

**METODOLOGIA PARA O ESTUDO DE
INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE
RETIFICAÇÃO NA RESISTÊNCIA MECÂNICA À
FLEXÃO DE CERÂMICAS POLICRISTALINAS
DE Al_2O_3**

Geraldo da Silva



DEDALUS - Acervo - EESC



31100036430

Tese apresentada à Escola
de Engenharia de São
Carlos, da Universidade de
São Paulo, como parte dos
requisitos para obtenção do
Título de Doutor em
Engenharia Mecânica

ORIENTADOR: Prof. Dr. João Fernando Gomes de Oliveira

São Carlos
1998

Class.	TESE/EESC
Aut.	6474
Tombo	0259/98

31100036430

st 0999147

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca - EESC-USP**

S586m

Silva, Geraldo da

Metodologia para o estudo de influência das condições de retificação na resistência mecânica à flexão de cerâmicas policristalinas de Al_2O_3 / Geraldo da Silva. -- São Carlos, 1998.

Tese (Doutorado). -- Escola de Engenharia de São Carlos-Universidade de São Paulo, 1998.

Área : Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. João Fernando Gomes de Oliveira.

1. Cerâmicas avançadas. 2. Rebolo de diamante
3. Fissuras críticas. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato: Tecnólogo **GERALDO DA SILVA**

Tese defendida e aprovada em 25.09.1998
pela Comissão Julgadora:

Prof. Tit. **JOÃO FERNANDO GOMES DE OLIVEIRA (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)

Prof. Tit. **BENEDITO DE MORAES PURQUÉRIO**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)

Prof. Dr. **REGINALDO TEIXEIRA COELHO**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)

Prof. Dr. **MÁRCIO RAYMUNDO MORELLI**
(Universidade Federal de São Carlos - UFSCar)

Prof. Dr. **CARLOS ALBERTO FORTULAN**
(Universidade Federal de São Carlos - UFSCar)

Prof. Associado **ARTHUR JOSÉ VIEIRA PORTO**
Coordenador da Área de Engenharia Mecânica

JOSE CARLOS A. CINTRA
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

À Vera Lúcia, minha esposa, pelo incentivo e compreensão nos momentos de ausência.

Aos meus pais Felix e Maria Cândida, por priorizar ao longo de suas vidas, a formação dos filhos.

Ao filho Rogerio e meus irmãos, pelo apoio e confiança.

Acima de tudo à DEUS que possibilitou-me concretizar este trabalho.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. João Fernando Gomes de Oliveira pela orientação, apoio constante e permanente incentivo.

À Faculdade de Tecnologia de São Paulo por ter-me proporcionado condições temporais para a concretização deste trabalho.

Ao Eng^o. Dr. Carlos Alberto Fortulan pela grande colaboração na confecção dos corpos-de-prova e profícuas discussões a respeito dos materiais cerâmicos.

Ao Prof. Dr. Reginaldo Teixeira Coelho, pelas valiosas sugestões e aconselhamentos técnicos.

Ao Prof. Dr. Benedito de Moraes Purquério, pela disposição do laboratório e ferramental para a fabricação dos corpos-de-provas.

Aos amigos, técnicos do LAMAFE-USP, Adão Santo Bolzan, Luiz Carlos Bruno, José Carlos Rizardi, José Carlos Botelho, Ronaldo Martins de Oliveira e aos professores da Fatec-SP, Armando Iwao Shimahara e João Carlos Alves Bassola pela colaboração e orientação na confecção da matriz de compactação dos corpos-de-prova.

À empresa SENSIS São Carlos pela cessão do equipamento de emissão acústica BM-12.

Aos meus pais e irmãos pela constante corrente de incentivos que me apoiou em todos momentos da elaboração deste trabalho.

SUMÁRIO

SUMÁRIO	i
LISTA DE FIGURAS	iv
LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	xi
LISTA DE SÍMBOLOS	xii
RESUMO	xiv
ABSTRACT	xv
1. INTRODUÇÃO	1
2. CERÂMICAS AVANÇADAS	11
2.1 Aplicações	15
2.2 Propriedades das cerâmicas avançadas	20
2.2.1 Cerâmicas óxidas	22
2.2.2 Cerâmicas não óxidas	23
2.2.3 Valores característicos das cerâmicas avançadas	24
2.2.3.1 Resistência à flexão	32
2.2.3.2 Critério de Weibull	36
2.3 Manufatura dos elementos cerâmicos	40
3. ASPECTOS DA RETIFICAÇÃO	45
3.1 Definição	45
3.2 As inter-relações no processo de retificação	46
3.3 Máquinas-ferramentas para retificação de elementos cerâmicos	50
3.4 Ferramentas para retificação de materiais cerâmicos	50
3.4.1 Abrasivo	52
3.4.2 Aglomerantes	54

3.4.3	Corpo do rebolo	56
3.4.4	Especificação dos rebolos	56
3.4.5	Mecanismo de desgaste e vida dos rebolos de diamante	61
3.5	Parâmetros da retificação	63
3.5.1	Velocidade de corte do rebolo	66
3.5.2	Profundidade de corte	68
3.5.3	Forças na retificação	71
3.5.4	Geração de calor e refrigeração da região de corte	74
3.6	Integridade superficial e sub-superficial	79
4.	METODOLOGIA DE ENSAIOS	83
4.1	Objetivo do ensaio	83
4.2	Características dos corpos de prova	85
4.2.1	Fabricação dos corpos de prova	86
4.2.2	Projeto do molde de compactação	88
	a) Compactação do corpo-de-prova	89
	b) Secagem dos corpo-de-prova	91
	c) Pré-queima dos corpo-de-prova	91
	d) Sinterização dos corpo-de-prova	93
4.3	Banco de ensaio	96
4.3.1.	Retificadora	96
4.3.2.	Rebolo	98
4.3.3.	Sistema de emissão acústica	100
4.4	Desenvolvimento do ensaio	101
4.4.1	Ensaio de retificação	101
4.4.2	Ensaio de flexão	104
5.	RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO	107
5.1	Características físicas dos corpos-de-prova	107
5.1.1	Densidade dos corpos-de-prova	109

5.1.2 Avaliação superficial	112
5.2 Resultados obtidos nos testes de retificação e flexão	119
5.2.1 Visão geral dos resultados obtidos	120
5.2.2 Influência na taxa de remoção no valor de E.A.	123
5.2.3 Influência da taxa de remoção no nível RMS da emissão acústica	126
5.2.4 Inter-relação da espessura entre $E.A_{rms}$ e tensão de ruptura	129
5.3 Aplicação da metodologia na retificação de cerâmicas policristalinas de Al_2O_3	131
6. CONCLUSÕES	134
7. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	136
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	137
8.1 Referências citadas	137
8.2 Bibliografia consultada	146
9. ANEXOS	

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-01	Materiais básicos utilizados na engenharia e seus compósitos. [GROOVER (1996)]	2
Figura 1-02	Mercado internacional de cerâmica. [COELHO et al. (1996)]	7
Figura 2-01	Classificação dos materiais cerâmicos conforme a sua aplicação. [CALLISTER(1994)]	11
Figura 2-02	Componentes dos materiais cerâmicos encontrados na natureza e suas porcentagens. [GROOVER (1996)]	12
Figura 2-03	Contraste entre as cerâmicas tradicional e avançada. [MUSIKANT (1990)]	15
Figura 2-04	Funções e aplicações das cerâmicas avançadas [MUSIKANT (1990)]	17
Figura 2-05	Geometria e medições dos indentador e amostras durante a medição das durezas Knoop e Vickers. [CALLISTER (1994)]	26
Figura 2-06	Curvas de tensão-deformação no metal. [BORETIUS (1995)]	29
Figura 2-07	Curvas de tensão-deformação na cerâmica. [BORETIUS (1995)]	30
Figura 2-08	Comparação dos valores da tensão de compressão entre materiais cerâmicos e metálicos. [BORETIUS (1995)]	31
Figura 2-09	Corpo-de-prova tipo A. [ASTM C1161-90 (1991)]	32
Figura 2-10	Corpo-de-prova tipo B. [ASTM C1161-90 (1991)]	33
Figura 2-11	Corpo-de-prova tipo C. [ASTM C1161-90 (1991)]	33

Figura 2-12	Configuração do ensaio de flexão a 3 pontos. [ASTM C1161-90 (1991)]	34
Figura 2-13	Configuração do ensaio de flexão a 4 pontos. [ASTM C1161-90 (1991)]	35
Figura 2-14	Valores comparativos da resistência à flexão entre várias cerâmicas . [BORETIUS (1995)] .	36
Figura 2-15	Distribuição de Weibull [RICHERSON (1991)]	38
Figura 2-16	Fluxograma básico do processo de fabricação de peças cerâmicas [RICHERSON (1992)] ..	40
Figura 2-17	Diferentes processos de conformação de peças cerâmicas à temperatura ambiente. [OLLER(1989)]	42
Figura 2-18	Apresentação esquemática das fases da prensagem uniaxial de componentes cerâmicos. [RICHERSON (1992)]	43
Figura 2-19	Valores das pressões durante a prensagem uniaxial de componentes cerâmicos. [RICHERSON (1992)]	44
Figura 3-01	A usinagem na fabricação de elementos cerâmicos	47
Figura 3-02	Principais interações no processo de retificação. [SILVA (1992)]	48
Figura 3-03:	Fatores que influenciam os resultados da retificação.[LI & LOW (1993)]	49
Figura 3-04	Desenho esquemático de um rebolo de diamante	51
Figura 3-05	Comparação entre as durezas de vários materiais abrasivos [CLAUSNITZER (1988)]	54
Figura 3-06	Especificação completa de um rebolo diamantado. [KÖNIG (1989)]	57
Figura 3-07	Composição e designação de rebolos diamantados. [KÖNIG (1989)]	58
Figura 3-08	Esquema da dressagem do rebolo de diamante com dressador rotativo	63

Figura 3-09	Influências dos parâmetros de corte [ROSENBERGER & WARNECKE (1994)]	65
Figura 3-10	Variação da rotação do rebolo durante a retificação [INASAKI et al. (1993)]	67
Figura 3-11	Influência da velocidade de corte na força de retificação [LI et al. (1993)]	68
Figura 3-12	Influência da profundidade de penetração na rugosidade superficial da Al_2O_3 e Si_3N_4 [LI et al. (1993)]	69
Figura 3-13	Influência da profundidade de penetração e velocidade da peça na temperatura da Al_2O_3 e Si_3N_4 [LI et al. (1993)]	70
Figura 3-14	Região de contato entre o grão abrasivo e o material da peça [KONDO & TSUKUDA (1994)]	72
Figura 3-15	Força normal F_n da retificação para várias cerâmicas [LI & LOW (1991)]	73
Figura 3-16	Taxa de força F_n/F_t na retificação de várias cerâmicas [LI & LOW (1991)]	73
Figura 3-17	Distribuição da temperatura do rebolo durante a retificação de Si_3N_4 [HEBBAR et al. (1992)]	77
Figura 3-18	Distribuição da temperatura do rebolo durante a retificação de zircônia [HEBBAR et al. (1992)]	78
Figura 3-19	Temperatura da sub-superfície durante a retificação [HEBBAR et al. (1992)]	79
Figura 3-20	Amostra dupla para ensaio da integridade superficial e sub-superficial [XU & JAHANMIR (1994)]	81
Figura 4-01	Corpos-de-prova sinterizados	85
Figura 4-02	Componentes do molde de compactação dos corpos-de-prova	89
Figura 4-03	Compactação uniaxial dos corpos-de-prova	90

Figura 4-04	Curva de temperatura da pré-sinterização	93
Figura 4-05	Curva de temperatura para a sinterização	95
Figura 4-06	Rigidez estática da retificadora. [OLIVEIRA (1988)]	98
Figura 4-07	Rebolo de diamante e sua superfície de corte	99
Figura 4-08	Unidade de monitoração de Emissão Acústica SENSIS BM-12	101
Figura 4-09	Corpo-de-prova retificado com o rebaixo	103
Figura 4-10	Posicionamento do corpo-de-prova no dispositivo de ensaio à flexão	104
Figura 4-11	Ensaio de flexão na máquina INSTRON, modelo TDML	105
Figura 5-01	Deformações do corpo-de-prova sinterizado .	108
Figura 5-02	Preparação da amostra para a caracterização da estrutura	113
Figura 5-03	Microestrutura da alumina 99,5% prensada uniaxialmente com ampliação de 1000 vezes	114
Figura 5-04	Superfície retificada com condições brandas de retificação com aumento de 1000 vezes ...	114
Figura 5-05	Superfície retificada com condições severas e com aumento de 1000 vezes	115
Figura 5-06	Região deformada pela ação do grão abrasivo do rebolo com aumento de 3000 vezes	116
Figura 5-07	Fratura da amostra 29 com ampliação de 500 vezes	117
Figura 5-08	Fratura da amostra 29 com ampliação de 3000 vezes	118
Figura 5-09	Fratura do corpo-de-prova 38 retificado com condições severas e aumento de 1000 vezes .	118
Figura 5-10	Fratura do corpo-de-prova 46 retificado com condições severas e aumento de 1000 vezes	119
Figura 5-11	Característica da variação do nível de emissão acústica na retificação concordante e discordante	123

Figura 5-12	Varição da emissão acústica ao longo da retificação	124
Figura 5-13	Influência da taxa de remoção no nível de RMS da emissão acústica	126
Figura 5-14	Influência da taxa de remoção específica $Q'w$ no valor da tensão de ruptura	128
Figura 5-15	Influência da espessura máxima h_{max} no valor da tensão de ruptura	129
Figura 5-16	Influência da emissão acústica no valor da tensão de ruptura	130

LISTA DE SÍMBOLOS

C	$1/\text{mm}^3$	Número de grãos ativos por unidade de área da superfície de corte do rebolo
D_{ap}	g/cm^3	Densidade aparente
D_{th}	g/cm^3	Densidade teórica
D	mm	Diâmetro do rebolo
E	N/mm^2	Módulo de elasticidade
EA_{rms}	volts	Voltagem RMS da emissão acústica (root-mean-square)
F_n	N	Força normal de corte
F_p	-	Fator de prensagem
F_t	N	Força tangencial de corte
G	-	Relação entre o volume de material usinado e o volume desgastado do rebolo $G = Z_w / Z_s$
Hv	GPa	Dureza Vickers
K_{Ic}	$\text{MPa}^{3/2}/\text{m}^2$	Tenacidade à fratura do material sob trincas
P_f	-	Probabilidade de fratura
Kt		Quilate de diamante $Kt = 0,2 \text{ g}$
Ra	μm	Rugosidade aritmética
Rmax	μm	Rugosidade máxima
T	$^{\circ}\text{C}$	Temperatura
T_{amb}	$^{\circ}\text{C}$	Temperatura ambiente
V	mm^3	volume
V_p	mm/s	Taxa de remoção de cavaco por unidade de área de cavaco
v_s	m/s	Velocidade tangencial do rebolo

v_w	m/s	Velocidade de corte da peça
V_s	mm ³	Volume de rebolo desgastado
Q_w	mm ³ / s	Volume de cavaco removido por unidade de tempo
Q'_w	mm ³ / mm. s	Taxa específica de remoção de cavaco $Q'_w = Q_w / b$
a	μm	Profundidade de penetração do rebolo
b	mm	Largura de corte
d	mm	Diâmetro médio do grão abrasivo
heq	μm	Espessura de corte equivalente
lc	mm	Comprimento de contato entre rebolo e peça
n	rpm	Rotação do rebolo
p	Pa	Pressão
t	s	Tempo
ρ	-	Relação entre as forças tangencial e normal $\rho = F_t / F_n$
ε	%	Alongamento do material
σ_f	MPa	Tensão de ruptura à flexão
σ_{adm}	MPa	Tensão admissível

RESUMO

SILVA, G. (1998) *Metodologia para o estudo de influência das condições de retificação na resistência mecânica à flexão de cerâmicas policristalinas de Al_2O_3* . São Carlos, 1998. 154p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo – USP.

Os componentes mecânicos fabricados em cerâmicas avançadas têm feito parte de modernos equipamentos de precisão nos quais a acuracidade e resistência sejam fundamentais. Geralmente estas peças são retificadas numa das últimas fase da sua fabricação, contudo esta operação de usinagem não pode ser feita sem os devidos cuidados para evitar o surgimento de trincas na superfície e sub-superfície da peça. O presente trabalho trata de um estudo teórico e experimental sobre a fenomenologia da retificação de precisão em componentes cerâmicos, particularmente aqueles fabricados em cerâmicas policristalinas de Al_2O_3 . Apresenta uma metodologia, onde são propostos ensaios laboratoriais, nos quais o objetivo geral é destacar a influência dos parâmetros e retificação nas propriedades mecânicas. Utiliza a emissão acústica e o ensaio de flexão como ferramentas de medidas, discute os resultados obtidos e propõe parâmetros que permitem a escolha de uma condição de retificação, que não produza fissuras críticas ou outros prejuízos à integridade superficial e sub-superficial nos componentes produzidos em cerâmicas avançadas.

Palavras chaves: material cerâmico, cerâmicas avançadas, retificação de cerâmicas avançadas, emissão acústica, fissuras críticas

ABSTRACT

SILVA, G. (1998) *Methodology for study of the influence of the grinding conditions on the flexural strength in the ceramic polycrystalline of Al_2O_3 .* São Carlos, 1998. 154p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo – USP.

The mechanical components manufactured with advanced ceramic have been making part of modern precision equipment's where accuracy and resistance are fundamental. These workpieces are generally ground in the last phase of its manufacturing sequence. However, this machining operation must be made taking care to avoid the appearance of cracks in the surface and sub-surface of the workpiece. The present work is about a theoretical and experimental study on the phenomenology of the precision grinding of ceramic components, particularly those manufactured in Al_2O_3 . It presents a laboratory methodology where tests, are proposed whose objective of highlighting the influence of the grinding parameters in the resistance of the ground workpieces. It uses acoustic emission and bend test as measuring parameters to discuss the results and to propose conditions that allow a safe grinding, that doesn't produce cracks or other damages to the surface and sub-surface integrity of workpieces produced with advanced ceramic.

Key words: ceramic material, advanced ceramic, grinding of advanced ceramic, acoustic emission, critical cracks.

1. INTRODUÇÃO

As tendências mais recentes na fabricação dos componentes de máquinas e instrumentos, principalmente aqueles utilizados em equipamentos que oferecem alto desempenho e qualidade, tem exigido o desenvolvimento e aplicação de novos materiais com características peculiares nos campos da ótica, química, eletrônica, biologia, engenharia nuclear, engenharia térmica, e mecânica.

Na literatura observamos que a maioria dos materiais utilizados na engenharia são divididos em três categorias: Metais, Cerâmicas e Polímeros. Estes materiais são diferentes em suas propriedades químicas, mecânicas e físicas, contudo da mixagem de quaisquer destes materiais básicos são produzidos os materiais compósitos com características heterogêneas de acordo com os materiais básicos. A figura 1-01, mostra os três grupos de materiais básicos e o inter-relacionamento entre eles. [GROOVER (1996)]

A observação da figura 1-01 permite ainda classificar os materiais conforme as características principais do seguinte modo: geralmente os metais são relativamente tenazes, possuem boa resistência, pesados e pouco rígidos; os polímeros são leves, pouco resistentes e estáveis com a variação da temperatura; os materiais cerâmicos são rígidos e de grande fragilidade em relação aos aços; os compósitos são formados pela combinação de materiais distintos,

destacam-se pela concentração conjunta das propriedades importantes dos materiais que os compõem e pela redução de suas desvantagens intrínsecas, geralmente são leves, resistentes e rígidos, podendo apresentar durezas consideráveis. ASHBY (1992), observa que os compósitos podem associar as propriedades atrativas de dois ou mais materiais envolvidos, onde são destacados os metais, cerâmicas, vidros, elastômeros, polímeros e as inter-relações de seus compósitos.

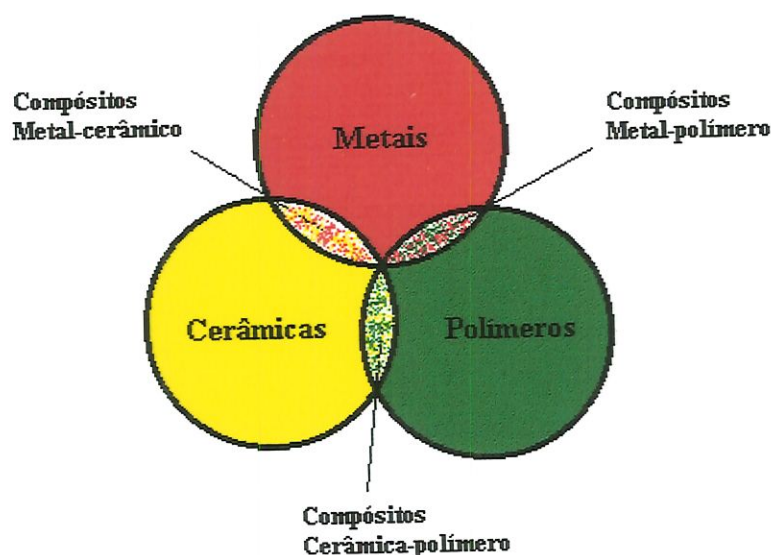


Figura 1-01: Materiais básicos utilizados na engenharia e seus compósitos. [GROOVER(1996)]

A engenharia tradicional considera os metais como a mais importante classe de materiais, no entanto, é muito interessante notar que os materiais cerâmicos tem sido usado em escala crescente nos últimos anos. A Associação Brasileira de Cerâmica define como materiais cerâmicos ou cerâmicas a “todos os materiais de emprego

em engenharia ou produtos químicos inorgânicos, excetuados os metais e suas ligas, que são utilizáveis geralmente pelo tratamento em temperaturas elevadas”. Assim, nesta categoria de materiais estão incluídos os elementos fabricados com argila (tijolos, telhas, vasos e louça de porcelana), vidros, cimento, carbeto de tungstênio e nitreto cúbico de boro.

A importância dos materiais cerâmicos está baseada na abundância dos seus componentes na natureza, propriedades mecânicas e físicas, estas, completamente distintas das propriedades e características básicas dos metais e polímeros.

O assunto voltado aos novos materiais e principalmente a cerâmica, se reveste de tanta importância no cenário tecnológico que o Ministério de Ciência e Tecnologia com o apoio do Ministério de Educação e Cultura (MEC) designou, em meados de 1988, uma comissão com a finalidade de desenvolver um programa denominado “O desafio dos novos materiais”, [CNPq (1988)]. O programa definia dentre outros aspectos importantes, a ampliação dos recursos humanos, consolidação de infra-estrutura de pesquisa e desenvolvimento nas várias áreas de conhecimento do quartzo, silício, ligas metálicas especiais, polímeros especiais, compósitos e cerâmicas avançadas. Considerando cada um dos novos materiais estabelecidos, o programa foi dividido em vários sub-programas:

- a) Estudos e planejamento;*
- b) Formação de recursos humanos;*
- c) Estabelecimento da infra-estrutura específica;*
- d) Pesquisas e desenvolvimento.*

Na literatura, geralmente encontramos duas categorias que distinguem as cerâmicas avançadas das tradicionais. **BOSCHI (1996)**, explica que a diferença fundamental entre as avançadas e tradicionais é o grau de exigência de qualidade das primeiras, em confiabilidade, conformidade e na produção das peças. Na manufatura das cerâmicas avançadas são aplicadas tecnologias, técnicas e teorias que permitem uma adequada caracterização, cercadas de mais cuidados, controles rigorosos do processo e matéria prima com maior grau de pureza. Assim estas cerâmicas possuem características mais confiáveis.

As inovações geralmente são precedidas e/ou fundamentadas em outras conforme pode ser observado na tabela I-01, onde é destacada a seqüência de surgimento de tecnologias que têm alguma relação com a cerâmica avançada.

O desenvolvimento da cerâmica avançada, embora sem esta denominação, teve sua ascensão em meados de 1930, sendo então utilizadas na fabricação de resistores elétricos e velas de ignição para automóveis. O destaque como cerâmica especial, ocorreu ao final dos anos 50, quando especialistas em materiais apresentaram em seminários e congressos diversos nomes: Cerâmica de engenharia, Cerâmica Fina, Cerâmica de alto desempenho e Cerâmicas avançadas. [ANUARIO (1989)]

Na tabela I-01, estão apresentadas as datas mais significativas referentes a fabricação de elementos cerâmicos e outros importantes desenvolvimentos. Pode-se observar nesta tabela, que as cerâmicas avançadas tiveram a marca de início de desenvolvimento por volta de 1920 o que demanda aproximadamente setenta anos de utilização deste importante material. Dentre os

materiais citados na tabela, a cerâmica avançada, assunto tratado neste trabalho, figura de modo importante no cenário econômico-industrial tanto nacionalmente como internacionalmente.

Tabela I-01: Dados históricos referentes à cerâmica e outros importantes desenvolvimentos. [LIMA (1996)]

5000 a 3000 a.C.	Fabricação de vidro pelos Egípcios
3500 a.C.	Início da utilização da roda.
1900 a.C.	Lubrificação de rolos e trilhos de madeira para o transporte de monumentos.
1200 a.C.	Surgimento do primeiro vidro para óculos.
40 d.C.	Fragmentos de um rolamento são encontrados no lago Nimi
1452 – 1519	Leonardo da Vinci aborda cientificamente o fenômeno atrito.
1676	Desenvolvimento do vidro cristalino com chumbo na Inglaterra.
1684	Robert Hooke combina eixos de aço com buchas de metais para mancais de rodas.
1699	Amonton postula a lei do atrito.
1780	Coulumb enuncia a terceira lei do atrito
1787 - 1829	Desenvolvimento do vidro óptico por Joseph Fraunhofer.
1845	Fabricação de vidros laminados.
1851 - 1935	Otto Schott fundamenta a moderna tecnologia do vidro.
1883 - 1886	T.Beauchamp e O. Reynolds aplicam a lubrificação hidrodinâmica.
1920 - 1930	Início do desenvolvimento da oxi-cerâmica.
1930 - 1940	Surgimento da cerâmica e cermets para usinagem.
1940 - 1950	Surgimento de cerâmicas para aplicações magnéticas (ferrite), capacitores cerâmicos e materiais piezoelétricos.
1950 - 1960	Surgimento da cerâmica nuclear, vidro cerâmico, diamante sintético e nitreto cúbico de boro.
1960 - 1970	Surgimento da cerâmica para eletrólise, sensores de oxigênio, biocerâmicas, novos materiais à base de carbono (pirocarbono) e vidros carbonados.
1970 - 1980	Desenvolvimento de cerâmica para eletrólise em baterias de alta potência, materiais de alta densidade sintetizados à base de SiC e Si ₃ N ₄ cerâmica com maior tenacidade; materiais cerâmicos para turbinas e motores.
1986 - 1987	Desenvolvimento da cerâmica supercondutora

Esta importância pode ser identificada pelo volume de recursos movimentados e aplicados nas áreas específicas da área da manufatura e aplicação deste material. Em 1985, o mercado mundial de cerâmicas avançadas foi avaliado num total de US\$ 5,2 bilhões onde foram destinados US\$ 1,7 bilhões para materiais e substratos para microeletrônica e US\$ 1 bilhão na fabricação de capacitores. [CNPq (1988)]

A produção internacional de cerâmicas no ano de 1993, permitiu um montante de vendas na ordem de US\$ 90,3 bilhões, deste total as cerâmicas avançadas participam com US\$ 18,3 bilhões significando o segundo lugar em valor ficando abaixo da indústria vidreira com cerca de 53% do total, [COELHO et al. (1996)].

