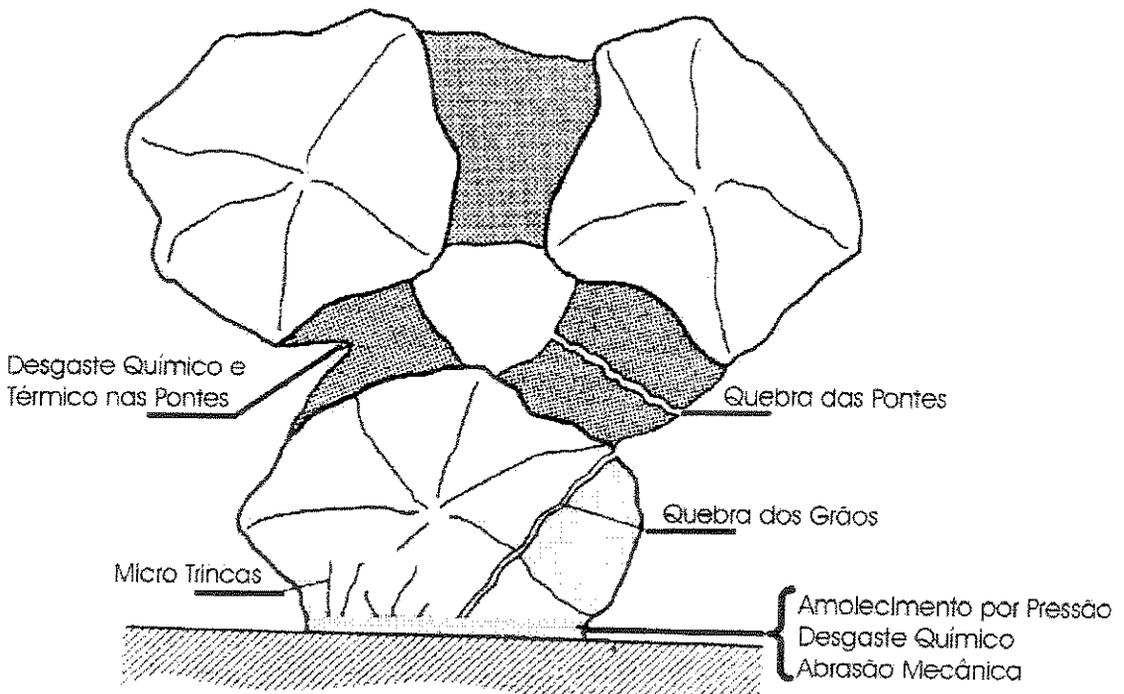


Figura 2.2 – Forma de desgaste no grão

FONTE : König, 1980

Na maioria dos casos, os desgastes que ocorrem nos grãos são os responsáveis pelos desgastes nas pontes de ligação, pois um “cegamento” dos grãos conduz, devido aos atritos cada vez maiores, a um aumento localizado dos esforços de corte conduzindo, com isto a um rompimento das ligações. De acordo com a maior ou menor ligação do grão com a estrutura, o desgaste ocorrerá mais no grão ou mais na ponte de ligação. A ponte pode se desgastar, também, sem a atuação direta do grão, devido à influências químicas ou térmicas [König, 1980]. Assim, as causas do desgaste estão diretamente relacionadas com o tipo de pedra abrasiva utilizada e as condições utilizadas no corte. A figura 2.3 , mostra, de maneira genérica, o tipo de desgaste mais provável de ocorrer em um grão abrasivo, em função do volume específico usinado, e sua influência na velocidade de ocorrência no desgaste radial da pedra abrasiva. O volume específico é dado por [Juchen, 1987].

$$Z' = \frac{\Delta V}{t_c * A_{pa}} \quad \left[\frac{\text{mm}^3}{\text{min.} * \text{mm}^2} \right]$$

onde

ΔV = volume usinado

t_c = tempo de corte

A_{pa} = área da pedra abrasiva

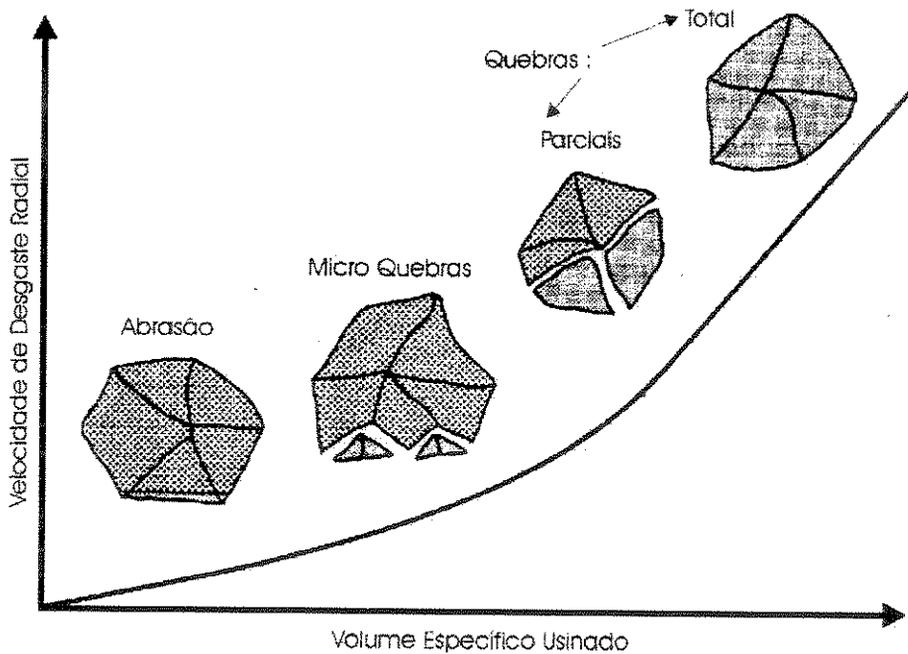


Figura 2.3 – Influência do volume específico usinado na velocidade de desgaste radial

FONTE : König, 1980

O quadro I apresenta os vários processos de brunimento, segundo a norma DIN 8589 - parte 14 [DIN 8589: 1982]. Segundo esta norma, a diferença entre o brunimento e o superacabamento reside no fato de que o curso do movimento de avanço da ferramenta, no termo empregado como brunimento é longo, enquanto que, no termo adotado como superacabamento, o curso da ferramenta é pequeno, ou seja, é um movimento vibratório da mesma.

BRUNIMENTO E SUPERCABAMENTO - GRUPO 3.3.4 DIN 8589	
Brunimento de Forma	Brunimento Plano (Curso Longo)
	Superacabamento Plano (Curso Pequeno)
	Brunimento Cilíndrico Externo
Brunimento Cilíndrico	Brunimento Cilíndrico Interno
	Superacabamento Cilíndrico Externo
	Superacabamento Cilíndrico Interno
	Superacabamento Helicoidal Externo
Brunimento Helicoidal	Superacabamento Helicoidal Interno
	Superacabamento Helicoidal Externo
Brunimento por Operação	Superacabamento por Geração Externo
	Superacabamento por Geração Interno
Brunimento de Perfil	Superacabamento de Perfil Externo
	Superacabamento de Perfil Interno
Brunimento de Forma	Brunimento de Forma Externo
	Brunimento de Forma Interno
	Superacabamento de Forma Interno

Quadro I - Processos de Brunimento

FONTE : DIN 8589, 1982

No brunimento de pequeno curso ou superacabamento, ou ainda microbrunimento “microhoning”, o processo é efetuado com movimento de reciprocação (oscilação) muito rápido, esta frequência varia de acordo com o sistema aplicado para a realização da operação e com o comprimento do curso, variando entre 300 e 2500 ciclos/ min (figura 2.4) [*Metals Handbook, 9ª ed. V. 16, König, 1980, Tool and Manufacturing Engineers Handbook, 4ª ed. Cap. 16*]. Este processo pode produzir rugosidades médias variando entre 0,10 e 0,05 $\mu\text{m R}_a$. Componentes de máquinas gráficas, bicos injetores de combustível são peças típicas que empregam este procedimento. Tem por objetivo, também, conferir uma superfície quase perfeita, ou seja, com uma diferença entre os picos e os vales muito pequena, e é usado onde haja a necessidade de guias muito precisas e com riscos muito finos, em alguns casos ele é chamado de espelhamento, por produzir uma superfície quase que espelhada.

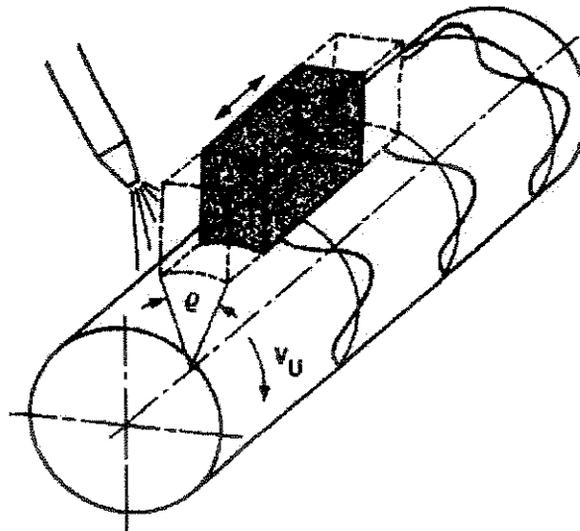


Figura 2.4 - Brunimento de pequeno curso (superacabamento)

FONTE : König, 1980

No brunimento de longo curso, ou simplesmente brunimento (figura 2.5), não existe um movimento vibratório da ferramenta e podem ser obtidas rugosidades aritméticas médias R_a da mesma ordem de grandeza do brunimento de pequeno curso, dependendo do tipo de ferramenta e operação empregados, embora um valor baixo de rugosidade não seja o principal motivo da utilização deste processo. Aplicações típicas deste procedimento são encontradas em camisas de pistões aplicadas em motores, elementos hidráulicos, componentes de máquinas ferramenta, etc.. Enquanto que, o brunimento de pequeno curso ou superacabamento tem

uma aplicação maior em peças usinadas externamente, o brunimento de longo curso encontra uma aplicação maior em usinagens internas. Na maioria das aplicações é prescrito, em projeto, que a superfície da peça deva ter uma superfície cruzada para efeitos de retenção de óleo, mas em alguns casos o brunimento é efetuado substituindo a retificação em peças longas, tendo em vista a exatidão dimensional e os desvios de forma e orientação, obtidos. O brunimento de longo curso pode corrigir desvios macrogeométricos advindos de processo anterior (figura 2.6).

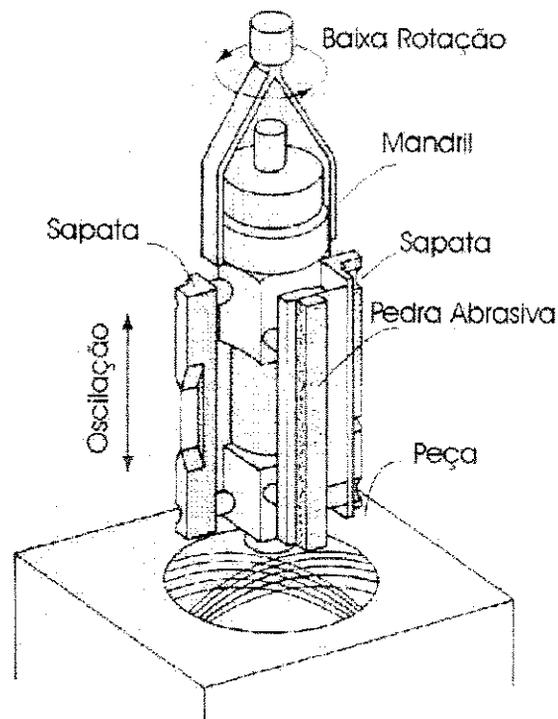


Figura 2.5 – Brunimento de longo curso (Brunimento)

FONTE : METALS HANDBOOK, 9ª ed. V. 16

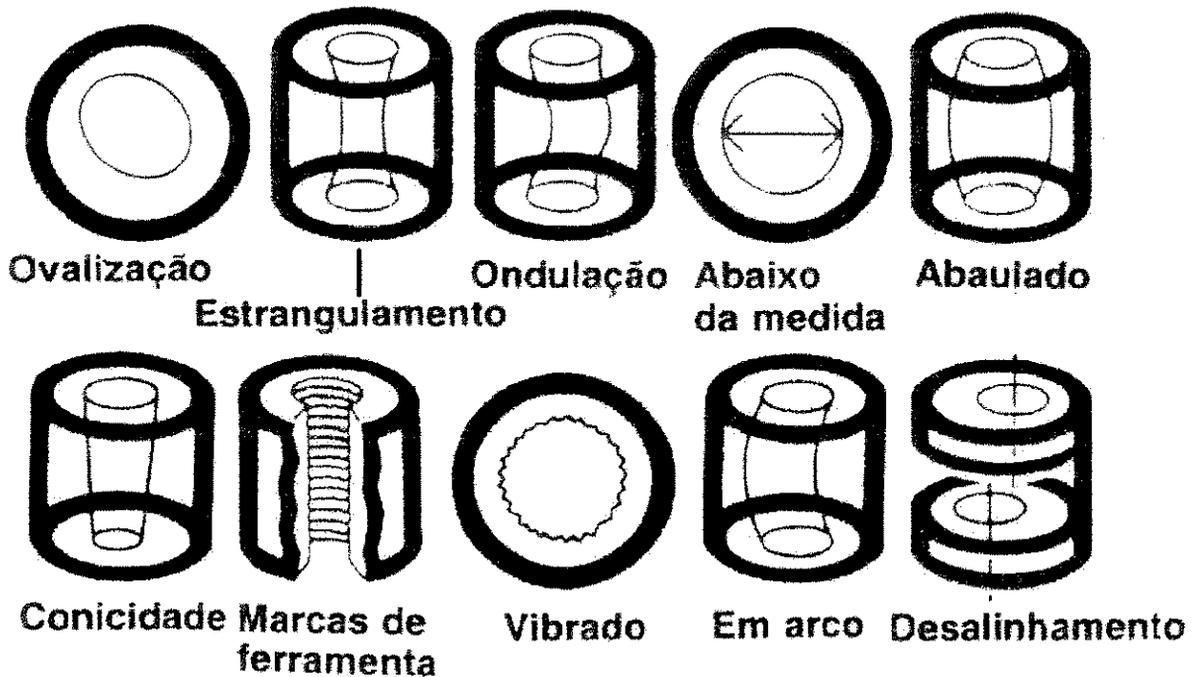


Figura 2.6 - Desvios macrogeométricos possíveis de ser corrigidos pelo processo de brunimento

FONTE : METALS HANDBOOK, 9ª ed. V. 16

O processo de brunimento pode ser caracterizado em dois grupos de grandezas de entrada [König, 1980], quais sejam, sistema e parâmetros de usinagem .

O sistema de usinagem contém as grandezas do processo, também denominadas como grandezas fixas, e é determinado por:

- Máquina, com seus dados de potência, rigidez e demais dados;
- Peça, com suas propriedades mecânicas, geometria, e condições da mesma, de acordo com a usinagem anterior;
- A ferramenta, com sua geometria, exatidão e composição da pedra abrasiva;
- O fluido de corte através do tipo, viscosidade, concentração e a disposição do jato.

Os parâmetros de usinagem envolvem os itens compreendidos pela cinemática do processo e pela mecânica do mesmo, também denominadas como grandezas variáveis. A cinemática do processo resulta da sobreposição de dois movimentos, quais sejam: o movimento de avanço e o movimento de corte.

Também influenciam o processo os parâmetros:

- pressão de contato exercida pela pedra na parede do furo;
- pressão do fluido de corte e vazão do mesmo.

O fluido de corte se encontra nas duas categorias pois, enquanto o fluido de corte manter as suas propriedades físico-químicas, pode ser considerado uma grandeza fixa ao processo. Porém, com o tempo de uso, ele começa a perder as suas propriedades físico-químicas sendo impregnado por qualquer agente contaminante envolvido no processo de usinagem ou mesmo por agentes externos ao processo como : pó, partículas em suspensão no ar, entre outros fatores externos.

Normalmente os fabricantes de fluido de corte recomendam que se faça, com certa constância, uma análise química do mesmo, para se determinar se não há contaminações no fluido, perda das características de viscosidade, fazendo a reposição ou a substituição total e completa, em função do grau de contaminação e/ou perdas ou alterações das propriedades físico-químicas. Algumas vezes adota-se a recomendação de se substituir o fluido de corte após uma determinada quantidade de peças usinadas, fato este que não é muito recomendado pelos fabricantes do fluido de corte uma vez que, o mesmo, pode sofrer a influência de agentes contaminantes antes mesmo da quantidade pré estabelecida ser atingida.

O meio ambiente em que se encontra a máquina é um fator importante para o exame do tempo de troca do fluido, por exemplo, se a máquina estiver instalada nas proximidades de uma empresa de fundição, o fluido de corte poderá sofrer contaminações das partículas de areia e/ou outros elementos oriundos dos processos de fundição. Assim como, se a máquina estiver em uma área próxima ao oceano o fluido poderá sofrer a influência dos efeitos da marésia. Portanto, como se pode constatar a escolha do fluido de corte não depende somente das características do processo de usinagem, do tipo de máquina mas, também, do meio ambiente onde a máquina se encontra pois, a “*agressividade*” deste meio pode vir a influenciar no grau de contaminação do fluido de corte.

A somatória das influências das grandezas de entrada determina as características do processo e o resultado final do mesmo.

A partir das pesquisas das relações entre as várias grandezas, podem ser obtidos vários dados que conduzem a novos desenvolvimentos, onde a velocidade de corte, o comprimento e a posição do curso, assim como a pressão de contato tem importância fundamental.

Desde o primeiro emprego industrial do brunimento, o processo tem evoluído de um sistema de brunir acionado manualmente, para um sistema de extrema eficácia de produção com o desenvolvimento de novas máquinas. Primeiramente, foi utilizado uma única pedra abrasiva, sem dispositivos de guia e, posteriormente com o emprego de máquinas de maior rotação, foram inseridas guias para evitar que a pedra não perdesse a referência. Com a evolução tecnológica passaram a ser empregadas ferramentas abrasivas em maior quantidade, ou

seja, foram empregados dispositivos com duas, três, quatro, até aproximadamente 20 pedras abrasivas em função do diâmetro a ser brunido. [*Metals Handbook, 9ª ed. V. 16*]

Com o advento de um número cada vez mais crescente das pesquisas para o aperfeiçoamento do processo, desenvolveu-se ferramentas abrasivas que atendessem a um número cada vez maior de materiais a serem brunidos. Desenvolveu-se, mais recentemente, as ferramentas de CBN e diamante, empregadas em peças, que requerem uma precisão dimensional, cada vez mais apertada e, um acabamento mais fino e preciso. Os modernos equipamentos de brunir são os mais adequados para brunir com tais ferramentas, por serem mais rígidos e precisos. Estas máquinas apresentam sistemas de controle e de medição, que fazem com que, o emprego de tais ferramentas se torne mais economicamente viável [*Haasis, 1975*].

O grão abrasivo é usado para remover cavacos (material) assim como as demais operações de usinagem. Os grãos são unidos por aglomerantes, e uma pressão axial suficiente é aplicada para forçar os pontos cortantes e abrasivos a penetrar e remover minúsculas partículas. Assim que um ponto torna-se sem corte, a pressão faz com que se formem novas partículas de grãos e aglomerante e uma nova aresta de corte é formada.

Esta pressão, portanto, afeta a eficiência e o resultado final. Em equipamento utilizando sistema hidráulico, as pressões, no mesmo, podem variar de 1000 a 3000 KPa (150 - 450 psi, 1 a 3 N/mm²). Entretanto, em alguns equipamentos, que não utilizam sistemas hidráulicos, o processo é controlado por um sistema de avanço radial, sendo que, elevados avanços radiais são utilizados para diâmetros maiores. Com exemplo, um avanço radial de 0,23 mm/min. poderia ser usado para desbaste e um avanço de 0,18 mm/min. para acabamento, para se usar um cilindro de diâmetro 215 mm, em ferro fundido cinzento. Se este cilindro possui um diâmetro de 150 mm, estes valores podem ser respectivamente 0,150 e 0,075 mm/min [*Metals Handbook, 9ª ed. V. 16*].

Uma pressão insuficiente (ou avanço radial) poderá resultar em uma taxa muito baixa remoção de material. Porém, quando a pressão (ou avanço radial) for excessiva, ela poderá originar superfícies mais rugosas, devido ao rompimento muito rápido do grão abrasivo da estrutura. Isto irá causar um aumento do custo de produção, assim como irá diminuir a produtividade, efeito este, causado pela aumento do tempo de parada para a troca dos elementos abrasivos.

Os métodos de tentativa e erro são habitualmente usados nas linhas de produção de brunimento, para se determinar pressão ótima. Um procedimento comum é começar com a pressão mais baixa e então gradualmente aumentam-se a pressão de trabalho, usando peças acaba-

das como referência até que as melhores condições sejam determinadas. [*Metals Handbook, 9ª ed. V. 16*].

Após a união pelo aglomerante, os grãos abrasivos são agregados sob o formato de pedras, rolos (ou bastões). Na operação de brunimento, uma face do bastão está em contato com a superfície a usinar, de tal modo que inúmeros grãos estão agindo na superfície. Enquanto cada pequeno grão faz um pequeno corte, a ação coletiva de todos os grãos assegura uma substancial remoção de material.

O processo de brunimento diferencia-se do processo de retificação nos seguintes aspectos [*Weingaertner, 1984*];

1 - O cavaco produzido pela retificação tem sua espessura variando durante o avanço do grão abrasivo. Isto não ocorre no brunimento conforme pode-se ver nas figuras 2.7 e 2.8;

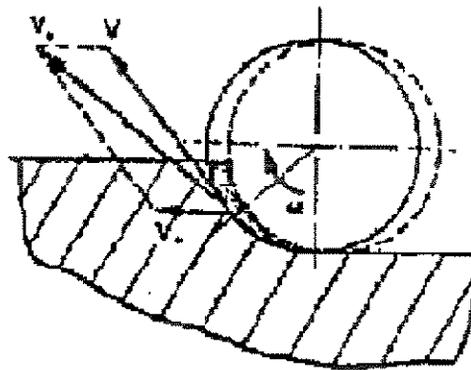


Figura 2.7 - Processo Retificação

FONTE : Brulé, 1989

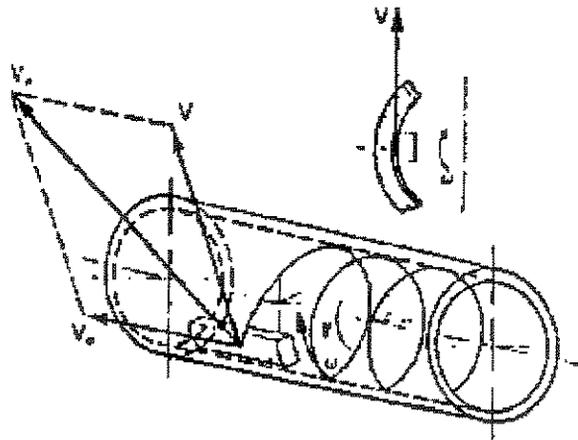


Figura 2.8 - Processo Brunimento

FONTE : Brulé, 1989

2 - As velocidades de corte e avanço, na retificação, são diferentes quando comparadas com o processo de brunimento em direção e módulo. Enquanto que na retificação tem-se altas velocidades de corte no brunimento as velocidades de corte são menores. Já o avanço axial é diferente pois na maioria dos processos de retificação o retorno não é feito com o elemento abrasivo em contato com a peça enquanto que, no brunimento tanto a ida como o retorno do elemento abrasivo o mesmo estará em contato permanente com a peças fazendo com que as velocidades de corte na retificação sejam diferentes das velocidades de corte no brunimento;

3 - As pressões em cada grão são diferentes para os dois processos pois, conforme citado acima, no brunimento há o retorno do elemento abrasivo em contato com a peça fazendo com que as solicitações nos grãos abrasivos sejam diferentes em relação a retificação, uma vez que, na retificação o retorno normalmente é feito afastando-se o elemento abrasivo do contato com a peça removendo as forças de contato entre a peça e o elemento abrasivo;

4 - No brunimento, os grãos apresentam um contato contínuo com a peça até se destacarem da pedra quando gastos;

5 - Não ocorre o fenômeno de queima da pedra abrasiva durante o brunimento;

6 - É gerada uma grande quantidade de calor na retificação devido à elevada velocidade de corte, ao contrário do brunimento, onde a velocidade é baixa;

7 - Na retificação, o rebolo é sustentado por um eixo da máquina que tem uma mesa para prender a peça obra. No brunimento, o cabeçote se apoia sobre a própria peça em usinagem e o eixo serve apenas para transmitir as forças necessárias para o processo;

8 - No brunimento, o movimento de reciprocção deixa um ângulo cruzado em "X" (figura 2.9);

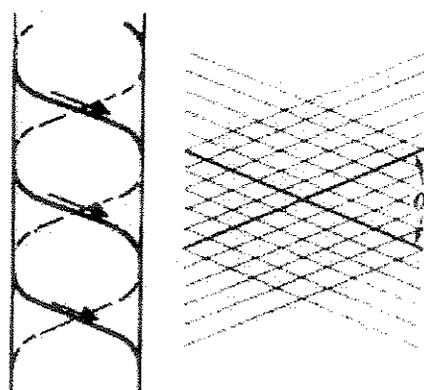


Figura 2.9 - Cruzamento em forma de "X"

FONTE : Juchen, 1987

Por outro lado, na retificação, por exemplo, o desgaste ocorre devido à influência da temperatura uma vez que, a velocidade de corte é mais elevada do que a velocidade de corte para o brunimento, tendo forças de corte menores e, cuja influência é menos significativa do que a velocidade de corte sem, no entanto, desconsiderar a ação da força.