Na figura 1-02 são mostrados os percentuais de cada setor da indústria internacional onde são destacadas a produção de vidros, argila estrutural, refratários, vidrados, cerâmica branca e cerâmica avançada.

Conforme NEVES (1991), no Brasil, estimou-se que por volta do ano 2000, o mercado para cerâmicas avançadas seria de US\$ 1,2 bilhão, porém tal previsão parece muito otimista conforme o desenvolvimento que pode ser visto na tabela I-02, nesta são feitas comparações entre os setores de cerâmicas para revestimento e avançadas. Nos Estados Unidos, o mercado das cerâmicas estruturais avançadas movimentou em 1992 recursos financeiros da ordem de US\$ 385 milhões com projeção de crescimento a 13% ao ano, o que significa a contabilização de US\$ 1 bilhão no ano 2000. [ABRAHAM (1993)]

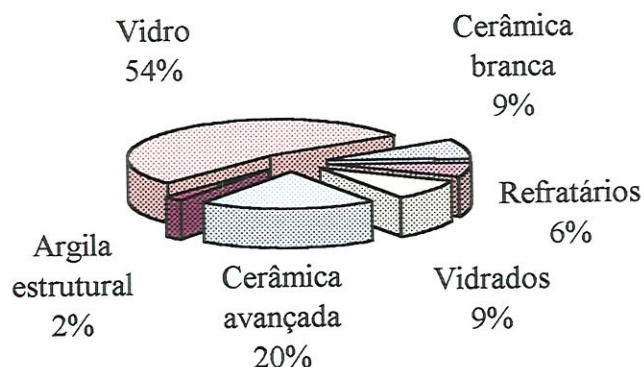


Figura 1-02: Mercado Internacional de cerâmica.
[COELHO et al. (1996)].

A importância das cerâmicas avançadas no Brasil, é idêntica a do restante dos países tecnologicamente mais desenvolvidos, isto é explicado pelo fato de vários equipamentos e instrumentos que utilizam elementos cerâmicos, fazem parte ou são fabricados em nosso parque industrial. Neste particular, entendemos com vital importância absorver e desenvolver os conhecimentos relativos aos aspectos da produção dos elementos de precisão fabricados em cerâmicas avançadas, principalmente o processo de por retificação que é em muitos casos, a última operação de usinagem.

A ampliação do número de elementos fabricados a partir das cerâmicas avançadas que exigem usinagem, tem sido determinada pelos competitivos custos de fabricação e atendimento das características superficiais impostas no projeto, onde a geração de trincas e tensão residual na camada superficial da peça em função da retificação devem ser evitadas.

Tabela I-02: Fatores econômicos dos setores fabricantes de Cerâmica. [NEVES (1991)]

ÁREA	FUNÇÃO/ SEGMENTO	1989		1994		ESTIMATIVA DE CRESCIMENTO
		US\$ x 10 ⁶	%	US\$ x 10 ⁶	%	% a.a.
Cerâmicas eletro- eletrônicas	Isolantes	67,6	27,2	90,5	14,5	6,0
	Ferroelétricos	28,0	11,2	58,8	9,4	16,0
	Semi-condutores	17,0	6,8	63,1	10,1	30,0
Cerâmicas magnéticas	Ferrites duras	7,5	3,0	10,0	1,6	6,0
	Ferrites moles	15,0	6,0	26,4	4,2	12,0
Cerâmicas Óticas	Fibras óticas	25,0	10,0	89,3	14,3	19,0
	Tubos de Al ₂ O ₃ translúcida	8,5	3,4	19,4	3,1	18,0
	Outras ¹	10,0	4,0	14,7	2,3	8,0
Cerâmicas mecânicas	Superabrasivos ²	27,3	11,0	67,9	10,8	20,0
	Estruturais	10,0	8,0	22,1	3,5	2,0
Cerâmicas nucleares	Elementos combustíveis	3,5	1,4	15,8	2,5	35,0
Outros setores	Catalisadores automotivos ^e	20,0	8,0	110,0	17,6	
	Outros ³			38,0	6,1	14,0
TOTAL		249,4	100	626,0	100	14,2

1 - Componentes para ópticas avançadas (Laser, Filtros, etc.);

2 - Não considerados o Si₃N₄;

3 - Catalisadores, sensores, vitro-cerâmicas, etc.;

Obs.: Entre as cerâmicas isolantes, estão incluídas as velas de ignição (porcelana com alto teor de alumina) responsável no Brasil, por cerca de 81% da produção do setor.

O comportamento frágil da cerâmica geralmente é uma propriedade indesejada para a retificação, pois forma cavacos quebradiços e provoca trincas que ocupam um volume maior do que aquele dedicado teoricamente à remoção de material por um dado grão abrasivo. As indesejáveis trincas, que geralmente ocorrem devido a fragilidade dos materiais cerâmicos, podem causar sérios

desastres em razão de sua propagação e conseqüente quebra da peça durante a sua utilização.

HENNIG (1990), apresenta a retificação como uma das bases para o crescente progresso tecnológico, este processo de fabricação direciona atenção à necessidade da produção de instrumentos e equipamentos com grande acuracidade. As soluções das dificuldades na retificação de elementos de precisão, dentro de pequenos intervalos de tolerâncias e atendendo simultaneamente à qualidade preestabelecida pelo projeto do componente, determinam que este processo de usinagem deva ser constantemente estudado e melhorado, pois ele pode ser caracterizado como agente de desenvolvimento da tecnologia, principalmente pelo fato de ser em muitos casos, o responsável pela qualidade final de componentes mecânicos.

O presente trabalho tem como objetivo propor uma metodologia para analisar a influência da retificação nas propriedades mecânicas das peças fabricadas com cerâmicas avançadas. Fundamentado no objetivo principal, são estabelecidos parâmetros que devem auxiliar o desenvolvimento de uma operação de retificação na qual a indução de fissuras na superfície ou sub-superfície da peça sejam minimizadas.

Neste trabalho, o assunto abordado é desenvolvido em sete capítulos, onde são enfocadas áreas de conhecimento relativos às cerâmicas avançadas, dos quais destacamos a seguir, seus principais objetivos.

O capítulo 2, **Cerâmicas avançadas**, apresenta uma atualização das informações sobre cerâmicas avançadas, destaca as

principais considerações sobre a manufatura destes materiais, suas propriedades e aplicações no campo da engenharia mecânica;

O capítulo 3, **Aspectos da retificação**, apresenta uma revisão bibliográfica, conforme sugere o título, onde são destacadas as considerações propostas por especialistas, no sentido de resolver problemas inerentes à retificação de elementos cerâmicos;

O capítulo 4, **Metodologia de ensaios**, apresenta a proposta de um sistema para avaliar as alterações da resistência dos elementos fabricados em cerâmicas avançadas após a sua retificação, em função das microfissuras ocorridas na superfície e sub-superfície das peças. Descreve em detalhes o desenvolvimento do ensaio experimental, seus objetivos, dispositivos, equipamentos e ferramental utilizados.

O capítulo 5, **Resultados obtidos e discussão**, apresenta os resultados dos ensaios e comenta a situação em que foram obtidos. Os valores são ainda analisados através de tabelas, gráficos e respectivas tendências fenomenológicas.

O capítulo 6 denominado **Conclusões**, apresenta as considerações finais sobre o presente trabalho, compara os resultados dos ensaios com os objetivos iniciais, apresenta propostas de futuros estudos e recomenda as aplicações práticas dos resultados obtidos no presente trabalho.

No capítulo 7, **Propostas para trabalhos futuros**, são apresentados temas para o desenvolvimento de trabalhos que possam ampliar o conhecimento na área da retificação de peças fabricadas em cerâmicas avançadas.

2. CERÂMICAS AVANÇADAS

Os produtos fabricados com materiais cerâmicos, tem acompanhado o desenvolvimento da humanidade desde os mais remotos tempos. Dentre estes estão os manufaturados em vidro, argila, refratários, abrasivos, cermets e cerâmicas avançadas, [CALLISTER(1994)] . A figura 2-01 apresenta o fluxograma que indica a matéria prima utilizada e o conseqüente produto.

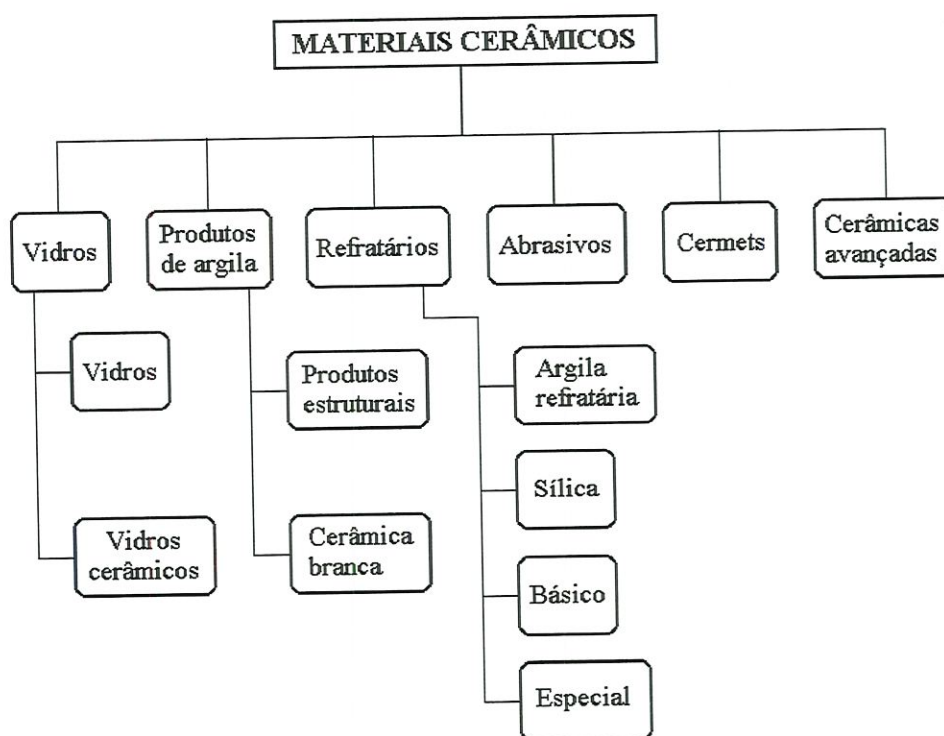


Figura 2-01: Classificação dos materiais cerâmicos conforme a sua aplicação. [CALLISTER(1994)]

Parte da grande importância dos materiais cerâmicos está baseada na abundância dos seus componentes na natureza. Apesar das características, propriedades mecânicas e físicas destes materiais serem distintas em relação aos metais, átomos deste material podem fazer parte das cerâmicas. A figura 2-02, apresenta os principais componentes da cerâmica encontrados na crosta terrestre.

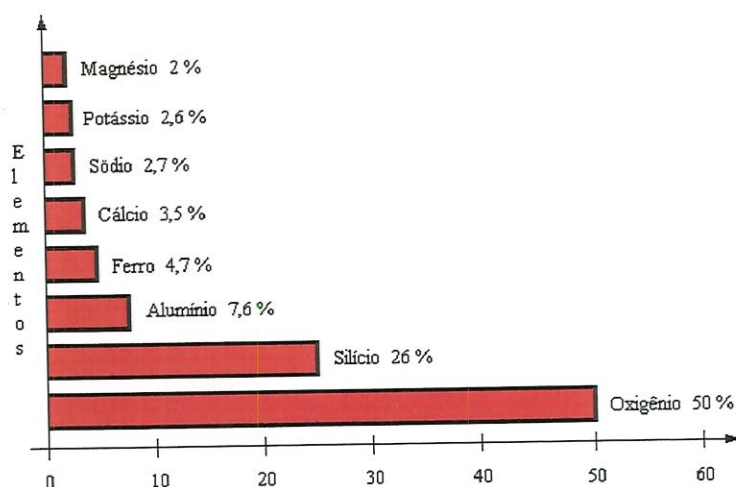


Figura 2-02: Componentes dos materiais cerâmicos encontrados na natureza e suas porcentagens. [GROOVER (1996)]

Os materiais cerâmicos são utilizados na fabricação de muitos dos produtos aplicados tanto no âmbito industrial como domiciliar. Dentre vários exemplos, destaca-se a sílica, ou dióxido de silício (SiO_2) que é o produto mais utilizado na produção de vidros; a alumina ou óxido de alumínio (Al_2O_3) usados na fabricação de abrasivos e o silicato de hidróxido de alumínio [$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$], conhecido por caulinila ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) que é a principal fase da argila.

Os produtos e derivados dos materiais cerâmicos sempre estiveram ligados ao desenvolvimento da humanidade. A literatura de forma geral, divide os produtos cerâmicos em cerâmica tradicional e cerâmica avançada. A cerâmica tradicional engloba os tijolos, telhas, pisos cerâmicos, tubos, produtos refratários, louça sanitária, louça de mesa, porcelana, vidro e minérios não-metálicos beneficiados. A cerâmica avançada geralmente é manufaturada com matérias prima de qualidade controlada e adequadas à um produto final específico, [MURRAY (1993)] . Na tabela II-01 são apresentadas as diferenças entre a cerâmica tradicional e avançada onde são consideradas as matérias primas utilizadas, os processos de fabricação e respectivos produtos.

Tabela II-01: Distinção entre a cerâmica tradicional e avançada. [MURRAY (1993)]

	Cerâmica Tradicional	Cerâmica Avançada
Matéria prima	Argila Sílica Feldspato Caulim	Al_2O_3 Si_3N_4 ZrO_2 ; B_4C SiC; MgO $BaTiO_3$
Método de processamento	Colagem de barbotina Cozimento Cementação Outros	Colagem de barbotina Injeção Prensagem Prensagem à quente
Produtos	Louça branca Tijolos Azulejos Ladrilhos Vidros Abrasivos Isoladores	Isoladoras Supercondutoras Piezelétricas Magnéticas Eletrônicas Estruturais Biológicas

A figura 2-03 é uma charge proposta por MUSIKANT (1990), ela identifica as principais diferenças entre a cerâmica tradicional e a cerâmica avançada. A relativa simplicidade do processamento mostrada no lado esquerdo, cerâmica tradicional, é suplantada pela complexidade exigida na manufatura dos produtos fabricados em cerâmicas avançadas, estes, representados pelo foguete, reator nuclear, turbina, implantes biológicos e automóvel. A exigência nestes casos, é acompanhada do adequado controle da estrutura do material que pode ser feita apenas por meio de sofisticados instrumentos como o microscópio eletrônico, bem diferente do exigido para as cerâmicas tradicionais onde, de forma generalizada, faz-se apenas o controle da existência de bolhas e trincas no componente, necessitando portanto apenas o microscópio óptico.

CASARINI (1993), afirma que as cerâmicas avançadas serão amplamente utilizadas no século 21, porém na atualidade já podem ser encontradas em muitas aplicações nos vários campos da engenharia mecânica. Devido as suas peculiares características, ela continuará sendo apontada como um dos principais materiais a ser utilizado nos equipamentos de precisão. Estes materiais apresentam boa qualidade de desempenho nas áreas de aplicação tecnológica como cerâmicas estruturais, telecomunicações, biotecnologia e eletrônica. PASCUCCI et al. (1993), observa que a obtenção dos produtos de cerâmicas avançada é feito com cuidadoso arranjo físico e químico dos componentes, isto permite a formação de uma microestrutura específica através de um processo de fabricação controlado e, devido à sua dedicada eficiência são aplicadas em funções variadas como na eletrônica, biotecnologia, telecomunicação, estrutural e nuclear.

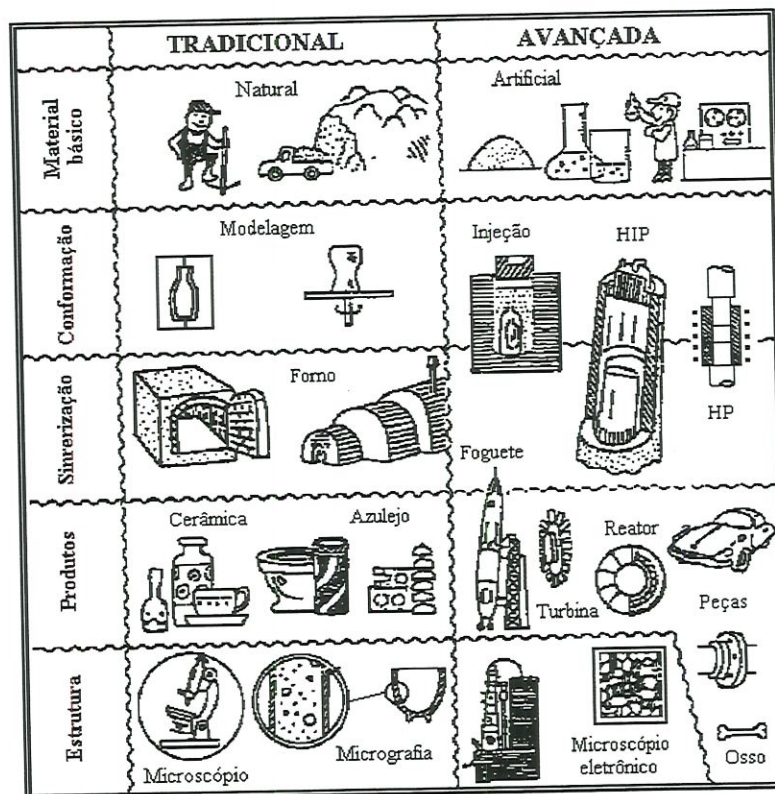


Figura 2-03: Contraste entre as cerâmicas tradicional e avançada. [MUSIKANT (1990)]

2.1 Aplicações

As aplicações dos materiais denominados cerâmicas avançadas podem ser encontradas na fabricação de elementos que compõem computadores, satélites, motores automotivos de combustão interna, turbinas, supercondutores e impressoras dentre outras aplicações. LACAVA (1988), afirma que as cerâmicas são matérias-primas por excelência dos motores e componentes mecânicos dos anos 90, pois elas ganharam resistência à impactos através da

mixagem com outras cerâmicas, principalmente o composto Al_2O_3 – ZrO_2 e com metais. A indústria japonesa fabricante de automóveis, tem buscado ampliar o número de componentes cerâmicos nos motores de combustão interna desde os idos de 1950. Na atualidade, peças como rotores, sensores, rolamentos, parte de pistões, mancais e guia de válvulas tem sido largamente aplicadas no motores e, outras partes como as válvulas de admissão e escape aguardam ainda o custo adequado e ou desenvolvimento tecnológico para que sejam amplamente utilizadas. [TAGUCHI (1987); WADA (1988); TIMONEY (1992); MATSUHIRO & MIWA (1994); KLOCKE et al. (1995)]

MUSIKANT (1990) & HERZOGENRATH (1994), observaram que as cerâmicas avançadas podem ocupar diversas funções dirigidas a um grande número de aplicações específicas como elétrica, magnética, química, biológica, óptica, nuclear, térmica e mecânica. O gráfico apresentado na figura 2-04, mostra as funções e aplicações das cerâmicas avançadas. Destas aplicações destaca-se a função mecânica que identifica a cerâmica avançada estrutural, que ressalta propriedades como a alta resistência à compressão, resistência à abrasão, baixa expansão térmica e capacidade de lubrificação. Devido suas propriedades, a cerâmica avançada pode ser utilizada como abrasivo, material para ferramentas, componentes de turbinas, motores em geral e equipamentos de precisão.

TROSSINGEN (1989), comenta que a melhoria da qualidade produtiva tem permitido maior aplicação das cerâmicas policristalinas de Al_2O_3 , os desvios de forma e dimensão dos componentes podem ser menores que $1,0 \mu\text{m}$. Nas últimas décadas, os sistemas produtivos só permitiam a fabricação de peças com o comprimento máximo de aproximadamente 300 mm e, em menos de

uma década tornou-se possível fabricar componentes de Al_2O_3 com 2.500 mm de comprimento.

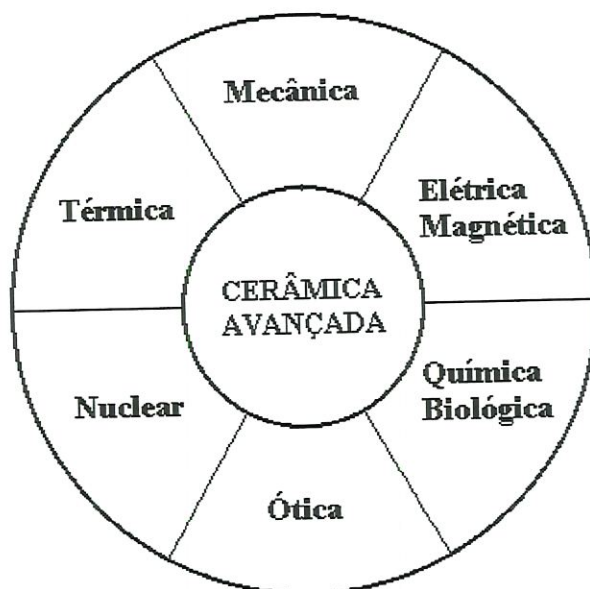


Figura 2-04: Funções e aplicações das cerâmicas avançadas. [MUSIKANT (1990)]

A adequação das propriedades químicas estruturais nas cerâmicas, possibilita a produção de materiais com aplicação específica nas mais diversas áreas. No início dos anos noventa, o número de cerâmicas avançadas disponíveis já era relativamente grande, na tabela II-02, são apresentadas as principais cerâmicas, em torno de setenta, classificadas conforme as suas aplicações, indica também as propriedades e a composição química de cada grupo desses materiais.

TABELA II-02: Funções e aplicações das cerâmicas avançadas.
[MUSIKANT (1990)]

CERÂMICAS AVANÇADAS			
FUNÇÕES	PROPRIEDADES	APLICAÇÕES	MATERIAIS
Química Biológica	Biocompatibilidade	Dentes e ossos artificiais	SiO ₂ Zeólita MgO
		Trocadores de calor	BaTiO ₃ CaTiO ₃ SrTiO ₃
	Capacidade de absorção	Catalizadores transportadores	BaS C, S TiB ₂
	Resistência à corrosão	Equipamentos químicos	ZrB ₂ ZnO SnO ₂ Al ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃ Apatita
Ótica	Condensação ótica	Diodo emissor de luz	ZnS CdS
		Tubos fluorescentes	TiO ₂ ZrO ₂
	Translucidez	Cabos de comunicação ótica	Y ₂ O ₃ ThO ₂ SiO ₂
		Porcelana translúcida	Y ₂ O ₃ MgO Al ₂ O ₃
Nuclear	Condução de luz	Diodo a laser	Al ₂ O ₃
	Resistência à altas temperaturas	Elemento combustível	UO ₂ UC US
	Resistência à radiação	Material encamisante	UO ₂ - PuO ₂ C
	Refratariedade	Revestimento de reatores	SiC B ₄ C Al ₂ O ₃ B, O
	Resistência à corrosão	Material de controle	

TABELA II-02: Funções e aplicações das cerâmicas avançadas
continuação

CERÂMICAS AVANÇADAS			
FUNÇÕES	PROPRIEDADES	APLICAÇÕES	MATERIAIS
Térmica	Condutividade térmica	Materiais para escoamento de calor em componentes eletrônicos	SiC
	Isolação térmica		TiC
	Absorção de calor	Revestimentos de fornos industriais para altas temperaturas	B ₄ C
	Refrateriedade		TiB ₂
		Eletrodos	Si ₃ N ₄
Mecânica	Alta resistência	Abrasivos	TiB ₂
	Resistência à abrasão	Peças de instrumentos de precisão	BaS
	Baixa expansão térmica		C, S
	Capacidade de lubrificação	Peças de motores	B, O
			ZnO
			Al ₂ O ₃
Elétrica Magnética	Magnetismo	Elementos de memória	Ferrita
	Dieletricidade	Sensores	PZT
	Piezo-eletricidade	Componentes supercondutores	SiC
	Semi-condutividade		BaTiO ₃
	Super-condutividade	Filtros piezo-elétrico	CaTiO ₃
	Isolação elétrica		Substratos de circuitos integrados
			B ₄ C
			TiC
			Al ₂ O ₃
			Y - BaCu - O
			Bi - Sr - Ca - Cu - O
			Ti - Ca - Ba - Cu - O

2.2 Propriedades das cerâmicas avançadas

As propriedades mecânicas dos materiais reservam características importantes tanto na produção como nos componentes fabricados em cerâmica. As cerâmicas avançadas apresentam-se de forma distinta em relação aos metais, quando são comparados, verifica-se em geral que as cerâmicas caracterizam-se por elevada dureza aliada a alta resistência à compressão, menor deformação térmica, menor desgaste e alta fragilidade.

A característica aleatória e grande variação da resistência à fratura é evidente entre componentes cerâmicos fabricados num mesmo lote. Esta particularidade gera relativas dificuldades na manufatura dos elementos, pois conforme **ZANOTTO & MIGLIORE (1991)**, os valores das resistências dos componentes podem variar de forma que o valor máximo pode alcançar o dobro do mínimo.

Em geral, as cerâmicas apresentam baixa tenacidade, pequena resistência ao impacto e não apresentam deformação plástica considerável, além disso, os materiais cerâmicos também podem sofrer a fadiga estática que diminui a resistência à fratura ao longo do tempo sob aplicação de carga constante. [**ZANOTTO & MIGLIORE (1991)**]

Esses atributos dentre outros, direciona suas aplicações à áreas específicas e garante ótimos desempenhos das peças de acordo com a classificação. **HAUSNER & LANDFERMANN (1988)** em seus estudos, apresentam o relacionamento e tendência qualitativa entre as principais propriedades dos metais e cerâmicas, na tabela II-03 são indicadas as relações entre a dureza, deformação térmica,

ductilidade, densidade, condutividade térmica, condutividade elétrica, estabilidade à corrosão, estabilidade à alta temperatura e resistência ao desgaste.

TABELA II-03: Comparação entre as principais propriedades dos metais e cerâmicas. [HAUSNER & LANDFERMANN (1988)]

CARACTERÍSTICAS	METAL	CERÂMICAS
Dureza	↓	↑
Deformação térmica	↑	↓
Ductilidade	↑	↓
Densidade	↑	↓
Condutividade térmica	↑	↓
Condutividade elétrica	↑	↓
Estabilidade à corrosão	↓	↑
Estabilidade à alta temperatura	↓	↑
Resistência ao desgaste	↓	↑

Obs.: Indicação de tendência à valores altos (↑) e baixos (↓) .

Os materiais cerâmicos podem ser classificados em silicosos, óxidos e não-óxidos, a tabela II-04 mostra esta classificação para cerâmicas avançadas conforme as similaridades químicas. A sua seleção é função das propriedades características necessárias a cada elemento fabricado com este material.

TABELA II-04: Materiais cerâmicos classificados conforme as suas similiaridades químicas. [LIMA (1996)]

CERÂMICAS		
SILICOSAS	ÓXIDAS	NÃO-ÓXIDAS
Mg - Silicato	óxidos puros	materiais duros não metálicos
Al - Silicato	Al ₂ O ₃ ; ZrO ₂	Si ₃ N ₄ ; SiC; SiSiC
K - Al - silicato	MgO; BeO	B ₄ C; B ₄ Si
Mg - Al - silicato	TiO ₂ ; ZnO; ThO ₂	BN cúbico
Na - Al - silicato	Y ₂ O ₃ ; Fe ₃ O ₄	materiais metálicos duros
Li - Al - silicato	óxidos ligados:	MoSi ₂
Vidro cerâmico	BaTiO ₃	TiN
	Pb (Ti, Zr) O ₄	TiC
	Al ₂ TiO ₅ ;	AlN
	MnFe ₂ O ₄	

2.2.1 Cerâmicas óxidas

As cerâmicas óxidas, também denominadas por oxi-cerâmicas possuem interessantes características de comportamento em relação à temperatura. Dentre as oxi-cerâmicas, a zircônia (ZrO₂) e a alumina (Al₂O₃) são as mais importantes, principalmente pelo fato de serem aplicadas na conformação de peças para as áreas de

transporte, máquinas e equipamentos. HEITMANN (1991) afirma que dentre as vinte principais cerâmicas avançadas, a alumina tem sido a mais utilizada e ocupa 80% do mercado destes materiais.

A alumina é um composto inorgânico do tipo $A_s X_r$, possui uma estrutura de arranjo cristalino hexagonal compacto como exemplifica o corindon Al_2O_3 , podendo assumir também um arranjo cúbico de face centrada. A zircônia ZrO_2 é do tipo ligação iônica AX e possui uma estrutura hexagonal compacta.

A fragilidade das cerâmicas óxidas é relativamente alta, quando elas são solicitadas mecanicamente, praticamente não permite deformações plásticas além de dificultar a acomodação das tensões internas.

2.2.2 Cerâmicas não-óxidas

As cerâmicas não-óxidas desenvolvidas em fins dos anos 70 geralmente são aplicadas nos casos em que são exigidas altas solicitações de dureza e abrasão. Estas cerâmicas permitem maior acomodação das tensões em relação aquela apresentada pelas cerâmicas óxidas. O termo cerâmicas não-óxidas compreende as cerâmicas a base de nitreto de silício (Si_3N_4), carбето de boro (B_4C), nitreto de boro (BN) e SIALON (Si, Al, O, N). O nitreto de silício é oferecido nas duas formas “ α ” e “ β ”, as quais indicam diferenciações na dureza e na estrutura dos materiais. [WILLIANN(1988)]

O nitreto de silício $\text{Si}_3\text{N}_4 - \alpha$ é mais duro que o $\text{Si}_3\text{N}_4 - \beta'$, e ambas as formas são hexagonais, mas com matrizes ligeiramente diferentes.

O SIALON tem estrutura cristalográfica igual e propriedades físicas similares ao $\text{Si}_3\text{N}_4 - \beta'$, contudo possui melhores propriedades químicas devido a composição. Os pós nitreto de silício (Si_3N_4), AlN , óxido de alumínio (Al_2O_3) e Y_2O_3 são os materiais básicos para a fabricação do SIALON.

2.2.3 Valores característicos das cerâmicas avançadas

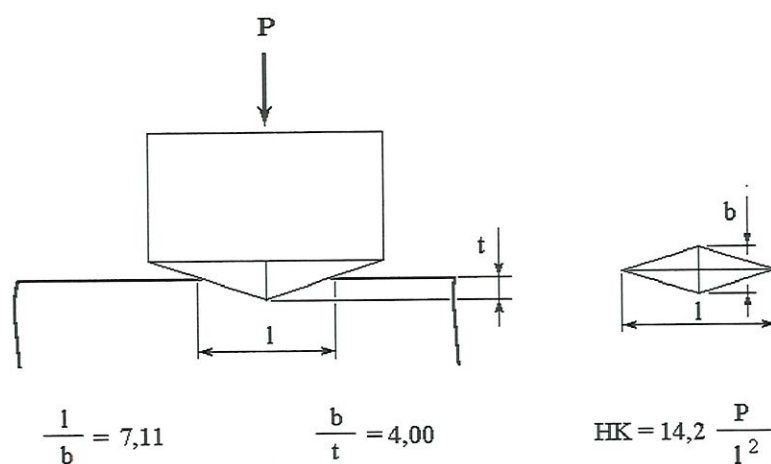
Dentre os materiais sintéticos, verifica-se de forma genérica, que os materiais de maior dureza estão enquadrados na categoria de compostos cerâmicos. Entre eles estão a alumina, o nitreto cúbico de boro, o diamante industrial. A dureza é uma característica importante nestes materiais, contudo deve-se também considerar a tenacidade ou fragilidade visto que estes materiais são freqüentemente usados como abrasivos. Considerando os materiais abrasivos, NUSSBAUM (1989) observa que os conceitos de tenacidade e fragilidade são opostos, enquanto a tenacidade representa a capacidade dos grãos abrasivos suportar as tensões provocadas pelo impacto na peça, sem que haja quebras, ao contrário, a fragilidade corresponde à facilidade de romper os abrasivos sob uma determinada tensão de impacto.

Embora o termo dureza possua diferentes definições, aceita-se em princípio que o conceito de dureza possa ser

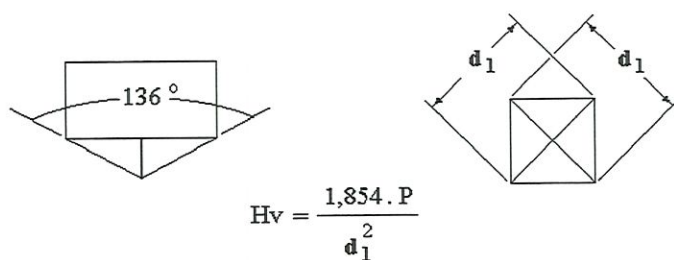
estabelecido como a resistência à deformação permanente de uma peça em função de uma carga que lhe é aplicada. **BRESCIANI** (1991), define a dureza como “uma propriedade superficial do corpo-de-prova devido à natureza de sua concepção; ela é, na realidade, uma medida de resistência a penetração de uma ponta (esférica, cônica ou piramidal constituída de material duro) oferecida pelo material do corpo-de-prova”.

A dureza dos materiais básicos pode ser estabelecida por vários parâmetros onde se destacam-se as escala de Mohs, Knoop e Vickers. A escala de Mohs é referente à dureza dinâmica, classifica de modo qualitativo os materiais conforme o resultado de ensaios onde o material mais duro consegue riscar o menos duro, esta graduação é muito simples e varia de 1 para o talco à 10 referente ao diamante, por isto não permite avaliar adequadamente os materiais cerâmicos. A escala Knoop é o resultado classificatório de um teste estático onde um material mais duro é pressionado contra um menos duro, o grau de penetração no material da amostra fundamenta a escala. As durezas Knoop e Vickers são designadas por HK e Hv respectivamente. Estes dois métodos referem-se à microdureza, fundamentam-se na carga de aplicação do teste e nas dimensões da marca impressa na peça pelo indentador. Tanto o sistema Vickers como o Knoop são adequados para a medição da dureza de materiais frágeis como a cerâmica. [CALLISTER(1994)]

A dureza Vickers (Hv) é definida como o quociente resultante da carga aplicada (P), dividida pela área de contato da ponta piramidal de medição impressa na amostra e é expressa pela equação 2.2, [CALLISTER(1994)]. A figura 2-05 apresenta as geometrias do indentadores para a medição de dureza Vickers e Knoop.



Identador para microdureza KNOOP



Identador para microdureza VICKERS

Figura 2-05: Geometrias e dimensões dos indentadores para a medição das durezas Knoop e Vickers. [CALLISTER(1994)]

$$HK = 14,2 \cdot P / l^2 \quad (2.1)$$

$$Hv = 1,854 \cdot P / (d_1)^2 \quad (2.2)$$

Na tabela II-05, estão apresentados alguns valores característicos dos materiais cerâmicos, respectivas composições, durezas, temperatura de fusão e módulo de elasticidade.

Tabela II-05: Alguns valores das propriedades mecânica das cerâmicas avançadas. [MURRAY (1993), MATSUHIRO & MIWA (1994), GROOVER (1996)]

Diamante e Cerâmicas Avançadas	Composição	Dureza Knoop Kgf/mm ²	Dureza Vickers Hv 10	Fusão °C	Modulo E MPa
Diamante	C	8000	7000	3500	10,35 x 10 ⁵
Nitreto cubico de boro	CBN	3500	6000	3000	-
Nitreto de silício	Si ₃ N ₄	1500	1800	1900	3,04 x 10 ⁵
Carbeto de titânio	TiC	2800	3200	3190	3,0 x 10 ⁵
Carbeto de tungstênio	WC	2100	2600	3250	3,10 x 10 ⁵
Alumina	Al ₂ O ₃	2000	2200	2054	3,80 x 10 ⁵

As cerâmicas policristalinas de óxido de alumínio comerciais são oferecidas por várias empresas do setor, portanto entre elas encontram-se diferenças em seus valores característicos, a tabela II-06 mostra de forma generalizada e resumida estes principais valores para as várias cerâmicas comerciais de Al₂O₃.

Tabela II-06: Valores característicos de cerâmicas policristalinas de Al_2O_3 comerciais. [BORETIUS (1995)]

Características	Notação	Al_2O_3 94 %	Al_2O_3 96 %	Al_2O_3 98 %	Al_2O_3 99,7 %
Densidade	g/cm^3	3,7	3,6	3,8	3,9
Temperatura de sinterização	$^\circ\text{C}$	1500	1650	1700	1750
Módulo de elasticidade	GPa	300	340	360	380
Tenacidade à fratura	$\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$	4,5-5,4	4,5-5,4	4,5-5,4	4,5-5,4
Nº de Poisson		0,25	0,25	0,25	0,25
Resistência à flexão (4 pontos)	MPa	370	350	400	450
Módulo de Weibull		> 8	> 8	> 8	> 8
Resistência à compressão	MPa	3400	3600	4000	4000
Dureza H_v2	MPa	-	2000	2100	2300
Condutibilidade térmica	W/m K	16	17	22	26

BORETIUS (1995) observa que o conceito de resistência à tração e respectivo limite de escoamento, tem importância para os materiais metálicos de construção mecânica assim como a resistência à fratura por flexão ou compressão tem para os componentes fabricados em cerâmicas avançadas, para as quais a resistência de tração característica é menor que a dos aços.

Durante um carregamento, a fase de regime elástico nas cerâmicas é relativamente pequena devido as ligações atômicas do material. Além do reduzido valor desta relação pode ocorrer a irreversibilidade da deformação, indicando assim a deformação plástica. Quando a tensão ocorre dentro de um limite que permita o desaparecimento da deformação, identifica o fenômeno denominado regime elástico de deformação e é expresso pela lei de Hooke. As figuras 2-06 e 2-07 apresentam gráficos de tensão-deformação onde pode ser estabelecida comparação entre os metais e as cerâmicas. Na figura 2-06 é mostrado o gráfico de tensão-deformação para materiais metálicos duros e destaca o limite de escoamento com base em 0,2 % de deformação “ σ_y ”, módulo de elasticidade e tensão de ruptura à tração, em 2-07 é mostrado o desenvolvimento da tensão de tração para a cerâmica. Neste gráfico, o carregamento impõem à princípio, uma pequena deformação elástica seguida de uma ruptura do catastrófica corpo-de-prova sem mostrar deformação plástica mensurável por este sistema de medição.

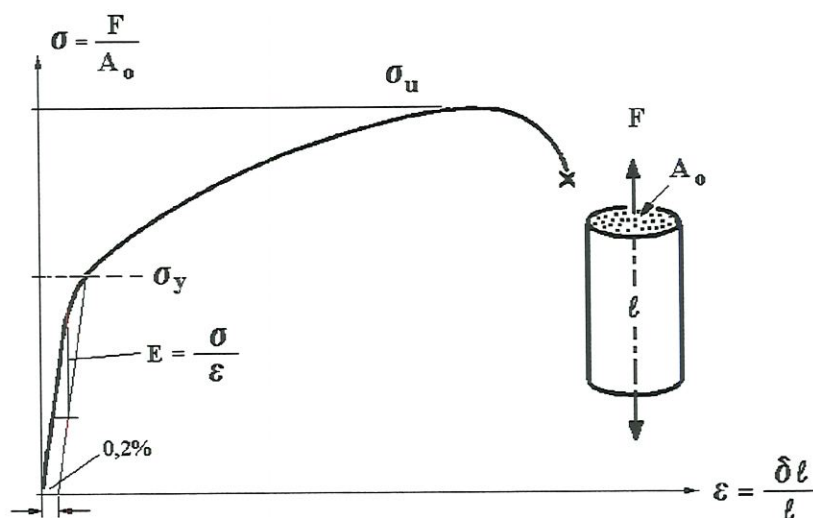


Figura 2-06: Curvas de tensão-deformação de metal (a)
BORETIUS (1995)

A lei de Hooke é expressa pelo produto entre o módulo de elasticidade (E) e a taxa de deformação (ε) de acordo com a Equação 2.2 . A equação 2.3 expressa o cálculo da tensão (σ) onde, F é a força aplicada e A_0 é a área efetiva da amostra. A equação 2.4 expressa a taxa de deformação (ε) onde, Δl é o comprimento da deformação e l o comprimento de referência no corpo-de-prova.

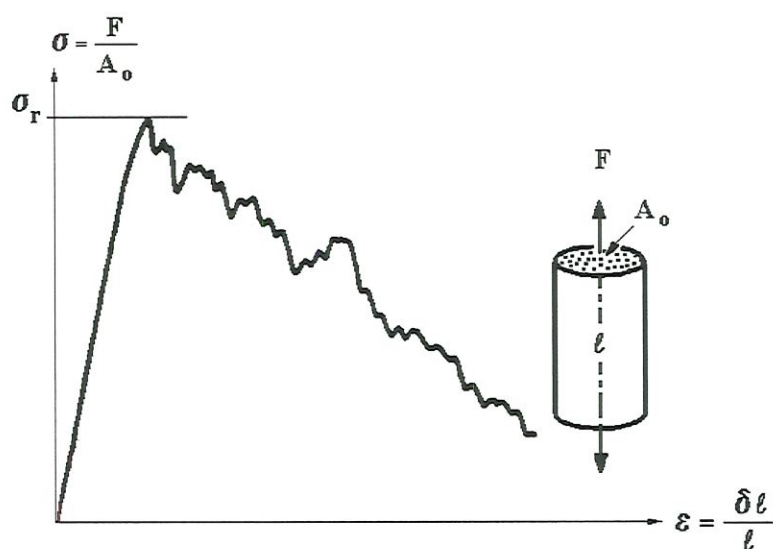


Figura 2-07: Curvas de tensão-deformação de cerâmica (b). BORETIUS (1995)

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad 2.2$$

$$\sigma = F / A_0 \quad 2.3$$

$$\varepsilon = \Delta l : l \quad 2.4$$

Estas equações também podem ser utilizadas para quantificar os resultados dos ensaios de compressão, onde a resistência das cerâmicas geralmente é maior que a encontrada para outros materiais. Nos testes de compressão em materiais frágeis os valores encontrados podem em alguns casos ser de até 10 vezes maiores que a tensão de tração, [FORTULAN(1997)]. A figura 2-08 apresenta o gráfico que relaciona a tensão de compressão para vários materiais.

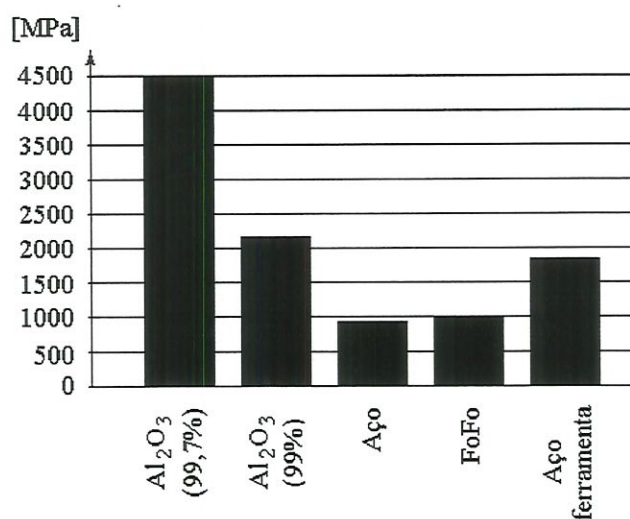


Figura 2-08: Comparação dos valores da tensão de compressão entre e materiais cerâmicos e metálicos. [BORETIUS (1995)]

No carregamento à compressão pura, ocorre um dano progressivo onde uma trinca pode crescer numa direção à 45° em relação ao carregamento, [AWAJI et al. (1993)].

2.2.3.1 Resistência à flexão

O ensaio de flexão é um dos meios mais empregados na caracterização das cerâmicas. As normas **ASTM C1161-90** (1991) e **JIS R 1601** (1987) determinam as condições de ensaio de cerâmicas avançadas em temperatura ambiente. Os corpos-de-prova recomendados são barras de perfil retangular chanfradas ou arredondadas nas arestas maiores. As figuras 2-09 , 2-10 e 2-11, apresentam a caracterização dimensional e geométrica dos tipos de corpos-de-prova **A**, **B** e **C** respectivamente.

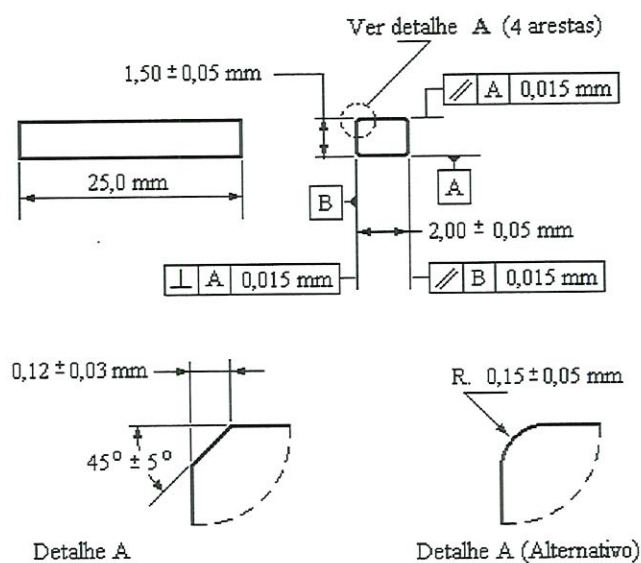


Figura 2-09: Corpo-de-prova tipo A. [ASTM C1161-90 (1991)]

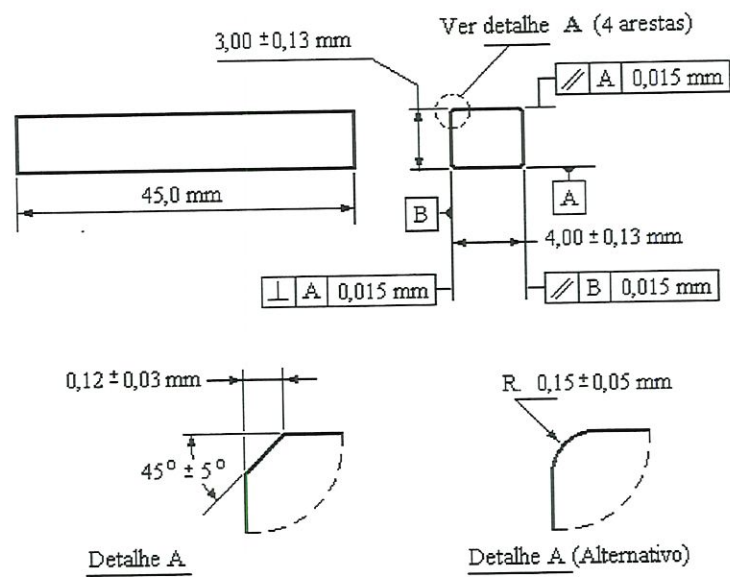


Figura 2-10: Corpo-de-prova tipo B. [ASTM C1161-90 (1991)]

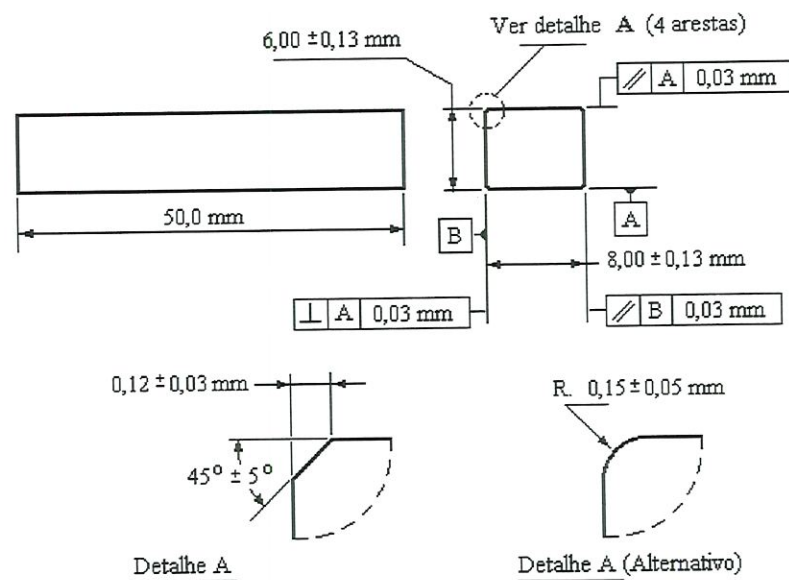


Figura 2-11: Corpo-de-prova tipo C. [ASTM C1161-90 (1991)]

Os ensaios estipulados pelas normas apresentam relativa dificuldade de execução devido a alta qualidade dimensional, geométrica e superficial exigidas da usinagem. Esta ainda deve ser executada de forma a não introduzir defeitos ou trincas na superfície que possam influir nos resultados. Os resultados obtidos são válidos para as condições dos ensaios, porém, de forma genérica os componentes usuais cerâmicos não são normalmente fabricados e usinados satisfazendo todos os passos exigidos nas normas, isto leva a crer na dificuldade de aplicação direta dos valores obtidos nos ensaios em aplicações práticas.

O ensaio estabelecido nas duas normas permite duas variações de carregamento, à três e a quatro pontos. No carregamento à três pontos, a carga é aplicada no corpo-de-prova em uma posição mediana entre os dois roletes do dispositivo de apoio, no carregamento à quatro pontos, a carga é aplicada em dois pontos eqüidistantes em relação aos roletes de apoio. As figuras 2-12 e 2-13 apresentam as disposições dos apoios e posição de aplicação da carga para os ensaios a três e a quatro pontos respectivamente.

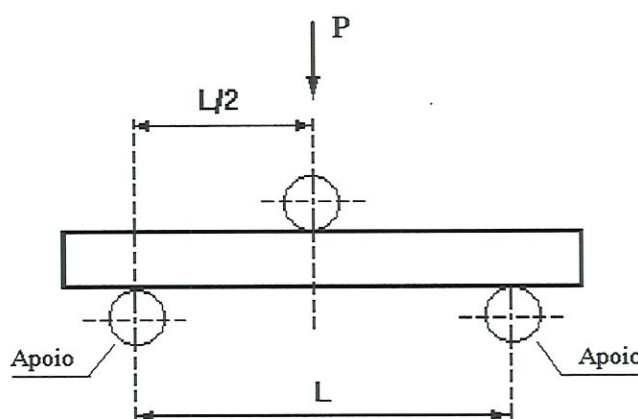


Figura 2-12: Configuração do ensaio de flexão a 3 pontos.
[ASTM C1161-90 (1991)]

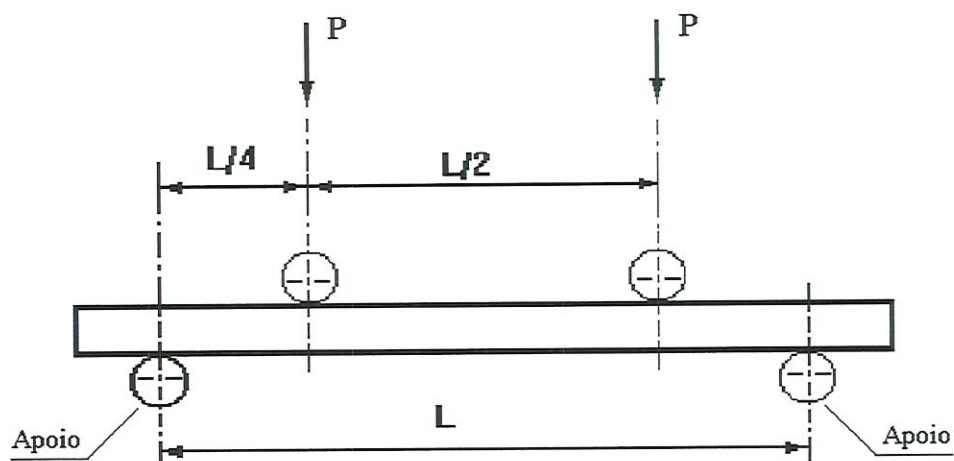


Figura 2-13: Configuração do ensaio de flexão a 4 pontos.
[ASTM C1161-90 (1991)]

PRICE & AUSTELL (1974) observam que os valores dos ensaios variam conforme o método aplicado. Os resultados obtidos com a utilização do dispositivo de apoio à três pontos, são em alguns casos, duas vezes e meia maiores que os encontrados nos ensaios de tração e excedem em 10 a 20% aqueles resultantes em apoios de quatro pontos.