No brunimento, o desgaste é mais afetado pela ação das forças de corte em conjunto com a velocidade de corte pois, tem-se temperaturas menores devido, às menores velocidades de corte, tendo, ao contrário da retificação, maiores forças de corte [*Chandrasekar, 1996*].

Como se pode constatar, na retificação, a auto-afiação é uma função da velocidade de corte enquanto que, no brunimento, a auto-afiação é uma função da combinação entre a força de corte e da velocidade de corte.

Dependendo das máquinas ferramentas e dos métodos a serem utilizados, o brunimento pode ser aplicado tanto em superfícies internas como externas, para se obter uma ou todas as qualidades abaixo relacionadas:

- 1 - Remoção de material rápida e economicamente com uma mínima geração de calor e deformação;
- 2 - Obtenção de uma superfície diametralmente circular e cilíndrica, pela correção da circularidade, cilíndricidade e retitude, ou distorções causadas em operações anteriores;
- 3 - Obtenção de qualquer acabamento superficial;
- 4 - Precisão no controle dimensional.

As operações de brunimento não mudam a posição de localização do eixo do furo, excetuando-se casos especiais. A linha de centro da ferramenta brunidora seguirá o eixo neutro do cilindro gerado e obtido em operações anteriores. A ferramenta ou a fixação deve flutuar de modo que o furo e a ferramenta fiquem alinhados.

Não é necessário preparar previamente o furo para o brunimento, exceto nos casos em que seja necessário estabelecer a localização apropriada do mesmo. Na maioria dos casos, outras operações de usinagem podem ser eliminadas. Em alguns casos, tais como em cilindros hidráulicos, pode-se remover acima de 2,5 mm de material, entretanto cerca de 0,025 a 0,5 mm no diâmetro é usualmente a faixa econômica para a prática do brunimento [*Metals Handbook, 9ª ed. V. 16, Tool and Manufacturing Engineers Handbook, 4ª ed. Cap. 16*].

Para se corrigir desvios tais como, circularidade, retitude, etc., deverá haver sobrematerial com cerca de duas vezes o equivalente em material ao montante de erro no furo. [*METALS HANDBOOK, 9ª ed. V. 16*]

Quando se deseja um acabamento superficial fino, deve-se processar as peças em duas etapas: 1 - Um brunimento grosseiro para remoção de material; 2 - Brunimento em acabamento para se desenvolver o acabamento desejado.

2.1 - TIPOS DE BRUNIMENTO

2.1.1 - BRUNIMENTO MANUAL

O brunimento manual é aquele que o operador exerce manualmente pressões sobre a pedra, ou exerce controles manuais sobre as dimensões obtidas. Neste tipo de brunimento existem máquinas para a usinagem de cilindros hidráulicos de grande comprimento e diâmetro, que podem ser brunidos tanto horizontal como verticalmente. Porém, se a medição for efetuada com a parada da máquina, para que o operador possa conferir as dimensões da peça durante a operação de usinagem, este tipo de brunimento é denominado de brunimento manual pois, houve a parada do processo para a medição manual efetuada pelo operador.

Há dois tipos de brunimento manual :

O brunimento horizontal : neste tipo de brunimento a ferramenta é mantida horizontalmente para facilitar o trabalho do operador. Neste caso, a força de corte é dada pela pressão que o operador exerce sobre a peça. Este tipo de brunimento geralmente é recomendado para o brunimento de desbaste e para peças de pequeno diâmetro.

O brunimento vertical : neste tipo de brunimento a peça é fixada através de dispositivos instalados em uma mesa vertical. A força de corte é determinada pela máquina enquanto que a medida final é determinada pelo operador medindo a peça através de dispositivos de medição por ar comprimido.

2.1.2 - BRUNIMENTO AUTOMATIZADO

No brunimento automatizado a máquina possui dispositivos pneumáticos de medição, que efetuam o controle da peça durante a realização do processo de usinagem e que interrompem o processo assim que, a medida especificada for atingida.

As máquinas podem ser horizontais ou verticais sendo que, as mais usuais são as verticais.

2.2 - BASTÕES E PEDRAS ABRASIVAS

2.2.1 - COMPOSIÇÃO E ESPECIFICAÇÃO DAS PEDRAS E BASTÕES :

Os bastões e as pedras abrasivas são feitas de óxido de alumínio, carboneto de silício, CBN ou diamante, aglomerados com porosidade na estrutura do bastão. A maneira pelo qual estes fatores são balanceados determina como o abrasivo irá se comportar em uma determinada peça. Os abrasivos [Brulé, 1992] são produzidos do mesmo modo que os rebolos abrasivos e seguem as mesmas especificações, que são divididas em duas categorias:

a) Abrasivos convencionais (óxido de alumínio e carboneto de silício); b) Abrasivos superduros (CBN e diamante).

Para ambos os casos, deve-se identificar os seguintes elementos:

- 1 - Natureza do abrasivo;
- 2 - Granulometria;
- 3 - Dureza da ferramenta;
- 4 - Porosidade;
- 5 - Tipo de liga;
- 6 - Estrutura;
- 7 - Concentração;
- 8 - Especificação;
- 9 - Solubilidade;
- 10 - Aditivação das pedras.

O grão é a aresta cortante da ferramenta. Ele deve ser frágil o suficiente para fraturar e afiar a si mesmo, e também duro o suficiente para suportar a pressão requerida para fazê-lo penetrar na superfície. O grão é classificado de acordo com a sua resistência, sua fragilidade e seu tamanho. Os tamanhos são da ordem de 36 à 600, nas suas malhas correspondentes. [ABNT - NBR 11094, 1987; ISO 6344, 1983; ISO 8486, 1984; DIN 69100, 1988; DIN 69186, 1982]

O aglomerante segura o grão e deve ser forte o suficiente para prendê-lo durante sua vida cortante, mas não tão duro de modo que ele se estrague no furo e retarde o corte. A dureza e o tipo de aglomerante são indicados por códigos e letras.

As classificações das pedras abrasivas são determinadas conforme abaixo: [ABNT NBR 6166, 1987.]

2.2.1.1 - ÓXIDO DE ALUMÍNIO:

Obtido pela redução da bauxita em forno a arco voltaico a 4000° C [ABNT NBR 6166, 1987; *Machining Data Handbook 3ª ed.*]. Esta bauxita é fundida e cristalizada em blocos durante o resfriamento. Estes blocos são depois moídos. Existem dois tipos conforme abaixo:

- Óxido de alumínio A: com pureza de aproximadamente 96%. Os grãos têm a forma geométrica arredondada e sua dureza é de 1850 a 1950 Knoop.
- Óxido de alumínio AA: com pureza de aproximadamente 99,5%. Os grãos têm a forma geométrica pontiaguda e sua dureza é de 1950 a 2100 Knoop.

É o menos duro dos abrasivos e também o mais barato, utilizado para materiais moles e semi-moles.

A tabela 2.1 apresenta os metais e ligas que podem ser brunidos com as suas respectivas durezas, tipo de abrasivo empregado, parâmetros operacionais e demais características

Tabela 2.1 - Parâmetros operacionais na operação de brunimento de metais e ligas

Dureza Brinell HB	Material da Pedra Abrasiva		Tamanho do Grão, para superfícies com rugosidade (Ra), mm (min)					Movimento dos Elcos		Pressão de trabalho KPa	Fluido de Corte
	Tipo (a)	Grau (b) ANSI e ISO	0.025 - 0.125 (1 - 5)	0.15 - 0.25 (6 - 10)	0.30 - 0.50 (11 - 20)	0.53 - 0.75 (21 - 30)	>0.75 (> 30)	Velocidade Rotacional m/min	Recriprocação m/min		
Ligas de aço carbono, forjado ou fundido											
100 - 300	A ou B	Q	600	500	320	220	180	30 - 91	5.5 - 33	276	A
300 - 400	A ou B	Q	500	500	320	220	180	27 - 84	4.9 - 30	276	A
45 - 52 HRC	A ou B	N	500	400	280	220	120	24 - 76	4.3 - 27	414	A
52 - 58 HRC	A ou B	K	500	320	280	220	120	23 - 69	3.9 - 25	517	A
58 - 60 HRC	B ou A	I	400	280	220	120	120	20 - 69	3.4 - 23	517	A
> 60 HRC	B ou A	I	320	220	120	120	120	18 - 56	3.0 - 21	690	A
Aços Ferramenta, forjado											
150 - 300	A ou B	Q	600	500	320	220	180	23 - 64	4.0 - 23	345	A
300 - 400	A ou B	N	500	500	320	220	180	21 - 61	3.7 - 22	345	A
45 - 52 HRC	A ou B	N	320	460	220	150	120	20 - 55	3.4 - 20	517	A
52 - 58 HRC	A ou B	K	400	280	220	150	120	15 - 46	2.7 - 16.5	690	A
> 60 HRC	B ou A	I	320	220	180	120	120	15 - 46	2.7 - 16.5	830	A
Aços inoxidáveis, forjado e fundido											
135 - 315	A ou B	Q	600	500	320	280	180	30 - 76	5.5 - 27	276	A
315 - 420	A ou B	N	500	500	320	200	150	26 - 72	4.6 - 26	276	A
45 - 52 HRC	A ou B	N	500	400	280	220	150	21 - 67	3.7 - 24	414	A
52 - 58 HRC	A ou B	I	500	320	220	150	120	15 - 61	2.7 - 23	517	A
Ferro de fundido cinzento, dúctil e maleável											
110 - 315	C ou D	Q	500	500	320	200	180	36.5 - 100	6.4 - 36.5	276	B
315 - 420	C ou D	Q	500	500	320	220	180	26 - 91	4.6 - 33.5	276	B
45 - 52 HRC	C ou D	N	500	400	320	220	120	20 - 67	6.5 - 220	414	B
Austenítico (resistente ao Ni), ferro de fundido maleável e cinzento											
100 - 270	C ou D	J à S	500	400	280	220	120	38 - 68.5	12.2 - 24	345	A
Ligas de Alumínio, forjado e fundido											
30 - 450 (500 Kg)	C ou D	L	600	500	400	280	220	15 - 64	2.7 - 23	276	A
110 - 315	C ou D	N	600	500	400	280	180	15 - 61	2.7 - 23	276	A
315 - 440	C ou D	N	500	500	400	280	180	Sell/46	1.5 - 16.5	414	A
Ligas de Cobre, forjado e fundido											
40 - 200 (500 Kg)	C ou D	I	600	500	500	320	180	15 - 76	2.7 - 27	276	A
Ligas de Níquel, forjado e fundido											
80 - 315	A ou B	J	600	500	400	280	180	30 - 76	5.5 - 27	276	A
Ligas de Níquel, forjado e fundido											
315 - 420	A ou B	J	500	500	400	220	180	27 - 69	4.9 - 24	276	A
45 - 52 HRC	A ou B	J	500	400	320	220	180	24 - 61	4.3 - 23	517	A
Ligas de alto temperatura, forjado e fundido											
200 - 315	C ou D	J	500	500	320	280	180	24 - 61	4.3 - 23	414	A
315 - 475	C ou D	J	500	400	320	280	180	15 - 49	2.7 - 18	414	A
Ligas refratárias											
180 - 320	A ou B	Q	500	400	320	280	180	15 - 61	2.7 - 23	414	A
Revestido com Cromo											
Duro	A ou D	L	320	280	320	180	120	27 - 91	4.9 - 33.5	690	A

(a) tipo de Abrasivo: A, óxido de alumínio; B, nitrato cúbico de boro; C, carboneto de silício; D, diamante. (b) Grau de dureza do abrasivo: mole (F, G, H, e I); médio (J, K, L, M, e N); e duro (O, P, Q, R e S). (c) Fluido de brunimento: A - 70% querosene 30% óleo sulfizado ou clorado; B - querosene.

2.2.1.2 - CARBONETO DE SILÍCIO:

Obtido por fusão da areia com carvão mineral a 3000° C em forno elétrico, o carboneto de silício resultante apresenta 70% de silício e 30% de carbono, existindo dois tipos de grãos :

[*ABNT NBR 6166, 1987: Machining Data Handbook 3ª ed.*]:

- Carboneto de silício C apresenta com geométrica pontiaguda;
- Carboneto de silício: GC: é uma forma mais pura que a anterior, possui forma geométrica mais pontiaguda e é mais frágil.

O carboneto de silício tem dureza de 2020 a 2480 Knoop.

É utilizado para materiais de altas durezas e baixas tenacidades.

2.2.1.3 - NITRETO CÚBICO DE BORO (CBN)

O CBN (Nitreto Cúbico de Boro) é um grão abrasivo que possui uma dureza Knoop duas vezes maior do que o óxido de alumínio ($\sim 4700 \text{ Kg/mm}^2$ contra $\sim 2100 \text{ Kg/mm}^2$), possuindo ainda alta condutividade térmica, maior resistência à abrasão e à fratura. Isto faz com que, os grãos abrasivos de CBN tenham uma vida maior dissipando melhor o calor, na usinagem. Assim, é uma material adequado para a usinagem de materiais ferrosos endurecidos e de superligas.

Tem-se três tipos de CBN : [*ABNT NBR 6166, 1987; Machining Data Handbook 3ª ed.*]

1 - **CBN I**: não é revestido e é o mais usado em pedras vitrificadas;

2 - **CBN II**: revestido com um filme metálico, é muito usado em pedras resinóides, sendo o melhor para brunir aços temperados de molibdênio e tungstênio e aços carbono com alto teor de carbono;

3 - **CBN de estrutura cristalina**, com tamanho de grão muito pequeno: É excelente para se utilizar em “linhas de transferência”, em peças de aços comuns. Nos processos anteriores, grãos obtidos após a moagem do CBN bruto, apresentam estruturas predominantemente monocristalinas. Quando suas arestas de corte são desgastadas, o grão se quebra em grandes lascas, gastando-se rapidamente, ou então, devido ao desgaste, as forças de corte crescem e, se

o grão não lasca, o grão inteiro se desloca da matriz causando o desgaste rápido da pedra [*Tool and Manufacturing Engineers Handbook, 4ª ed. V. III*]. Por este novo processo, os grãos de CBN são unidos por sinterização, sendo que estes grãos são extra finos. Os blocos possuem estrutura dividida em muitas regiões cristalinas micrométricas. Ao se moer estes blocos, tem-se novos grãos com estrutura não monocristalina, sendo que estes grãos não mono cristalinos, irão se desgastar de modo diferente. Ao se perder a agressividade das arestas cortantes dos grãos, ocorre a microfratura e destacamento dos microcristais, num processo que expõe novas arestas cortantes com poucas perdas de CBN. Produz um baixo desgaste, aumentando a vida, assim como as forças de corte são substancialmente menores do que para os grãos monocristalinos. [*MACHINING DATA HAN-DBOOK 3ª ed., MDC*].

Os tipos I e II são indicados para aços superduros e ferros fundidos e o CBN de estrutura cristalina é indicado para aços moles e meio moles (menos de 50 Rc) usinando milhares de furos nestes metais, antes de haver a necessidade de troca das pedras. [*Machining Data Handbook 3ª ed.*]

2.2.1.4 - DIAMANTE:

Seu custo é elevado, é o mais duro e o mais antigo superabrasivo em uso no brunimento. O diamante natural era usado no início do século e o diamante sintético teve seu uso incrementado a partir de meados dos anos 40. [*Machining Data Handbook 3ª ed.*]

Tem-se dois tipos de grãos:

1 - Diamante natural (D): é o mais duro, com uma dureza de aproximadamente 8000 Knoop.

2 - Diamante sintético (SD): é o mais barato e tem uma dureza de 7000 a 7500 Knoop.

O diamante possui uma vida menor quando usado em metais ferrosos insaturados em carbono, devido à sua solubilidade com o ferro, mesmo assim sua vida é muito maior que a vida dos óxidos de alumínio e do carboneto de silício, aplicados ao mesmo material.

Com o aparecimento do CBN (nitreto cúbico de boro), o diamante passou a ser utilizado principalmente para metais ferrosos saturados em carbono e nas superligas tais como alnico, rené, waspalo, inconel, materiais cerâmicos, vidros, tungstênio, carbonetos, aços de alto teor de carbono, nitretados ou temperados. Como o diamante apresenta uma geometria pouco

pontiaguda, ele é adequado para materiais moles. Na tabela 2.1 (item 2.2.1.1) e tabela 2.2 pode-se ver os principais materiais usinados pelo diamante e CBN e suas ligas

Tabela 2.2 – PRINCIPAIS MATERIAIS USINADOS PELO DIAMANTE, CBN E SUAS LIGAS

ABRASIVOS SUPERDUROS					
AÇOS DUROS (temperados ou cementados)	DUREZA DO MATERIAL (Rc)	DIAMANTE	CBN	CONCENTRAÇÃO	DUREZA DA LIGA
AÇOS DUROS (temperados ou cementados)	50 – 65	NÃO	Preferido	NORMAL	Médio
AÇOS DUROS nitretados	65 – 75	Preferido	Preferido	NORMAL P/ ALTA	Muito Duro
AÇOS MOLES	< 50	Recomendado	Preferido	BAIXA	Duro
AÇOS INÓX	TODOS	NÃO	Preferido	NORMAL	Médio
CARBONETOS (duros)	ALTA	Preferido	NÃO	NORMAL	Muito mole
CARBONETOS (tenazes)	BAIXA	Preferido	NÃO	NORMAL	Mole, Médio
FERRO FUNDIDO (duros)	ALTA	Preferido	Recomendado	NORMAL	Médio
FERRO FUNDIDO (moles)	BAIXA	Preferido	Recomendado	BAIXA	Duro
SUPER LIGAS (Inconel, René, Waspaloy, etc.)	ALTA	Preferido	NÃO	NORMAL P/ ALTA	Muito duro
CROMO (revestimento)	30 – 45	Recomendado*	Preferido	NORMAL	Médio
CERÂMICAS	TODOS	Preferido	NÃO	NORMAL P/ ALTA	Médio, Duro

* O diamante é recomendado para o brunimento em peças revestidas com cromo. Porém, o mais recomendada é o CBN e o Óxido de Alumínio, com preferência para o CBN.

FONTE : *Machining Data Handbook 3ª ed.*

Abaixo estão indicados os principais códigos utilizados para os abrasivos segundo a norma FEPA. [ABNT NBR 6166, 1987; *Machining Data Handbook 3ª ed.*]

A = Óxido de alumínio comum (96 % de pureza);

AA = Óxido de alumínio branco (99,5 % de pureza);

DA = 50 % A + 50 % AA;

C = Carboneto de silício comum;

GC = Carboneto de silício verde;

B = CBN;

D = Diamante.

2.3 - GRANULOMETRIA:

A análise granulométrica é feita de acordo com o ensaio de distribuição dos grãos em malhas específicas [*Metals Handbook 9ª ed., Capítulo 16 – Honing.*]. A tabela 2.3 apresenta a classificação dos grãos abrasivos de acordo com os conceitos de granulometria. Ou seja, os números pequenos indicam grãos grandes e os números maiores indicam grãos menores.

Tabela 2.3 - Classificação da Pedra Abrasiva Segundo a Granulometria

Os Valores Usuais de Granulometria são (Grana)		Granulometria US mesh	Tamanho médio (µm)
8] 10] 12] 14]	70	36	710
	80	46	508
	90	54	430
	100	60	406
	120	(70)	328
	150	80	266
16] 20] 24]	180	(90)	216
	220	100	173
	240	120	142
	280	150	122
	320	180	86
	400	220	66
36] 46] 54] 60]	500	240	63
	600	280	44
	800	320	32
		400	23
		500	16
		600	8

Fonte: *Metals Handbook 9ª ed., Capítulo 16 - Honing*

2.3.1 - POROSIDADE:

A porosidade é a relação entre os espaços vazios e os espaços ocupados pelo abrasivo mais o aglomerante. Dependendo também da mistura de grãos e da pressão de sinterização, ela é classificada por números como segue [*ABNT NBR 11094*]:

De 1 a 4 : estrutura fechada dos grãos;

De 5 a 7 : estrutura média dos grãos;

De 8 a 12 : estrutura aberta dos grãos;

De 13 a 15 : estrutura muito aberta.

A estrutura do abrasivo depende da mistura do grão, do aglomerante, do método empregado na fabricação do abrasivo, da pressão usada para a formação dos abrasivos e das demais características de fabricação.

A relação entre a composição volumétrica entre os grãos, aglomerantes e poros, determina a estrutura da pedra. Isto pode ser visualizado pela equação [*König, 1980*]:

$$V = V_K + V_B + V_P \quad \text{onde:}$$

V_K = Volume dos grãos;

V_B = Volume do aglomerante;

V_P = Volume dos poros.

De tal forma que,

$$100 \% = V_K + V_B + V_P \quad (1)$$

Na figura 2.10 estão mostradas diversas estruturas de pedras abrasivas, para um mesmo tamanho de grão.

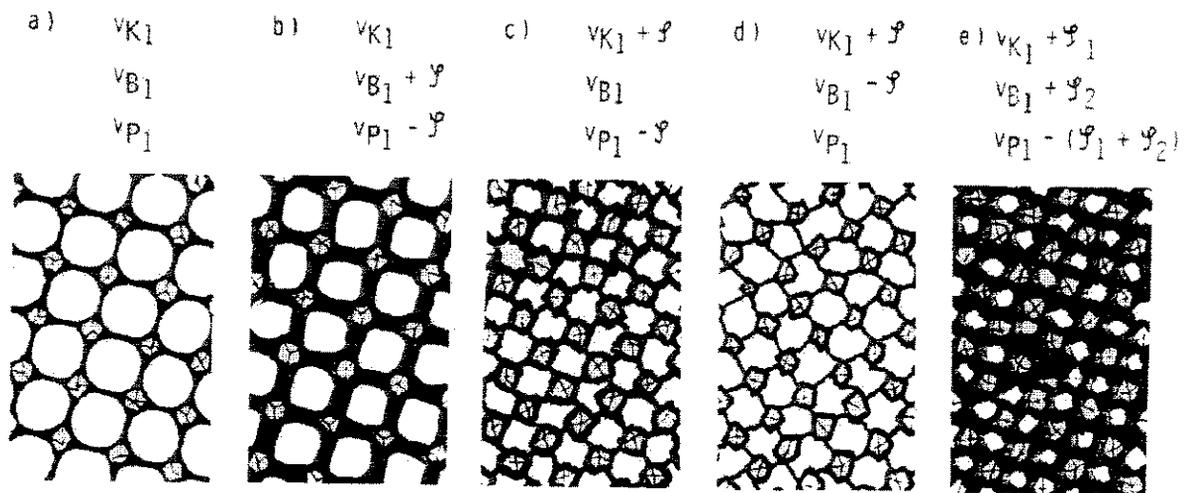


Figura 2.10 – Estrutura de pedras abrasivas tendo-se: a) estrutura equilibrada; b) estrutura com maior volume de pontes e menos de poros (mais dura e menos porosa); c) estrutura com maior volume de grãos e menor de poros (dureza normal menos porosa); d) estrutura com maior volume de grãos e menos pontes (mais mole); e) estrutura com maior volume de grãos, maior de pontes e menor de poros (mais dura, menos porosa).