BORETIUS (1995) apresenta a relação da resistência de onze cerâmicas, observa-se que a diferença entre os valores é relativamente grande, onde um material pode ser dez vezes mais resistente que outro, ficando a alumina entre os menos resistentes. Na figura 2-14 pode ser vista a comparação das resistências destas cerâmicas.

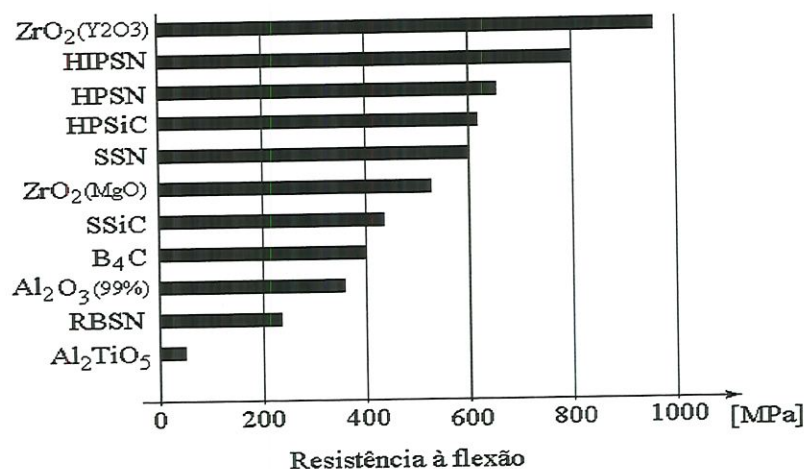


Figura 2-14: Valores comparativos da resistência à flexão entre várias cerâmicas . [BORETIUS (1995)]

2.2.3.2 Critério de Weibull

As peças fabricadas com materiais cerâmicos, seguindo o mesmo processo de produção e materiais, geralmente oferecem valores discrepantes de resistência. Esta variação exige que os resultados obtidos em ensaios, devam ser tratados com bases estatísticas, fazendo com que seja assegurada uma probabilidade de ruptura aceitável conforme a exigência de utilização dos componentes ensaiados.

A principal técnica utilizada é a estatística de Weibull que utiliza os valores extremos para os cálculos, [ASTM C1239 – 94a(1994), BORETIUS(1995), ZANOTO et al. (1991)]. Weibull compara a estrutura frágil da cerâmica tracionada com uma corrente que se rompe quando a resistência de seu elo mais fraco é excedida.

Na cerâmica, a fratura de uma fibra ou o desenvolvimento de uma trinca isolada devido a uma carga aplicada perpendicularmente ao plano destes defeitos, são similares à ruptura de uma corrente em função do elo menos resistente.

O cálculo que permite encontrar o valor para o módulo de Weibull “ m ” é feito através da função distribuição de Weibull e corresponde à probabilidade de fratura conforme a equação 2.5 ,

$$P_F = 1 - \exp \left[-V \left(\frac{\sigma}{\sigma_o} \right)^m \right] \quad (2.5)$$

na qual, P_F significa a probabilidade de fratura, σ é a tensão aplicada, σ_o é um parâmetro normalizado (freqüentemente selecionado como a característica de tensão, na qual a probabilidade de fratura é 0,632), m é o módulo de Weibull e V é o volume do corpo-de-prova. A figura 2-15 mostra a distribuição típica de Weibull, é o gráfico representativo da função 2.5 tratada matematicamente com logarítmicos e expressa pela equação 2.6 .

$$\ln \ln \frac{1}{1 - P_F} = \ln V - m \ln \sigma_o + m \ln \sigma \quad (2.6)$$

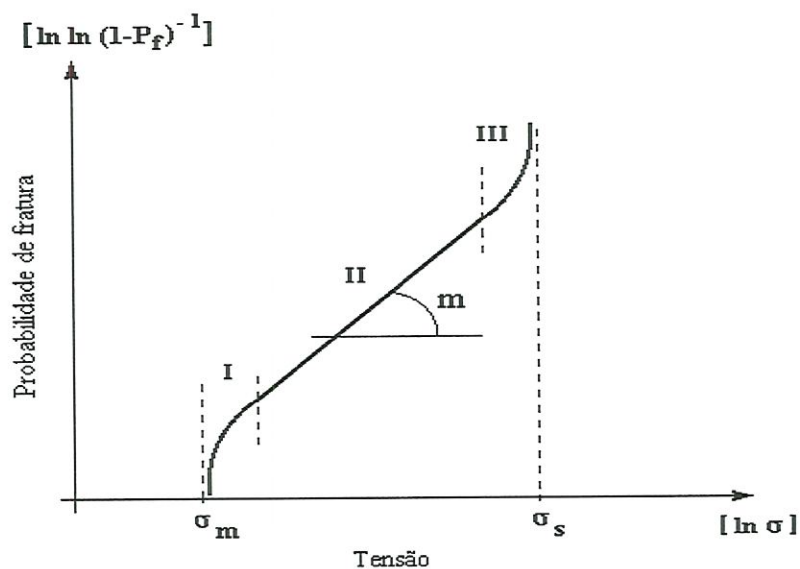


Figura 2-15: Distribuição de Weibull [RICHERSON (1991)]

BORETIUS(1995), afirma que módulo Weibull não tem significado físico, ele é uma medida que identifica a resistência da cerâmica. Sem considerar o conjunto de aspectos propostos por Weibull, o autor propõe ainda uma fórmula para a determinação do módulo de Weibull “ m ”, êle pode ser avaliado como sendo 20% maior que o quociente entre o valor médio da resistência “ σ ” e o desvio padrão da resistência “ S ”, equação 2.7 .

$$m \approx 1,2 \left(\frac{\sigma}{S} \right) \quad (2.7)$$

IMASAVA et al. (1989) considera que posição, inclinação e conseqüente valor do módulo de Weibull no gráfico $\ln \ln (1-P_F)^{-1} \times \ln \sigma$ possibilita deduzir conclusões importantes para a avaliação do material ensaiado. Dentre estas exemplificam as principais:

- a) Maior valor de m significa, menor dispersão de valores da resistência e uma distribuição mais homogênea dos defeitos;
- b) O deslocamento da reta para a região direita do gráfico, indica um aumento da resistência do material mantendo-se a mesma distribuição dos defeitos, e
- c) O volume do corpo-de-prova influi no posicionamento da reta devido a maior probabilidade de se encontrar, defeitos em posições críticas nas amostras de maior volume, neste caso supõem-se que a reta deva se deslocar para o lado esquerdo do gráfico.

ZANOTTO et al. (1991) também observam que quanto maior for o valor do módulo de Weibull (m), maior será a confiabilidade, o que indica menor espalhamento dos valores obtidos nos ensaios. Afirmam ainda que os materiais cerâmicos policristalinos possuem módulo de Weibull dentro da faixa de 3 à 15, embora podem ser encontrado na literatura alguns valores surpreendentemente altos pois se situam na faixa de $26 < m < 34$.

2.3 Manufatura dos Elementos Cerâmicos

A manufatura dos elementos cerâmicos exige um processo relativamente caro e detalhado. A figura 2-16, apresenta um fluxograma onde são identificadas cada uma das fases básicas para a fabricação de peças cerâmicas avançadas.

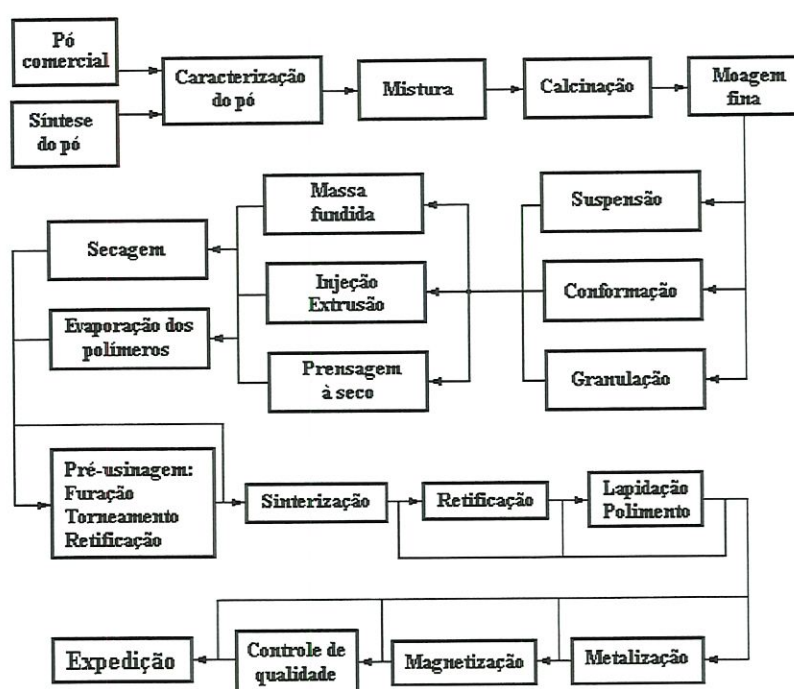


Figura 2-16: Fluxograma básico do processo de fabricação de peças cerâmicas. [RICHERSON (1992)]

A fabricação de componentes cerâmicos pode ser dividida em importantes estágios: Preparação do pó que compreende a caracterização das partículas com base no pó comercial e na síntese, mistura, calcinação, moagem fina, granulação, suspensão e conformação do grão. Nesta fase, a massa está preparada para passar

ao próximo estágio, ou seja, a conformação das peças. Este estágio compreende a conformação da peça por fundição, injeção ou prensagem seguida da evaporação dos polímeros e secagem. Caso as peças necessitem de melhor acabamento e ou reajustes geométricos elas podem ser usinadas por meio de furação, retificação, fresamento, torneamento, etc. Após a sinterização as peças podem ser retificadas e ou lapidadas, este estágio é um dos mais importantes principalmente porque fornece os requisitos em termos de dimensionais, superficiais e geométricos das peças.

OLLER(1989) observa que a conformação da peça é um passo muito importante dentro da fabricação e, a escolha do procedimento ou processo, depende do material e da geometria da peça, porém qualquer que seja o método (figura 2-17), à seco em temperatura ambiente ou à quente, este deve permitir a qualidade geométrica dimensional preestabelecida além das propriedades mecânicas.

A figura 2-17 apresenta vários dos modos de conformar peças cerâmicas em temperatura ambiente: a prensagem uniaxial, isostática, extrusão e injeção. A prensagem uniaxial, pela simplicidade de execução, permite com relativa facilidade a automatização do processo, o que é dificultada no caso da prensagem isostática.

Dentre os processos de conformação, a prensagem é o mais utilizado na manufatura dos componentes de cerâmica avançada. O resultado da prensagem é a compactação do pó cerâmico dentro do molde de maneira que haja a agregação e empacotamento das partículas no menor volume possível, e considerando uma pressão da ordem de 800-1000 MPa. [FORTULAN (1997)]

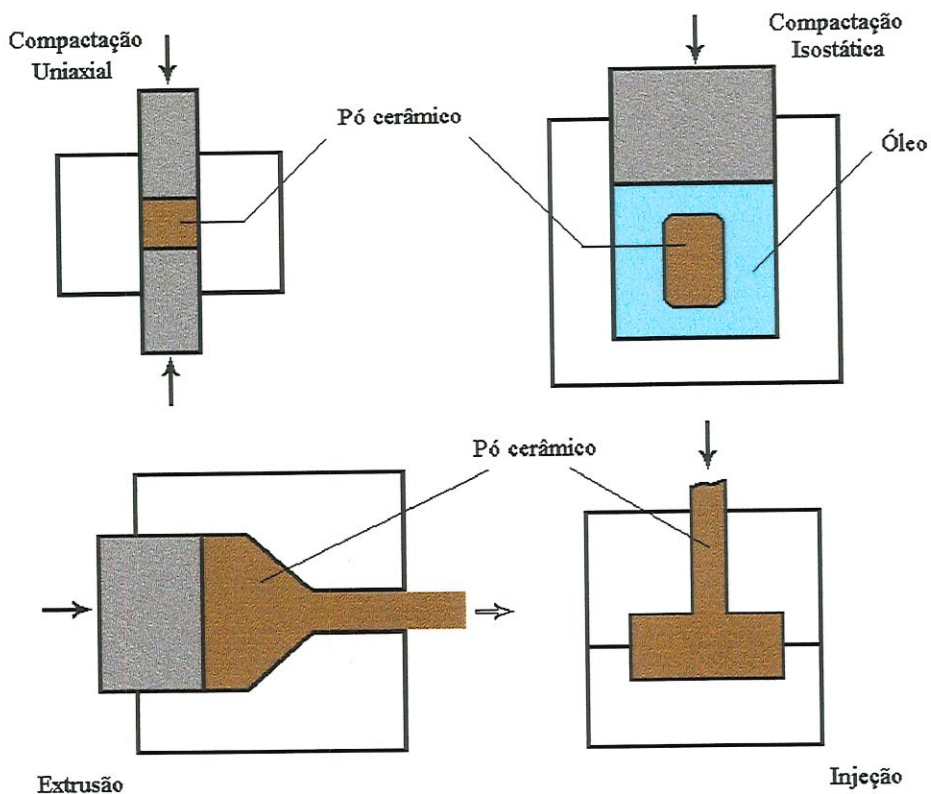


Figura 2-17: Diferentes processos de conformação de peças cerâmicas à temperatura ambiente. [OLLER(1989)]

O processo de prensagem uniaxial é feita em três fases: o enchimento da cavidade da matriz com o volume adequado de pó cerâmico, a compactação pelo pressionamento simultâneo dos dois punções até atingir a pressão estabelecida e a extração do corpo-de-prova. A figura 2-18 ilustra de forma esquemática, as três fases de prensagem uniaxial.

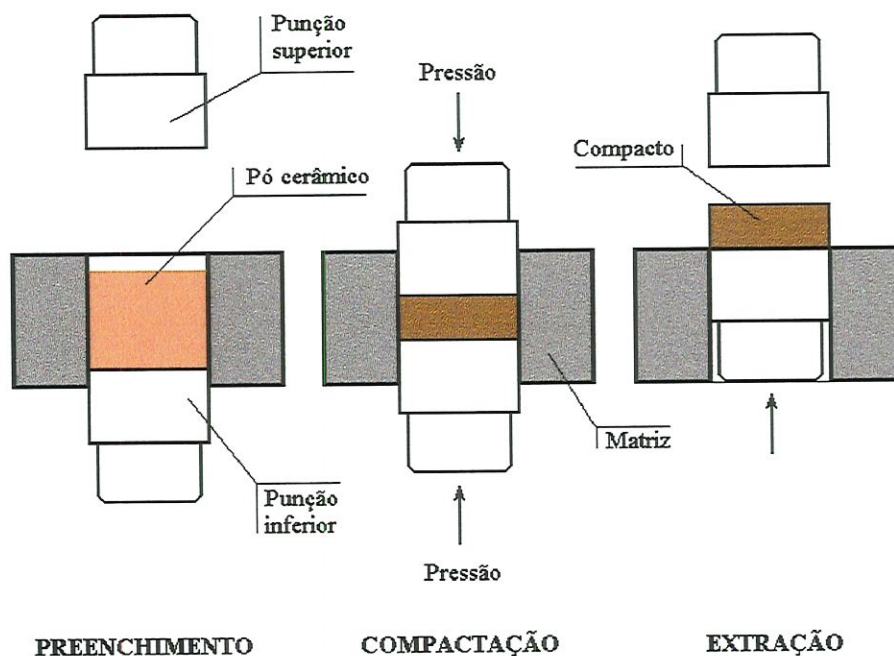


Figura 2-18: Apresentação esquemática das fases da prensagem uniaxial de componentes cerâmicos. [RICHESON (1992)]

O processo de prensagem uniaxial, tem como principal desvantagem a heterogeneidade da pressão em todos pontos do volume da peça principalmente devido ao atrito entre pó e as superfícies internas da matriz. Estes desvios, permite que hajam diferenças estruturais do componente à verde e conseqüente erros de forma e propriedades estruturais, [OLLER (1989) ; RICHESON (1992)]. A figura 2-19 mostra a magnitude das diferentes pressões no componente compactado.

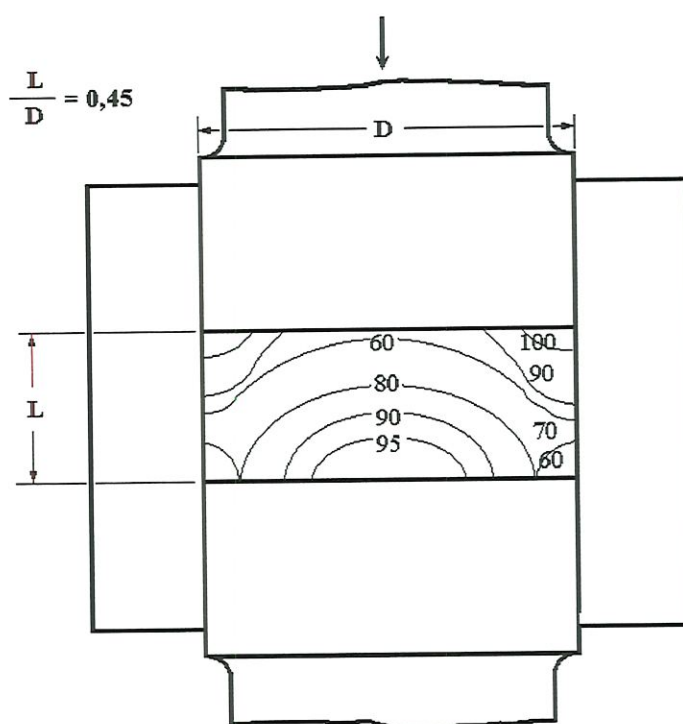


Figura 2-19: Valores das pressões durante a prensagem uniaxial de componentes cerâmicos. [RICHERSON (1992)]

TERPSTRA et al. (1995), discutem a densidade das peças cerâmicas com base na conformação uniaxial das mesmas. Afirmam que a homogeneidade geométrica e dimensional dos de pós cerâmicos utilizados permitem maior adensamento, porém alertam no sentido de cuidar para que a distribuição do pó no molde seja homogênea de acordo com a geometria final da peça. A densidade superficial e subsuperficial da peça podem ser medidas por vários métodos que caracterizam a porosidade do componente ainda no estado verde, dentre eles citam a distribuição da microdureza, a radiografia com raio X e a análise da imagem obtida pela ressonância magnética nuclear.

3. ASPECTOS DA RETIFICAÇÃO

A tecnologia de usinagem por abrasão começou com o homem primitivo. A história conta que eles utilizavam a abrasão para afiar suas facas e machados, mostra também que os primeiros indícios da retificação de metais ocorreu inicialmente por volta de 2000 A.C. na região do Egito, [NUSSBAUM(1989)]. Com base no contínuo desenvolvimento industrial, na atualidade a tecnologia de retificação, dentre outras linhas de pesquisa, tem se preocupado com a retificação de cerâmicas avançadas com rebolo de diamante. Este capítulo aborda as relações que envolvem a peça, a retificadora, o rebolo e o abrasivo no âmbito da retificação de precisão em peças de cerâmicas avançadas.

3.1 Definição

A retificação de cerâmicas avançadas não difere em termos conceituais da retificação de peças fabricadas com outros materiais. **KÖNIG** (1991) define retificação como um processo de usinagem por abrasão com uma ferramenta denominada rebolo, no qual, as pontas cortantes dos grãos abrasivos são relativamente pequenas e de geometria variável. Esta usinagem consiste em remover pequenas

partículas da superfície que está sendo trabalhada pela ação dos efetivos grãos cortantes que incidem em alta velocidade sobre a peça, possibilitando assim relativa precisão dimensional, geométrica e superficial.

3.2 As inter-relações no processo de retificação

A produção de elementos fabricados com cerâmicas avançadas, requer contínuo aperfeiçoamento nas inter-relações entre o mecanismo de retificação, material da peça e os abrasivos utilizados. Neste processo de usinagem, consideram-se dois aspectos: a retificação na peça verde, ou seja, antes da sinterização e na peça sinterizada.

A figura 3-01 mostra a fabricação de elementos cerâmicos de precisão dividida em quatro fases básicas. Na primeira fase tem-se a forma primária que responde pela conformação da peça através da prensagem, injeção ou extrusão do pó ou da massa cerâmica. A segunda fase trata do ajuste geométrico da peça que está apenas conformada à verde, ou seja, não endurecida pela sinterização. A terceira fase, a sinterização confere as propriedades mecânicas e físicas da peça, porém não qualificando-as totalmente em termos dimensionais ou geométricas. A quarta fase é responsável pelo acabamento que confere à peça as dimensões e perfís finais conforme o estabelecido no projeto.

Conforme pode-se observar na figura 2-16, antes da sinterização as peças cerâmicas de precisão necessitam de uma pré-

usinagem. Esta fase da fabricação, permite uma conformação geométrica e dimensional mais próxima dos valores finais da peça. Ela é portanto responsável pela adequação da geometria da peça bruta às condições estabelecidas no projeto. Nesta fase, a dureza da peça ainda possibilita a conformação por meio dos processos de usinagem que utilizam ferramentas de corte com cunha cortante geometricamente definida como a furação, torneamento, fresamento, etc. além da retificação com rebolo de carbeto de silício ou óxido de alumínio.

A última fase refere-se ao acabamento final da peça em termos geométricos e dimensionais o que geralmente ocorre através da retificação e ou lapidação de precisão. De modo generalizado a usinagem através da retificação, que está sendo estudada neste trabalho, pode ser considerada como muito importante na fabricação, pois é nesta fase que são geradas as dimensões e ou geometria final da peça nos casos em que a lapidação não seja prioritária.



Figura 3-01: A usinagem na fabricação de elementos cerâmicos

O motivo que torna importante a quarta fase e principalmente no que se refere a retificação, exige o entendimento das relações que envolvem a peça, a retificadora, o rebole e o abrasivo utilizados, visto que o processo de retificação é geralmente utilizado como última etapa da fabricação. A figura 3-02 apresenta o inter-relacionamento entre os principais envolvimento na retificação.

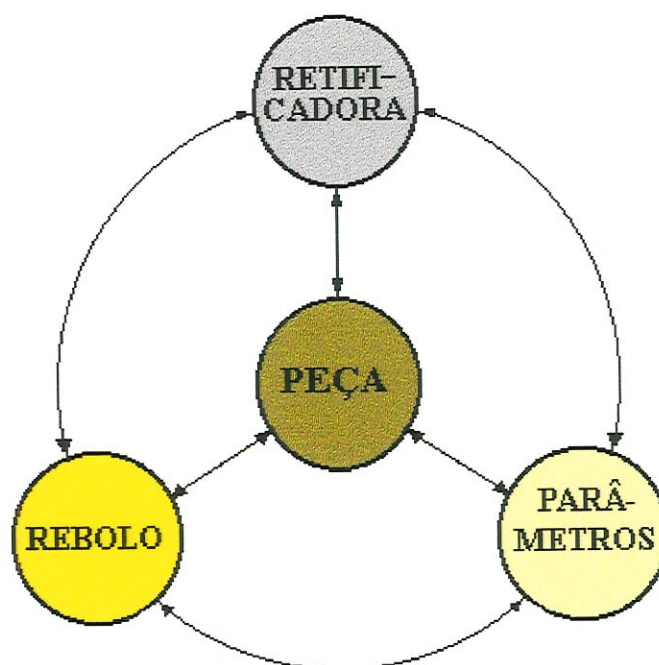


Figura 3-02: Principais interações no processo de retificação.
[SILVA(1992)]

A retificação de cerâmicas avançadas envolve uma interação complexa entre as variáveis envolvidas, isto é, as propriedades do material da peça, a escolha da retificadora, a especificação do rebole e os parâmetros da retificação. A característica de cada material é destacada principalmente pela

dureza, tenacidade, resistência à fratura, estabilidade física e química, resistência ao choque térmico. Conforme os estudos de LI et al. (1993) sobre a retificação de componentes cerâmicos, a influência da estrutura do material na superfície retificada é muito importante exigindo portanto, para cada característica estrutural, um controle adequado de todas variáveis envolvidas no processo para a sua obtenção. A resultante desta interação é denominada de retificabilidade e pode ser quantificada em termos da taxa de material removido, força normal e tangencial efetivas, acabamento superficial, tolerância dimensional, integridade superficial, e volume de cavaco removido por volume de rebole desgastado, figura 3-03.

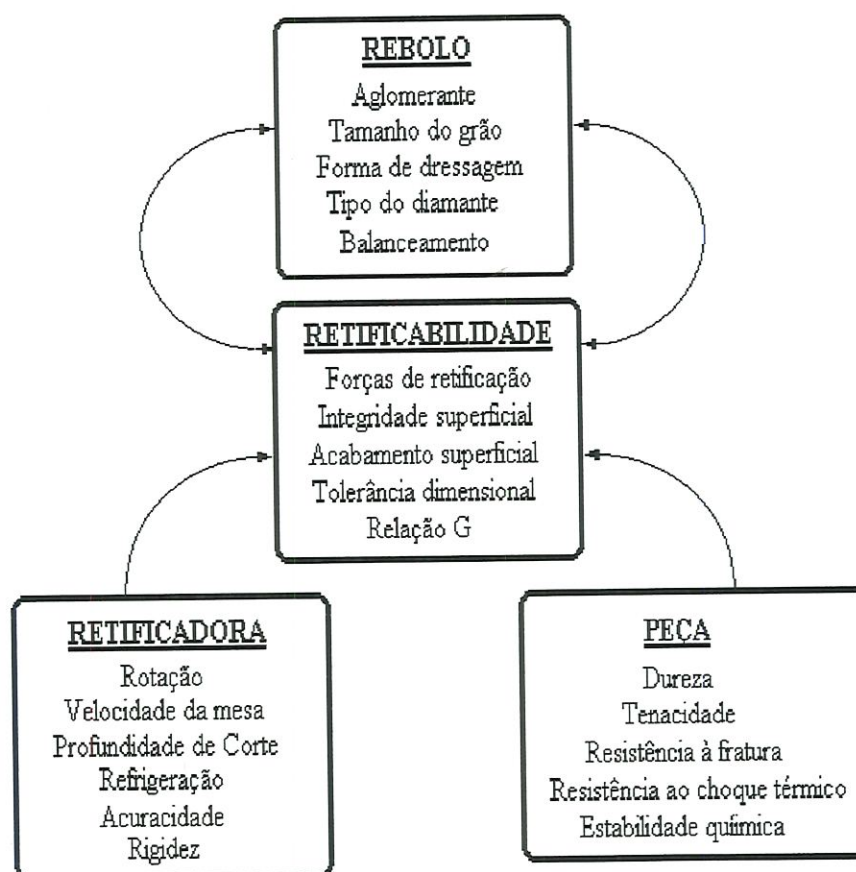


Figura 3-03: Fatores que influenciam os resultados da retificação.
[LI et al. (1993)]

3.3 Máquinas-ferramenta para retificação de elementos cerâmicos

A retificação de componentes cerâmicos, destaca algumas particularidades em relação à mesma operação de usinagem em outros materiais. Dentre as diferenças que se situam principalmente na fenomenologia da remoção de cavaco, as forças de corte desempenham um papel muito importante.