FONTE : König, 1980

2.3.2 - DUREZA

A dureza corresponde à profundidade de penetração, na pedra abrasiva, de um corpo de prova contundente com uma força pré-determinada, e serve para indicar a resistência que a pedra oferece ao destacamento dos grãos. Portanto, a coesão depende da resistência à tração do ligante e da espessura do ligante entre os grãos e da porosidade. Se a coesão for grande e capaz de segurar os grãos sujeitos às elevadas forças de corte, tem-se uma pedra forte ou dura. Para os casos contrários tem-se uma liga fraca ou mole. [*Brulé, Régis André: 1992*]

A dureza da pedra abrasiva é classificada, conforme segue [*NBR 11094, 1987*]

E - F - G : muito mole

H - I - J - K : mole

L - M - N - O : média

P - Q - R - S : dura

T - U - V : muito dura

2.4 - AGLOMERANTES

Os aglomerantes se dividem em três grupos

Aglomerantes Orgânicos	{	Borrachas vulcanizadas Resinóides Aglomerantes à base de goma laca
Aglomerantes Inorgânicos	{	Cerâmicas ou Vitrificados Aglomerantes à base de silicato Aglomerantes à base de oxiclreto de magnésio
Aglomerantes Metálicos	{	Sinterizados Eletrodepositados

2.4.1.1 - AGLOMERANTES ORGÂNICOS

2.4.1.1.1 - AGLOMERANTES DE BORRACHA VULCANIZADA

São excelentes para dar acabamento superficial e são usados com grãos finos. São empregados em equipamentos como *Cutt-off*, utilizados para o corte de corpos de prova, utilizados em laboratórios de análise microscópica.

2.4.1.1.2 - AGLOMERANTES RESINÓIDES

São aglomerantes sintéticos, de resinas orgânicas, misturadas na forma de pós ou líquidos C com os grãos abrasivos. O aglomerante sintético mais utilizado é a *bakelite*. Se expostos à ação prolongada da água ou soluções aquosas, estes aglomerantes tendem a amolecer. Também são atacados por soluções alcalinas fortes. São aglomerantes de elevada resistência e são excelentes para acabamento superficial, sendo os mais usados dos aglomerantes orgânicos.

2.4.1.1.3 - AGLOMERANTES À BASE DE GOMA LACA

Constituídos predominantemente de goma laca. Costumam ser produzidos com goma laca vulcanizada a partir de 150° C até 200° C. Possuem boa elasticidade. São excelentes para dar acabamento superficial.

2.4.1.2 - AGLOMERANTES INORGÂNICOS

2.4.1.2.1 - AGLOMERANTES CERÂMICOS OU VITRIFICADOS

Constituídos basicamente de pó de argila, feldspato e quartzo. O pó destes três compostos mais os grãos abrasivos, são prensados e depois sinterizados em forno industrial a partir de 1400° C até 1600° C. O aglomerante funde parcialmente, fixando fortemente os grãos abrasivos. Este tipo de pedra cerâmica é porosa e homogênea. Não é atacada pela água e óleos e suporta bem a ação dos fluidos refrigerantes. A baixa elasticidade presente e suas características rígidas, permitem a manutenção dos grãos abrasivos por mais tempo na pedra e, permitem um trabalho de precisão. São os mais usados dentre todos os tipos de aglomerantes.

2.4.1.2.2 - AGLOMERANTES DE SILICATO

Constituídos de pó de argila e silicato de sódio líquido. A sinterização é feita à 200° C. São aglomerantes menos duros que os vitrificados. São menos resistentes à ação da água que os aglomerantes vitrificados e podem sofrer alterações com o tempo. São adequados para acabamentos finos e pouco usados para brunimento.

2.4.1.3 - AGLOMERANTES METÁLICOS

2.4.1.3.1 - AGLOMERANTES DE METAL SINTERIZADO

A pedra é feita com pó de metal, em geral ligas de bronze, sendo os grãos abrasivos misturados e sinterizados na forma desejada. Apresentam elevada condutividade térmica e elétrica o que os tornam adequados para usinagens por eletroerosão “*eletrobrunimento*”. Também facilitam a formação de cavaco durante a usinagem.

A sinterização deixa poucos poros que podem ser preenchidos por aditivos sólidos para melhorar as propriedades das pedras. São muito usados para pedras de Diamante e CBN.

2.4.1.3.2 - AGLOMERANTES DE METAL ELETRODEPOSITADO

Os grãos abrasivos são depositados em uma única camada sobre uma base metálica e são fixos por um aglomerante metálico depositado eletromagneticamente, geralmente o níquel. São muito usados em cabeçotes brunidores de passe único com Diamante ou CBN.

Mesmo para os aglomerantes metálicos uma regra muito importante deve ser seguida :

Para usinagem de materiais duros : a matriz deve ser mole, uma vez que os grãos quebram mais rapidamente e necessitam de maior velocidade de troca.

Para usinagem de materiais moles : a matriz deve ser mais dura para evitar a penetração excessiva dos grãos na peça que está sendo usinada com um consequente aumento indesejável das forças de corte atuantes nos grãos abrasivos.

Para a saída do cavaco, a matriz metálica possibilita aos cavacos criarem caminhos entre os grãos. Como a matriz quase não é porosa, as forças de fixação dos grãos são muito grandes, mesmo com os sulcos feitos pelos cavacos. Assim, a pedra tem vida longa. Pelo fato que os metais são ótimos condutores térmicos, tampouco ocorrem aquecimentos notáveis durante a usinagem.

Os aglomerantes utilizados em pedras abrasivas são classificados como [*NBR 11094, 1987*] :

- R - Aglomerante com base de **borracha**;
- B - Aglomerante com base de **resina sintética**;
- E - Aglomerante com base de **goma laca**;
- V - Aglomerante com base de **material vitrificável**;
- S - Aglomerante com base de **silicato**;
- O - Aglomerante com base de **oxi-cloreto**;
- M - Aglomerante com base de **metal**;

2.5 - AGRESSIVIDADE DE UMA PEDRA ABRASIVA

O desgaste da pedra abrasiva é influenciado pela sua "*agressividade*". Uma pedra muito agressiva fará com que se remova mais material desgastando mais a peça e consequentemente a pedra abrasiva. Geralmente as pedras abrasivas mais agressivas são recomendadas para o desbaste de partes mais grosseiras.

A tabela 2.3 apresenta a aplicação das pedras, em função da sua granulometria.

Tabela 2.4 - Granulometria da pedra e aplicação

GRANULOMETRIA (US MESH)	ACABAMENTO
45, 54, 60, 70, 80, 90, 100	Desbaste
100 a 170	Para Acabamento Superficial Normal
170 a 270	Para Acabamento Superficiais Finos
270, 280* a 400	Para Acabamento Superficiais Extra-Finos
500 e 600	Para Lapidação e Polimento

FONTE Régis A. Brülé, Dissertação de mestrado

* Esta é a granulometria da pedra abrasiva usada para a realização deste trabalho

Os grãos abrasivos mais grossos removem mais rapidamente o material, possibilitando uma rápida e boa correção dos desvios de forma, especialmente o desvio de circularidade e, conseqüentemente, o de cilindricidade. Geralmente, o desbaste é feito com pedras de granulometria grossa, fazendo com que seja atingida a precisão geométrica necessária e a precisão dimensional seja levemente aquém da necessária com uma rugosidade relativamente alta.

Após a operação de desbaste, usa-se uma pedra de granulometria mais fina, para acabamento, conferindo o acabamento final dos erros geométricos, atingindo as dimensões requeridas pelo projeto reduzindo a rugosidade.

Uma pedra abrasiva de baixa dureza apresenta uma alta “agressividade” e tem um processo de auto-afiação que ocorre por destacamento dos grãos, cujas arestas de corte tenham atingido um grau mediano de cegamento.

As pedras abrasivas de dureza média apresentam uma tendência ao “cegamento” dos grãos abrasivos maior que as pedras de baixa dureza apresentando, uma auto-afiação por fragmentação ou destacamento dos grãos. Elas são usadas para desbaste e semi-acabamento.

Nas pedras duras, a “agressividade” é baixa, com um predomínio de grãos abrasivos “cegos”, com um pequeno volume de cavaco removido por hora. Estes tipos de pedra abrasiva podem sofrer “entupimento” dos poros, sendo empregadas normalmente no acabamento.

Portanto, a “agressividade” de uma pedra abrasiva está relacionada diretamente com a dureza da pedra, o tipo de aglomerante, a porosidade, a aditivção, a solubilidade, entre outros.

2.5.1 - FATORES DE INFLUÊNCIA NA AGRESSIVIDADE DE UMA PEDRA ABRASIVA

Os fatores que podem influenciar na “agressividade” e, conseqüentemente no desgaste da pedra abrasiva são [Brülé, 1992] :

- A - A aglomeração ou porosidade;
- B - A concentração;
- C - A solubilidade;
- D - A aditivação;
- E - A dureza;
- F - A granulometria;
- G - A temperatura.

A porosidade auxilia no processo de formação do cavaco facilitando-o. Aumenta o fluxo de óleo na superfície de contato entre a peça e a pedra, eliminando o cavaco por arraste aumentando a refrigeração durante a usinagem, aumentando a agressividade.

A concentração nos abrasivos e superabrasivos é a porcentagem de grãos por polegada quadrada, na matriz. Baixas concentrações desgastam a pedra rapidamente e de forma irregular, melhorando a agressividade. Já as altas concentrações podem gerar atritos adicionais, causando aglutinação dos metais e conseqüentemente o “entupimento”.

A solubilidade é a capacidade da pedra abrasiva em associar-se quimicamente com a peça-obra. O carboneto de silício e o carboneto de boro apresentam tendência ao “cegamento”, quando usinam peças com baixo teor de carbono. O óxido de alumínio possui solubilidade com os vidros e cristais, cegando e vidrando mais rapidamente.

A solubilidade aumenta com as altas pressões e/ou altas temperaturas. Como as mais elevadas temperaturas e as maiores pressões ocorrem nas pontas das arestas de corte, é nelas que ocorre a solubilização do abrasivo, causando, com isto, o arredondamento da aresta de corte, isto é, o “cegamento” dos grãos abrasivos com conseqüências prejudiciais ao processo de usinagem. Portanto, quanto maior a solubilidade, menor a “agressividade”.

A aditivação : de uma pedra abrasiva tem por objetivo aumentar sua agressividade. Auxilia na diminuição do desgaste da pedra, apesar de aumentar a agressividade pois, aumenta o número de grãos atuantes permitindo gerar superfícies menos rugosas.

Entre os muitos fatores que podem afetar o desgaste de uma pedra abrasiva, não se pode desconsiderar a temperatura. O aumento da temperatura de corte pode ser causado pelo aumento da temperatura da peça, do cavaco e da pedra abrasiva e que pode ocorrer de forma irregular.

Enquanto que a pedra estará em uma temperatura “Tpedra”, o cavaco removido poderá estar em outra temperatura “Tcavaco”. Assim, a peça poderá apresentar duas possíveis faixas

de temperatura : uma na parte da peça que está em contato com a pedra e a outra, na parte da peça que não está em contato com a pedra abrasiva. Esta segunda, estará em uma temperatura um pouco menor que a primeira e, ao entrar em contato com a pedra abrasiva irá se aquecer e, após, irá se resfriar.

A variação da temperatura irá depender da velocidade. Quanto maior a velocidade de corte, menor será o tempo de troca térmica, maior será o desgaste da pedra, menor a vida útil. E quanto menor a velocidade de corte, maior será o tempo de troca térmica e menor será o desgaste da pedra abrasiva. Assim, o aumento da velocidade de corte, aumenta a rugosidade da pedra.

Uma variação irregular na temperatura pode afetar os erros dimensionais por variação de dilatação. Por outro lado, uma temperatura excessiva irá causar distorções por superaquecimento causando erros dimensionais por dilatação.

Para que haja uma efetiva redução do calor gerado na interface peça pedra, é necessário que haja um filme constante e ininterrupto de óleo que, além de, resfriar a interface peça pedra, penetra na pedra, limpando os poros e evitando o entupimento.

2.6 - MATERIAIS QUE PODEM SER BRUNIDOS

Qualquer material metálico pode ser brunido, ou seja, o ferro fundido, os aços carbono e suas ligas, bronze, latão, alumínio, cromo, prata, magnésio, e outras ligas, assim como os materiais não metálicos como: vidro, cerâmica, plástico. [*Tool and Manufacturing Engineers Handbook, 4ª ed. V. III*]

2.7 - APLICAÇÃO DOS ABRASIVOS

Na seleção de um abrasivo para ser usado em uma determinada peça, recomenda-se [*Machining Data Handbook 3ª ed.*]:

1 - Usar carboneto de silício para o ferro fundido e metais não ferrosos e óxido de alumínio para o aço. Para metais não-ferrosos deve-se usar pedras abrasivas com aglomerante resinóide. As pedras de diamante são geralmente usadas em peças de cromo, carbonetos, ferro fundido, latão, bronze e superfícies nitretadas, usadas também em furos cegos, cortes inter-

rompidos e intermitentes e na produção em série para a indústria automobilística. O CBN é usado para todos os tipos de aços (duros ou moles), níquel e as superfícies à base de cobalto, aço inoxidável e uma variedade de outros metais incluindo as ligas de cobre, berílio e zircônio [*Machining Data Handbook 3ª ed., Tool and Manufacturing Engineers Handbook, 4ª ed. V. III*].

2 - Em materiais duros, usar um grão frágil e um correspondente aglomerante macio e poroso. Se a peça é rugosa, e interrompida por orifícios e cortes, ou mesmo se estiver muito ovalizada, deve-se usar um grão e um aglomerante duros para suportar as severas condições existentes.

2.8 - PRESSÃO DE BRUNIMENTO

A pressão aplicada a um abrasivo para fazê-lo penetrar e cortar é variável e difícil de computar. A dureza do material, as características do furo, o tipo e a dureza da pedra abrasiva usada e os demais fatores afetam a pressão requerida na ferramenta. Em ferramentas expandidas hidráulicamente, a pressão hidráulica nas linhas pode variar de 100 a 300 N/cm². As recomendações da máquina e dos fabricantes devem ser observadas. [*Brulé, 1989*]

A expansão do diâmetro da ferramenta, e conseqüentemente a pressão que a pedra exerce na parede do furo pode ser feita de duas maneiras, acionamento mecânico ou acionamento hidráulico [*König, 1980; Klink, 1983*], figura 2.11. No primeiro caso, pode-se ter equipamento apresentando ou o valor da expansão radial, na unidade de tempo, ou números indicativos, correspondentes à estes valores. Neste caso, o dos números indicativos, a determinação do valor da força aplicada à pedra ou o valor da expansão radial, e conseqüentemente o valor da pressão de contato não é possível [*Klink, 1983; Juchen, 1980*]. No caso do equipamento ser acionado hidráulicamente, é possível a determinação desta grandeza, da maneira descrita abaixo :

$$F_F = KF * p_{\text{óleo}} \text{ [N]}$$

$$F_C = \frac{F_F}{\text{tg}\alpha_1}$$

$$P_C = \frac{KF * p_{\text{óleo}}}{A_p * \text{tg}\alpha_1} \quad \text{[N/mm}^2\text{]}$$

A_p = superfície da pedra em contato com o furo

α_1 = ângulo de expansão dos cones na pedra

F_F = Força axial

F_C = Força de corte

P_C = Pressão de contato

KF = Área do pistão

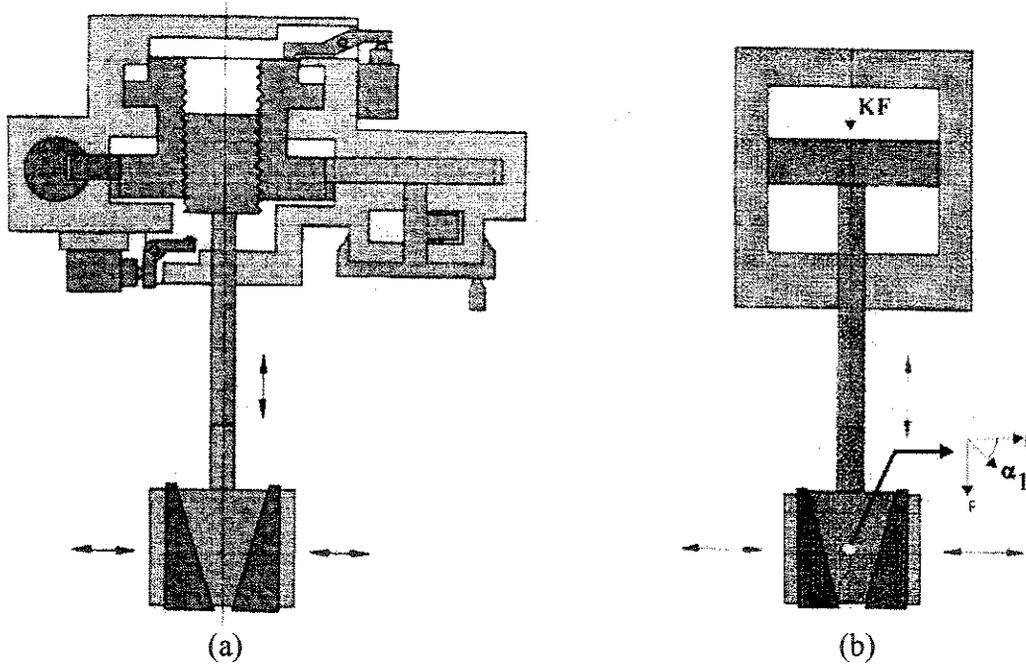


Figura 2.11 – Tipos de acionamento do cabeçote brunidor : a) acionamento mecânico; b) acionamento hidráulico

FONTE : Klink, 1983

2.9 - FERRAMENTAS

As ferramentas de brunir são dependentes do tipo de cabeçote bem como das medidas e da montagem das mesmas. Exceto em ferramentas do tipo eixo, mais simples, que são totalmente galvanizadas e que são utilizadas para furos pequenos entre 0,8 e 10 mm, as demais apresentam uma grande variedade de construções especiais. Ferramentas com apenas uma pedra, figuras 2.12 e 2.13a, são recomendadas para brunir furos longos com pequeno diâmetro. Os apoios assimétricos são características destas ferramentas, permitindo obter uma melhor circularidade e paralelismo, mesmo para furos fortemente interrompidos. Os apoios de-

vem ser tratados contra o desgaste [*Machining Data Handbook 3ª ed., Metals Handbook, 9ª ed. V. 16; Tool Manufacturing Engineers Handbook 4ª ed. V. III : Juchen, 1987*].

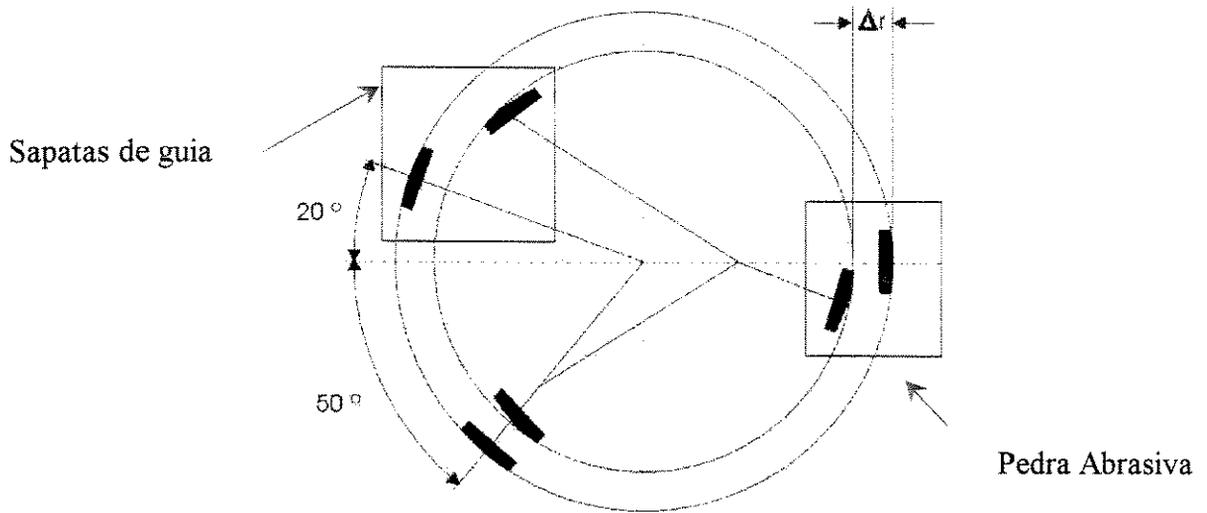


Figura 2.12 - Ferramenta de uma pedra para brunir furos longos com pequeno diâmetro

Fonte : *Machining Data Handbook 3ª ed.*

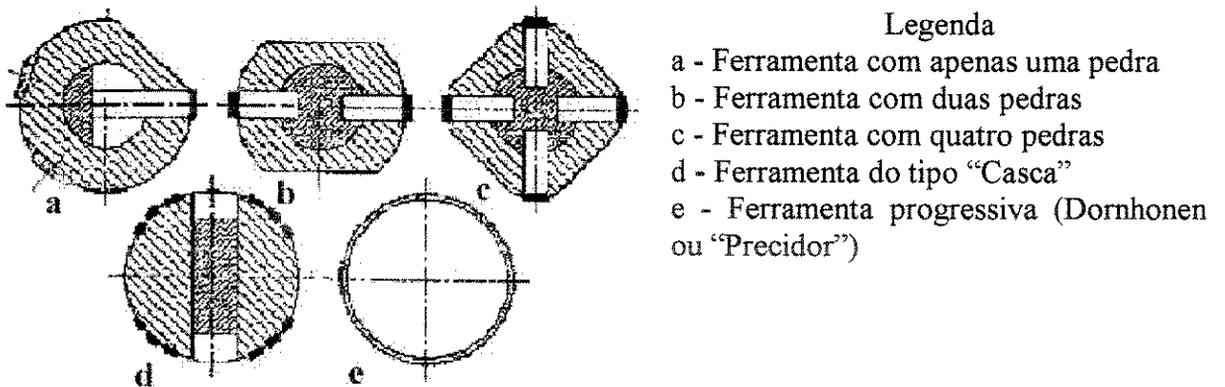


Figura 2.13 - Ferramenta de uma pedra para brunir furos longos com pequeno diâmetro

Fonte : *Juchen, 1987*

Embora a maioria das ferramentas possa ser utilizada em ambas as direções de rotação, aquelas que possuem apenas uma pedra, só podem girar na direção prevista na construção da mesma. Elas girarão concêntricas apenas quando a medida final da peça é alcançada, figura 2.12.

Ferramentas com duas pedras, figura 2.13b, tem a vantagem de sempre girar concentricamente. São rígidas e tem condições de retirar uma elevada taxa de remoção em relação à ferramenta de pedra única. A cilindricidade não é tão boa como no caso anterior, assim, tais ferramentas são empregadas normalmente em operações de brunimento em desbaste, onde o objetivo é retirar uma elevada taxa de remoção de material [*Metals Handbook, 9ª ed. V. 16*].

As ferramentas com quatro pedras, figura 2.13c, facilitam, da mesma forma, a obtenção de elevadas taxas de remoção de material, todavia são mais caras e menos rígidas do que as com duas pedras e não são recomendadas para usinar furos fortemente interrompidos.