Observa-se em vários trabalhos, que a razão entre a força normal (F_n) e a força tangencial (F_t), é relativamente maior na retificação de cerâmicas avançadas que em outros materiais conforme **ARNOT(1995)**, **BIFANO(1991^a)**, **CHEREMISNOFF(1992)**. Esta característica exige que a retificadora, utilizada para a usinagem de peças fabricadas com materiais cerâmicos, tenha maior rigidez, visto que a flexibilidade do sistema eixo porta-rebolo - corpo da máquina e guias permite deflexões causando a necessidade de maior tempo de spark-out, dificuldade de perfilamento do rebolo. De modo resumido, podemos destacar que as deformações permitidas pela flexão da máquina leve à diminuição da eficiência e acuracidade de retificação, portanto se faz necessário o uso de retificadora mais rígida para compensar o relativo aumento da força normal (F_n).

3.4 Ferramentas para retificação de materiais cerâmicos

Alguns fatores econômicos obrigam à diferenciação entre o rebolo de diamante e os convencionais. Os rebolos de diamante são geralmente constituídos de um corpo base sobre o qual é aplicado um revestimento de grãos abrasivos e ligante que pode ser aplicado na



superfície lateral ou frontal do disco. A figura 3-04 apresenta o desenho esquemático de alguns tipos geométricos de rebolo onde podem ser observados o corpo e a parte abrasiva.

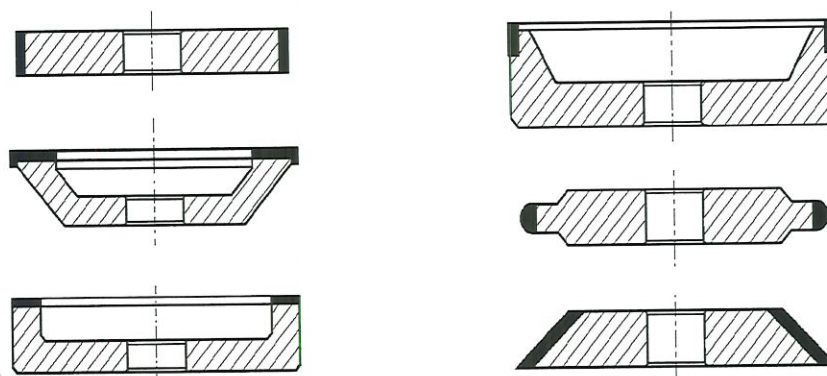


Figura 3-04: Desenho esquemático de um rebolo de diamante. [DIFER(1996)]

Na usinagem com arestas cortantes de geometria não definida, a remoção do material é feita com rebolo constituídos de grãos abrasivos de materiais relativamente mais duro que a peça. Para que essa remoção de material possa ocorrer durante um período longo de tempo, listamos abaixo os principais requisitos dos materiais abrasivos:

- a) Devem ser extremamente duros para que a remoção seja predominantemente do material da peça, isto permite que as arestas cortantes se mantenham ativas durante um longo período de tempo;

- b) Devem ter estabilidade térmica para que o grão possa resistir às temperaturas elevadas que ocorrem durante o processo de fabricação;
- c) Devem apresentar boa estabilidade química para que nas pressões e nas temperaturas elevadas, em contato com o ar, fluidos de corte e o material da peça, não ocorram combinações químicas que enfraqueçam o grão abrasivo e conseqüente desgaste prematuro.

Considerando os variados materiais utilizados na fabricação das peças, não existe um abrasivo que trabalhe todas peças de maneira adequada. Deve-se portanto, escolher o abrasivo que satisfaça as condições acima descrita, e para a usinagem de materiais cerâmicos utilizam-se rebolos de diamante.

Existem quatro tipos de materiais abrasivos naturais que podem ser empregados na fabricação de rebolos, o quartzo, esmeril, granada e o diamante. Com exceção do diamante natural, os materiais abrasivos naturais não dispõem de uma dureza suficientemente grande para serem utilizados adequadamente como abrasivo para a retificação de cerâmica. Além disso, verifica-se que nos materiais abrasivos naturais, a qualidade não pode ser controlada de uma forma tão eficiente e reproduzível como é possível nos produtos sintéticos.

3.4.1 Abrasivo

O diamante natural é composto quimicamente por carbono puro que na forma de um produto natural se formou em condições de

pressões extremas e temperaturas elevadas durante um longo período de tempo. Aproximadamente 80% dos diamantes naturais não podem ser empregados como diamantes de joalheria em decorrência de falhas internas e a falta de uma pureza suficientemente elevada caracterizada por uma cor não adequada. Esses diamantes ficam então à disposição de uso industrial, pois, as propriedades desses são praticamente idênticas a dos diamantes sintéticos fabricados especificamente para fins industriais.

Dentre os materiais sintéticos mais utilizados na retificação estão os óxidos de alumínio cristalino ($Al_2O_3-\alpha$), os carbonetos de silício, o nitreto cúbico de boro e o diamante sintético, este último geralmente utilizado na fabricação de rebolos de diamantes.

A extrema dureza é uma das propriedades mais relevantes dos diamantes sintéticos, ela não é atingida por nenhum outro material. A figura 3-05 apresenta o gráfico comparativo das durezas Knoop e Vickers para diversos materiais abrasivos.

O diamante em relação ao óxido de alumínio e ao carboneto de silício tem grande condutividade térmica. O grão de diamante, transmite rapidamente o calor gerado na região do corte ao ligante. A alta condutibilidade térmica dos diamantes pode levar a uma destruição do ligante e conseqüente diminuição da resistência de ligação entre o aglomerante e o grão abrasivo. Quando isto ocorre, a eliminação do grão abrasivo pode acontecer precocemente. Alguns fabricantes de rebolos, revestem o grão de diamante com microcobalto ou outros metais, esta cobertura age como um bloqueio da dissipação do calor e aumenta a resistência de ancoramento do grão abrasivo ao ligante.

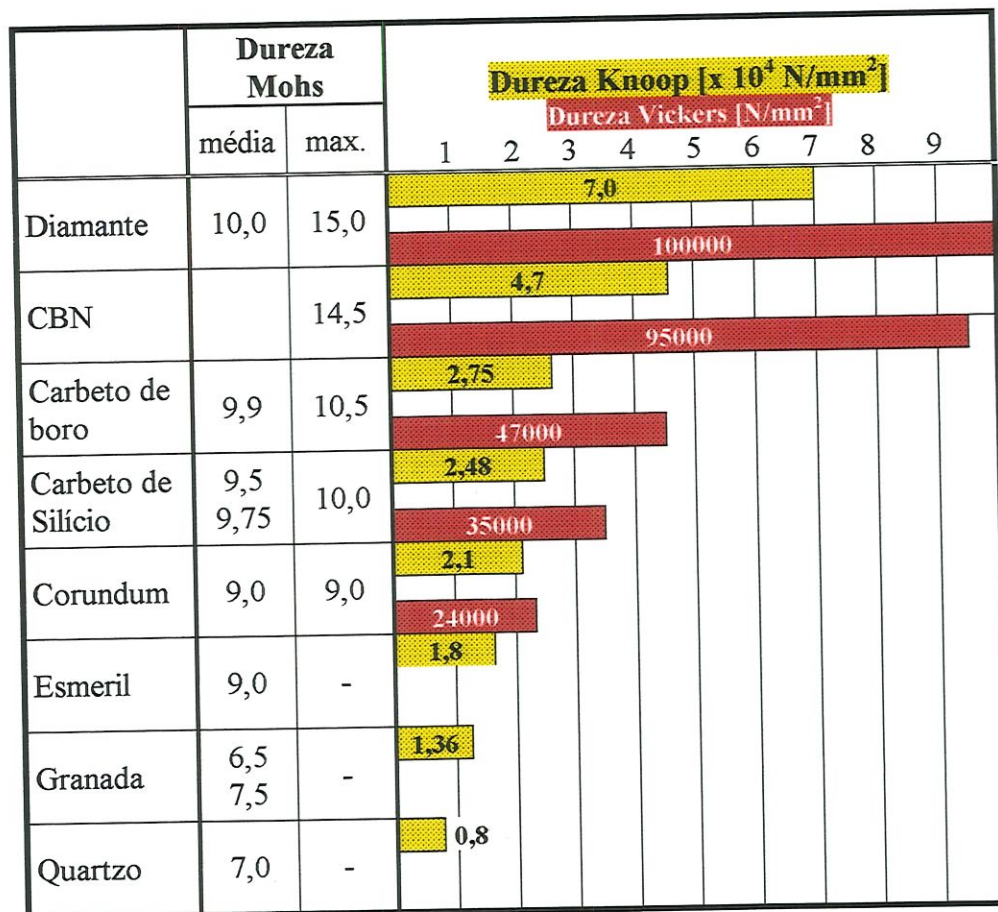


Figura 3-05: Comparação entre as durezas de vários materiais abrasivos. [REINHOLD&CLAUSNITZER (1988)]

3.4.2 Aglomerantes

Em todas as ferramentas abrasivas, classificadas de acordo com a norma DIN 69111, com exceção dos grãos abrasivos soltos, os grãos são ligados entre si com aglomerantes. Os ligantes têm a função de manter o grão fixo até que este esteja suficientemente desgastado em decorrência do processo de usinagem. A partir desse ponto, o ligante deve liberar o grão abrasivo de forma que outros

grãos posicionados em camadas mais profundas, ainda afiados, possam entrar em ação. A função de manter o grão em sua posição só é preenchida quando o ligante satisfaz a três exigências:

- a) O material do ligante deve ser o suficientemente resistente;
- b) O ligante deve formar poros entre os grãos com volume suficientemente grande para acomodar os cavacos, e
- c) Entre o grão abrasivo e o aglomerante deve existir uma ligação suficientemente forte para garantir a fixação do grão.

Enquanto que a primeira e a terceira propriedades são obtidas pela seleção do material abrasivo e pelo processo de fabricação a segunda propriedade apenas é obtida pela relação volumétrica entre os materiais de composição do rebolo da ferramenta abrasiva. Como ligante, a indústria de abrasivos usa materiais inorgânicos, orgânicos e metálicos. Para ferramentas de diamante na retificação de cerâmica, os mais adequados são os metálicos como o bronze, latão e alumínio, que são sinterizados juntamente com o adequado volume de grãos abrasivos. [KÖNIG (1989)].

A sinterização conforme KUBICKI (1995), significa que um metal ou corpos “verdes” metálicos prensados são transformados num material resistente quando submetido a uma temperatura situada um pouco abaixo da temperatura de fusão do metal envolvido. Neste processo, os grãos de pó metálico unem-se uns com outros formando uma estrutura relativamente porosa e permeada pelos grãos abrasivos de diamante.

3.4.3 Corpo do rebolo

Os corpos básicos do rebolo são usualmente fabricados com alumínio, resina sintética ou resina sintética mista. De acordo com **KÖNIG** (1989), abaixo são listadas as principais características e aplicações do substrato do rebolo:

- a) O corpo base de ligas de alumínio é caracterizado por uma alta resistência. Basicamente são aplicados quando o processo exige ferramentas delgadas, alta estabilidade, resistência e velocidades tangenciais elevadas;
- b) De forma genérica, os corpos base de resina sintética não permitem atingir propriedades mecânicas ao nível dos substratos fabricados em alumínio. No entanto eles apresentam propriedades que facilitam o amortecimento de vibrações, o que pode ser muito importante em casos específicos;
- c) Os corpos base de resina sintética misturada a cavacos de alumínio, podem ser importantes pelo fato de serem formados pela combinação entre os dois materiais apresentados anteriormente e por tal, também possuem características mescladas em relação aos corpos de rebolos fabricados em alumínio e resina sintética.

3.4.4 Especificação dos rebolos

Além dos parâmetros de corte, é importante a escolha adequada do rebolo para a retificação de componentes cerâmicos,

pois durante o processo de usinagem ocorrem fenômenos que provocam alterações nas propriedades do material na região superficial da peça.

As características que designam as constituições do revestimento abrasivo dos rebolos são deduzidas a partir das indicações dos fabricantes. De acordo com essas recomendações, a designação de um rebole diamantado é constituída, como nos convencionais, em parte por parâmetros que caracterizam a sua forma e dimensões, como também a composição do revestimento abrasivo, conforme mostra figura 3-06. Estas indicações dão informações sobre o tipo de abrasivo, a granulometria, o ligante, a dureza do ligante, o corpo base e a concentração de abrasivo.

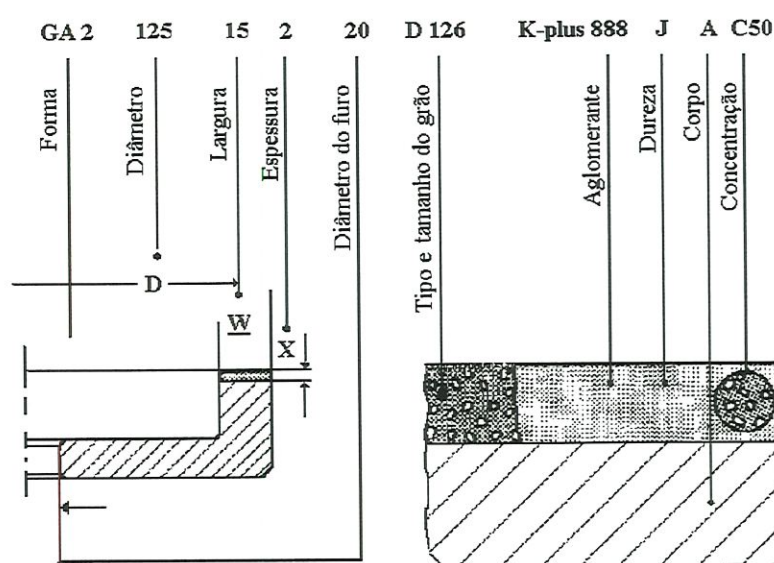


Figura 3-06: Especificação completa de um rebole diamantado.
[KÖNIG (1989)]

A figura 3-07 mostra a subdivisão para a especificação do revestimento. De acordo com esta subdivisão emprega-se a letra maiúscula *D* para o diamante como material abrasivo. O número subsequente designa a granulometria do abrasivo, corresponde ao diâmetro médio dos grãos medidos em microns. Da combinação subsequente de letras e números, podemos identificar qual foi o tipo de ligante na ferramenta específica. Além deste conjunto de letras e números, os fabricantes de rebolo ainda tem liberdade para a especificação de ligantes especiais.

Após a especificação do tipo do rebolo, conforme a sua geometria, devemos fazer ainda a indicação da concentração do abrasivo. A concentração indica o peso do abrasivo numa unidade de volume da camada abrasiva, é dada por Kt/cm^3 .

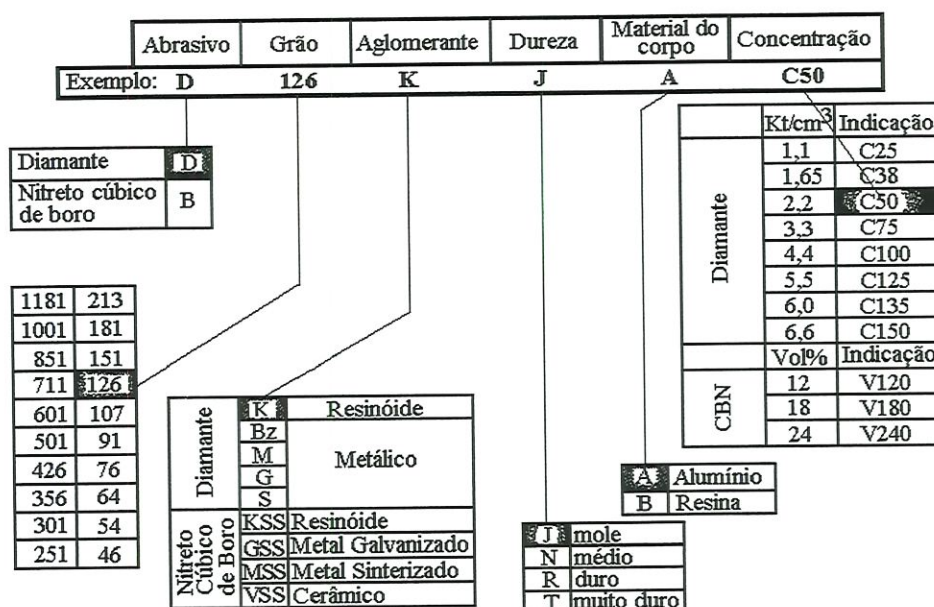


Figura 3-07: Composição e designação de rebolos diamantados. [KÖNIG (1989)]

Os principais fabricantes de rebolos diamantados do mundo utilizam a mesma especificação da concentração do material abrasivo. Como convenção aceitam-se os números que indicam a concentração com certa coerência porém, sem qualquer relação matemática com os valores reais. A tabela III-01 apresenta os números das concentrações, a concentração real e a porcentagem de abrasivo no volume da camada abrasiva.

Tabela III-01 - Concentração do abrasivo no rebolo.
[Catálogo de rebolos Dinfer(1996)]

Concentração da especificação	Concentração Real [Kt/cm ³]	Porcentagem de diamante na superfície ativa do rebolo [%]
25	1,1	6,25
28	1,7	9,38
50	2,2	12,50
63	2,8	15,53
75	3,3	18,75
100	4,4	25,00
125	5,5	31,25
150	6,6	37,50
200	8,8	50,00

A concentração número 100 significa 4,4 Kt/cm³. Isto corresponde a uma proporção volumétrica de diamante de 25% no volume total do revestimento diamantado, sendo que a densidade do diamante é 3,52 g/cm³ e 1Kt = 0,2 g.

A escolha da concentração econômica e mais adequada, depende da função e finalidade, da forma do rebolo, das suas dimensões e do tamanho do grão empregado para obter um determinado resultado na retificação. A influência do tamanho do grão no acabamento superficial é apresentada na tabela III-02.

Tabela III-02 - Número médio de grãos por quilate relacionado com o tamanho do grão.
[Catálogo de rebolos Dinfer(1996)]

Tipo de trabalho	Granulometria			Quantidade de grãos por quilate	Acabamento em Ra [μm]
	FEPA [μm]	DIN [μm]	ASTM [malha/pol]		
Alto desbaste	D 301 D 251	D 250	50 - 60 60 - 70	6.200	0,85 - 1,25
Desbaste	D 213 D 181 D 151	D 150	70 - 80 80 - 100 100 - 120	13.770	0,70 - 1,10
Pré-acabamento	D 126 D 107	D 100	120 - 140 140 - 170	35.160	0,25 - 0,70
Acabamento	D 91 D 76	D 70	170 - 200 200 - 230	111.700	0,15 - 0,45
Acabamento fino	D 64 D 54 D 46	D 50	230 - 270 270 - 325 325 - 400	552.000	0,08 - 0,20

O número médio de grãos por quilate aumenta com a diminuição do tamanho do abrasivo. Em decorrência disto, os rebolos que utilizam grãos pequenos geralmente mantêm menor concentração abrasiva na superfície de corte. O tamanho do grão abrasivo influencia também na dureza do rebolo pelo fato de uma maior ou menor área de envolvimento no aglomerante.

Os aspectos relativos ao tamanho, concentração e distribuição das pontas abrasivas afetam a topografia do rebolo e as condições de usinagem devido à variação do número de grãos que efetivamente entram em contato com a peça. Esta variação pode ser estática quando medida diretamente na superfície de corte do rebolo e dinâmica pela variação do número de entrada dos grãos abrasivos na peça ao longo do tempo.

3.4.5 Mecanismo de desgaste e vida dos rebolos de diamante

Durante a retificação, as forças envolvidas no processo de remoção de cavaco, são as responsáveis pelo comportamento dos desgastes dos grãos abrasivos na superfície efetiva de corte do rebolo. **KÖNIG** (1989) apresenta o mecanismo de desgaste do rebolo dividido em 3 fases:

1. Atrito;
2. Fratura do grão;
3. Desprendimento do grão.

O desgaste do tipo *atrato* é comparável ao desgaste gradual do grafite de um lápis sobre o papel causando portanto, a perda gradativa da agressividade do rebolo. Em termos de volume, o desgaste é insignificante porém, influencia consideravelmente a ação de corte pelo fato de acrescer em muito as forças de corte. O segundo tipo de desgaste, *fratura do grão*, deve ser orientado para a retificação de precisão devido a manutenção de um número maior de

pontas ativas melhorando o acabamento superficial, contudo no rebolo de diamante a quebra do grão é relativamente pequena em relação aos rebolos constituídos com outros abrasivos. No desgaste do tipo *desprendimento do grão*, a perda de volume ocorre na ordem do destacamento de um grão podendo causar a impossibilidade da obtenção da qualidade superficial, geométrica e dimensional exigidas para os elementos de precisão. Uma análise microscópica da superfície de corte do rebolo, permite verificar que o material aglomerante é removido pelo cavaco, destruindo assim o ancoramento do grão abrasivo.

O entendimento destacado acima indica que ao longo do processo de retificação ocorrem simultaneamente o macro e micro desgaste. O macro desgaste corresponde ao destacamento dos grãos e o micro desgaste é identificado pelo atrito do abrasivo com a peça e o conseqüente achatamento das pontas cortantes. Estes desgastes alteram a geometria da superfície cortante do rebolo, influenciando consideravelmente no desempenho do processo retificação, deste modo, o estado de afiação e a densidade de grãos ativos podem ser utilizados como indicadores do final da vida do rebolo, portanto da necessidade da dressagem.

Para o rebolo de diamante a dressagem é dividida em duas fases: o perfilamento e o avivamento. O perfilamento é responsável pela correção geométrica e topográfica da superfície formada com os pontos que pertencem ao plano superficial de corte do rebolo, geralmente é feito com dressador rotativo de diamante conforme mostra de modo esquemático a figura 3-08. Nos rebolos de ligante resinóide, a estrutura deixada por esta operação é relativamente fechada, necessitando portanto um re-trabalho que permita aos grãos abrasivos, sobressaírem em relação ao aglomerante, esta nova

operação é chamada de avivamento. O avivamento consiste na remoção de parte do material aglomerante para que haja a protusão dos grãos abrasivos. Geralmente é feita com uma ferramenta abrasiva de óxido de alumínio ou carbeto de silício a qual é forçada contra a superfície de corte do rebolo por um determinado tempo, quanto maior for o tempo de contato entre a ferramenta de avivamento e o rebolo maior será o desgaste do aglomerante e a protusão dos grãos abrasivos.

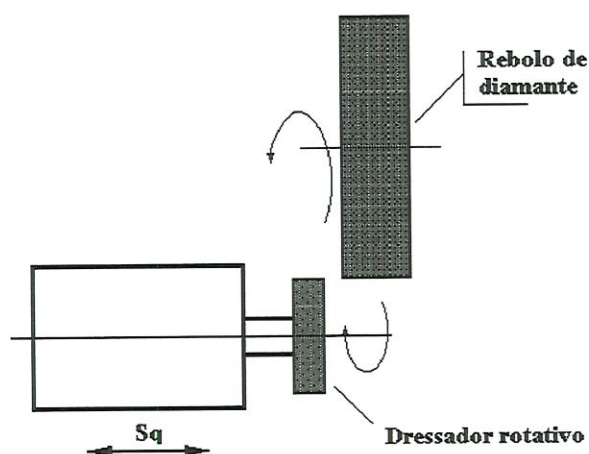


Figura 3-08: Esquema da dressagem do rebolo de diamante com dressador rotativo

3.5 Parâmetros da retificação

Em vários trabalhos publicados, o processo de retificação foi estudado com a finalidade de definir e quantificar as relações e influências dos fatores integrantes deste processo de usinagem. Os

principais fatores que afetam a superfície retificada são os parâmetros da retificação, a refrigeração da região de corte e a condição da superfície de corte do rebolo.

As características topográficas da superfície cortante do rebolo e a microgeometria dos grãos abrasivos durante a retificação, levam as pontas de corte trabalharem de forma estatisticamente distribuídas. Como em todas usinagens por abrasão, o processo de retificação é caracterizado por fenômenos probabilísticos que influenciam as condições de corte na zona de contato entre o rebolo e peça. [ROSENBERGER & WARNECKE(1994)]

A superfície cortante do rebolo é caracterizada em função do resultado desejado na superfície retificada, desta forma, a especificação do rebolo tem importância relativamente grande, isto é, pelo abrasivo, granulometria, dureza, estrutura, aglomerante e principalmente pela dressagem. Além dessa característica que traz uma certa aleatoriedade ao processo, o comportamento da remoção de cavacos é influenciada por parâmetros de corte estabelecidos para a usinagem, dos quais, os que podem ser ajustados na retificadora são a velocidade de corte do rebolo, a velocidade periférica da peça, a profundidade de penetração com conseqüente taxa de remoção de cavaco e forças de retificação. O conjunto de parâmetros de entrada, ajustados na retificadora resulta em parte na característica da superfície retificada. [ROSENBERGER & WARNECKE(1994)]

Algumas literaturas sugerem que adequados parâmetros de corte para a retificação das cerâmicas, permitem a usinagem em regime dúctil ou frágil distintamente, porém MAKSOUUD (1994) em seu estudo, observa os efeitos da retificação sobre as propriedades

das cerâmicas avançadas e afirma que a remoção de cavaco ocorre de modo concomitante nos mecanismos dúctil e frágil.