Em peças, onde possam ocorrer o perigo de formação de marcas de vibração e ondulações, se empregam ferramentas do tipo “de casca”. Estas ferramentas possibilitam um extraordinário contato entre a superfície da ferramenta e a peça. Ferramentas de brunir deste tipo compõem-se normalmente de duas cascas semi circulares, figura 2.13d, que podem ser trabalhadas através da expansão. Estas cascas podem ser totalmente revestidas ou serem compostas de finas camadas protetoras. Elas são especialmente indicadas para brunimento de superfícies cilíndricas, em motores de dois tempos. [*Juchen, 1987*]

Um novo tipo desenvolvido de ferramenta são as chamadas ferramentas progressivas (“Dornhonen”), figura 2.13e. Com estas, a taxa de remoção total e a rugosidade final são obtidas em apenas um curso. A velocidade do curso (v_f) fica entre 0,5 e 5 m/min (sendo ideal entre 1 e 2 m/min), onde a velocidade de corte deve ficar em torno de 20 m/min, o que produz um ângulo de cruzamento entre 6 e 12° com as velocidades de avanço ideais [*Juchen, 1987*]. As ferramentas progressivas apresentam uma guia concêntrica, uma zona levemente cônica no meio, que realmente usina, e uma zona cilíndrica de calibramento, que determina a precisão de medida, bem como a rugosidade. Os grãos de diamante e CBN são, em toda a periferia, ligados galvanicamente, algumas vezes interrompidamente ou em forma de grandes placas em número elevado, ajustados na periferia. [*Juchen, 1987*]

2.9.1 - FERRAMENTAS PARA BRUNIMENTO MANUAL

As unidades de brunimento manual consistem de um mandril, rolo brunidor (bastão ou pedra de brunir), de um calço e um adaptador (figura 2.14). A função do mandril é fixar (segurar), guiar a pedra, localizar a unidade de brunimento no cilindro e servir de guia para a realização da operação de brunimento. O mandril é composto de duas sapatas que localizam o cilindro e pressionam contra o rolo. Portanto existem três pontos de contato na parede do cilindro [*Metals Handbook, 9ª ed. V. 16, Tool and Manufacturing Engineers Handbook, 4ª ed. Cap. 16*].

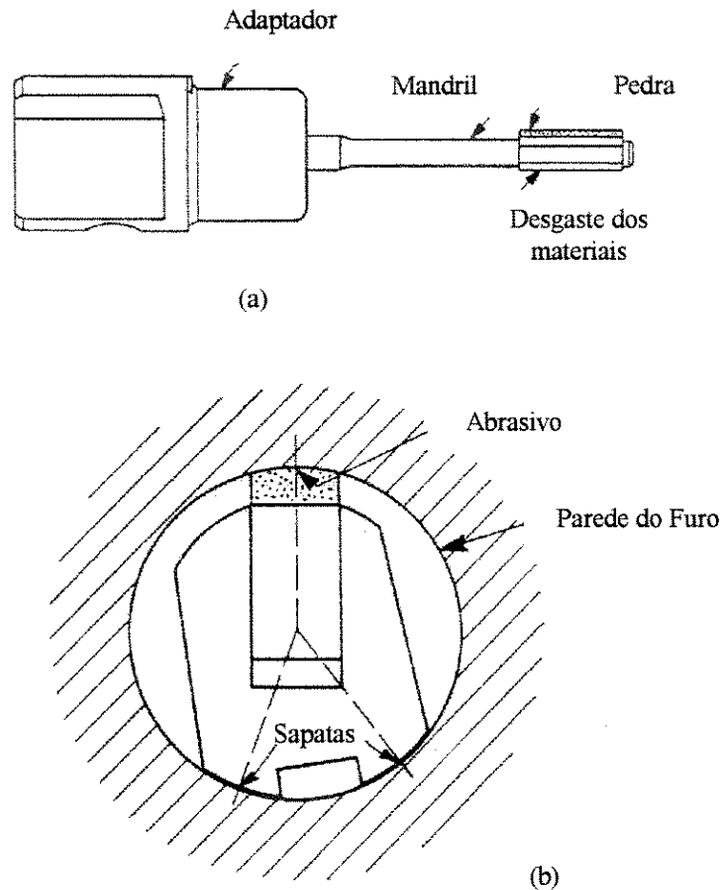


Figura 2.14 - (a) Ferramenta para corte manual, (b) Corte com a ferramenta

Fonte : *Tool and Manufacturing Engineers Handbook, 4ª ed. Cap. 16*

O brunimento, neste caso, tem suas limitações devido à máquina na qual a ferramenta está sendo montada.

As peças abrasivas brunem o material da parede do cilindro e avançam através da cunha localizada no fundo do mandril, conectando um sensor para o controle do avanço micrométrico ao rolo (à peça). O adaptador é usado para possibilitar a conexão de mandris menores ao nariz do fuso.

2.9.2 - FERRAMENTAS COM FIXAÇÃO PARA SUPERFÍCIES INTERNAS

Estas ferramentas possuem três ou mais suportes igualmente espaçados. Os suportes são expandidos radial e igualmente a partir do centro da ferramenta garantindo igual pressão em todos os lados do cilindro e mantendo a ferramenta na linha de centro (figura 2.15).

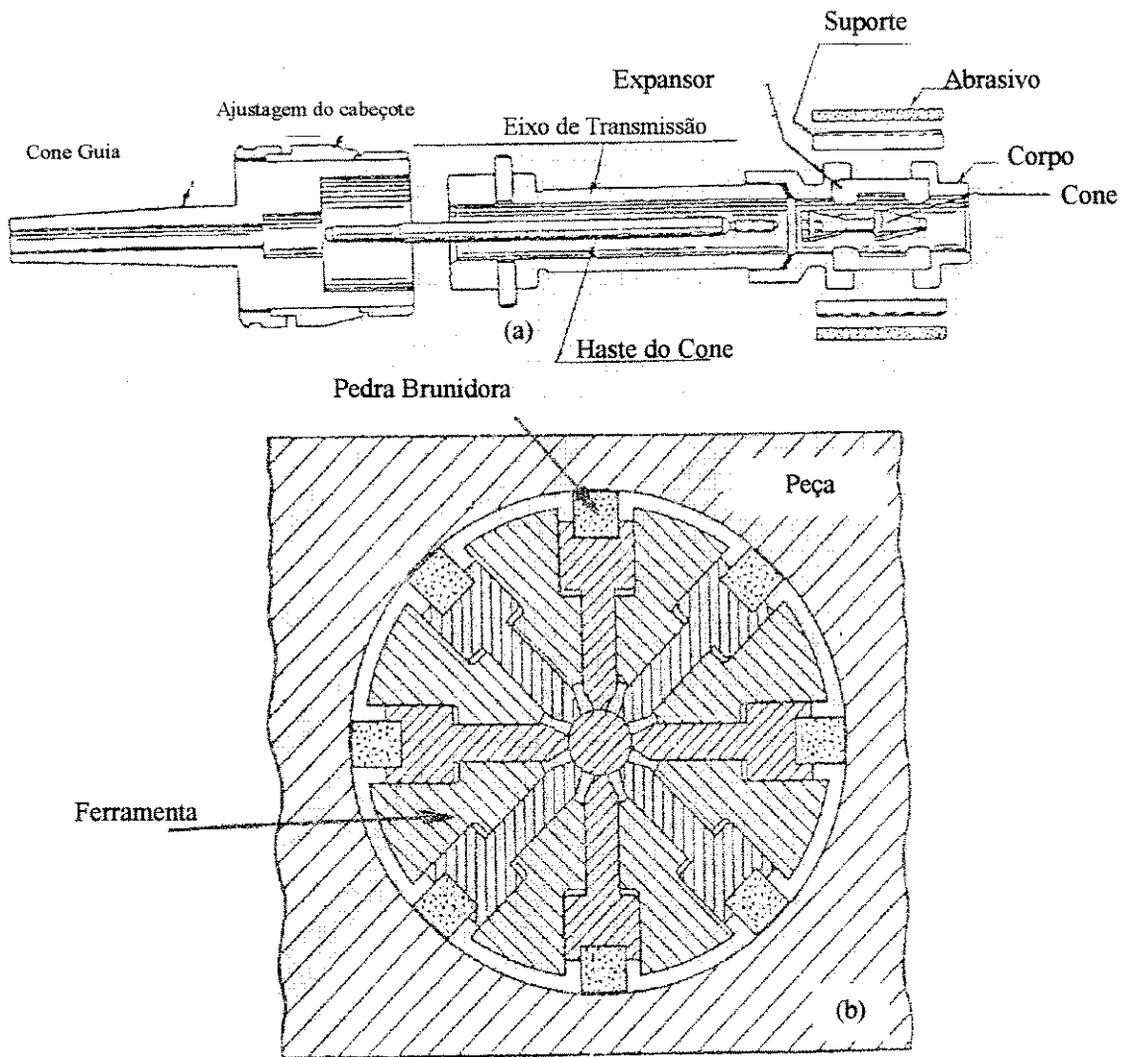


Figura 2.15 - (a) Sistema de expansão da ferramenta, (b) corte com a ferramenta

Fonte : *Tool and Manufacturing Engineers Handbook*, 4ª ed. Cap. 16

As ferramentas com juntas universais (figura 2.16) tem geralmente duas juntas universais e são usadas com fixações rígidas.

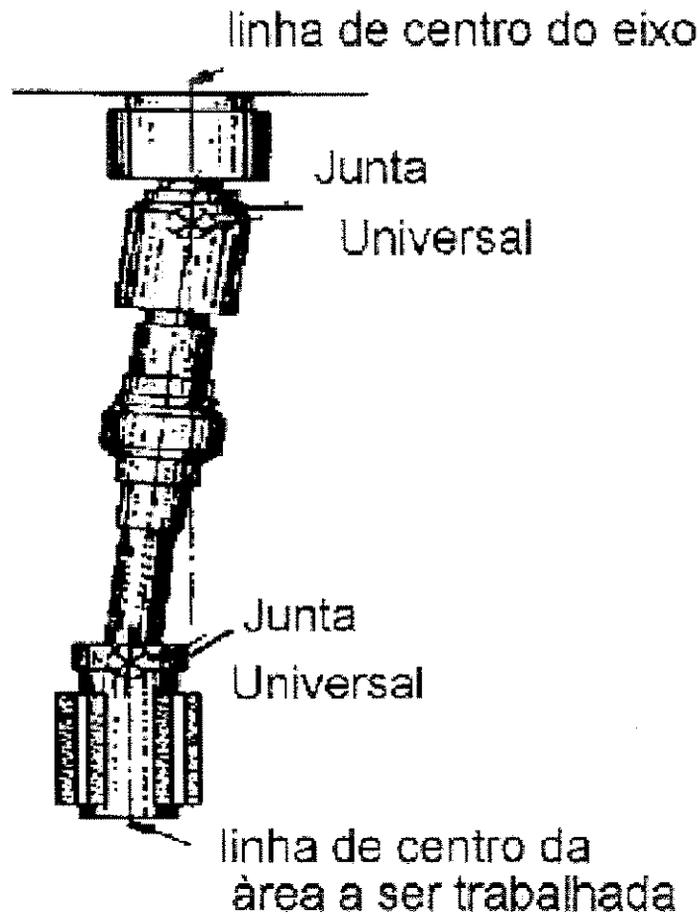


Figura 2.16 - Ferramenta com junta universal

Fonte : Tool and Manufacturing Engineers Handbook, 4ª ed. Cap. 16

As ferramentas rígidas não tem juntas universais. Elas são geralmente usadas com guias rígidas ou adaptadores, entretanto, em alguns casos especiais elas podem ser usadas com adaptadores esféricos ou laterais flutuantes. Ferramentas rígidas são usadas com fixações rígidas. São utilizados três métodos para aplicar a pressão no cone para expandir as ferramentas: manual, elétrico, hidráulico.

2.9.3 - FIXAÇÕES PARA BRUNIMENTO

Para o brunimento manual não é usada fixação. A peça é segurada pelo operador. O mandril gira e o operador segura a peça em sua mão e translada-a ao longo do mandril. Este equipamento é barato e opera satisfatoriamente em peças pequenas, requerendo relativamente pequena remoção de material e é de um formato que pode ser manipulado pelo operador.

Para o brunimento seriado, a peça é fixada de modo a tornar possível a rápida remoção de grandes quantidades de material, e assegura que a precisão seja mantida de peça para peça. No brunimento de peças grandes, geralmente as peças são fixadas entre centros, e giradas e transladadas através de uma ferramenta estacionária flutuante.

2.9.4 - PRINCÍPIOS GERAIS DE FIXAÇÃO

São listados abaixo alguns dos princípios básicos; necessários para uma boa fixação da peça [*Metals Handbook, 9ª ed. V. 16*], quais sejam :

A peça deve ser presa de modo que não haja deformação ou movimento pela translação e rotação da ferramenta . Todos os grampos de fixação devem ser diretamente opostos. Em fixações de peças grandes, tais como, camisas de cilindros, devem ser tomadas todas as providências para que a peça possa fazer uma troca de calor mais efetiva com o meio ambiente tanto no sentido longitudinal como no radial;

A fixação deve prever a possibilidade de localizar a peça com precisão;

Nas fixações do tipo rígidas, uma guia é requerida para conduzir a ferramenta para dentro do cilindro;

Devem ser previstas as condições de carga e descarga e inspeção da peça sem interferência no processo;

A ferramenta deve ultrapassar as extremidades do cilindro em aproximadamente 1/3 do comprimento das pedras abrasivas. A extremidade da fixação deve ser aberta para permitir saída das pedras e livre fluxo do óleo refrigerante.

2.10 - CONTROLE DIMENSIONAL:

Tem-se dois tipos de medição:

- a - Manual: realizada diretamente pelo operador, com o uso de equipamento de controle de medida adequado;
- b - Automática: realizada da seguinte maneira:

- 1 - Para-se a expansão da ferramenta após o término ou durante a operação de usinagem;
- 2 - Recolhe-se a ferramenta;
- 3 - Realiza-se a leitura manualmente ou através de dispositivos especiais de medição tais como a leitora a laser.

Tem-se dois tipos de controle de medida para garantir a dimensão do furo da peça a ser medida

a) Controle por medição da ferramenta: este método implica em uma ferramenta tendo pedras abrasivas com abas de plástico em cada extremidade e um anel-padrão. As abas se desgastam junto com o abrasivo de modo que seu diâmetro externo é sempre exatamente igual ao diâmetro do furo, sendo que o anel-padrão é posicionado diretamente acima da peça de trabalho de modo que as abas de plástico entram no anel no topo de cada batida, ou seja, sempre que ocorrer a translação.

b) Controle por medição do cilindro: Divide-se em três métodos:

1 - Bucha de dimensionamento: é um método para o controle automático da dimensão de um sensor do tipo bucha. O sensor está fixado no fim do furo e posicionado para entrar no furo a cada passada durante o ciclo de brunimento. Assim que a dimensão desejada for obtida, o sensor interrompe automaticamente o ciclo.

2 - Dimensionamento por dois pontos: Outro método de controle automático por bucha é aquele que usa dois pontos (figura 2.17). A bucha calibradora faz parte da ferramenta de brunir, movimentando-se livremente em torno da ferramenta e do eixo-árvore, verificando o interior da peça a cada curso.

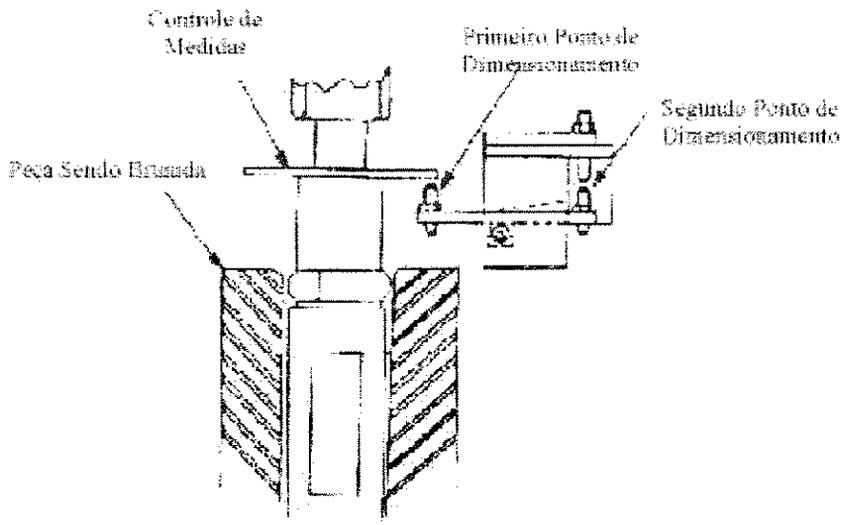


Figura 2.17 - Dimensionamento por dois pontos

Fonte : *Tool and Manufacturing Engineers Handbook, 4ª ed. Cap. 16*

3 - Barras de medidas flutuando no corpo da ferramenta (figura 2.18): As barras de medidas são diagonalmente opostas, contendo contatos elétricos. Uma mola mantém o anel forçado contra o cilindro. Os contatos no anel são ajustados para se fecharem quando as distâncias entre as faces das barras de medida forem iguais ao diâmetro do furo. Este padrão é adaptável a furos de grandes diâmetros.

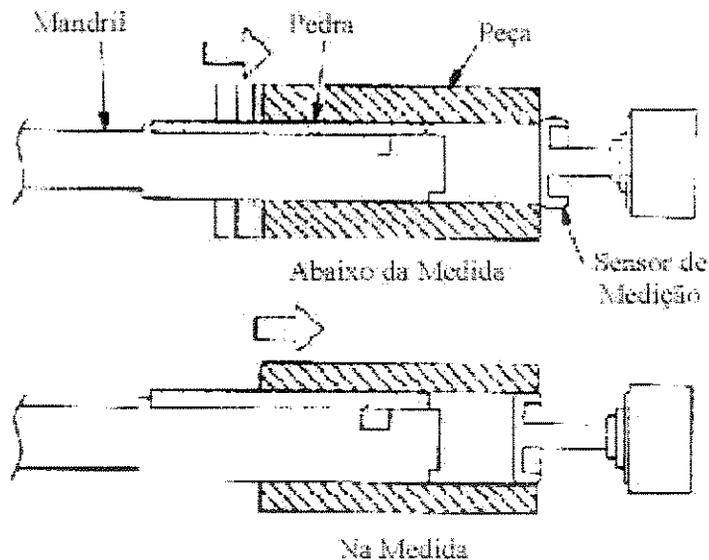


Figura 2.18 - Tem-se barras de medidas flutuando no corpo da ferramenta

Fonte : *Tool and Manufacturing Engineers Handbook, 4ª ed. Cap. 16*

4 - Controle de medida por ar (figura 2.19): uma bucha contendo orifícios de ar acompanha a ferramenta. Quando o furo aproxima-se do diâmetro acabado, a bucha entra no furo e aciona um contato elétrico que interrompe o sistema pneumático.

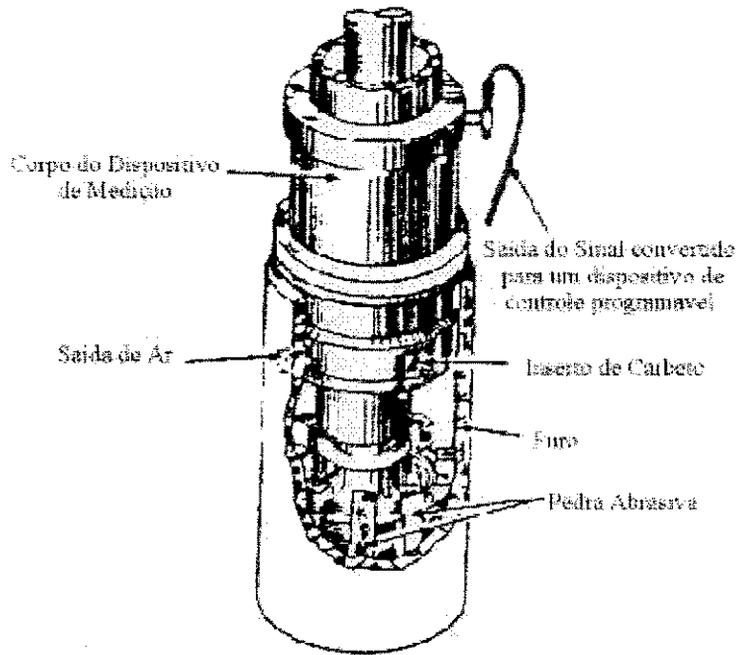


Figura 2.19 - Controle de medida por ar

Fonte : *Tool and Manufacturing Engineers Handbook, 4ª ed. Cap. 16*

2.10.1 - DISTORÇÃO DO MATERIAL

No brunimento do ferro fundido, as ferramentas de diamante promovem a maior taxa de remoção de material. A grande variedade dos ferros fundidos é um grande fator potencial para a utilização de grãos abrasivos mais duros. Na usinagem de certos tipos de ferro fundido, são, todavia, pressionadas as lamelas de grafita existentes, provocando falhas nas peças. Esta ocorrência denomina-se distorção do material. Em camisas de pistões, por exemplo, utilizadas em motores, tais distorções fazem com que haja um consumo elevado de óleo. Uma vez que o óleo não utilizado pode ser evadido pelas estrias. Para motores de caminhões, com elevada potência, tal fato é inaceitável. Por isto, a formação da distorção do material deve ser controlada. Atualmente há pesquisas destas inter-relações, com o objetivo de desenvolver ferramentas de brunir que possam ter uma elevada performance e uma boa vida com uma pequena formação da distorção do material. [*Juchen, 1987*]

A porcentagem de lamelas de grafite cortadas linearmente chega a ser da ordem de 25 à 50%, quando se emprega ferramenta de SiC. Quando se utiliza ferramenta de diamante, este número cai para 15 à 25%. Uma comparação da vida da ferramenta, na usinagem de ferro fundido nodular, apresenta os seguintes resultados :

Diamante sintético	10.000 à 20.000 furos
CBN,	1.000 à 2.000 furos
SiC	200 à 300 furos

A figura 2.20 mostra as superfícies de ferro fundido brunidos, utilizando-se estas ferramentas. [*Juchen, 1987*]

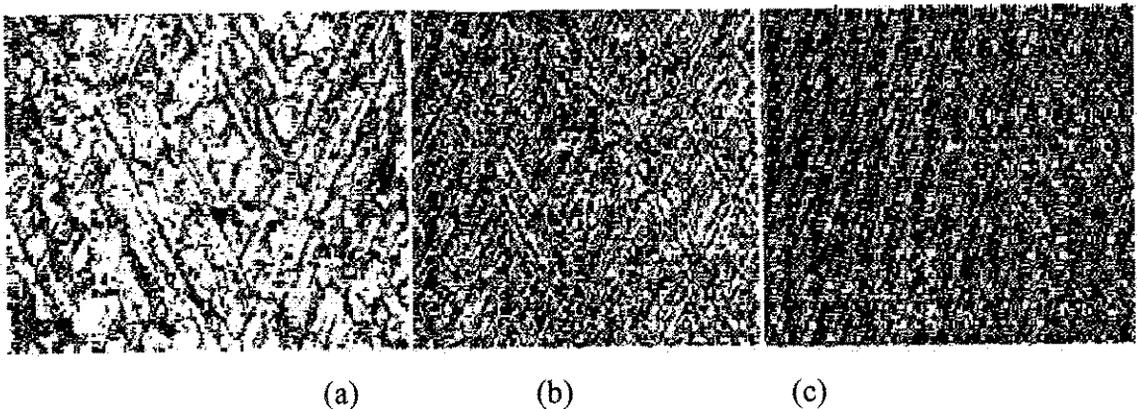


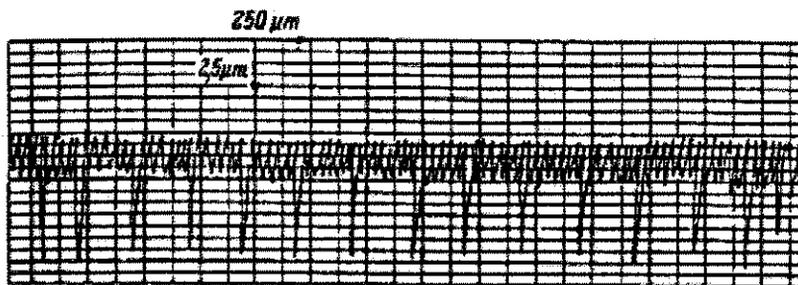
Figura 2.20 - Traçado característico da operação de brunimento, utilizando-se, (a) Diamante, (b) Carboneto de Silício, (c) CBN

Fonte : *Juchen, 1987*

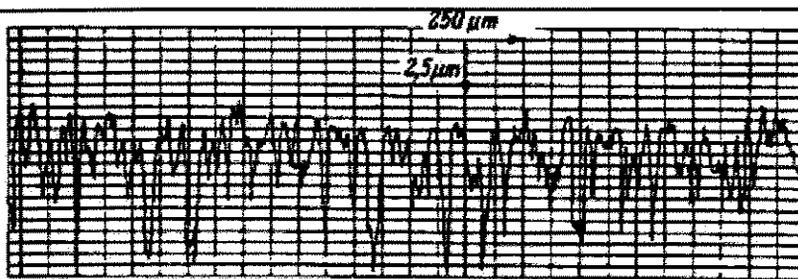
2.11 - BRUNIMENTO EM “PLATEAU”

Motores de elevada potência, especialmente motores diesel, são normalmente brunidos de maneira “plateau”. Esta técnica compreende duas operações, para obtenção de uma superfície cilíndrica com bolsas de retenção de óleo, figura 2.21. No pré-brunimento, com abrasivos com grãos mais grossos, são retirados até 0,06 mm de sobrematerial em cerca de 30 seg., enquanto que no brunimento em acabamento, com grãos mais finos, são retirados de 0,005 à 0,01 mm de sobrematerial em poucos segundos, onde somente os picos de rugosidade da superfície são alisados. No pré-brunimento, as pedras de diamante apresentam os melhores re-

sultados, uma vez que, como desejado, é obtido um grande número de estrias profundas e regulares. Também na usinagem em acabamento, as pedras de diamante apresentam vantagens, porque com elas se consegue obter uma boa circularidade. A distorção de material pode ser limitada, se a direção do movimento circular no brunimento, em acabamento, for invertido. Emprega-se, no entanto, com maior intensidade, as pedras de brunir de SiC na operação de acabamento, porque em comparação com grãos abrasivos mais duros, o custo por furo, é menor. [König, 1980, Haasis, 1972]



Brunimento Plateau com Rugosidade $R_{m\acute{a}x}$ 1,5 – 2 μm



Brunimento Convencional com Rugosidade $R_{m\acute{a}x}$ 5 μm

Profundidade [μm]	Fração de contato φ [%]	
	Normal	Plateau
0,25	10	40
0,37	13	52
0,50	16	64
0,62	18	68
0,75	20	75
1,00	26	78
1,25	31	81

Figura 2.21 - Perfil de rugosidade, no brunimento tipo "plateau"

Fonte : König, 1980, Haasis, 1972

2.12 - BRUNIMENTO COM FERRAMENTAS EXPANSIVAS "DORNHONEN"

O brunimento em espiga permite uma elevada racionalização e um bom acabamento superficial, para furos profundos e de pequenas dimensões, principalmente quando estes são interrompidos. Os componentes indicados para se utilizar com este processo, são, por exem-

plo, carcaças para comandos hidráulicos. A figura 2.22 contém informações de um processo, feito em três estações. Para a obtenção da precisão necessária, a máquina tem que ser constituída por um sistema integrado de medição e controle. Como meio lubrificante utiliza-se um óleo especial para brunimento. As ferramentas de brunir são compostas de regiões independentes, compreendidas por zonas de corte e de guia. Podem ser alcançadas precisões dimensionais de 0,001 à 0,002 mm, para um sobrematerial de 0,02 à 0,04 mm. As operações anteriores ao brunimento em espiga são normalmente feitas com brunidores normais, principalmente quando se trata de máquinas multi fusos. [Haasis, 1987]

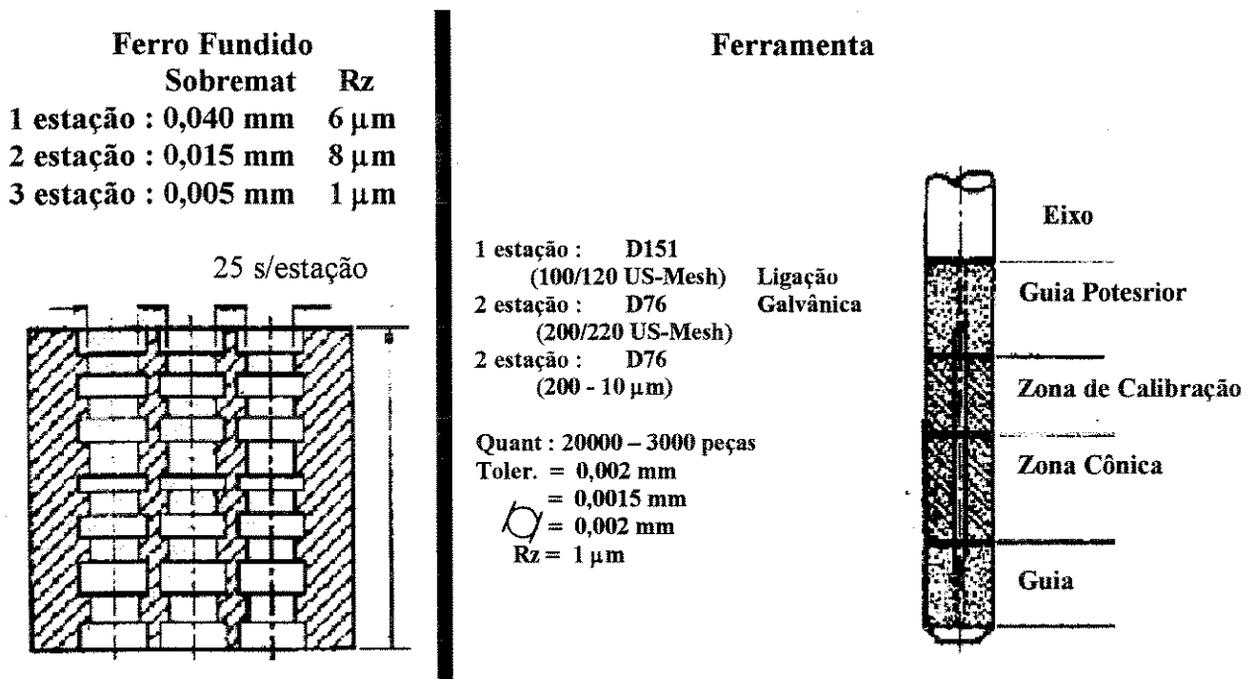


Figura 2.22 – Brunimento utilizando-se ferramentas do tipo espiga (“Dornhonen”)

Fonte : Juchen, 1987

2.13 - PARÂMETROS DO PROCESSO

A melhora da qualidade superficial é influenciada, em parte, pelo estado inicial da peça-obra, sendo que, as características e as propriedades do material da peça, bem como os resultados da usinagem anterior tem uma grande influência no resultado final.

A dureza da peça pode influenciar na qualidade superficial da mesma. Quanto mais dura a peça, mais difícil torna-se o processo de remoção do cavaco, piorando a qualidade superficial da peça. Assim, a escolha da ferramenta que irá usinar esta peça requer cuidados especiais

pois, uma ferramenta inadequada irá desgastar-se muito, sem que haja uma efetiva melhoria dos desvios de forma e da qualidade superficial.

Conforme os estudos realizados por Tönshoff, as dimensões da pedra abrasiva, especialmente o comprimento e a largura, tem influência sobre os desvios de cilindricidade (consequentemente sobre o desvio de retitude) e sobre o desvio de circularidade, respectivamente. [König, 1980]

O comprimento da pedra abrasiva tem uma elevada importância. Uma pedra de brunir muito curta pode vir a acompanhar o contorno do erro de forma e, em decorrência, disto o erro pode não ser corrigido (eliminado). Uma pedra longa, por outro lado, irá se apoiar em duas ondulações consecutivas melhorando a cilindricidade (figura 2.23).

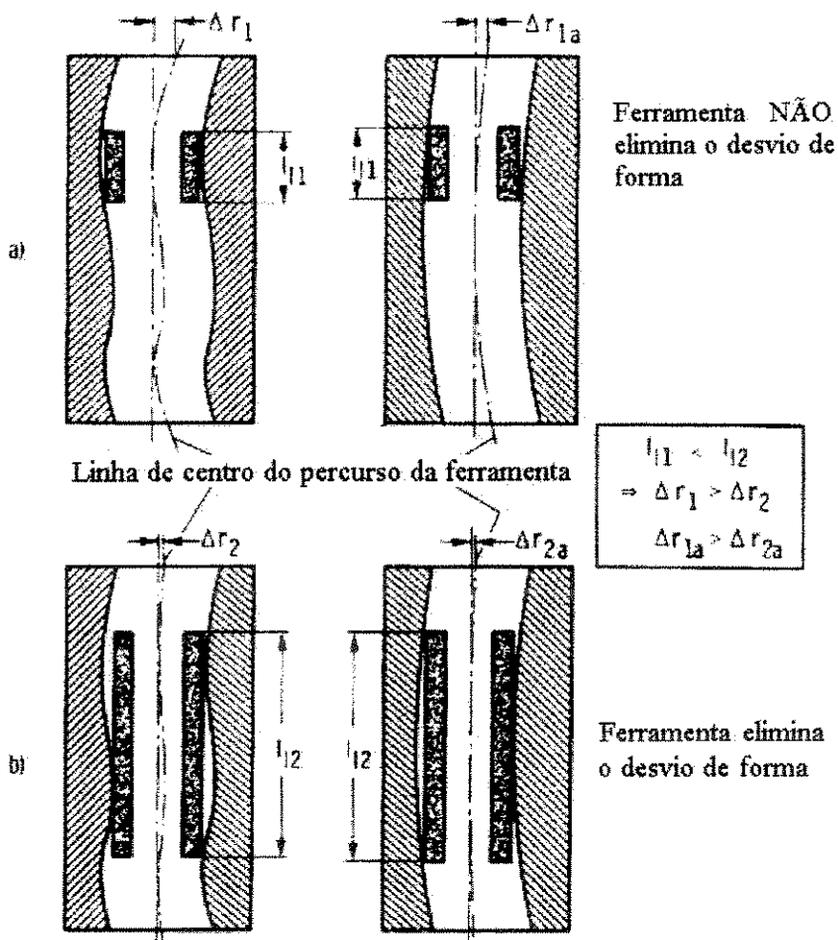


Figura 2.23 - Influência do comprimento da pedra brunidora sobre o desvio de cilindricidade

Fonte : König, 1980

A largura da pedra abrasiva influencia na eliminação dos erros de circularidade.

Uma pedra estreita irá acompanhar a forma do erro de forma, sem se apoiar corretamente em duas cristas, fazendo com que o erro de forma seja pouco corrigido ou até mesmo piorado. Já uma pedra larga irá se apoiar em duas cristas consecutivas, favorecendo a diminuição ou eliminação do desvio de circularidade (figura 2.24) [König, 1980].

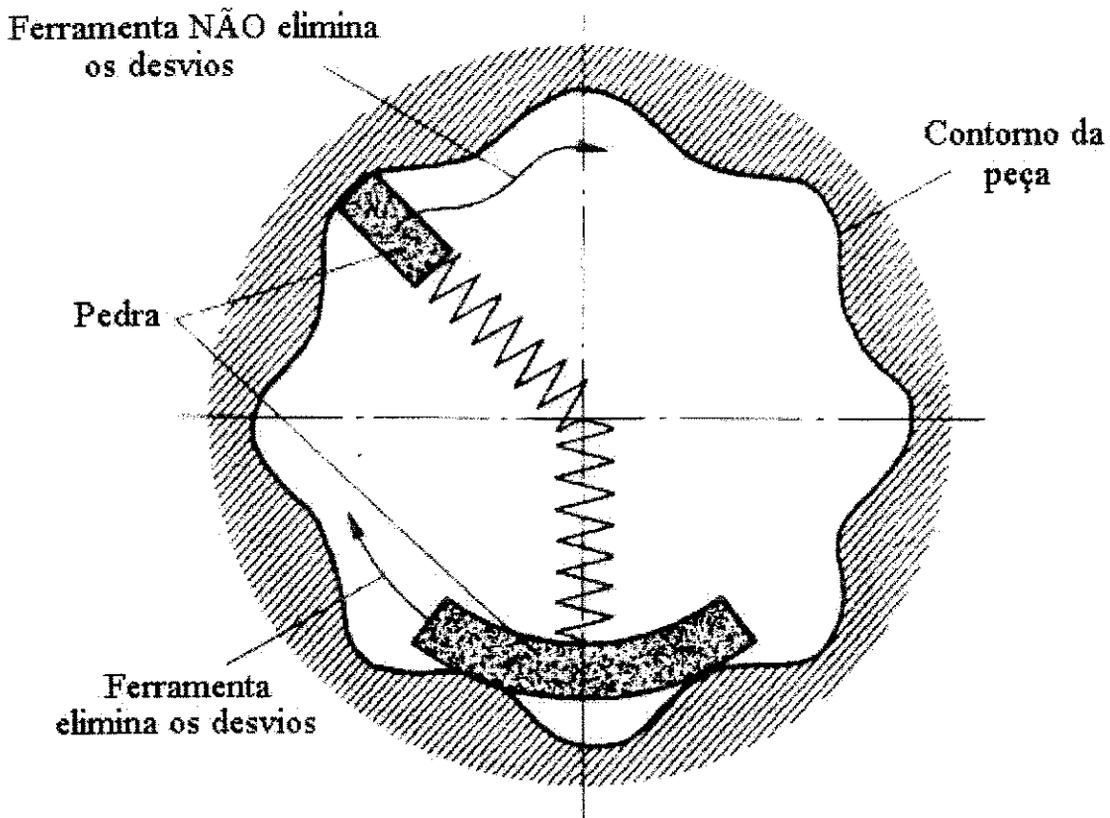


Figura 2.24 - Influência da largura da pedra brunidora sobre a circularidade

FONTE : König, 1980

O tamanho do grão abrasivo influencia no volume de cavaco efetivamente usinado por unidade de tempo. Grãos grandes levam a um aumento de volume do cavaco usinado na unidade de tempo e, diminuem, com certas restrições, a qualidade superficial. Em decorrência disto, no brunimento de desbaste, deve-se tomar os cuidados necessários para que os erros de forma, oriundos do processo anterior ao brunimento, permaneçam abaixo de um valor pré determinado para que o brunimento possa corrigi-los [Tönshoff, 1970, Zettel, 1974, König, 1980].

Com a diminuição da dureza da pedra, aumenta-se o desgaste, levando a um processo de auto-afiação do grão. Com a diminuição da dureza, o volume efetivo de cavaco usinado por

unidade de tempo, aumenta uma vez que, continuamente, se tem novos grãos abrasivos em ação.

O desgaste influencia a rugosidade pela ação da dureza. Grãos muito afiados, de baixa dureza, produzem uma alta rugosidade devido ao mecanismo de auto afiação dos grãos que ao se desgastarem irão se romper formando um novo grão afiado removendo uma maior quantidade de cavaco. Enquanto que, uma dureza mais elevada leva ao “cegamento” dos grãos antes de sua quebra, uma vez que, grãos mais duros demoram mais para se romper desgastando-se de modo a retardar a quebra do grão e a conseqüente formação da nova aresta de corte. Portanto, grãos “cegos” provocam um “alisamento” das ranhuras e, em decorrência disto, há a diminuição da rugosidade produzida, conforme citado anteriormente. [Brulé, 1992]

A figura 2.25 mostra as grandezas de influência, que influenciam os resultados finais das peças quais sejam, velocidade de avanço, velocidade de corte, comprimento do curso, tempo de espera e pressão de contato.

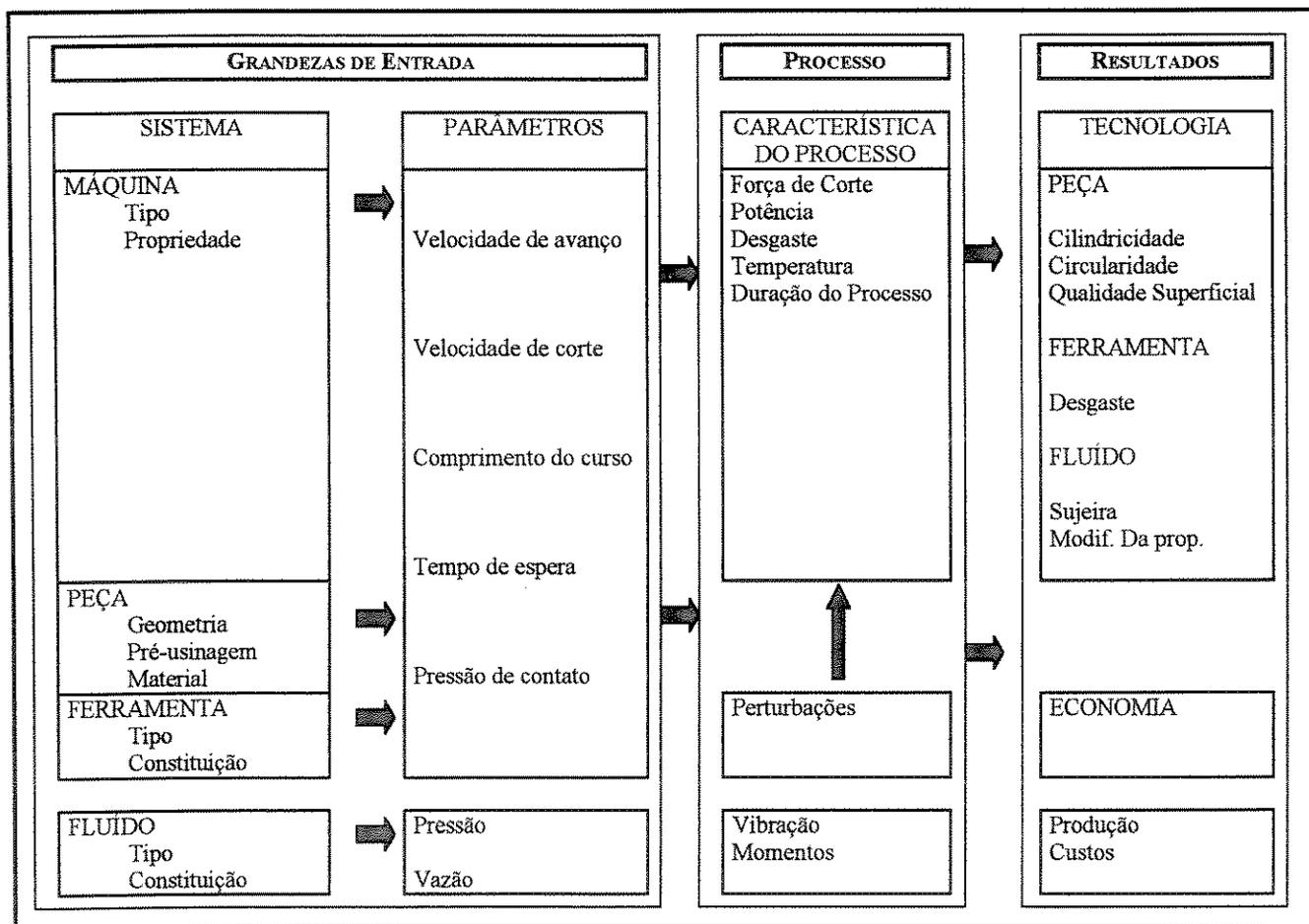


Figura 2.25 - Grandezas de influência no brunimento

FONTE : König, 1980

O tempo de espera ou tempo de parada, no brunimento, se aplica quando, tanto na entrada da ferramenta quanto na saída ou em ambos, há um aumento do desvio de forma, efetuando-se nas partes centrais da peça, alguns ciclos rotativos sem que haja o movimento de oscilação (reciprocção) da máquina brunidora. [*König, 1980*]

A velocidade efetiva, resultante entre as componentes avanço e corte, é dada pela expressão [*NBR 6162, 1989*].

$$v_e = \sqrt{v_f^2 + v_c^2} \quad (2)$$

No processo de brunimento cilíndrico interno, o ângulo da direção de avanço φ [*NBR 6162, 1989*] vale 90° e assim, o ângulo da direção efetiva η é dada pela expressão [*NBR 6162, 1989*].

$$\operatorname{tg} \eta = \frac{v_f}{v_c} \quad (3)$$

O ângulo da direção efetiva, corresponde, portanto, à metade do chamado ângulo de cruzamento α entre as linhas, para este tipo de brunimento (figura 2.9).

O ângulo de cruzamento α , provoca diferentes condições de entrada dos grãos, na superfície da peça. As diferentes taxas de remoção do material resultam das cargas atuantes na ferramenta, cujas cargas e desgastes aumentam com o aumento do ângulo de cruzamento. Quanto maior diferença entre as direções dos esforços, maior a probabilidade de ser ultrapassada a força de ligação entre os grãos [*König, 1980*] (figura 2.26), fazendo com que haja maior facilidade para o destacamento dos mesmos. Esta propriedade está relacionada com as características da pedra abrasiva (estrutura, dureza, tipo de grão, etc.). Portanto, em relação aos esforços atuantes para destacamento dos grãos, o maior equilíbrio é obtido para um ângulo $\alpha = 45^\circ$.

É possível que haja dependência entre o ângulo de cruzamento α e o erro de forma. Primeiramente, o erro pode ser explicado pelo fato de que o volume efetivo de cavaco usinado, por unidade de tempo, alcança um maior valor para $\alpha = 45^\circ$, valor este, que é otimizado pela superposição das componentes otimizadas [*Zettel, 1974; Tönshoff, 1970*]. Portanto, o volume efetivo de cavaco usinado, por unidade de tempo, sendo elevado, pressupõe-se que seja básico para se obter a eliminação dos erros de forma de maneira mais acentuada.

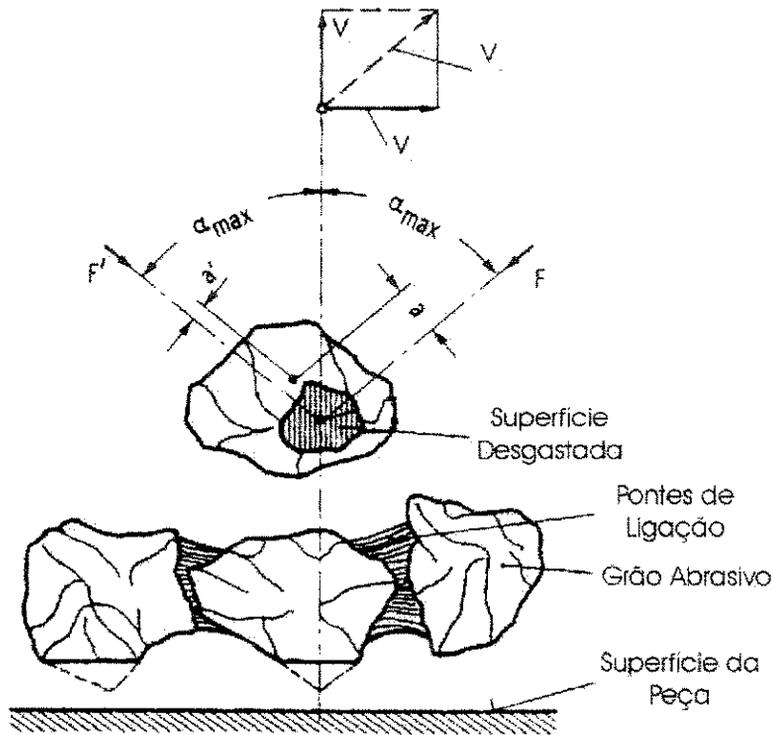


Figura 2.26 – Solicitação do Grão abrasivo no processo de brunimento de curso curto

FONTE : König, 1980

Assim como a pressão de contato, a velocidade de corte tem uma influência direta sobre o volume de cavaco removido, por unidade de tempo, em um processo de brunimento. Para uma certa pressão de contato, que é responsável pelo número e pela seção dos cavacos removidos, a velocidade de corte determina o volume de cavaco específico e o comprimento médio dos cavacos. Em decorrência disso, o volume efetivo de cavaco usinado na unidade de tempo aumenta com o aumento da velocidade de corte [Tönshoff, 1970, Zettel 1974, König, 1980] até o limite de $\alpha = 45^\circ$.

A velocidade efetiva v_e tem uma influência direta na taxa de remoção de cavaco. Para que se tenha um elevado valor de v_e , sem alterar o ângulo de cruzamento, devem ser aumentados simultaneamente as velocidades v_f e v_c . Todavia, um aumento isolado de v_f , aumentando-se o valor de η , conduz, também, a uma taxa maior de remoção de cavacos [König, 1980], até o limite de $\alpha = 45^\circ$. Na prática, demonstrou-se que o ângulo de cruzamento α deve ficar

entre 40° à 70° , para se obter uma ótima taxa de remoção de cavacos, independente da granulometria, dureza e pressão de contato [*Metals Handbook, 9ª ed. V. 16; König, 1980*].

O aumento da velocidade de corte v_c apresenta uma influência positiva na rugosidade [*König, 1980*]. Os desvios de circularidade e cilindridade também são influenciados pelas velocidades de corte e de avanço, e valores ótimos de ambos podem ser encontrados para se alcançar os mesmos desvios [*König, 1980*].