A figura 3-09 apresenta as relações entre as forças tangencial específica (F_t), força normal específica (F_n), desgaste radial do rebolo (Δr_s), e rugosidade em função da taxa de volume específica removida durante a retificação de nitreto de silício prensado à quente.

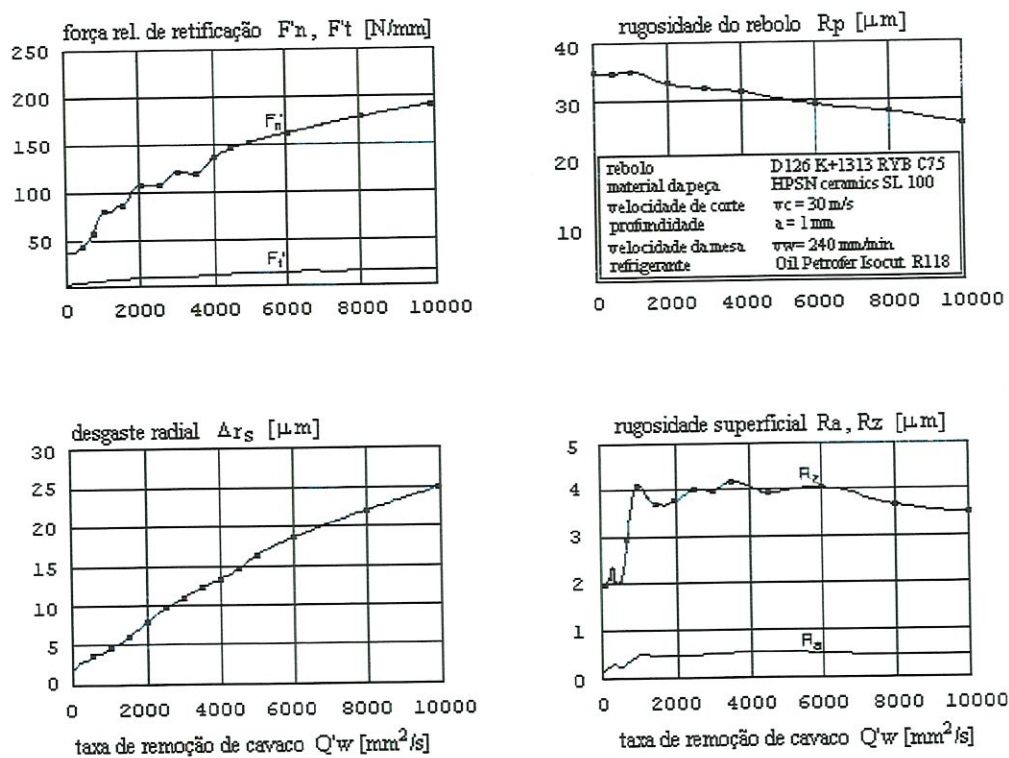


Figura 3-09: Influências dos parâmetros de corte.
[ROSENBERGER & WARNECKE(1994)]

Observa-se na figura 3-09 que os valores das forças de retificação crescem com o aumento do volume de cavaco removido, para a força normal (F_n) verifica-se maior influencia e maiores

valores que aqueles apresentados para a força tangencial (F_t). A curva do desgaste mostra um comportamento crescente com o aumento do volume de remoção de cavaco. A rugosidade superficial é relativamente baixa nas pequenas taxas de remoção, em torno de $1000 \text{ mm}^3/\text{mm}$ cresce de modo abrupto e depois mantém-se com pequenas variações.

3.5.1 Velocidade de corte do rebolo

A velocidade de corte (v_s) é um importante parâmetro e influi principalmente na vida do rebolo, volume de remoção de cavaco e forças de corte. Ela indica a velocidade tangencial e instantânea medida num ponto da superfície efetiva de corte do rebolo e é expressa conforme a equação 3.1 ,

$$v_s = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{6 \cdot 10^4} \quad 3.1$$

onde: v_s = velocidade de corte do rebolo [m/s];

D = diâmetro do rebolo [mm];

n = rotação do rebolo [rpm];

Com a análise da equação 3.1, verifica-se que a rotação do rebolo também é um fator importante na retificação devido a sua proporcionalidade com a velocidade de corte. INASAKI et al.(1993) observam que a rotação do rebolo varia durante a remoção de cavaco. Quando o rebolo penetra na peça, em função do movimento da mesa

e do atrito a sua rotação diminui, ao longo da peça ela volta a aumentar sem contudo, chegar à rotação de trabalho em vazio e volta ao nível de equilíbrio quando sai da peça. A figura 3-10 mostra num gráfico, a variação da rotação do rebolo durante a retificação de duas peças, verificamos um decréscimo de até 1,5% em relação a rotação do rebolo sem carga. Como a rugosidade diminui com o aumento da velocidade de corte do rebolo, nessas condições, a retificação pode gerar superfícies com rugosidades variáveis.

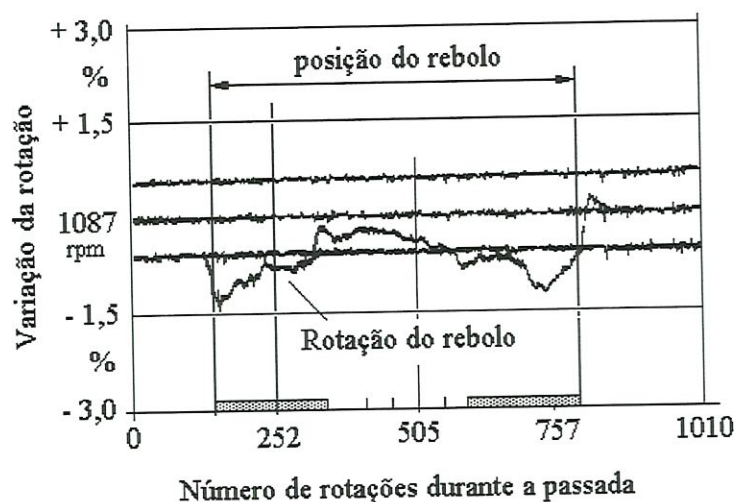


Figura 3-10: Variação da rotação do rebolo durante a retificação [INASAKI et al. (1993)]

A velocidade de corte influi notavelmente na força normal de corte. A figura 3-11 mostra esta influência na retificação de Al_2O_3 e ZrO_2 onde se observa que o aumento da velocidade de corte do rebolo num mesmo material e com a mesma taxa de remoção de cavaco, provoca a diminuição da força normal de corte. LI et al.(1993) consideram que esta tendência dá-se devido a cinemática

de corte na qual, a seção teórica do cavaco é menor e exige um esforço menor de cada grão abrasivo durante a usinagem quando a velocidade periférica do rebolo é aumentada.

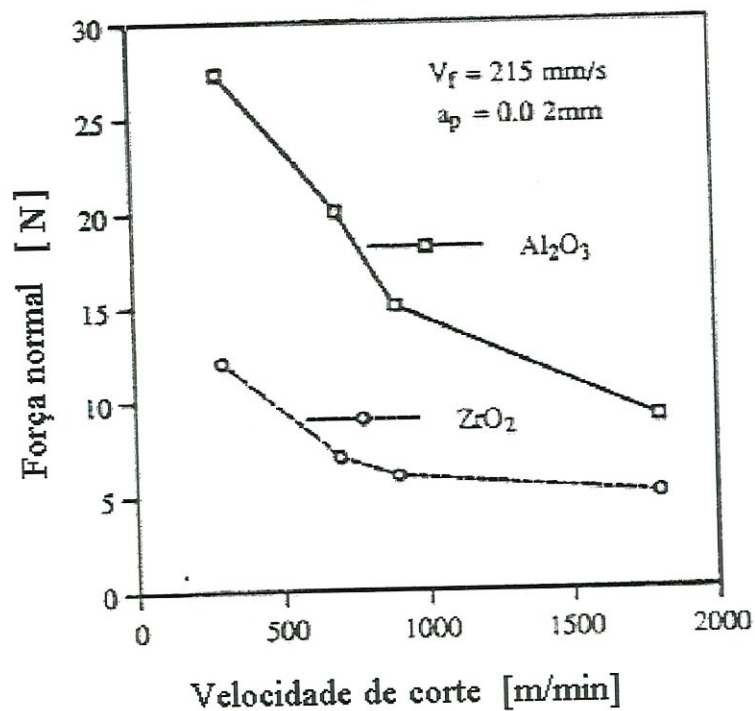


Figura 3-11: Influência da velocidade de corte na força de retificação. [Li et al.(1993)]

3.5.2 Profundidade de corte

A profundidade de corte na retificação, é um dos fatores influenciadores no resultado, tanto no acabamento superficial da peça como nos esforços de usinagem. A figura 3-12 mostra a influência da profundidade de corte na rugosidade superficial na direção da velocidade de passagem da peça ($Ra =$) e na transversal $Ra \perp$. O gráfico estabelecido para a ZrO_2 indica no geral que o

aumento da espessura de corte leva a maior rugosidade transversal, induz pequena variação desta até a espessura de 10 μm , apresenta um crescimento mais acentuado até 20 μm e mantendo-se constante a seguir, por outro lado, a rugosidade medida paralelamente a direção do avanço corte mantém-se praticamente constante, não sendo influenciada pela profundidade de penetração. [Li et al.(1993)]

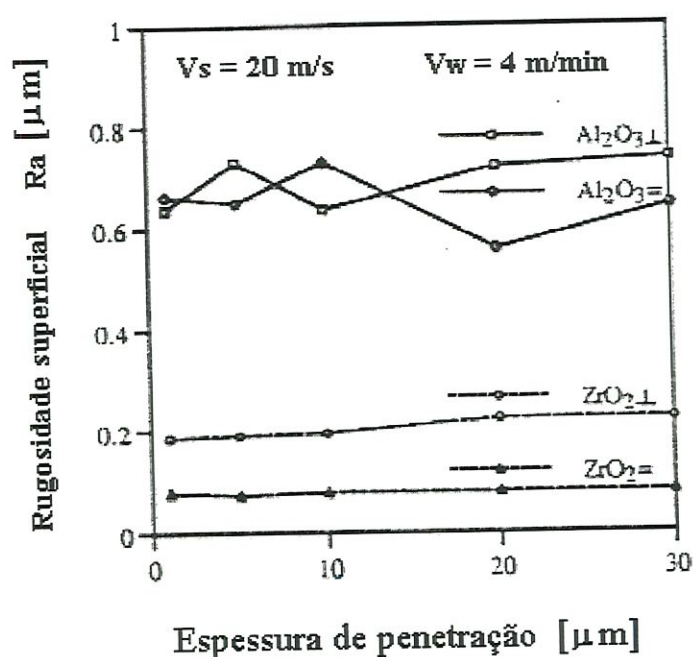


Figura 3-12: Influência da profundidade de penetração na rugosidade superficial de da Al_2O_3 e Si_3N_4 . [Li et al.(1993)]

A diferença maior é observada quando comparada aos materiais, mantendo as mesmas condições de corte, a rugosidade é maior para a Al_2O_3 na qual a tendência não é regular. Na figura 3-13 é apresentada a relação entre a profundidade de penetração e a

temperatura da região de corte na retificação de Al_2O_3 e Si_3N_4 . A temperatura aumenta com o aumento da profundidade de penetração e da velocidade de avanço da peça pois nesta situação o volume de cavaco removido é maior intensificando o calor gerado durante a formação do cavaco. Pode ser observado também a substancial diferença entre as temperaturas estabelecidas entre os dois materiais, enquanto para Al_2O_3 a temperatura varia de 120°C a 575°C , tem-se uma faixa limitada por 400°C e 1120°C para o Si_3N_4 .

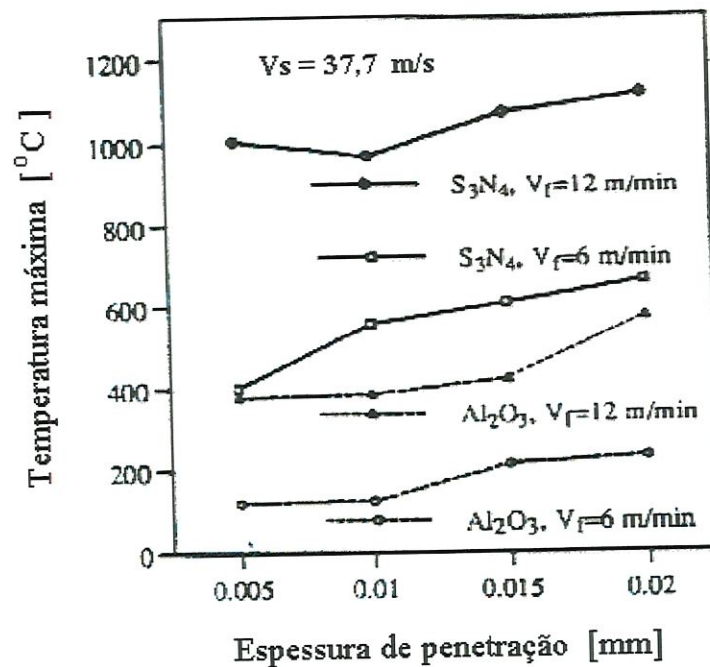


Figura 3-13: Influência da profundidade de penetração e velocidade da peça na temperatura da Al_2O_3 e Si_3N_4 . [LI et al.(1993)]

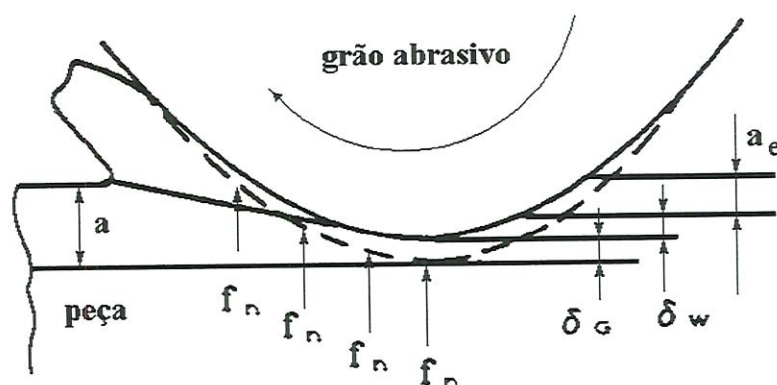
3.5.3 Forças na retificação

Em geral, a retificabilidade no processo de retificação pode ser estimada pelas forças atuantes no processo. Os componentes da força tangencial F_t e força normal F_n são os fatores mais apropriados para avaliar os fenômenos inerentes ao processo de retificação. A força normal é rigorosamente relacionada com a espessura penetração e a deformação elástica devido a interação entre o rebolo e a peça, [KONDO & TSUKUDA (1994)]. A figura 3.14 mostra esquematicamente a região de corte onde se destaca o grão abrasivo de diamante e a peça. A espessura efetiva de corte a_e é menor que a profundidade de penetração ajustada a na retificadora, causando a deformação total Δ_a . Esta deformação é causada pela elasticidade do material da peça δ_w e o deslocamento do grão δ_G abrasivo devido a rigidez do sistema retificadora-rebolo. A deformação total Δ_a é dada pela equação 3.6.

$$\Delta_a = a - a_e \quad \text{ou} \quad \Delta_a = \delta_w + \delta_G \quad (3.6)$$

Algumas das peculiaridades do processo de retificação são as forças de retificação. Na retificação de cerâmicas, a força normal é consideravelmente mais alta que a força tangencial quando comparadas aos metais. A relação da força normal F_n com a força tangencial F_t também é relativamente alta e pode chegar à 20 no caso das cerâmicas policristalinas de Al_2O_3 , LI & LOW(1991). A figura 3-15, mostra as forças de retificação para vários materiais onde observa-se que o nitreto de silício prensado a quente (HPSN)

requer as maiores forças de corte em comparação com outras cerâmicas como a ferrita, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$ e zircônia. Os valores da relação entre as forças F_n / F_t são apresentados na figura 3-16, que mostra ainda que as cerâmicas atingem o valor máximo próximo de 25 contra 2,5 para os aços, indicando portanto, um valor 10 vezes maior para as cerâmicas.



$$\Delta_a = a - a_e$$

$$\Delta_a = \delta_w + \delta_G$$

Figura 3-14: Região de contato entre o grão abrasivo e o material da peça. Espessura efetiva de corte a_e ; Profundidade de penetração ajustada a na retificadora; Força normal num grão abrasivo f_n ; Deformação total Δ_a ; Deformação do material da peça δ_w ; Deslocamento elástico do grão abrasivo δ_G [KONDO & TSUKUDA (1994)].

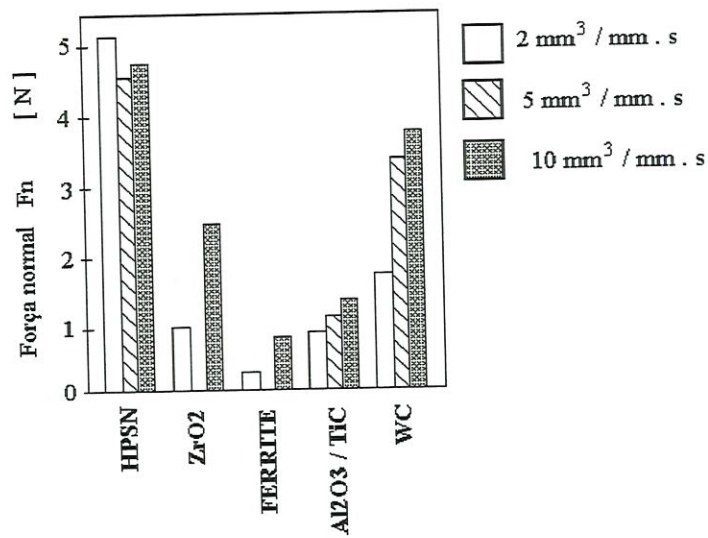


Figura 3-15: Força normal F_n de retificação para várias cerâmicas. [LI & LOW(1991)]

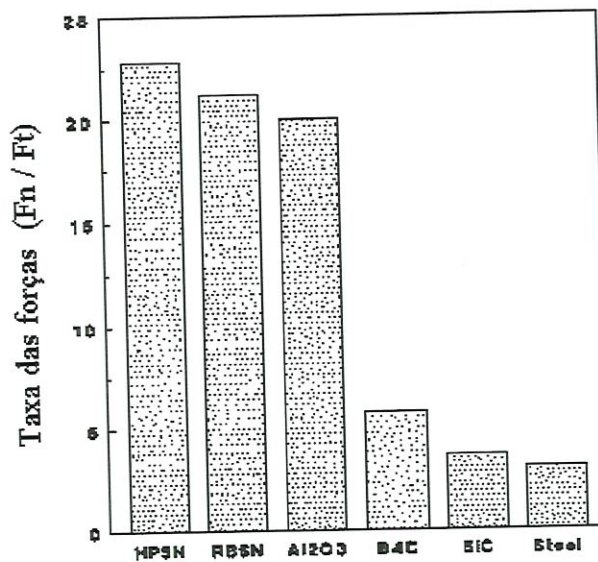


Figura 3-16: Taxa de força F_n / F_t na retificação de várias cerâmicas. Rebolo D126-S33; $V_c = 20 \text{ m/s}$; $Q_w' = 2 \text{ mm}^3 / \text{mm} \cdot \text{s}$; $v_w = 0,5 \text{ mm/s}$. [LI & LOW(1991)]

A grande diferença entre o metal e a cerâmica se refere à razão F_n/F_t da força normal F_n e força tangencial F_t . Esta razão é geralmente utilizada para explicar a retificabilidade dos materiais, que é relativamente pior no caso da cerâmica, a figura 3-16 evidencia as relações F_n/F_t para vários materiais e permite observar que a relação entre as forças é consideravelmente maior para as cerâmicas em relação ao aço.

3.5.4 Geração de calor e refrigeração da região de corte

Durante o processo de retificação, tanto o atrito dos grãos abrasivos com a superfície da peça, como a energia exigida para deformação plástica de parte do material da peça, geram calor na interface entre o rebolo e a peça. Com o objetivo de diminuir a temperatura do rebolo e da peça, é necessário a aplicação de fluido de corte. De modo geral, é fácil destacar e entender as características importantes que o fluido de corte deve possuir. Dentre estas, as mais expressivas são: boa capacidade de troca de calor; capacidade de lubrificação facilidade de manuseio; pouca agressão ao meio ambiente e baixo custo.

A aplicação do fluido de corte na região de remoção de cavaco, onde existe a interação do par rebolo-peça deve portanto, ser executada com seguintes objetivos:

- Refrigeração;
- Lubrificação;
- Remoção das partículas do material da peça e do rebolo;
- Proteção química da superfície da peça.

A refrigeração da região de corte durante a retificação de componentes cerâmicos ocorre de modo completamente distinto em relação a retificação dos aços principalmente devido a estrutura dos materiais cerâmicos. A estrutura dos aços geralmente dão a eles grande densidade chegando com muita facilidade a 100%, já os materiais cerâmicos o mesmo fato não acontece pois o componente retificado pode ficar contaminado com partículas pressionadas pelo rebolo contra a peça ou mesmo pela pressão do fluido refrigerante. Por outro lado, pode-se entender que a porosidade da cerâmica traga benefícios durante a retificação, pois o acúmulo de partículas de fluido em suas cavidades poderá auxiliar na lubrificação do corte visto que a maioria dos fluidos utilizados possuem teores refrigerantes e lubrificantes.

DICK & FOLTZ (1997), comentam que o fato das indústrias manufatureiras buscarem melhorias de produtividade e de resultados econômicos, determina o desempenho dos fluidos refrigerante com vistas ao conjunto de avanços tecnológicos de máquinas-ferramenta, ferramental, materiais e automatização. Tais desenvolvimentos possibilitam melhoramentos possíveis também em relação ao processo de refrigeração. Afirmam que é importante conhecer e avaliar os tópicos listados à seguir para permitir e ou melhorar o gerenciamento e o controle total dos fluidos:

- as práticas de seleção dos fluidos;
- a qualidade da água que compõe os fluidos aquosos;
- os controles dos fluidos;
- os equipamentos para remoção de contaminantes;
- o tratamento da água servida e seu despejo;
- aspectos econômico;
- o tipo de retificação;

- o tipo e característica do reservatório (central ou individual para cada máquina);
- as características do rebolo utilizado;
- o tipo do material da peça;
- os requisitos de tolerância dimensional e acabamento superficial;
- os requisitos da retificadora (lubrificação, vedações, pintura, limpeza, visibilidade da área de trabalho, etc.)

HEBBAR et al (1992), observam que a alta temperatura é uma importante fonte de prejuízo à integridade da superfície retificada. O autor divide esta atuação maléfica em quatro níveis: Em primeira ordem considera que a pequena faixa de tempo em que é gerada a temperatura contribui para a ocorrência da tensão residual e as microfissuras da superfície retificada. Em segunda ordem, a temperatura localizada dilata a região da peça que está sendo retificada provocando assim o empenamento da peça, principalmente nos casos de peças delgadas. Em terceira ordem, o aquecimento pode atingir níveis que possibilitem a transformação de fase do material alterando desta forma as taxas de composição na superfície da peça. Por último, a transformação de fase também poderá ocorrer devido as influências combinadas de aumento de temperatura e tensão mecânica provocada pela retificação. Além dos problemas citados, a alta temperatura pode ainda provocar a destruição do material ligante do rebolo em função da grafitação das partículas abrasivas de diamante quando o aquecimento for acima de 1200° C ou pela microfratura do diamante devido aos repetidos aquecimentos e resfriamentos. Desta forma, verifica-se, que os fenômenos térmicos são pontos importantes no mecanismo da retificação de materiais cerâmicos e devem ser controlados adequadamente.

Os grãos abrasivos dos rebolos de diamante utilizados para retificar componentes cerâmicos são relativamente disformes e geralmente tem dimensões que variam entre 20 e 200 μm . Cada um destes grãos trabalha em contato com a peça num tempo muito curto e por isto eles aquecem e resfriam também num pequeno espaço de tempo.

Durante a retificação, cada ponto da superfície de corte do rebolo terá uma temperatura particular, pois o fato do posicionamento do grão ser aleatório não permite a remoção de igual volume de cavaco. Assim, a caracterização de uma única temperatura do rebolo não indica a realidade, portanto a apresentação da temperatura num histograma é mais adequada. As figuras 3-17 e 3-18, apresentam o histograma da distribuição de temperatura de um rebolo de diamante durante a retificação de Si_3N_4 e zircônia respectivamente em função da freqüência dos picos de temperatura. Nas figuras, observa-se que as temperaturas mais freqüentes ocorrem em aproximadamente 8% das vezes e ocupam a faixa de 350 à 850 $^{\circ}\text{C}$.

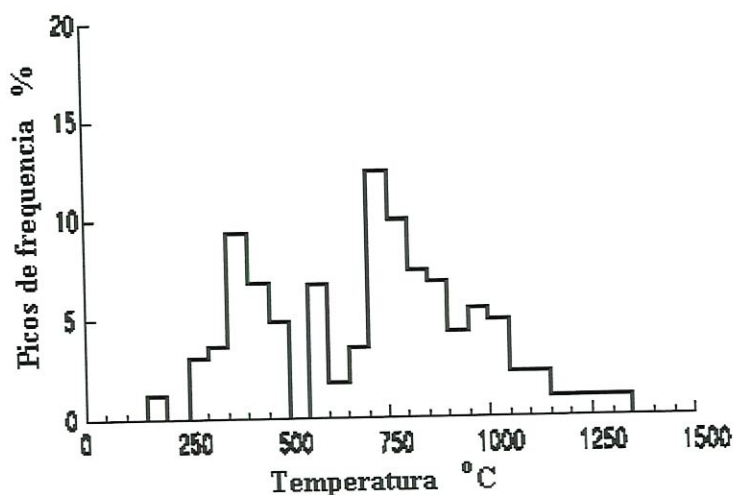


Figura 3-17: Distribuição da temperatura do rebolo durante a retificação de Si_3N_4 ($a= 12,5\mu\text{m}$; $v_w= 23,4 \text{ mm/s}$; $v_s= 32 \text{ m/s}$ e grão $220 \mu\text{m}$). [HEBBAR et al (1992)]

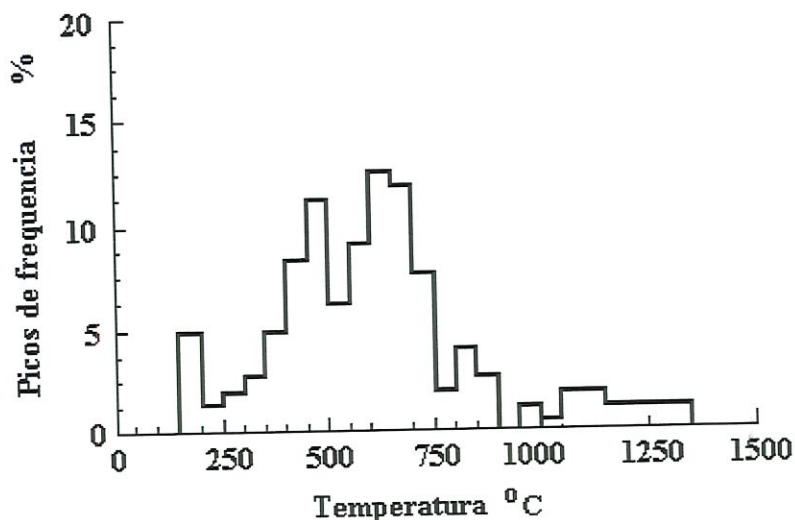


Figura 3-18: Distribuição da temperatura do rebolo durante a retificação de zircônia ($a= 12,5\mu\text{m}$; $v_w= 23,4 \text{ mm/s}$; $v_s= 32 \text{ m/s}$ e grão $220\mu\text{m}$). [HEBBAR et al (1992)]

HEBBAR et al. (1992), afirmam que a temperatura dos grãos abrasivos é igual a da peça e após o contato entre eles a temperatura diminui e pode ser calculada com boa precisão de resultado inclusive nos níveis abaixo da superfície retificada. A figura 3-19, mostra o decréscimo da temperatura na sub-superfície da peça. Comparado os materiais, verificamos que nas condições de ensaio o nitreto de silício e o aço SAE 1070 tem variações idênticas no decréscimo da temperatura ao longo da sub-superfície da peça.

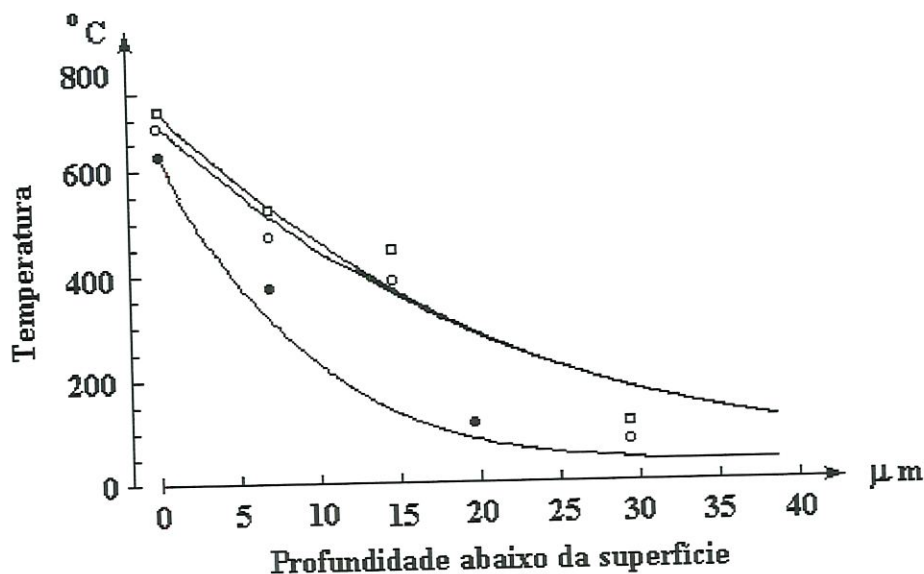


Figura 3-19: Temperatura da sub-superfície durante a retificação. $v_w = 23,4$ mm/s; $v_s = 32$ m/s; (● = ferrita: ensaio feito com rebolo de grão $220\mu\text{m}$ e $a = 12,5\mu\text{m}$); (○ = Si_3N_4 : ensaio feito com rebolo de grão $320\mu\text{m}$ e $a = 20,0\mu\text{m}$); (□ = aço Sae 1070: ensaiado com rebolo de grão $320\mu\text{m}$ e profundidade de corte $a = 12,5\mu\text{m}$)

3.6 Integridade superficial e sub-superficial

Os componentes mecânicos possuem geralmente uma série de condições preestabelecidas em seus projetos. As especificações inerentes ao produto tem dentre outras, a qualidade do acabamento superficial das faces da peça que é, em geral, obtida nos últimos estágios do processo produtivo e, em muitos casos, com a retificação. Conforme MIGUEL (1997), a especificação e controle da rugosidade superficial provocam polêmicas em termos da sua aplicação pois a caracterização da superfície do componente deve ter um valor maior ou menor, conforme os requisitos específicos do produto.

RATTERMAN(1990), destaca nove das propriedades inerentes das cerâmicas avançadas, as quais ele chama de críticas, na tabela III-03 estão listadas estas propriedades e as características influenciadas pela operação de retificação.

Tabela III-03: Influências da retificação nas propriedades críticas dos materiais cerâmicos. [RATTERMAN (1990)]

Propriedades das cerâmicas	Modo da influência da retificação
Tensão residual	Direta
Tensão de fadiga	
Integridade superficial	
Tenacidade	Indireta
Coefficiente de atrito	
Dureza	Pouca influência
Fragilidade ao choque térmico	
Condutividade térmica	
Resistência ao desgaste	

A retificação das cerâmicas policristalinas de Al_2O_3 induz efeitos na integridade superficial e sub-superficial das peças as quais incluem a rugosidade, a microestrutura, tensões residuais e fissuras críticas. A iniciação destas trincas nos componentes podem estar correlacionadas com as tensões induzidas e ou residuais de tração e compressão, portanto é importante conhecer em detalhes os efeitos do processo de retificação sobre a integridade da superficial. [VIGNEU (1997)]

O estudo de literatura pertinente mostra que as avarias impostas pela usinagem podem ser determinantes para a perda de resistência e desempenho das peças. XU & JAHANMIR (1994)

afirmam que numerosas investigações tem sido feitas no sentido de detectar e caracterizar os defeitos causados pela retificação na superfície e sub-superfície das peças. Observam que essas informações e técnicas propostas carecem ainda de ajustes e desenvolvimento pois, freqüentemente não são capazes de identificar de modo inequívoco os vários tipos ou padrões de defeitos produzidos. Com o intuito de melhorar a qualidade dos resultados propuseram uma técnica que permite observar diretamente na peça, os possíveis defeitos.

A técnica permite verificar a existência de defeitos na superfície, sub-superfície e revela suas características. Consiste na retificação de duas peças unidas pelas superfícies polidas com pasta de diamante de $1,0\ \mu\text{m}$ e posterior observação num microscópio com iluminação de interferência. A retificação deve ser executada de forma transversal às superfícies polidas e coladas, após a usinagem as peças são separadas e adequadamente limpas para possibilitar a análise no microscópio. A figura 3-20 apresenta a amostra e a identificação das superfícies coladas, onde o plano $xyx'y'$ é a interface formada pelas duas superfícies polidas e unidas por meio de cola, o plano ABCD é a superfície retificada com o rebolo passando transversalmente à linha xy .

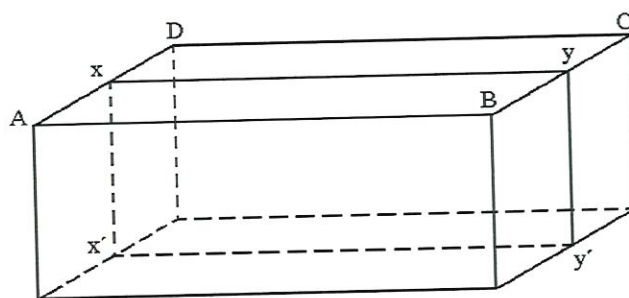


Figura 3-20: Amostra dupla para ensaio da integridade superficial e sub-superficial. [XU & JAHANMIR (1994)]

Nesta técnica, o exame microscópico das superfícies polidas separadas após a retificação, permite a identificação da existência de defeitos na sub-superfície da peça devido a retificação. Os possíveis defeitos crescem com o aumento da profundidade de penetração e são caracterizados pela deformação da estrutura com fissuras intragranular, intergranular ou mista.

4. METODOLOGIA DE ENSAIOS

A análise da literatura, apresentada neste trabalho, indica que são poucas as pesquisas dirigidas às problemáticas específicas da retificação plana em cerâmicas avançadas. Embora a prática deste processo de usinagem por abrasão seja usualmente aplicado na fabricação de elementos cerâmicos, o estado da arte não contempla de forma ampla os caminhos necessários à obtenção de um resultado com qualidade pre-estabelecida. Por outro lado, a crescente utilização de elementos cerâmicos como partes integrantes de máquinas e equipamentos de precisão exige, a maximização dos conhecimentos sobre a inter-relação do processo como um todo e as características resultantes e desejáveis na peça recém-retificada. A metodologia estabelecida para os ensaios visa contribuir para o entendimento desses relacionamentos.

4.1 Objetivo do ensaio

O objetivo geral do ensaio é desenvolver o estado da arte em relação à retificação plana tangencial em elementos cerâmicos. Os experimentos são planejados de forma a permitir um entendimento detalhado sobre a relação entre os parâmetros de corte e a peça antes e após a retificação. O entendimento, e a conseqüente ampliação do estado-da-arte, é obtido através do estudo da inter-

relação dos resultados alcançados no ensaio. Para isso, analisou-se o desempenho da usinagem abrasiva nos corpos-de-prova, que tiveram suas faces retificadas sob diferentes parâmetros de usinagem e posteriormente ensaiadas por flexão à três pontos.

O experimento engloba ensaios no processo de retificação plana tangencial onde é utilizado um rebolo de diamante, em 48 corpos-de-prova prismáticos através da variação do conjunto de valores que compõem os parâmetros de corte.

Através do conjunto de experimentos estabelecidos, são variados os valores dos parâmetros de retificação, propõem-se desenvolver condições para que sejam observadas as tendências resultantes nas seguintes relações:

- a) volume específico de cavaco removido em função da resistência do corpo-de-prova à flexão;
- b) integridade da face retificada em função dos parâmetros de corte;
- c) trio de parâmetros, v_w , a , v_s mais adequados para a remoção de um determinado volume de cavaco.

Os corpos-de-prova são retificados com base nos fatores de maior importância escolhidos para o presente trabalho. Estes fatores são a velocidade de avanço longitudinal da mesa da retificadora (v_w), profundidade de penetração do rebolo (a), volume de cavaco removido, característica macro-topográfica da superfície retificada, integridade superficial e sub-superficial da peça. Além do exposto, ainda analisa as alterações de resistência à flexão imposta ao corpo-de-prova em função das micro-trincas originadas durante o mecanismo de formação de cavaco neste processo de usinagem.

4.2 Características dos corpos de prova

Os corpos-de-prova são prismáticos, tem geometria e dimensões próximas aquelas estipuladas para o tipo C na norma 1161-90 (ASTM), esta, determina as condições e métodos para ensaio de flexão em cerâmicas avançadas na temperatura ambiente. Basicamente os corpos-de-prova consistem em barras retangulares medindo aproximadamente 6,4 mm na espessura, 8,7 mm de largura e 5,00 mm no comprimento, foram prensados uniaxialmente à seco e sinterizados. O material utilizado é cerâmica policristalina de alumina 99,5% com densidade volumétrica $3,78 \text{ g.cm}^{-3}$, a figura 4-01 apresenta alguns corpos-de-prova fabricados especificamente para os ensaios.

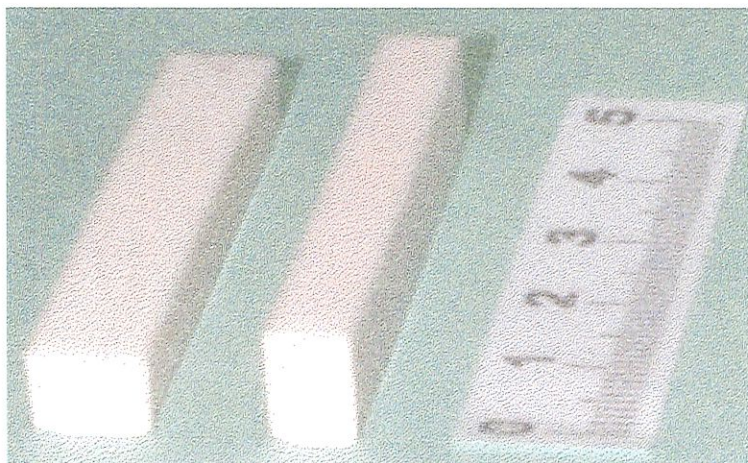


Figura 4-01: Corpos-de-prova sinterizados

4.2.1. Fabricação dos corpos de prova

A fabricação dos corpos-de-prova é feita a partir do pó cerâmico, compactado e posteriormente sinterizado. **BLOMBERG** et al. (1994) desenvolveram estudos que permitem afirmar que em termos gerais, a alumina representa o comportamento da maioria das cerâmicas avançadas no que se refere à tenacidade, estabilidade química e dureza. Isto permite inferir que os resultados e conclusões obtidas através dos ensaios executados em Al_2O_3 , possam ser aplicados qualitativamente em outras cerâmicas.

O composto de matéria prima utilizado no pó cerâmico gera a Alumina 99,5% de grau comercial. A tabela IV-01 apresenta as formulações empregadas e os valores representam o percentual de participação em peso do componente seco à temperatura de 110 °C .

Tabela IV-01: Formulação da matéria prima na preparação do pó cerâmico. [**FORTULAN** (1997)]

COMPONENTES	PARTICIPAÇÃO
Alumina S-5G	99,90%
MgO	0,25%

A alumina S-5G é produzida pela ALCAN Alumínio do Brasil S.A. . Conforme **FORTULAN** (1997), esta alumina é recomendada para a fabricação de cerâmica avançada estrutural e produzida em fornos calcinadores rotativos à partir do hidrato de

alumina. A tabela IV-02 indica detalhes referentes à procedência, composição e característica geral da alumina utilizada.

Tabela IV-02: Alumina utilizada na preparação do pó cerâmico.

ALUMINA CALCINADA 5-SG			
CARACTERÍSTICAS BÁSICAS		ANÁLISE QUÍMICA	
Procedência	ALCAN ALUMINIO DO BRASIL	Al ₂ O ₃	99,70 %
Lote	Número 24 Silo B	SiO ₂	0,03 %
Granulometria	325 mesh	Fe ₂ O ₃	0,03 %
Densidade compactada	1,20 g/cm ³	Na ₂ O	0,07 %
Área superficial	0,95 m ² /g	CaO	0,07 %
Diâmetro esférico equivalente	4,08 µm	L.O.I.	0,10 %
		110 – 1100 °C	
		Umidade	0,06 %

Conforme pode ser observado na tabela IV-02, a alumina S-5G contém dentre outros elementos, pequenas taxas de Ca e Si. BAIK et al. (1991), afirmam que aluminas de grau comercial, geralmente contém impurezas, como o Ca e o Si, os quais mesmo em

pequenas parcelas, causam um crescimento desordenado dos grãos. A adição de MgO na formulação da cerâmica, impede a ação destes elementos, segregando-os para os contornos dos grãos.

4.2.2 Projeto do molde de compactação

Com o objetivo de preparar os corpos-de-prova, foi projetado e fabricado um molde para conformação sob prensagem uniaxial conforme a técnica apresentada por **RICHERSON** (1992).

O molde é constituído de três partes básicas: matriz, punção de compactação e punção de extração. A qualidade dos materiais envolvidos e o processo de fabricação dos componentes é muito importante para a obtenção das amostras de ensaio. As partes do molde que entram em contato com o pó cerâmico são feitas com aço VC-130, temperado, revenido com dureza de 58 HRC, retificado com acabamento superficial Ra 0,2 μm e tolerâncias dimensionais que permitem o funcionamento compatível com o projeto. Os demais componentes são produzidos com aço SAE 1045 e dimensões adequadas à montagem do conjunto. A figura 4-02 apresenta o molde e seus componentes e no apêndice, encontram-se em detalhes do projeto.

A matriz do molde é constituída de seis peças que são fixadas por meio de parafusos Allen. As partes internas, fabricadas em aço VC-130 são as responsáveis para a conformação geométrica dos corpos-de-prova e as duas peças externas respondem pela manutenção da posição relativa das demais peças fazendo com que

todas peças produzidas tenham as mesmas dimensões no plano horizontal, pois na vertical uma alteração no volume do pó cerâmico acarreta variação na espessura da amostra compactada. A alta dureza dos componentes internos se faz extremamente necessária para que os desgastes produzidos pelo pó cerâmico, não danifiquem estas partes da matriz que estão em contato com este material altamente abrasivo, diminuindo assim a vida produtiva do molde.

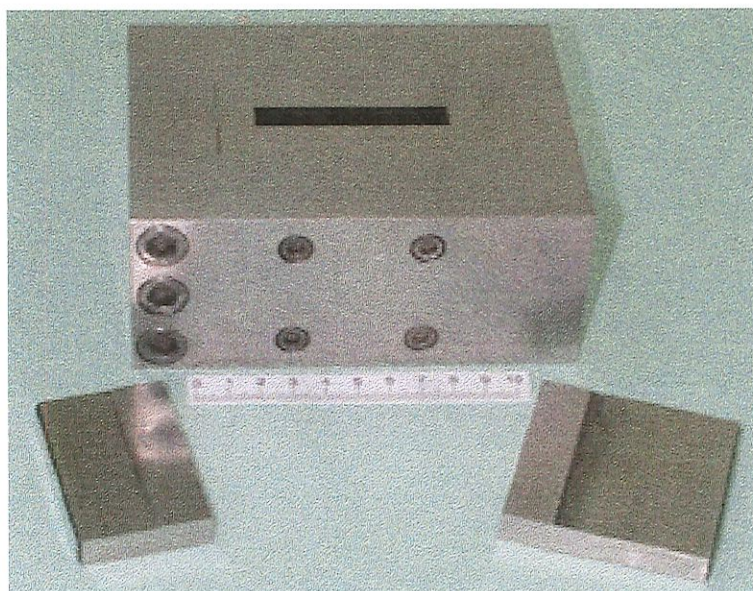


Figura 4-02: Componentes do molde de compactação dos corpos de prova

a) Compactação dos corpos de prova

A compactação dos corpos-de-prova é feita a partir da prensagem do pó cerâmico no molde. O pó cerâmico é colocado na

cavidade do molde de forma que após a prensagem a espessura da amostra seja $7,8 \pm 0,1\text{mm}$, as dimensões referentes à largura e o comprimento são mantidas pelas distâncias entre as superfícies laterais internas da matriz. O pó é espalhado com um espátula de maneira que mantenha a mesma altura em toda a cavidade, pois assim, haverá uma diminuição na heterogeneidade das propriedades mecânicas da peça em virtude da pressão de compactação não ser homogênea em todos os pontos da peça.

A compactação é feita numa prensa uniaxial à uma pressão de 800 kgf/cm^2 da cavidade do molde, desta forma, a força aplicada é de 5400 Kgf. A retirada do corpo verde é feita através da expulsão pelo punção de extração, na figura 4-03 é apresentado o molde na fase final da compactação do pó.

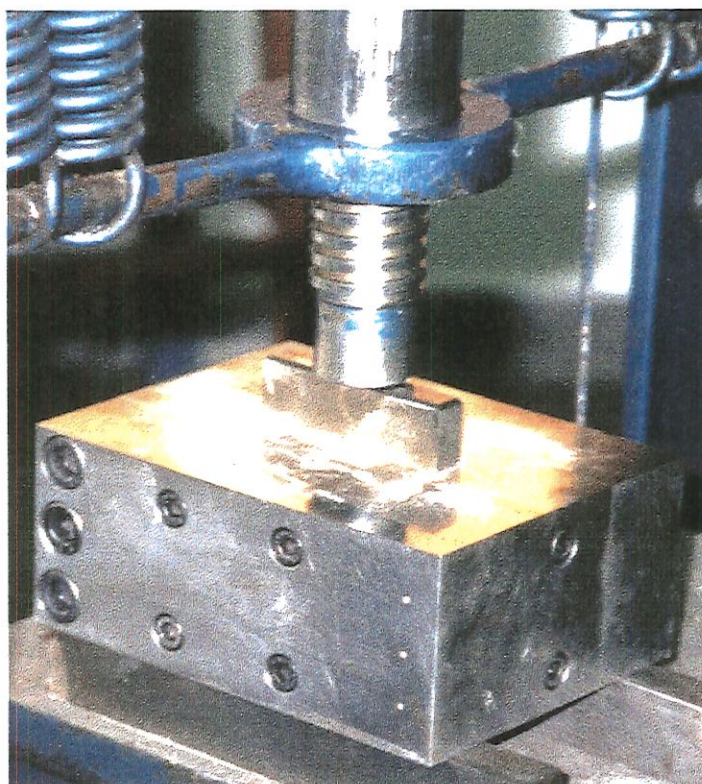


Figura 4-03: Compactação uniaxial dos corpos de prova.

b) Secagem dos corpos de prova

Os corpos-de-prova são secados após a compactação. Este processo é feito numa estufa onde as peças apenas compactadas permanecem por 12 horas à temperatura constante de 100 °C. Dentro da estufa, os corpos-de-prova são apoiados numa placa de Al₂O₃ para que não haja contaminação das peças por elementos químicos estranhos à sua composição. Após esta fase do processo produtivo, segue a pré-queima.

c) Pré-queima dos corpos-de-prova

A pré-queima é feita num forno da marca QUIMIS, modelo Q-318.24, aquecimento por meio de resistências elétricas de 4000 Watts permitindo temperaturas variáveis com resolução de 20 °C na faixa de 100 à 1200 °C.

As peças são colocadas sobre uma placa refratária coberta por alumina eletrofundida (TPF-II Elfusa), para possibilitar melhor assentamento dos corpos de prova e não permitir contaminações advindas da placa de apoio. Além disso, esta base refratária é apoiada em cilindros de alumina para permitir a temperatura constante em todos pontos da cavidade do forno.

A curva de temperatura é feita variavelmente crescente, em três fases distintas, até atingir 1050 °C, tabela IV-03. A primeira fase compreende as temperaturas limitadas entre 100 e 750 °C,

crescendo 50 °C a cada 30 minutos. A segunda fase limitam as temperaturas na faixa de 750 e 1050 °C, varia de modo crescente à taxa de 100 °C a cada 30 minutos. A última fase refere-se à manutenção da temperatura de 1050 °C por 1 hora e então o forno é desligado.

Tabela IV-03: Mapa de temperatura de pré-queima

Período de tempo [min]		Temperatura
de	até	
0	30	100
30	60	150
60	90	200
90	120	250
120	150	300
150	180	350
180	210	400
210	240	450
240	270	500

Período de tempo [min]		Temperatura
de	até	
270	300	550
300	330	600
330	360	650
360	390	700
390	420	750
420	450	850
450	480	950
480	510	1050
510	570	1050

O gráfico apresentado na figura 4-04, indica de variação de temperatura ao longo do tempo, destinada à monitoração do forno utilizado para a pré-queima dos corpos-de-prova.

A temperatura baixa ao longo de 15 horas antes da retirada dos corpos-de-prova que agora mantém temperatura próxima de 40 graus, quando o forno é aberto, evitando-se possível choque térmico.

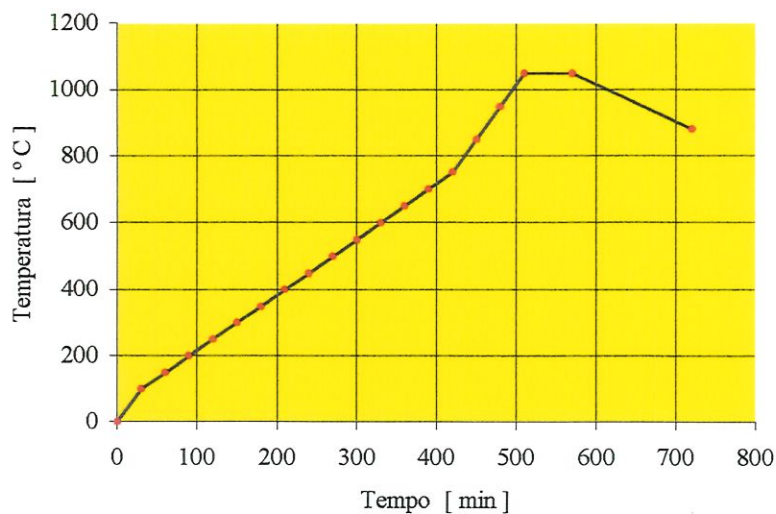


Figura 4-04: Curva de temperatura da pré-sinterização

d) Sinterização dos corpos-de-prova

A sinterização dos corpos-de-prova é feita no forno mufla, marca EDG-Equipamentos, modelo F-1700. Este forno permite o processamento de materiais na temperatura máxima de 1700 °C. A tabela IV-04, apresenta as principais características e dados técnicos do forno EDG F-1700 °C.

O forno é composto por vários conjuntos dos quais podemos destacar suas principais unidades: módulo de aquecimento, módulo de comando e módulo de potência.

O interior da mufla, no módulo de aquecimento, é revestido com refratários e isolantes de baixa densidade, possui ventilação forçada e o aquecimento é feito através de resistências elétricas de dissiliceto de molibdênio em formato “U”.

**TABELA IV-04: Dados técnicos forno de sinterização
EDG F-1700 °C**

DADOS TÉCNICOS	
Largura	250 mm
Profundidade	400 mm
Altura	200 mm
Potência	12 Kw
Tensão	220 bi-volt
Temperatura máxima (períodos curtos)	1700 °C
Temperatura de trabalho contínuo	1630 °C
Temperatura face fria	60 °C

O módulo de comando consiste num controlador programável de temperatura. Ele possui programas que permite patamares de tempo, alarme de fim de processo, controle de velocidade de aquecimento e sistema de proteção.

O módulo de potência tiristorizada possui sistema de proteção e sinalização.

A fase da queima dos corpos de prova é muito importante por ser exatamente neste período que ocorre a sinterização do material. A temperatura e o seu gradiente na unidade de tempo devem ser muito bem controlados. Para os corpos-de-prova, é utilizada uma curva de aquecimento constante e três patamares. O

gráfico apresentado na figura 4-05, mostra o comportamento da temperatura de queima ao longo do tempo.