O comprimento do curso l_c tem grande influência nos desvios de forma, afetando, principalmente a cilindridade. Quanto maior o comprimento do curso, mais se alarga o furo nas bordas (figura 2.27).

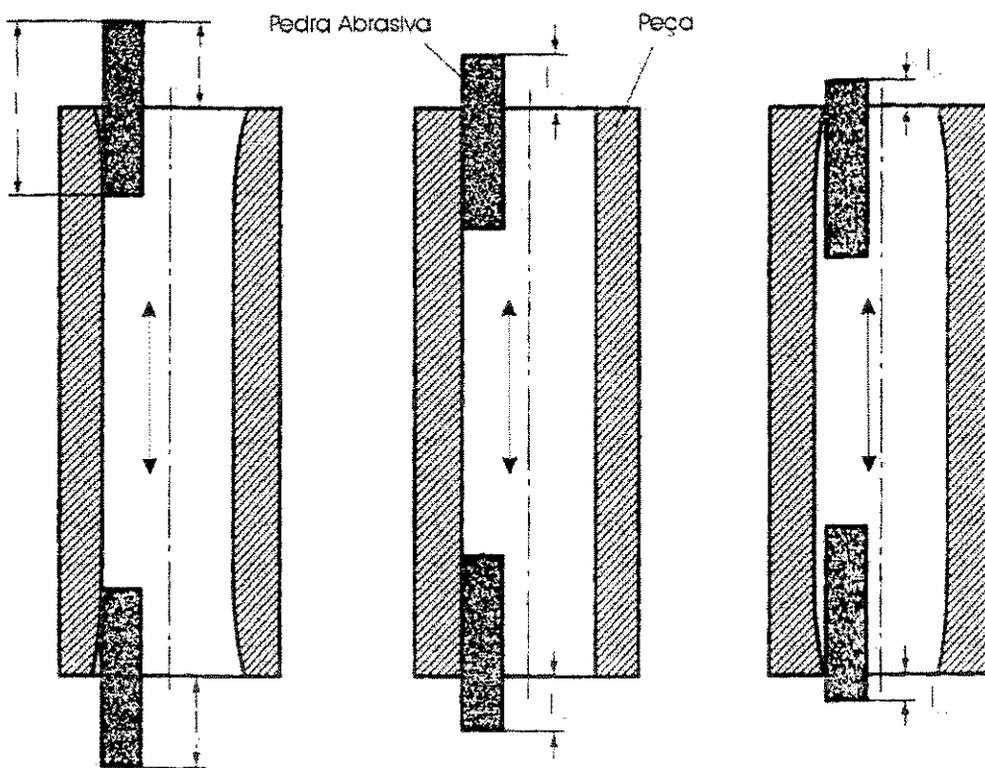


Figura 2.27 - Influência do comprimento da pedra de brunimento sobre o desvio de cilindridade

Fonte : König, 1980

As causas para esta influência residem nos seguintes fatos:

- Comprimento efetivo em contato;
- Pressão de contato nas bordas (figura 2.28)

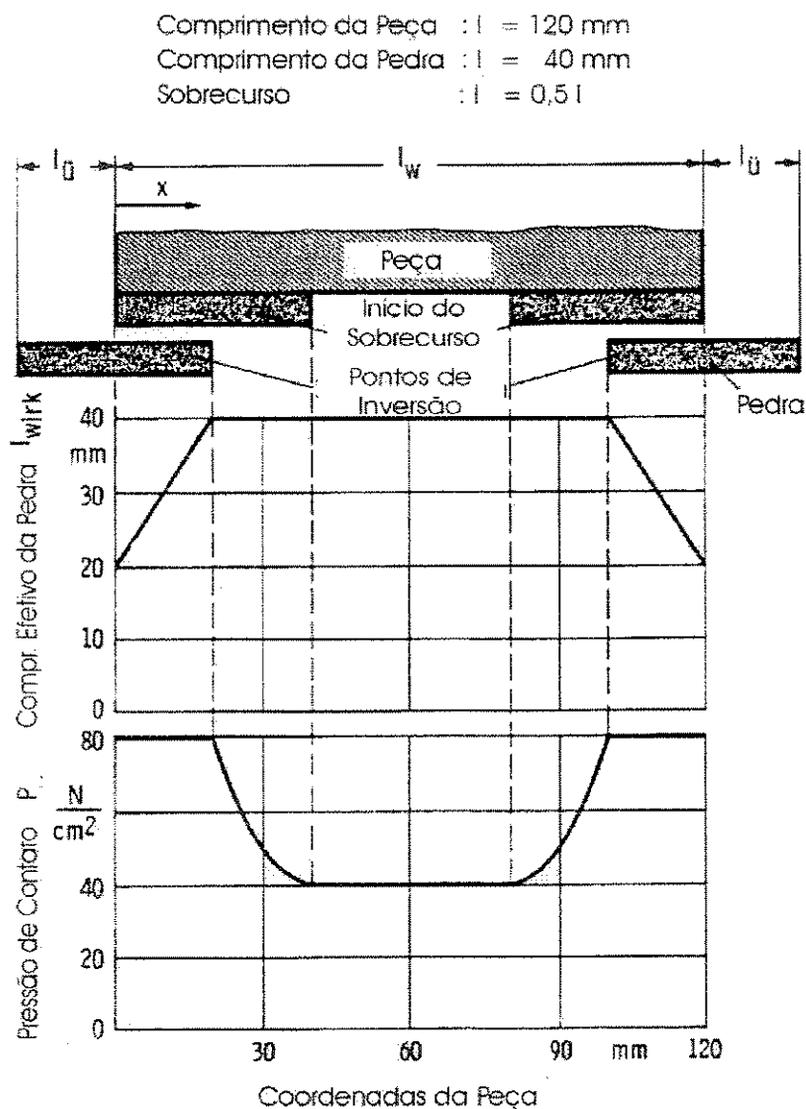


Figura 2.28 – Comprimento útil da ferramenta de brunir e pressão de contato sobre o comprimento da peça

Fonte : König, 1980

Se, por exemplo, em um caso extremo, o sobrecurso for zero, a pressão de contato permanece constante ao longo do percurso, mas o comprimento efetivo, nas bordas, será zero, significando que, para a mesma pressão, menos grãos abrasivos estarão atuando, retirando conseqüentemente, menos material. No outro extremo, em que a pedra abrasiva ultrapassa quase que totalmente o furo, antes da inversão do movimento, ocorrem as seguintes considerações : uma vez que, somente uma parte da pedra estará em contato com a parede do furo, a pressão de contato nas extremidades aumentará, já que, a mesma força de corte estará pressionando a pedra em uma área menor (figura 2.28). Com esta ultrapassagem aumenta também o comprimento efetivo em contato. A somatória destas influências conduz aos alargamentos

maiores nas bordas. Uma precisão maior dos desvios de cilindricidade pode ser encontrada para a relação $0 < l_u < l_p$. Valores práticos indicam que bons resultados são encontrados para sobrecursos da ordem de $1/3 l_p$ [König, 1980; Juchen, 1987].

Uma vez que, no fim dos cursos inferior e superior, há uma inversão no sentido do movimento de avanço, ocorre, próximo destes pontos, uma diminuição da velocidade de avanço, com a conseqüente diminuição do ângulo de cruzamento α . Se for importante que não haja, em nenhum ponto diferenças angulares, far-se-á necessário a utilização de um tempo de espera antes da inversão do movimento, para reduzir estas eventuais diferenças [König, 1980].

A influência da pressão de contato, isoladamente, é de difícil análise, pois existe uma relação direta com as características da pedra abrasiva. Em princípio quanto maior a pressão de contato, maior a facilidade de ocorrer o destacamento dos grãos abrasivos da estrutura e quando este for o caso (pode não ocorrer, dependendo da dureza da pedra), sempre haverá grãos abrasivos novos e pontiagudos atuando sem tempo para a formação de arestas planas. Este fato conduz ao aumento da rugosidade, aumento do volume de cavaco removido e aumento do desgaste da pedra. Estes fatos podem ser verificados para as condições utilizadas por Tönshoff [Tönshoff, 1970]. Tönshoff conduziu seus trabalhos no aço St 35 (~ SAE 1010) e seus resultados, neste particular, estão mostrados na figura 2.29. Portanto, a influência da pressão de contato, nas grandezas de usinagem e no resultado final do trabalho está associada com a especificação da ferramenta e conseqüentemente com as características do desgaste da mesma.

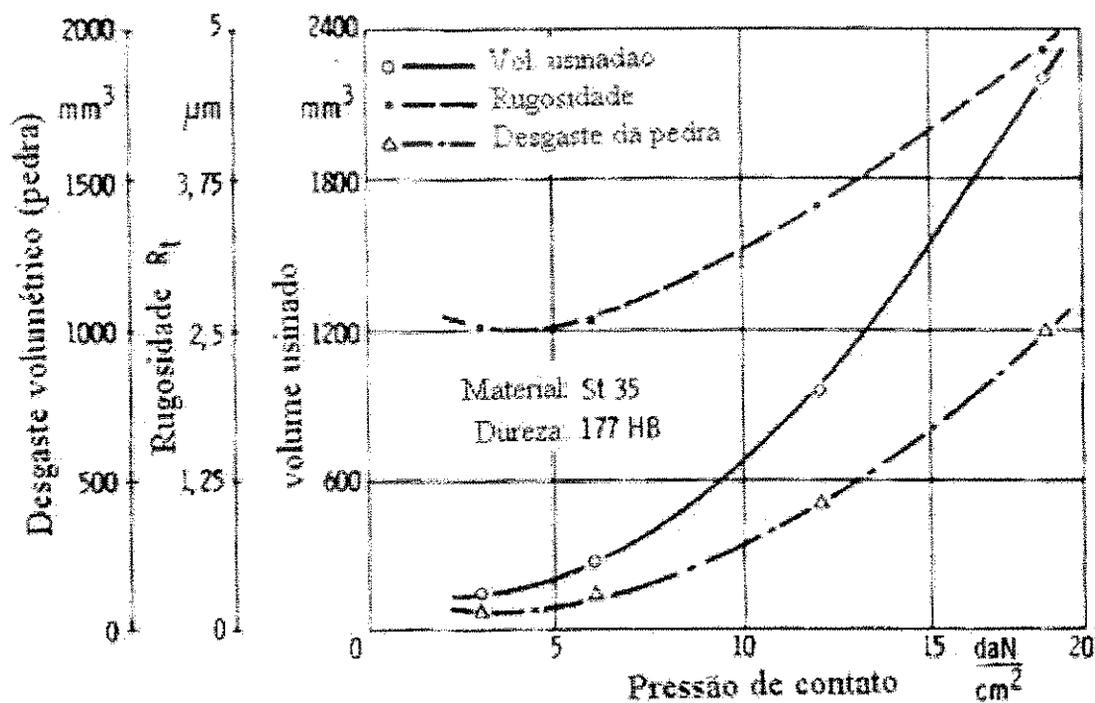


Figura 2.29 - Resultados obtidos por Tönshoff, variando-se a pressão de contato e mantendo-se os demais parâmetros constantes, obtidos para o aço St 35 (~ SAE 1010)

FONTE : König, 1980

CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3.1 - A METODOLOGIA

A metodologia experimental empregada para a elaboração deste trabalho seguiu os seguintes passos.

- 1 - Definição das medidas do corpo de prova em função dos equipamentos de medição;
- 2 - Execução dos ensaios da fase I, onde o objetivo foi verificar o efeito da pré usinagem, sem alterar os parâmetros do processo, utilizados pela Empresa participante;
- 3 - Execução dos ensaios da fase II, onde o objetivo foi o de verificar a influência da pressão de contato nos desvios de circularidade, retitude e rugosidade;
- 4 - Execução dos ensaios da fase III, onde o objetivo foi o de verificar a influência da velocidade de corte nos desvios de circularidade, retitude e rugosidade;
- 5 - Análise dos resultados.

Para a análise experimental utilizou-se corpos de prova de ferro fundido cinzento do tipo FC 250 (ABNT NBR 6589) com as dimensões apresentadas abaixo (figura 3.1).

A operação de brunimento foi realizada em uma máquina brunidora vertical da marca SUNEN, modelo CV-616 com potência de motor de 2,2 KW, com junta universal e com o avanço radial da pedra abrasiva contra a peça acionado mecanicamente por um sistema de roscas conforme citado por Klink e Juchen, utilizando-se uma pedra abrasiva NAGEL de carboneto de silício, código SC280QKe1031 com 3,4x5x114 mm. Esta é a pedra utilizada pela Empresa participante do projeto e não foi autorizado a utilização de outras. As operações anteriores ao brunimento foram: furar com broca de diâmetro 17,5 mm; alargar com alargador de 18,2 mm; alargar com alargador de 18,4 mm. Estas operações foram realizadas em um torno Pronecor, CNC, com 20 KW de potência.

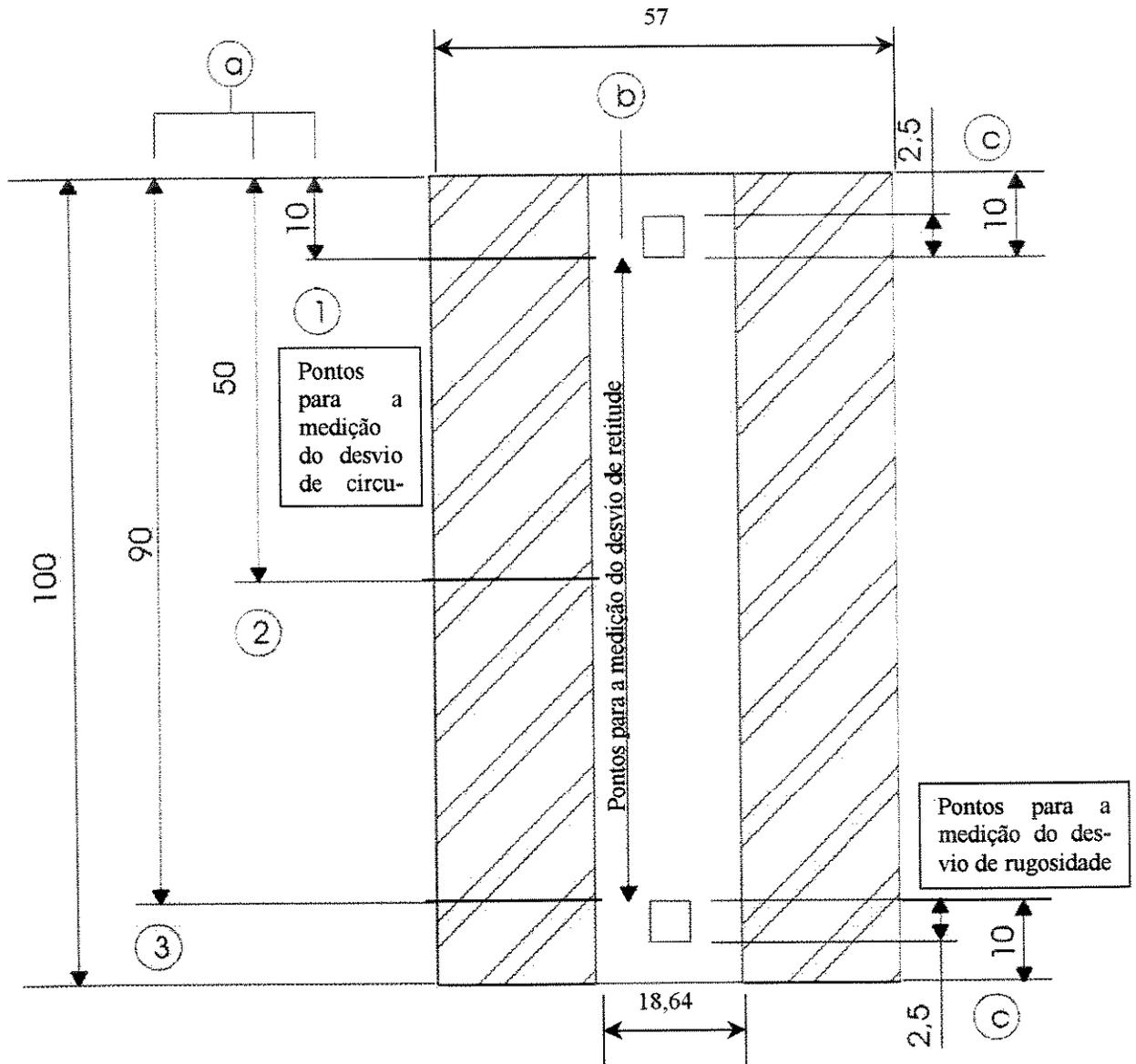


Figura 3.1 - Dimensões do corpo de prova, a) área da medição da circularidade, b) área da medição da retitude, c) área da medição da rugosidade R_a

Na figura acima são apresentadas as áreas de medição. A área de medição para a circularidade foi assim dividida : 1 – Pontos de medição da circularidade, em μm - o primeiro ponto de medição à 10 mm da entrada da ferramenta, 2 - segundo ponto de medição à 50 mm da entrada da ferramenta e 3 - terceiro ponto de medição à 90 mm da entrada da ferramenta, item (a). Para a retitude, em μm - a medição foi feita em um comprimento de 80 mm descontando 10 mm das bordas, item (b). A medição da rugosidade, em R_a , foi feita à 10 mm tanto da entrada como da saída da ferramenta, em um comprimento de medição de 2,5 mm, item (c).

A rugosidade foi medida num rugosímetro Sinumeric 3 da Taylor-Hobson; os erros de forma, circularidade e de retitude, foram medidos em um medidor de erros de forma Taylor-round 200 da Taylor-Hobson.

3.2 - CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS

As condições de trabalho da brunidora foram as seguintes:

⇒ Comprimento da pedra brunidora = 114 mm;

⇒ Sobrecurso = 1/3 do comprimento da pedra = 38 mm.

⇒ Curso:

comprimento da pedra brunidora + 2 x o sobrecurso =

$$= 114 + 2 \cdot 38 = 114 + 76 = 190 \text{ mm}$$

⇒ Fluido de corte = Honilo 430, fornecido pela Castrol, com as características :

Cor : âmbar, translúcido

Densidade a 20/4 °C : 0,840

Viscosidade a 40 °C, cSt : 3,20/4,50

Principais aplicações : Recomendado para brunimento de ferro fundido, metais não ferrosos, e aços até ABNT 1045

Utilizado também em tornos automáticos para usinagem de metais não ferrosos e aços de baixo teor de carbono.

Características da máquina brunidora SUNEN CV 616 :

Velocidade de corte (m/min.) : 7,22; 9,83; 13,30; 17,92

Pressão de contato : 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 9 (indicações relativas na máquina)

Golpes por minuto : fixo em 41 golpes por minuto (quantidades de golpes dados pela máquina brunidora SUNEN em um minuto)

Acionamento do cabeçote brunidor : mecanicamente acionado

Pedra abrasiva Nagel código : SC280QKe1031

Características da pedra abrasiva :

SC - Carboneto de Silício;

280 – Granulometria (muito fina);

Q – Dureza da pedra abrasiva : dura;

Ke – Tipo de aglomerante usado : aglomerante do tipo **vitrificado**;

1031 – Porosidade e demais características da pedra abrasiva:

O primeiro número identifica a porosidade da pedra abrasiva. Para o presente trabalho a pedra abrasiva tem uma porosidade fechada (nº 1)

Os demais números especificam um código interno do fabricante.

Os testes foram divididos em três fases conforme mostrados nas tabelas 3.1, 3.2 e 3.3.

Tabela 3.1 - CONDIÇÕES DE TRABALHO UTILIZADAS NA FASE I

Desvios	Avanço (golpes por minuto)	Velocidade de Corte (v_c em m/min)	v_f (m/min)	Pressão de contato (indicações relativas na máquina)	Angulo (°)
Circularidade	41	9,83	7,20	5	72
Retitude	41	9,83	7,20	5	72
Rugosidade	41	9,83	7,20	5	72

Tabela 3.2 - CONDIÇÕES DE TRABALHO UTILIZADAS NA FASE II, VARIANDO-SE APENAS A PRESSÃO DE CONTATO

Desvios	Avanço (golpes por minuto)	Velocidade de Corte (v_c em m/min)	v_f (m/min)	Pressão de contato (indicações relativas na máquina)	Angulo (°)
Circularidade	41	9,83	7,20	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9	72
Retitude	41	9,83	7,20	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9	72
Rugosidade	41	9,83	7,20	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9	72

Tabela 3.3 - CONDIÇÕES DE TRABALHO UTILIZADAS NA FASE III, VARIANDO-SE APENAS A VELOCIDADE DE CORTE

Desvios	avanço(golpes por minuto)	Velocidade de Corte (v _c em m/min)	v _r (m/min válida para todas as v _c)	Pressão de contato (indicações relativas na máquina)	Ângulo (°)
Circularidade	41	7,23	7,20	5	88
		9,83			72
		13,30			46
		17,92			42
Retitude	41	7,23	7,20	5	88
		9,83			72
		13,30			46
		17,92			42
Rugosidade	41	7,23	7,20	5	88
		9,83			72
		13,30			46
		17,92			42

CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como citado no item 3.1, este trabalho foi dividido em três fases denominadas: Fase I – manteve-se as condições de trabalho da máquina brunidora, tal com é utilizada pela Empresa participante do Projeto, para se verificar o efeito da pré-usinagem; Fase II – Variou-se a pressão de contato da máquina brunidora mantendo-se as demais condições de usinagem constantes; Fase III – Variou-se a velocidade de corte da máquina brunidora, mantendo-se as demais condições de usinagem constantes.

4.1 - RESULTADOS OBTIDOS PARA A FASE I.

Nos ensaios realizados na fase I, os desvios não foram analisados de maneira interdependente, ou seja, na avaliação da circularidade, por exemplo, não se tomaram peças iniciais que tivessem todos os mesmos valores de retitude e rugosidade, para se verificar o comportamento do processo. O tempo de brunimento foi mantido constante, em todos os casos, em 30 segundos.

4.1.1 - AVALIAÇÃO DA CIRCULARIDADE PARA A FASE I

A figura 4.1 mostra o percentual de correção do desvio de circularidade, para as condições de trabalho mostradas na tabela 3.1.

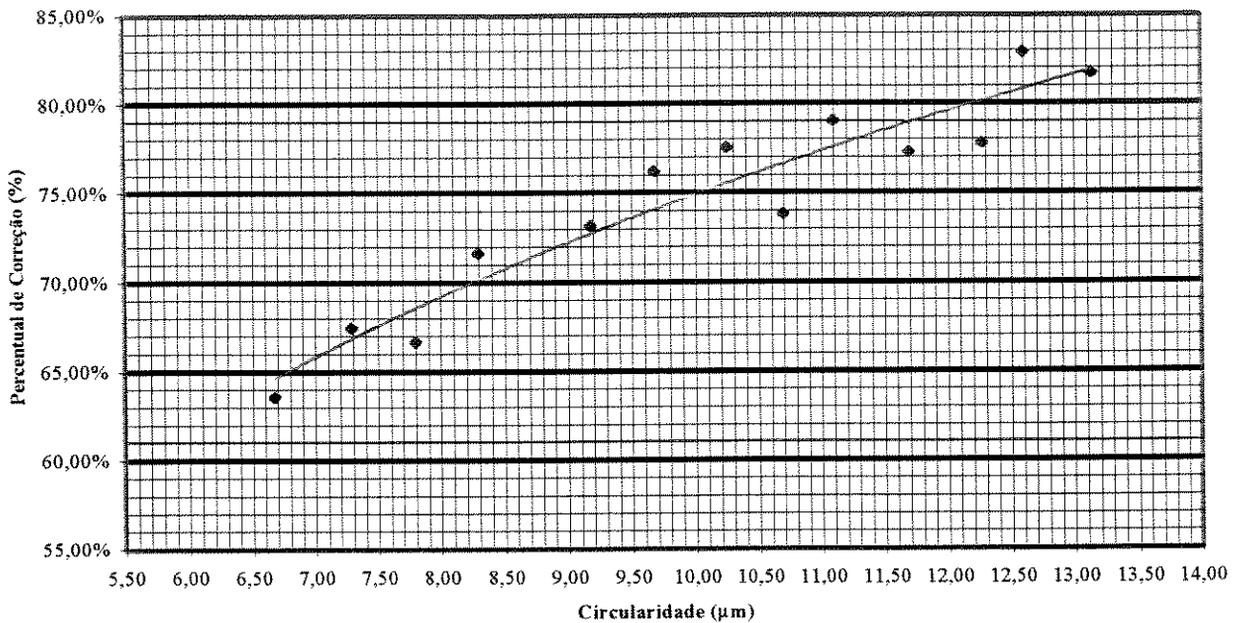


Figura 4.1 – Percentual de correção do desvio de circularidade, em função da circularidade advinda do processo anterior.

Nota-se, da figura 4.1, que houve uma correção significativa dos desvios de circularidade oriundos das operações anteriores, quando se avaliou o comportamento da máquina brunidora. Todavia, a correção foi mais acentuada nas peças com desvios iniciais maiores. Assim, um desvio da ordem de $13,10 \mu\text{m}$ foi corrigido em cerca de 83%, passando após o brunimento, portanto, para cerca de $2,20 \mu\text{m}$. Por outro lado, um desvio inicial da ordem de $7,0 \mu\text{m}$, corrigido em cerca de 67%, teve um valor final da ordem de $2,30 \mu\text{m}$. Assim, verifica-se que, houve uma tendência, para as condições estudadas, do desvio de circularidade final ser corrigido para cerca de $2,5 \mu\text{m}$, independente do desvio inicial, sendo que, quanto menor o desvio inicial, mais difícil se tornou a sua correção. Deve ser lembrado que a correção do desvio de circularidade está relacionada com a largura da pedra (figura 24) e quanto menor o valor do desvio inicial, mais difícil se torna da pedra se apoiar em duas cristas consecutivas.

4.1.2 - AVALIAÇÃO DA RETITUDE PARA A FASE I

A figura 4.2 mostra o percentual de correção do desvio de retitude, para as condições de trabalho mostradas na tabela 3.1.

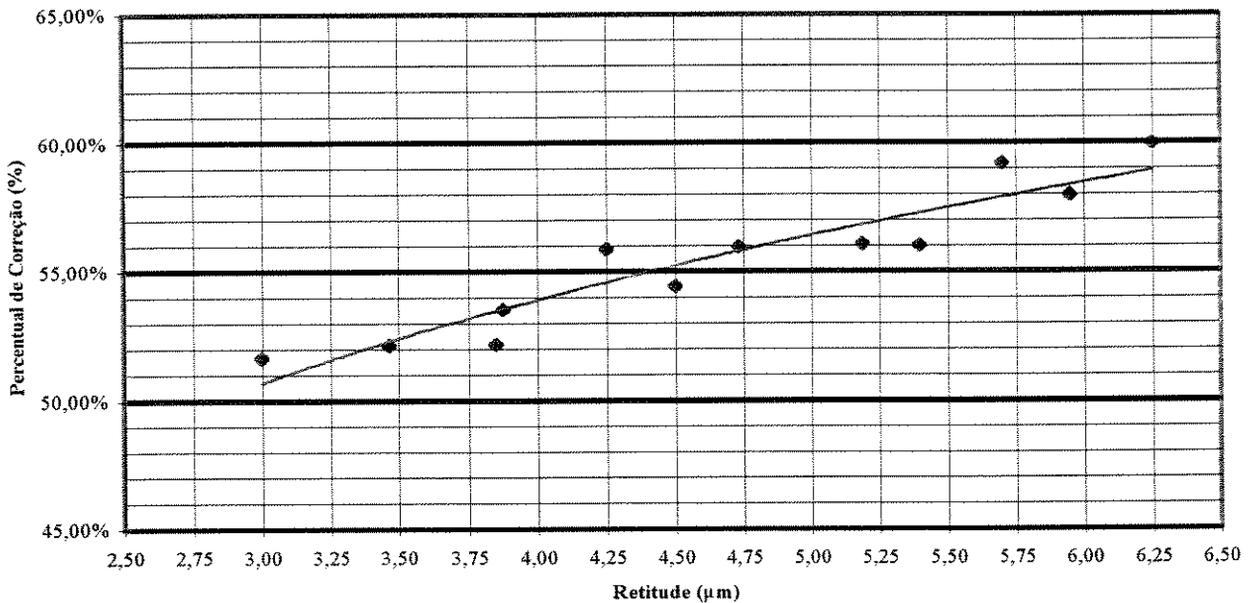


Figura 4.2 – Percentual de correção do desvio de retitude, em função da retitude advinda do processo anterior.

Ao contrário da circularidade, o percentual de correção da retitude, se manteve praticamente constante, independentemente do desvio deixado pelo processo anterior. Assim, o brunimento corrigiu com mais intensidade a circularidade do que a retitude. A correção do desvio de retitude, bem como o de cilindricidade está correlacionado com o comprimento da pedra (figura 23). Como, para o caso estudado, os desvios iniciais se mantiveram em um patamar baixo (3,0 μm à 6,25 μm), se tornou mais difícil a correção, comparada à circularidade, cujos desvios iniciais possuíam um patamar mais elevado (6,50 μm à 13,50 μm).

Para as condições estudadas, a retitude foi corrigida de 52 à 60%. Assim, um desvio inicial de 3,0 μm foi corrigido para cerca de 1,5 μm e um desvio de 6,00 μm , para cerca de 2,5 μm , não havendo, portanto, a tendência dos desvios finais ficarem todos num mesmo patamar, conforme observado no caso anterior.

4.1.3 - AVALIAÇÃO DA RUGOSIDADE PARA A FASE I

A figura 4.3 mostra o percentual de correção do desvio de rugosidade, para as condições de trabalho mostradas na tabela 3.1.

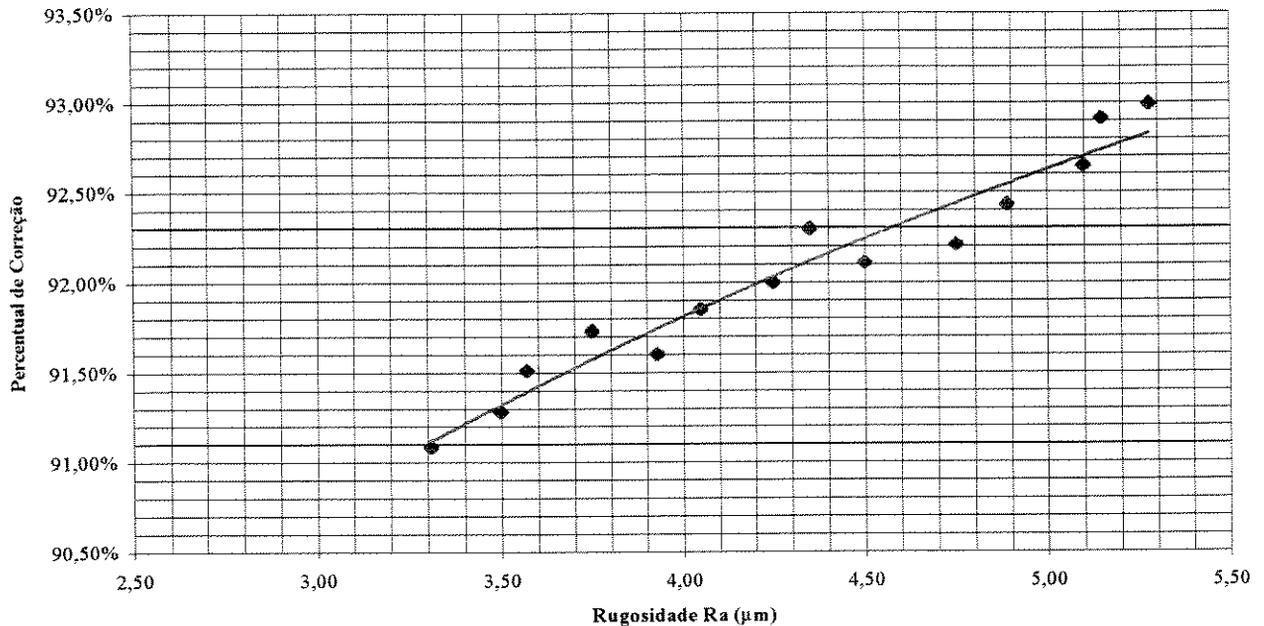


Figura 4.3 – Percentual de correção do desvio de rugosidade, em função da rugosidade advinda do processo anterior.

Neste caso e, para as rugosidades iniciais variando de aproximadamente 3,50 µm à 5,20 µm, o percentual de correção variou de 91,8% à 92,8%, aproximadamente. Isto significa que, as rugosidades médias (R_a) finais se situaram entre 0,29 e 0,38, sendo, portanto, a maior beneficiada do processo, compatível aos processos abrasivos. Há de se notar também que, a pedra, utilizada nos testes, possuía a granulomeria muito fina, na muito dura e pouco porosa. Assim, se tornou difícil o destacamento dos grãos, havendo tendência maior de “*cegamento*” dos mesmos com o conseqüente “*alisamento*” da superfície, melhorando consideravelmente a rugosidade.

4.2 - RESULTADOS PARA A FASE II – VARIAÇÃO DA PRESSÃO DE CONTATO.

Quando foram avaliadas a pressão de contato e a velocidade de corte tomou-se o cuidado em manter os demais parâmetros constantes. Mesmo os desvios que não eram objetos de análise, foram mantidos dentro de um mesmo patamar. Como por exemplo, quando se avaliou a circularidade em função da variação da pressão de contato, tomou-se o cuidado de selecionar peças em que a retitude e rugosidade se mantivessem em desvios de forma próximos. Condição esta válida para cada um dos desvios analisados.

4.2.1 - AVALIAÇÃO DA CIRCULARIDADE PARA A FASE II

Na avaliação da circularidade, em função da pressão de contato, escolheu-se peças iniciais que, antes de serem brunidas, tivessem desvios próximos entre si conforme abaixo.

- Circularidade : $10,00 \pm 1 \mu\text{m}$

- Rugosidade : $5,00 \pm 1 \mu\text{m}$

- Retitude : $7,50 \pm 1 \mu\text{m}$

A figura 4.4 mostra o percentual de correção do desvio de circularidade, em função da variação da pressão de brunimento, conforme tabela 3.2.

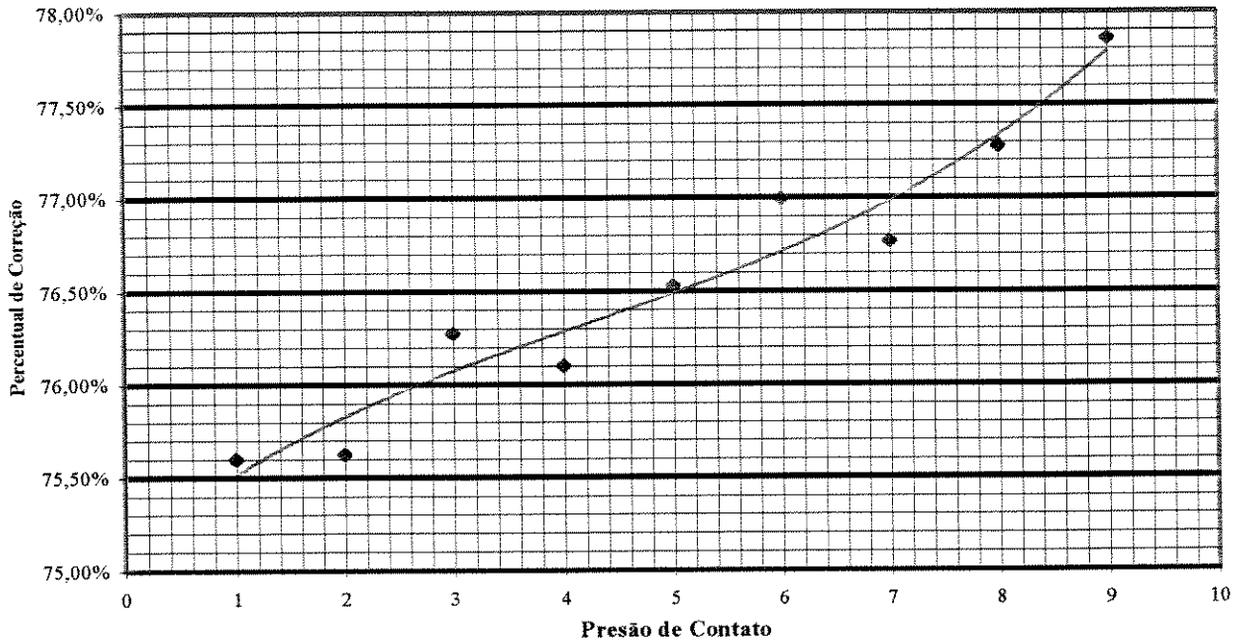


Figura 4.4 – Percentual de correção do desvio de circularidade, em função da pressão de brunimento.

Observa-se, pela figura 4.4, que a variação da pressão de brunimento causou uma variação pequena na melhoria do desvio de circularidade. A variação, em percentual, com relação à melhoria do processo, quando se variou da pressão 1 até a pressão 9 foi da ordem de 2,5% (75,5% para a pressão número 1 e 78% para a pressão número 9).

O aumento da pressão de contato faz com que haja uma penetração maior dos grãos abrasivos, na peça, facilitando o destacamento dos mesmos e, melhorando, conseqüentemente, a correção dos desvios de circularidade, à medida que se aumenta a pressão. No presente caso, devido às já citadas características da pedra, tal fato não foi de grande magnitude, motivo pelo qual, ao aumento da pressão, não se observou uma melhoria proporcional, na circularidade.

4.2.2 - AVALIAÇÃO DA RETITUDE PARA A FASE II

Para se avaliar a influência da variação da pressão de contato, nos desvios de retitude, foram escolhidas peças com os desvios de circularidade e rugosidade controlados. Assim as peças iniciais apresentavam os seguintes desvios :

- Circularidade : $5,00 \pm 1 \mu\text{m}$
- Rugosidade : $4,00 \pm 1 \mu\text{m}$
- Retitude : $11,00 \pm 1 \mu\text{m}$

A figura 4.5 mostra o percentual de correção do desvio de retitude, em função da variação da pressão de brunimento, conforme tabela 3.2.

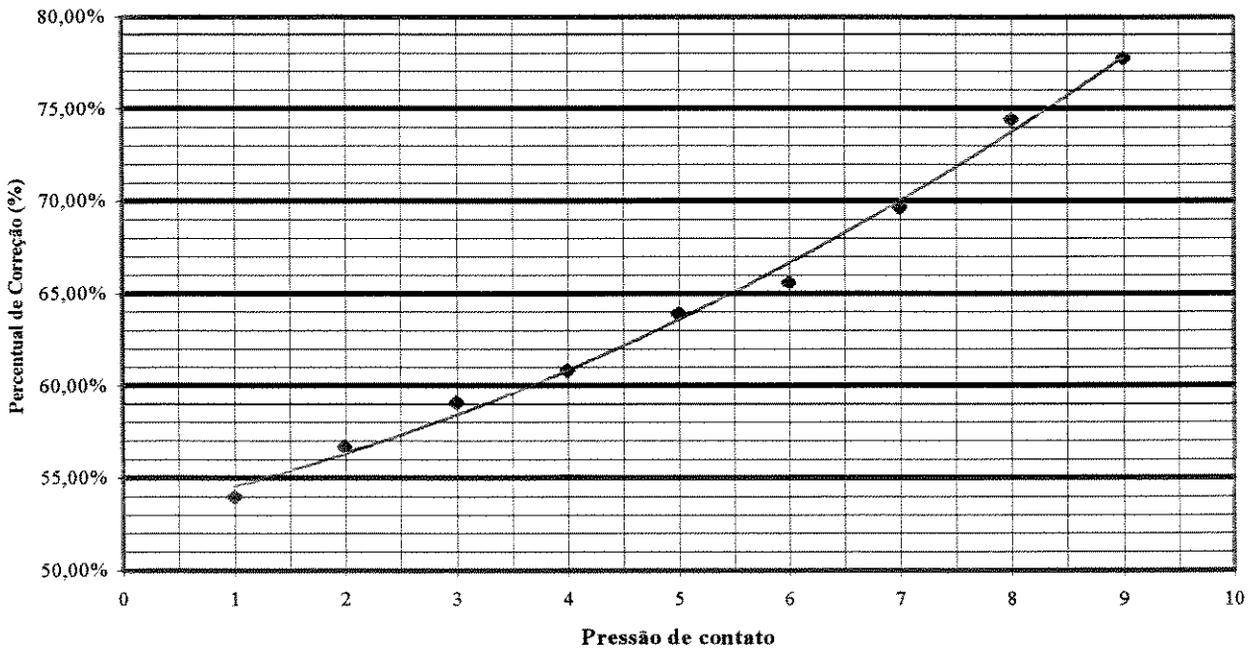


Figura 4.5 - Percentual de correção do desvio de retitude, em função da pressão de brunimento.

A retitude foi afetada pela variação da pressão de contato, pois a correção passou de 54% (pressão 1) para 78% (pressão 9). Neste caso, a pressão de contato maior, atuando ao longo do movimento de avanço, fez com que a pedra se tornasse mais “agressiva”, e se ajustasse mais às paredes do furo, melhorando, conseqüentemente, a retitude.

Neste caso, a melhoria observada, entre a pressão nº 1 e a pressão nº 9, foi percentualmente maior que àquela observada na circularidade pois, o efeito da maior pressão, ao longo do comprimento do furo, foi o de destacamento maior das cristas de retitude.

4.2.3 - - AVALIAÇÃO DA RUGOSIDADE PARA A FASE II

Da mesma forma que para os casos anteriores, as peças iniciais apresentam os seguintes desvios :

- Circularidade : $6,00 \pm 1 \mu\text{m}$
- Retitude : $11,00 \pm 1 \mu\text{m}$
- Rugosidade : $4,00 \pm 1 \mu\text{m}$

A figura 4.6 mostra o percentual de correção do desvio de rugosidade, em função da variação da pressão de brunimento, conforme tabela 3.2.

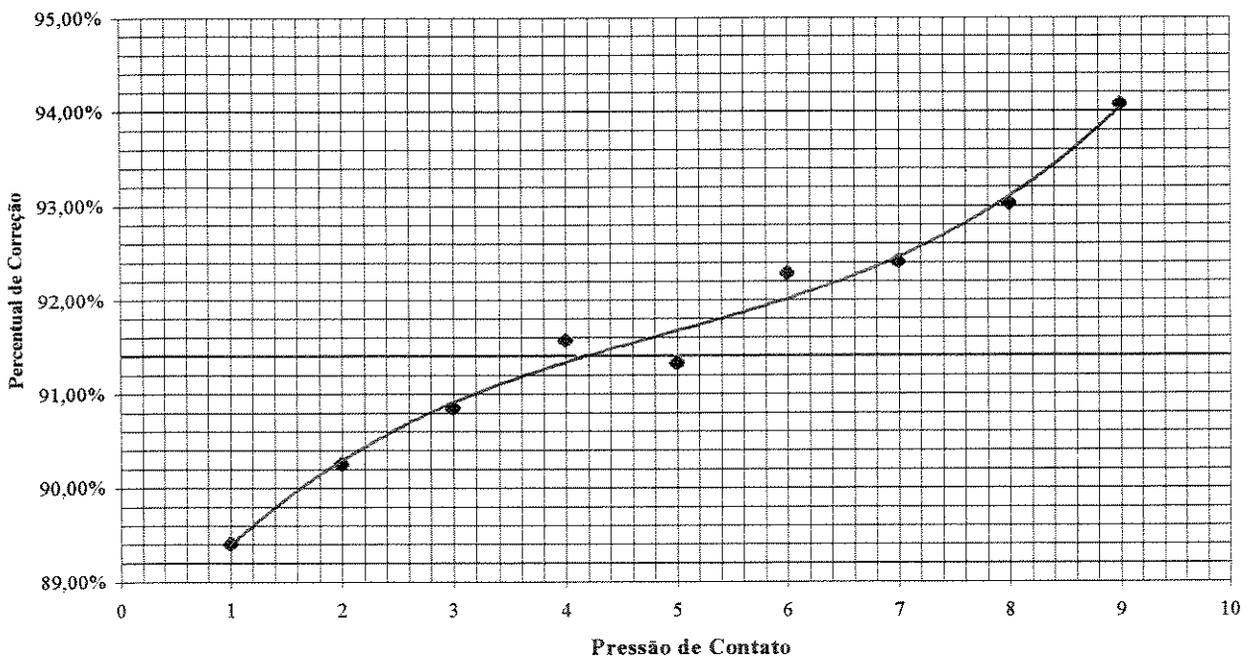


Figura 4.6 – Percentual de correção da rugosidade, variando-se a pressão de contato

A rugosidade, para a pressão n° 1, apresentou uma correção percentual de 89,60 % enquanto que, para a pressão n° 9, a correção foi da ordem de 95,8 %, portanto, uma variação da ordem de 6,2%, ou seja, o aumento da pressão de contato, melhorou o desvio de rugosidade. Isto se deve ao fato que, a pedra abrasiva é uma pedra abrasiva dura (código Q) e a porosidade é fechada (código 1). A dureza faz com que ocorra o retardamento da ruptura dos grãos abrasivos, acarretando o “cegamento”, antes mesmo de ocorrer o início da ruptura. A pedra pode assumir o comportamento de um “rolete”, deformando plasticamente o material da peça que está sendo brunida.

Por outro lado, o cavaco removido encontra dificuldades para se alojar nos poros, forçando a sua passagem por entre os grãos abrasivos. Ao forçar esta passagem, ele “quebra” os grãos abrasivos de forma totalmente irregular; em alguns ele quebra totalmente o grão abrasivo, passando por sobre o mesmo e arredondando-o. Em outros, ele os quebra parcialmente, fazendo com que, haja um “amolecimento” do restante dos grãos abrasivos de modo que, venham a se “acomodar” às suas novas formas, aumentando o desgaste e o “cegamento”. Com isto cria-se as condições ideais para o “empastamento” da pedra abrasiva.

4.3 - RESULTADOS PARA A FASE III – VARIAÇÃO DA VELOCIDADE DE CORTE.

4.3.1 - AVALIAÇÃO DA CIRCULARIDADE PARA A FASE III

Para a avaliação da circularidade, foram selecionadas peças que apresentavam os seguintes desvios :

- Circularidade : $5,00 \pm 0,5 \mu\text{m}$
- Retitude : $11,00 \pm 1 \mu\text{m}$
- Rugosidade : $4,00 \pm 1 \mu\text{m}$

A figura 4.7 mostra o percentual de correção do desvio de rugosidade, em função da variação da velocidade de corte, conforme tabela 3.2.

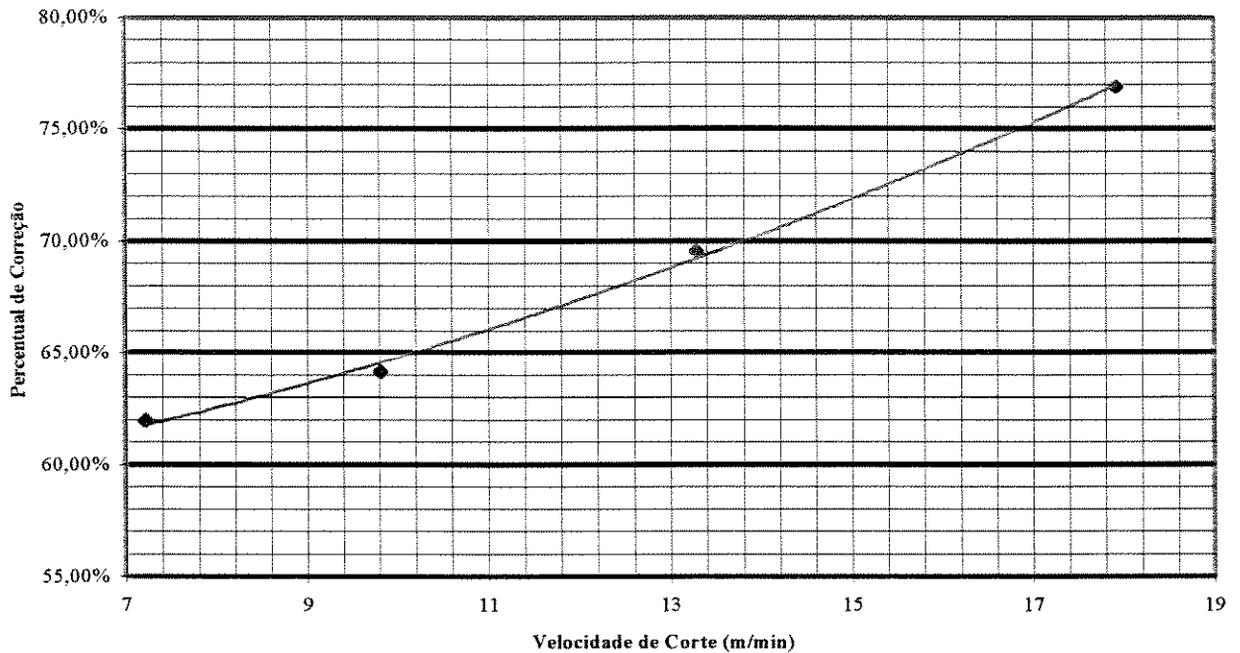


Figura 4.7 – Percentual de correção da circularidade, em função da velocidade de corte

Uma vez que, com aumento da velocidade de corte, se aumenta o volume de cavaco usinado, na unidade de tempo, e como o tempo de usinagem se manteve constante, em todos os desvios, houve, com o aumento deste parâmetro, maior remoção de cavacos, e, conseqüentemente, maior remoção das cristas, melhorando os desvios de circularidade. Para uma velocidade de corte de 7,22 m/min houve um percentual de correção de 62% e, para uma velocidade de corte de 17,92 m/min um percentual de correção de 77%. O fator mais importante não está na diferença de percentagens mas sim, no grau de correção, que superou o fator de 50%, tendo uma acentuada correção dos desvios de forma, oriundos da operação anterior ao brunimento (figura 4.7).

4.3.2 - AVALIAÇÃO DA RETITUDE PARA A FASE III

Para a avaliação da retitude foram selecionadas peças, que apresentavam os seguintes desvios :

- Circularidade : $4,50 \pm 1 \mu\text{m}$
- Retitude : $5,50 \pm 1 \mu\text{m}$
- Rugosidade : $4,00 \pm 1 \mu\text{m}$

A figura 4.8 mostra o percentual de correção do desvio de rugosidade, em função da variação da velocidade de corte, conforme tabela 3.2.

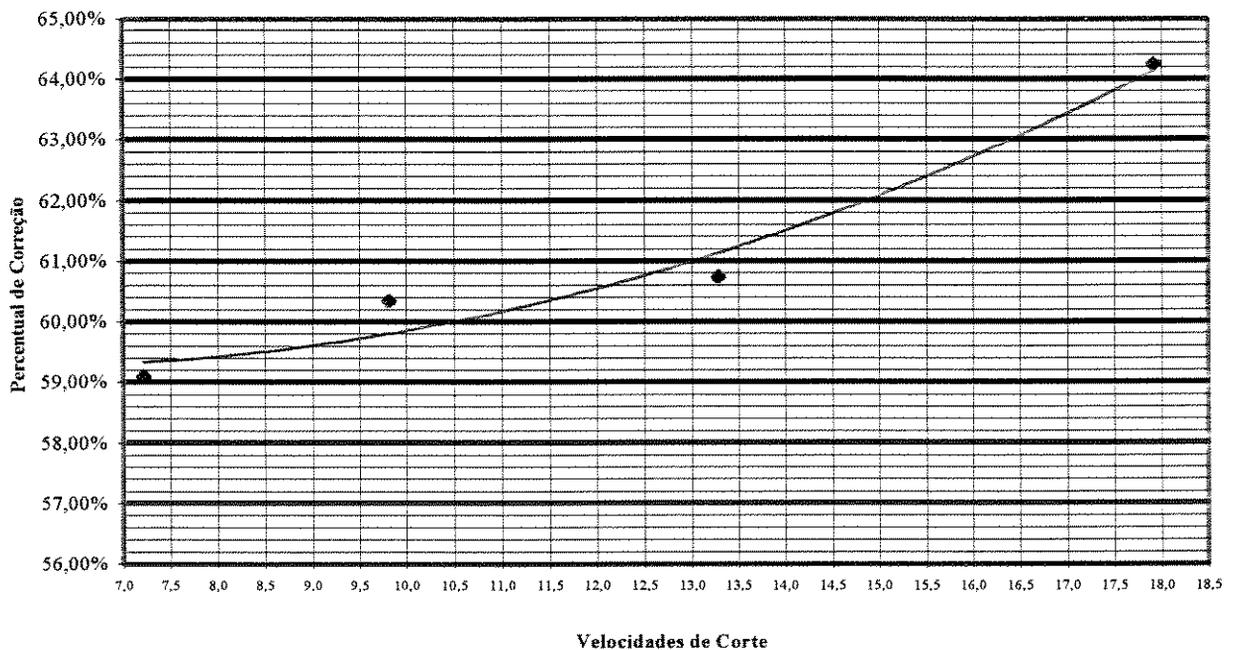


Figura 4.8 – Percentual de correção da retitude, em função da velocidade de corte

A velocidade de corte agiu como uma diferencial aumentando a rapidez da remoção do cavaco do interior da pedra abrasiva, em função da rapidez na remoção do cavaco. O cavaco já removido, é rapidamente “forçado” para fora pelo que está imediatamente anterior a ele criando caminhos (sulcos) irregulares na pedra, influenciando diretamente na taxa de remoção e, apesar do cegamento dos grãos abrasivos, a remoção de cavaco é maior. Assim, pelas mesmas razões da circularidade, há uma melhoria no desvio de retitude.

4.3.3 - AVALIAÇÃO DA RUGOSIDADE PARA A FASE III

Para a avaliação da rugosidade foram selecionadas peças, que apresentavam os seguintes desvios :

- Circularidade : $5,00 \pm 0,3 \mu\text{m}$
- Retitude : $11,00 \pm 1 \mu\text{m}$
- Rugosidade : $6,50 \pm 1, \mu\text{m}$

A figura 4.9 mostra o percentual de correção do desvio de rugosidade, em função da variação da velocidade de corte, conforme tabela 3.2.

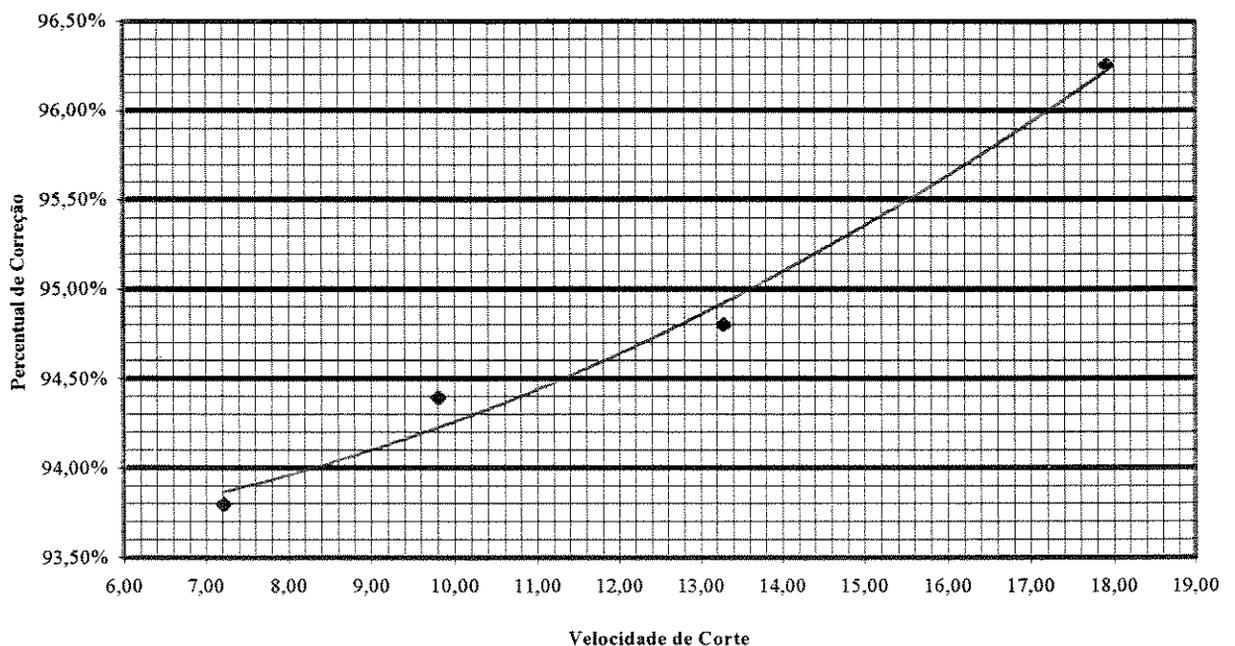


Figura 4.9 – Percentual de correção da rugosidade, em função da velocidade de corte

O percentual de correção da rugosidade, em função da velocidade de corte, variou entre 93,80% e 96,25%, praticamente constante. O aumento da velocidade de corte faz com que haja uma diminuição do ângulo de cruzamento que, neste caso, passou de 88 para 42°. Como citado à página 48 (figura 2.26), o maior equilíbrio de forças ocorre para um ângulo $\alpha = 45^\circ$, onde ocorre, também, a maior taxa de produção de cavaco, por unidade de tempo, o que provoca a eliminação dos erros de forma de maneira mais acentuada. Fatos estes que ocorreram

tanto para a circularidade como para a retitude. Da mesma forma, com o maior equilíbrio das forças, menor a diferença da direção dos esforços e, mais difícil se torna o deslocamento dos grãos, conseqüentemente, mais difícil o aparecimento de grãos pontiagudos. O aparecimento de grãos pontiagudos, piora a rugosidade.

No presente caso, a diminuição (melhoria) da rugosidade com a diminuição do ângulo de cruzamento (aumento da velocidade de corte), não foi mais acentuada, tendo em vista que, a pedra utilizada, neste trabalho, possuía uma dureza muito elevada. Assim, mesmo para um ângulo de cruzamento, da ordem de 88° ($v_c = 7,22$ m/min), o desequilíbrio de forças não foi tão suficiente para destacar fortemente os grãos abrasivos das pontes de ligação, motivo pelo qual, a diferença de variação do percentual de correção não foi tão acentuada (93,80% para $\alpha = 88^\circ$ e 96,25% para $\alpha = 45^\circ$)

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES

Os resultados apresentados neste trabalho são válidos para as condições de equipamento, de ambiente e materiais utilizados para a realização destes ensaios.

5.1 - CONCLUSÕES

- 1 - Os desvios iniciais, advindos de processo anterior ao brunimento, influenciam na percentagem de correção dos mesmos. Para as condições estudadas, quanto menor os desvios iniciais, menor a percentagem de correção observada, seja para os desvios macro, seja para os desvios microgeométricos. No caso específico da circularidade, houve uma tendência do processo corrigir os desvios para valores finais próximos, independentes dos desvios iniciais; no caso da rugosidade a percentagem de correção se manteve praticamente constante, independente dos valores iniciais, devido às características das pedras. Assim, não se deve atentar para obter pequenos desvios nas operações anteriores ao brunimento, uma vez que o processo se mostrou capaz de corrigir valores elevados;
- 2 - O aumento da pressão de contato se mostrou benéfico para todos os desvios monitorados. Este benefício, todavia, não foi muito acentuado, o que leva a crer que, aumentar a pressão de contato, com o objetivo de se melhorar os desvios, deve ser visto com reservas. Deve ser levado em conta que, a rugosidade deve sua melhoria, em função da pressão de contato, às características da pedra utilizada (muito dura). Assim, olhar isoladamente este parâmetro, sem levar em conta as características da pedra, se mostra temerário;
- 3 - Da mesma forma que a pressão de contato, o aumento da velocidade de corte se mostrou benéfico aos desvios analisados. Isto, pelo fato que, ao aumento da velocidade de corte, seguiu-se uma diminuição do ângulo de cruzamento de 88° para 42° . A posição de equilíbrio é encontrada para ângulos próximos de 45° . Ao se aumen-

- tar ainda mais a velocidade de corte, o ângulo de cruzamento diminuiria mais ainda, desequilibrando novamente as forças e, “provavelmente”, piorando as condições dos desvios. “Provavelmente” porque as condições da máquina não permitiram velocidades maiores. Na condição de equilíbrio não ocorre um destacamento acelerado dos grãos abrasivos. A rugosidade, embora tivesse uma correção elevada, se mostrou pouco variável, face à velocidade de corte, novamente, devendo se levar em conta as características da pedra;
- 4 - O processo de brunimento é afetado pelos parâmetros pressão de contato e velocidade de corte. Nas condições estudadas e para as características da pedra utilizada, o aumento deste parâmetros se mostrou benéfico ao processo. Particularmente, aumentar a pressão de contato, significa penetração mais intensa dos grãos, o que tende a soltá-los das pontes de ligação, com mais facilidade, conforme citado no item 2.13, tendendo a melhorar os desvios macrogeométricos e a piorar os microgeométricos. No presente caso, tal não aconteceu, face às características da pedra. Portanto, a análise isolada dos parâmetros pode levar a conclusões errôneas.

5.2 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudos sobre a influência da variação do ângulo de cruzamento na retenção de óleo em alguns dos processos em que o brunimento é empregado como por exemplo: em corpos de válvula, na usinagem de motores de combustão interna, em cilindros hidráulicos;
- Influência do cabeçote brunidor sobre o processo de brunimento comparando-se o cabeçote fixo com o cabeçote de junta universal;
- Analisar os erros de forma quando se empregam 1, 2, 3, 4,....., 20 pedras abrasivas no brunimento;
- Influência da granulometria da pedra abrasiva no processo de brunimento;
- Análise dos fluídos de corte empregados nos processos de brunimento e a sua influência no processo;
- Influência do curso e do sobrecurso no processo;

CAPÍTULO 6 - BIBLIOGRAFIA

6.1 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN SOCIETY FOR METALS - **Metals Handbook** 9ª ed. V. 16 - Ohio - Metals Park, p. 472-492.
- AMERICAN SOCIETY OF TOOL AND MANUFACTURING ENGINEERS - **TOOL ENGINEERS HANDBOOK** - New York - McGraw-Hill Book Company, 1959 1800p. section 38
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro, NBR 11094 - *Grãos Abrasivos Aplicados com Lixas; ensaios*. Rio de Janeiro, ABNT, 1987, 18p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro, NBR 6166 - *Ferramentas Abrasivas*. Rio de Janeiro, ABNT, 1961, 16p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro, NBR 6162 - *Movimentos e Relações Geométricas na Usinagem dos metais*. Rio de Janeiro, ABNT, 1989, 37p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro, NBR 6589 - *Peças em Ferro Fundido Cinzento Classificadas Conforme a Resistência à Tração*. Rio de Janeiro, ABNT, 1986, 11p.
- BRÛLÉ, RÉGIS ANDRÉ, ROSALVO T. RUFFINO. *Brunimento de Furos: Estudo para Aperfeiçoar o Processo*. **Máquinas e Metais**, julho 1989 - 4p.
- BRÛLÉ, RÉGIS ANDRÉ. *Um Desenvolvimento Teórico Preliminar Sobre Brunimento: Forças de Corte e Erros Intrínsecos ao Brunimento*, **Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de São Carlos, USP-EESC**, 1992. 112p. Dissertação (mestrado)

- Carius, Alan C. *CBN Trends in America and Europe – Product and Market Developments* General Electric Superabrasives, Worthington, Ohio, Informativo Técnico n. 98-1179, 9p.
- Castrol do Brasil, Catálogos sobre Fluidos de corte para Brunimento.
- CHANDRASSEKAR, SRIVASAN., FARRIS, THOMAS N., BULSARA, VISPI H., HUCKER, SCOTT A., HEBBAR, RAJADASA R., MANN, JAMES B. Thermal Aspects of Surface Finishing Processes. **Advances in Mechanical Engineering. International Congress.** New Delhi, Índia, p. 677 – 701, 1996
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, DIN 69100-1, *Skleifkoerper aus gebundenem Schleifmittel; Bezeichnung, Formen, Masssbuchstaben, Werkstoffe.* Berlim, DIN, 1988. 13p.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, DIN 69186, *Honsteine.* Berlim, DIN, 1982, 8p.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, DIN 8589-14 *Fertigungsverfahren Spanen; Honen; Einordnung. Unterteilung. Begriffe,* Berlim, DIN, 1985. 8p.
- FERRARESI, DINO. *Fundamentos Da Usinagem Dos Metais V.* 1 p. 512 à 563. Editora Edgard Blücher LTDA, 1986
- FLORES, G.; von SICKLE, C., *Diamond and CBN in the Honing Process in: Understanding the Basics of Honing.* Technical publication of SAE, sem numeração de páginas, 1993.
- HAASIS, G., *Characteristics of Honing in: Understanding the Basics of Honing.* Technical publication of SAE, sem numeração de páginas, 1993
- HAASIS, G., *Möglichkeiten der Optimeirung beim Honen – Technical publication of Nagel,* Nürtingen, 14 p. 1975.
- HAASIS, G., *Möglichkeiten der Prozessbeherschung beim Langhub und Kurzhubhonen. TZ für Metallbearbeitung V.* 81, p. 9-15, 1987.
- HAASIS, G.; WIDMANN, R., *Dornhonen gewinnt neue Anwendungsgebiete. Werkstatt Technik V.* 79, p. 431-435, 1979.
- HAASIS, G.; WIDMANN, R., *Neue Vorrichtungskonzept beim Langhub und Dornhonen. Werkstatt und Betrieb V.* 124 n. 6, p. 497-501, 1991.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 6384, partes 1 e 2 - *Coated Abrasives - Grain Size Analysis - Definitions - Designations - Principle of Grain Distribution.* ISO, 1983

- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 8486, *Bonded Abrasives - Grain Size Analysis - Designations - Testing of Grain Distribution*. ISO, 1984
- JUCHEN, H O. *Entwicklungsstand beim Honen von Bohrungen in: Metallischen Werkstücken mit Diamant und CBN*. VDI M8, 25p. 1987
- KLINK, U., *Fachgebiete in Jahresübersichten : Honen*. VDI-Z, V. 125, n. 14, p. 595 - 603, 1983.
- KLINK, U., *Honen*. VDI-Z, V. 128, n. 3, p. 83 – 93, 1983
- KÖNIG, W., - *Fertigungsverfahren: schleifen, honen, läppen*. 3 aufl. Düsseldorf: VDI - Verlag, Band 2, 1980
- MARVIM, R., *Understanding Single Pass, Superabrasive Bore Honing in: Understanding the Basics of Honing*. Technical publication of SAE, sem numeração de páginas, 1993.
- MICHELSKI, JACEK; PAWLUS, PAWEL. *Characterization of the Shape Of the Roughness Profile Ordinate Distribution of Honed Cylinder Surfaces*. Wear V. 161, n. 1/2, apr., p. 135-143, 1993
- MILLER, M., *Flexible Honing: A Study of Cylinder Wall Micro-Structure in: Understanding the Basics of Honing*. Technical publication of SAE, sem numeração de páginas, 1993.
- NORMA MERCEDES N 37800. *Gehonte Zylinder, Laufflächen*. Daimler-Benz Norm. Germany, 4 p., 1982
- Plateau-Honing : Modification of a Fine Finishing Process*, Nagel Technical Publication, Nürtingen, Germany
- SALJÉ, E.; LANG, G., *Moderne Schleiftechnologie und Schleifmaschinen*. Voltan Verlag Essen, 198 p., 1989
- SALJÉ, E.; von SEE, M., *Process-Optimization in Honing*. CIRP Annals 36/1/1987. 4p.
- STAUFFER, ROBERT N., *Taking Finish and Geometry One Step Furter*. Manufacturing Engineering. V. 104, n. 2, p. 31-33, feb. 1990
- STEFFENS, K.; SCHMALTS H., *Spanbildung und Trennpunktlage beim Schleifen – Industrie Anzeiger*, V. 100, n. 73, p. 49 - 50, 1978
- STEWART, M., *The Basics of Plateau Honing*. in: *Understanding the Basics of Honing*. Technical publication of SAE, sem numeração de páginas, 1993

- TÖNSHOFF, T., *Formgebung, Oberflächenrauheit und Werkstoffabtrag beim Langhubhonen*. **Dissertation (doctor Thesis)**, TH Karlsruhe, 1970
- TOOL AND MANUFACTURING ENGINEERS HANDBOOK V. III 4^a ed. chapter 16, p. *Honing* 36 a 49 e 104 a 116
- WEINGAERTNER, WALTER L.; PERES, RICARDO, CRICHIGNO, JOEL M.; PAULETTI, MAURÍCIO C. *Uma Análise das Forças que são Próprias do Bruni-mento de Peças*. **Máquinas e Metais**. p. 46 - 50, abr. 1994. 5p
- ZETTEL, H. D., *Abtragsteigerung und Formverbesserung beim Langhubhonen*. **Dissertation (doctor Thesis)**, TH Karlsruhe, 1974.

6.2 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS ESTUDADAS MAS NÃO REFERENCIADAS NESTE TRABALHO

- LIMA, NORBERTO P.; SIMON, ALEXANDRE T., *Há Variações de Processo de Máquina para Máquina que Levam a uma Usinagem Melhorada*. **Máquinas e Metais**. p. 82 – 103, julho 1995
- MALBURG, MARK C.; RAJA, JAY, *Characterization of Surface Texture Generated by Plateau Honing Process*. **CIRP Annals** V. 42/1/1993 p. 637-639
- MATIN, M. A.; RAHMAN, M. *Analysis of the Cutting Process of Cylindrical Workpiece Clamped by a Three-Jaw Chuck*. **Journal of the Engineering for Industry Transactions of the ASME** V. 110, n. 4 nov., p. 326-332, 1988
- PETERSON, D. R.; HARVILLE, M. H.; WELDON, W. F.; AT ALL. *Producing and Gauging Precision Railgun Bores*. **IEEE Transactions on Magnetics**, V. 25-n. 1- jan. 1989 - 5p
- UEDA, TAKESHI; YAMAMOTTO, AKIRA, *An Analytical Investigation of Honing Mechanism*. **Journal of the Engineering for Industry Transactions of the ASME**. V. 106, n. 3, p. 237 - 241, aug. 1984
- UEDA, TAKESHI; YAMAMOTTO, AKIRA, *Honing Conditions for Effective Use of Diamond and Cubic Boron Nitride Sticks*. **Journal of the Engineering for Industry Transactions of the ASME**. V. 109, n. 8, aug. 1987
- WEULE, H., *Improved Honing Through Process-Control*. **CIRP Annals** Vol. 37/1/1988 - p. 339 – 342
- WEULE, H., TINNERMANN, S. *Automation of the Surface Finishing in the Manufacturing of Dies and Molds*. **CIRP Annals** Vol. 39/1/1990 - p. 299 - 303

-
- NOAKER, PAULA M., *Hone Up on Production Honing*. **Manufacturing Engineering**. V. 102, n. 2, p. 57 - 60, feb. 1991
- LEE, J.; MALKIN, S., *Experimental Investigation of the Bore Honing Process*. **Journal of the Engineering for Industry Transactions of the ASME**. V. 115, n. 4, p. 406-414, nov. 1993
- TÖNSHOFF, H. K.; ASCHE, J. *Wear of Metal-Bond Diamond Tools in the Machining Stone*. **Industrial Diamond Review (IDR)**. V. 57, n. 572, p. 7-14, 1997
- FLORES, G. *Monitoring Honing Stick Wear*. **Industrial Diamond Review (IDR)**. V. 49, n. 531, p. 78-79, 1989
- NOWICKI, BOGDAN. *The New Method of Free Form Surface Honing*. **CIRP Annals**. V. 42/1/1993, p. 425-428
- BRACH, K.; PAI, D. M.; RATHERMAN, E.; SHAW, M. C. *Grinding Forces and Energy*. **Journal of the Engineering for Industry Transactions of the ASME** V. 110, n. 2, p. 25-31, nov. 1988
- TIAN, XUEFENG; KENEDY Jr., FRANCIS E. *Maximum and Average Temperatures in Sliding Contacts*. **Journal of Tribology Transactions of the ASME**. V. 116, n. 1, p. 167-174, 1997
- YAMAMOTO, AKIRA; UEDA, TAKESHI. *Cutting Law of Grain Common to Grinding and Honing*. **Bulletin of Japan Society of Precision Engineers**. V. 15, n. 2, p. 113-116, jun. 1981
- JENNINGS, MARTIN. *J & S – Honing to Perfection*. **Industrial Diamond Review (IDR)**. V. 49, n. 534, p. 195-197, 1989
- KOPP, OSWALD. *High-Frequency Honing for Improved Bore Quality*. **Industrial Diamond Review (IDR)**. V. 55, n. 566, p. 116-118, 1995