Pode-se observar na figura 4-05 que primeira fase de aquecimento forno, da temperatura ambiente até 700 °C, a taxa de aquecimento é 5 °C/min, seguido de um patamar de 10 min nesta temperatura. A Segunda fase corresponde ao aquecimento de 700 °C à 1200 °C , com taxa de 6 °C /min, seguido de um patamar de 10 min na temperatura limite. A terceira fase é composta da elevação da temperatura até 1620 °C com a taxa de 10 °C /min seguido de um patamar à temperatura máxima, durante 120 min, ocasião em que o forno deve ser desligado.

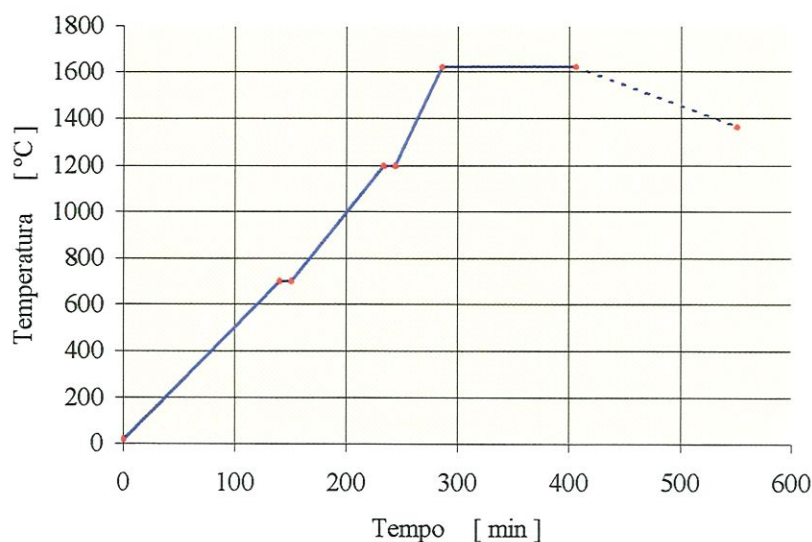


Figura 4-05: Gráfico do programa de aquecimento para a sinterização

A velocidade de resfriamento não é controlada, contudo as peças permanecem ainda dentro do forno por 15 horas, chegando à

temperatura aproximada de 40 graus quando o forno é aberto para a retirada das amostras evitando-se possível choque térmico.

As curvas de aquecimento utilizadas, tanto para a pré-queima como para a sinterização são propostas nos catálogos dos fornos QUIMIS modelo -318.24 e EDG F-1700 respectivamente.

4.3 Banco de ensaio.

O banco de ensaio é composto por uma retificadora plana tangencial e equipamentos de medição, este conjunto está disposto de forma a caracterizar-se como um ambiente semelhante àquele encontrado nos setores de retificação dentro do processo industrial. O local de instalação do banco de ensaio é um laboratório de usinagem por abrasão, neste, a temperatura é estabilizada em torno de 20 °C e isento de vibrações no piso, que possam alterar o resultado do processo.

4.3.1. Retificadora

A máquina-ferramenta é uma retificadora plana tangencial de precisão, tem procedência Suíça, da marca TRIPET. Os movimentos das mesas longitudinal e transversal são acionados por um sistema hidráulico que permite o ajuste contínuo entre 0,5 e 8,0 m.min⁻¹. Os mancais do eixo porta-rebolo e guias da mesa

longitudinal, transversal e do cabeçote porta-rebolo são hidrodinâmicos. A tabela IV-05 apresenta os principais dados técnicos da máquina.

A rigidez estática da retificadora é uma característica importante, a sua inobservância poderá permitir erros de 2ª ordem na superfície retificada devido ao deslocamento do rebolo em função da força normal de retificação. A figura 4-06 apresenta curva de rigidez do sistema retificadora-peça-rebolo.

Tabela IV-05: Dados técnicos da retificadora TRIPET

Superfície da mesa porta-peça	600 X 200 mm
Distância máxima entre a superfície da mesa porta-peça e o eixo porta-rebolo	412 mm
Rotação do rebolo	2750 rpm
Velocidade da mesa	0,5 - 8,0 m/min
Potência disponível no eixo porta-rebolo	1,8 Kw
Sistema hidráulico de dressagem	0,6 m/min
Resolução de ajuste da profundidade de penetração	0,001 mm
Volume do tanque de fluido refrigerante	150 litros

OLIVEIRA (1988), desenvolveu estudos sobre a retificadora utilizada no ensaio, com o auxílio de um anel dinamométrico e comparador eletrônico estabeleceu os valores que

relacionam uma força estática normal ao eixo porta-rebolo com a deformação da retificadora, neste trabalho foi observado que a rigidez estática da retificadora utilizada no ensaio é $13,2 \text{ N}/\mu\text{m}$

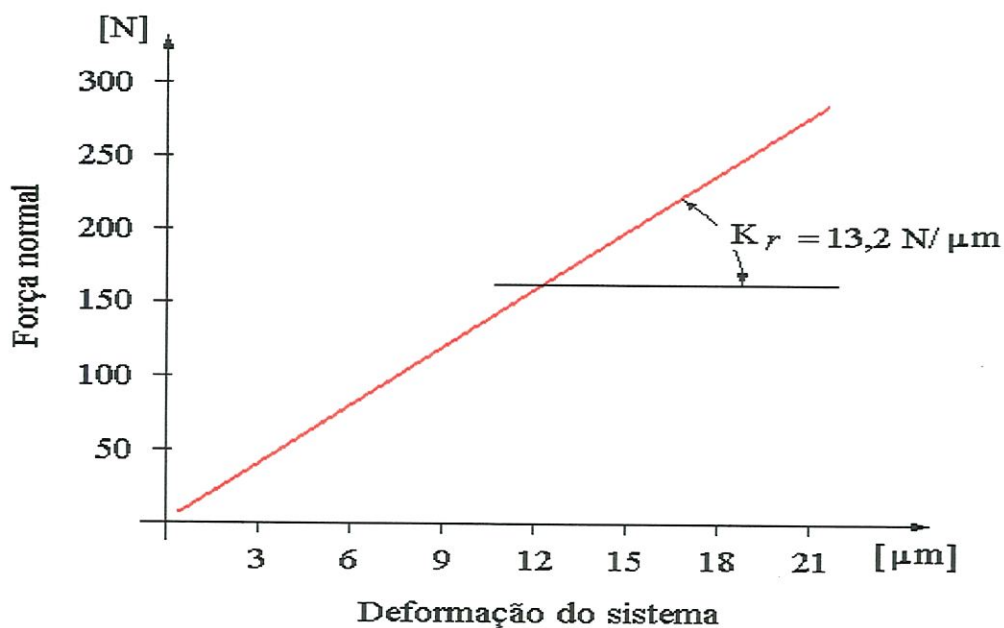


Figura 4-06: Rigidez estática da retificadora TRIPET.
[OLIVEIRA (1988)]

4.3.2 Rebolo

A retificação das amostras é feita com o auxílio de um rebolo da marca WINTER e especificação D91-K+1313NY-B-C75. A especificação indica um rebolo de granulometria média, o grão de diamante tem dimensão média de $91\mu\text{m}$, o material aglomerante é do

tipo resinóide e a concentração de diamante é de 75% ($3,3 \text{ Kt/cm}^3$). O rebolo é do tipo reto, tem 200 mm de diâmetro externo, 20 mm de largura e 4 mm de largura na camada abrasiva.

O rebolo é cuidadosamente balanceado por intermédio de massas balanceadoras montadas na flange e tem sua concentricidade devidamente controlada. A figura 4-07 mostra os alguns detalhes do rebolo, em (a) estão as indicações das partes constituintes e a flange com os dispositivos de balanceamento, em (b) é apresentada a superfície de corte do rebolo onde podem ser identificados os grãos abrasivos e o aglomerante.

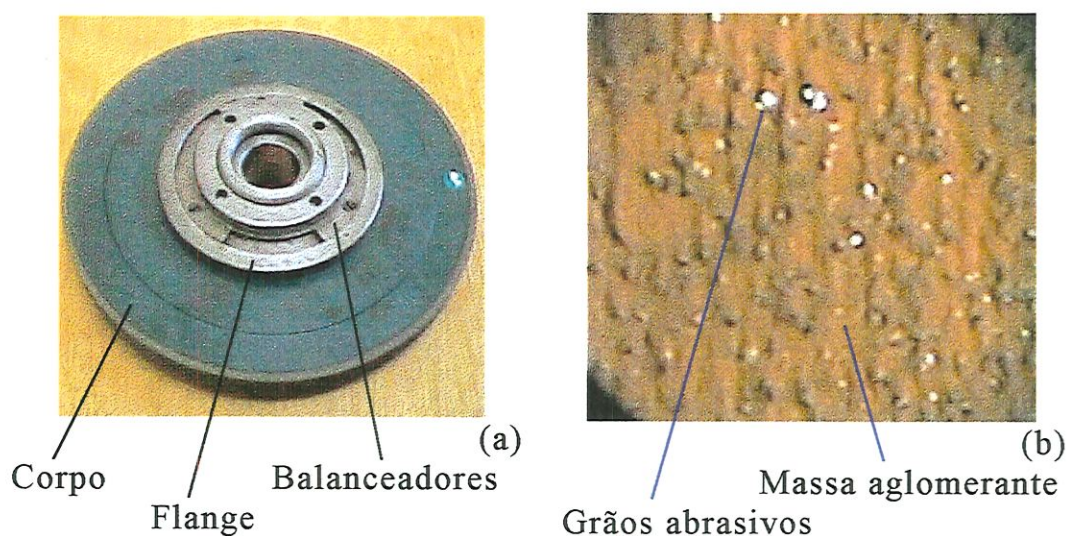


Figura 4-07: Rebolo de diamante (a) e superfície de corte (b)

4.3.3 Sistema de emissão acústica

A emissão acústica é avaliada através da unidade de monitoramento com um sensor piezoelétrico de emissão acústica, fabricado pela empresa SENSIS – São Carlos. Este sistema é composto pela unidade BM-12 com filtro de 100 MHz, ajustado com uma amplificação de 40 dB e por um computador equipado com o software LabView da National Instruments, que mede, gerencia e permite o armazenamento dos níveis de emissão acústica obtidos.

O SENSIS BM-12, figura 4-08, é um equipamento de concepção analógica, ele toma os dados do comportamento acústico através do sensor ao longo do tempo de retificação, amplifica estes sinais que filtrados estabelecem uma frequência para cada ponto medido no ensaio. O resultado das medições não permite observar os instantes em que foram tomados os valores RMS, porém podem ser avaliados por meio da sequência dos leds ou calculados em função do número de pontos medidos por unidade de tempo.

Os valores de tensão obtidos sofrem variações conforme os parâmetros instantâneos de corte, portanto durante a preparação para os ensaios, o ganho do sistema é ajustado de maneira que os sinais de E.A. RMS, máximo e mínimo resultantes, estejam dentro da escala de medição do sistema.

A peça é fixada numa morsa universal que por sua vez é presa na mesa magnética da mesa da retificadora. O sensor de aquisição da emissão acústica é fixado na mandíbula móvel da morsa e próximo da peça.





Figura 4-08: Unidade de monitoração de Emissão Acústica SENSIS BM-12

4.4 Desenvolvimento do ensaio

O ensaio é executado em duas partes. Inicialmente é desenvolvido o ensaio de retificação no qual os corpos-de-prova são retificados com variadas condições de corte, após isso é feito o ensaio de resistência por flexão.

4.4.1 Ensaio de retificação

Os corpos de prova em número de 48 são identificados por dois dígitos 01 – 02 – 03 – 04 - -46 – 47 - 48 e

distribuídos em quatro grupos (*A*, *B*, *C* e *D*) de doze amostras para cada condição de ensaio.

Os parâmetros de corte adotados para o ensaio são profundidade de penetração e velocidade longitudinal da mesa. A tabela IV-06 indica o conjunto de valores dos parâmetros utilizados no ensaio.

Os corpo-de-prova são retificados um a um com o ajuste da profundidade de penetração estabelecida tanto para o corte concordante como discordante. A retificação é feita por mergulho de modo a formar na peça um rebaixo de 300 μm de altura e largura igual a espessura do rebolo, ou seja, 20,0 mm, na figura 4-09 é apresentado o desenho do corpo de prova após a retificação.

Tabela IV-06: Parâmetros do ensaio

Número dos corpos-de-prova ensaiados	Profundidade de penetração $a = [\mu\text{m}]$	Velocidade da mesa $v_w = [\text{m/min}]$
02 - 04 - 06 - 15 16 - 17 - 18 - 19 21 - 22 - 23 - 24	1,0	7,50
01 - 03 - 05 - 07 08 - 09 - 25 - 26 27 - 28 - 29 - 30	20,0	18,75
10 - 11 - 12 - 13 14 - 20 - 31 - 32 33 - 34 - 35 - 36	40,0	29,20
37 - 38 - 39 - 40 41 - 42 - 43 - 44 45 - 46 - 47 - 48	55,0	86,50

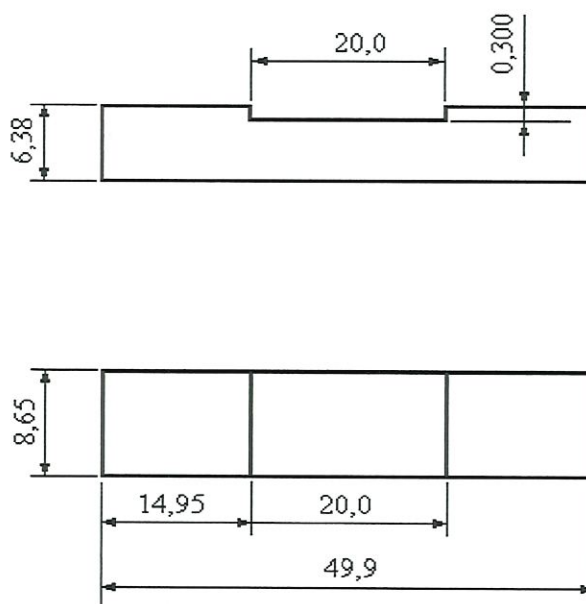


Figura 4-09: Corpo-de-prova retificado como rebaixo de 300 μm

O número de passadas é função da profundidade de penetração adotada. Para as amostras do grupo “A” onde $a = 1,0 \mu\text{m}$, são dados 300 passes de retificação; as amostras do grupo “B” que tem $a = 20,0 \mu\text{m}$ são retificadas com 15 passes; o grupo “C” que tem para as amostras, a profundidade estabelecida em $a = 40,0 \mu\text{m}$ é retificado com um passe de $20,0 \mu\text{m}$ seguido de 7 passes de $40,0 \mu\text{m}$; os corpos-de-prova do grupo “D” onde $a = 55,0 \mu\text{m}$ são retificados com o primeiro passe de $25 \mu\text{m}$ somado à 5 passes de $55,0 \mu\text{m}$.

Para cada par de parâmetros utilizado nos ensaios, são tomados os valores resultantes do nível de emissão acústica para posterior análise.

4.4.2 Ensaio de flexão

O ensaio de flexão foi feito em acordo com as orientações especificadas nas normas ASTM C 1161-90 e JIS R 1601. Fabricou-se um dispositivo de apoio a três pontos bi-articulado com o objetivo de evitar influências derivadas de possíveis erros de paralelismo entre as faces dos corpos-de-prova.

O corpo-de-prova é posicionado transversalmente aos roletes de apoio do dispositivo e ao rolete superior que é responsável pela formação da linha onde é aplicada a carga de ensaio. A força é constante e aplicada uniformemente com a velocidade de 0,5 mm/min até o momento da ruptura, as figuras 4-10 e 4-11 mostram a posicionamento esquemático do dispositivo de apoio do corpo-de-prova e a execução do ensaio respectivamente.

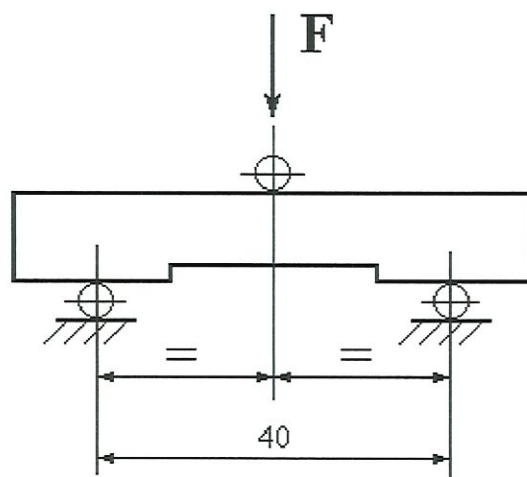


Figura 4-10: Posicionamento do corpo de prova no dispositivo de ensaio de flexão

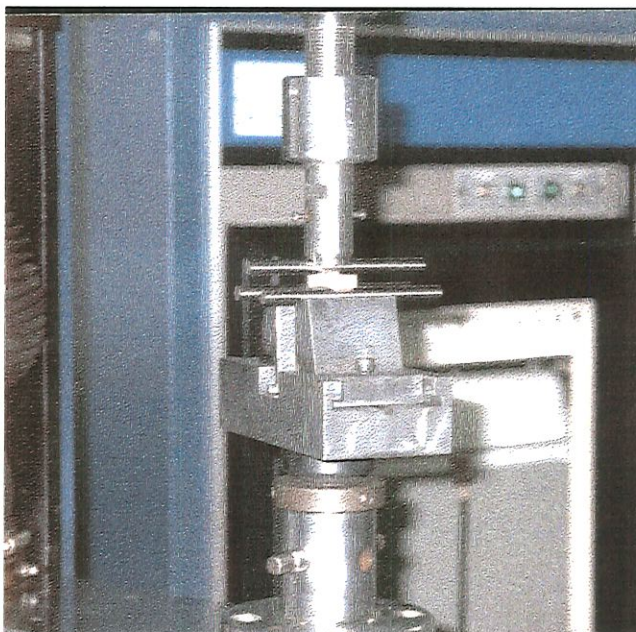


Figura 4-11: Ensaio de flexão na máquina INSTRON , modelo TTDML

A equação 4.1 usada no cálculo da tensão de ruptura é indicada pela norma ASTM C 1161-90, corresponde à fórmula para o cálculo da resistência de uma barra, considerando a flexão à 3 pontos condição do ensaio neste trabalho tem-se:

$$\sigma = \frac{3Fl}{2bh^2} \dots\dots\dots(4.1)$$

onde: σ = tensão de ruptura à flexão [MPa]

F = carga máxima de ruptura [Kgf]

l = distância entre os apoios [mm]

b = largura do corpo-de-prova [mm]

h = altura do corpo-de-prova [mm];

Os cálculos foram feitos com os valores da força de ruptura obtidos no gráfico da máquina de ensaio, o comprimento l é constante e medido no dispositivo de apoio do corpo-de-prova, as dimensões b e d são medidas diretamente nas amostras.

5. RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO

O presente capítulo apresenta e discute os resultados obtidos nos ensaios de retificação plana tangencial, com os respectivos valores de emissão acústica, e nos ensaios de flexão. Buscou-se correlacionar a severidade do processo de retificação com a resistência à flexão dos corpos de prova. A seguir são apresentados os dados referentes a fabricação dos corpos de prova.

5.1 Características físicas dos corpos de prova

Os corpos de prova sinterizados apresentaram variações nas características geométricas quando comparados ao corpo-de-prova apenas compactado. Estas variações ocorrem tanto na seção transversal e longitudinal devido principalmente ao gradiente de temperatura no interior da mufla durante a sinterização. Outro motivo que leva à deformação do corpo-de-prova é a forma utilizada para a compactação, pois a aplicação de força uniaxial na prensagem, resulta em níveis diferentes de aglutinação do pó, fazendo com que a região próxima do punção seja formada por um maior volume de grãos. Considerando que a parte superior do corpo-de-prova tenha

possibilidade de maior expansão, devido a falta de homogeneidade de pressão durante a prensagem do corpo-de-prova, ocorre a deformação conforme mostra a figura 5-01.

A seção longitudinal sofre uma deformação em forma de arco onde a parte central permanece na posição enquanto no sentido da extremidade ocorre um arqueamento progressivo. Na direção transversal, a deformação é caracterizada pela diminuição da dimensão da largura inferior, transformando a seção inicialmente retangular em trapezoidal, a figura 5-01 mostra de modo esquemático e sem escala, um corpo-de-prova com as cotas representantes dos valores médios das dimensões em milímetros.

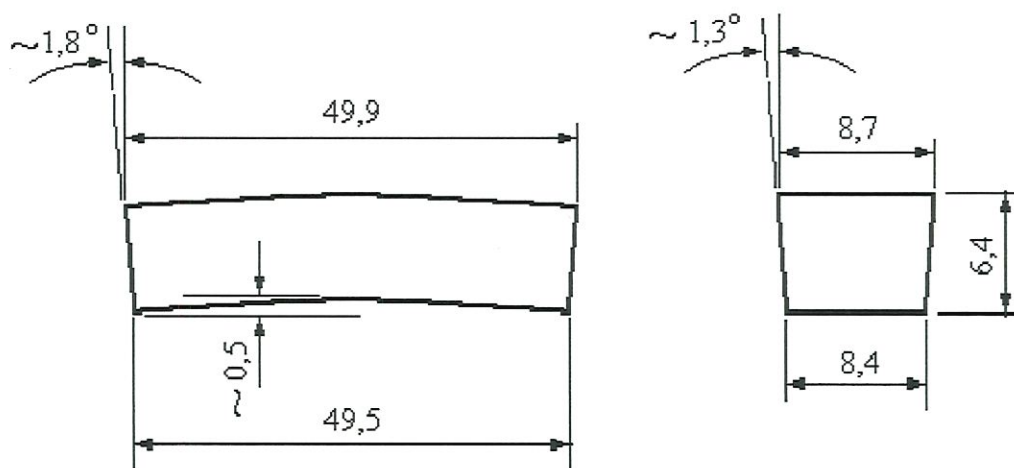


Figura 5-01: Deformações do corpo-de-prova sintetizado

Após a fabricação dos corpos de prova, foram escolhidos aqueles que mantiveram melhor qualidade dimensional e geométrica durante o processo. Este procedimento permitiu-nos observar que as deformações geométricas dos corpos de prova são relativamente pequenas em relação às outras dimensões, o que pode ser entendido

como boa qualidade do processo de fabricação em relação à planeza e ao paralelismo das faces. É importante salientar a manutenção da altura do corpo-de-prova na região retificada, este aspecto aliado ao fato de que a tensão de ruptura ocorre na região central, nas imediações da linha de aplicação da força, entende-se como importância nula o valor da flecha “*f*” dos corpos de prova.

5.1.1 Densidade do corpo-de-prova

Ao longo do processo produtivo, um grupo de dez corpos de prova foram avaliados quanto a sua densidade aparente e retração percentual. Destacam-se as avaliações feitas no momento anterior à compactação, quando o pó é colocado na cavidade do molde, logo após a compactação, já na forma prismática de um paralelepípedo; após a secagem durante uma hora à temperatura de 120 °C; após a pré-queima na temperatura de 1050 °C e após a sinterização à temperatura de 1650 °C. Os cálculos e avaliações das densidades nos momentos mencionados fundamentaram-se numa amostragem de dez peças, ou seja aproximadamente 20% da população dos corpos de prova fabricados. Para as medições, utilizou-se um paquímetro digital com resolução centesimal e uma balança com resolução de 0,1g com os quais foram obtidos valores em cada estágio de fabricação, estes são dispostos nas tabelas V-02; V-03 e V04. Nota-se que entre os corpos de prova apenas compactados e após terem sido secados, não há alteração significativa de volume e massa, deste modo entre as duas fases de fabricação não ocorre variação de densidade e retração volumétrica.

TABELA V-02: Densidade dos corpos de prova compactados e secos

Corpo de prova	Dimensões			Volume [mm ³]	Peso [g]	Densidade aparente [g/cm ³]
	Comprimento [mm]	Largura [mm]	Altura [mm]			
A	61,50	10,65	7,90	5,17	11,03	2,13
B	61,50	10,60	7,90	5,15	10,98	2,13
C	61,50	10,70	7,85	5,17	11,00	2,13
D	61,50	10,70	7,88	5,18	10,96	2,11
E	61,50	10,70	7,85	5,17	10,98	2,13
F	61,50	10,65	7,83	5,13	10,91	2,13
G	61,50	10,70	7,75	5,10	10,90	2,14
H	61,50	10,70	7,73	5,09	10,46	2,06
I	61,50	10,70	7,75	5,10	10,92	2,14
J	61,50	10,65	7,80	5,11	11,00	2,15
Densidade aparente média						2,13

TABELA V-03: Densidade dos corpos de prova após a pré queima

Corpo de prova	Dimensões			Volume [cm ³]	Peso [g]	Densidade aparente [g/cm ³]
	Comprimento [mm]	Largura [mm]	Altura [mm]			
A	61,00	10,56	7,68	4,94	10,29	2,08
B	61,01	10,57	7,78	5,02	10,32	2,06
C	61,02	10,57	7,84	5,05	10,34	2,05
D	60,96	10,56	7,85	5,05	10,35	2,05
E	60,95	10,57	7,83	5,04	10,31	2,04
F	60,99	10,57	7,77	5,01	10,31	2,06
G	60,98	10,57	7,79	5,02	10,28	2,05
H	60,98	10,57	7,77	5,01	10,26	2,05
I	61,00	10,57	7,87	5,07	10,35	2,04
J	61,00	10,56	7,77	5,00	10,26	2,05
Densidade aparente média						2,05

TABELA V-04: Densidade dos corpos de prova após a sinterização

Corpo de prova	Dimensões			Volume [cm ³]	Peso [g]	Densidade aparente [g/cm ³]
	Comprimento [mm]	Largura [mm]	Altura [mm]			
A	49,73	8,60	7,20	3,08	11,57	3,76
B	49,79	8,68	6,26	2,71	10,05	3,71
C	49,86	8,68	5,98	2,59	9,69	3,75
D	49,96	8,73	6,38	2,78	10,26	3,69
E	49,78	8,69	6,39	2,76	10,25	3,71
F	49,76	8,69	6,38	2,76	10,19	3,69
G	49,89	8,72	6,42	2,79	10,3	3,69
H	49,73	8,68	6,43	2,77	10,27	3,70
I	49,99	8,72	6,40	2,79	10,18	3,65
J	49,98	8,72	6,43	2,80	10,32	3,68
Densidade aparente média						3,70

As variações encontradas nas densidades podem ser atribuídas à dispersão de medição das dimensões do corpo-de-prova. Verificou-se também, a densidade do corpo-de-prova sinterizado por imersão conforme o princípio de Arquimedes o qual indicou a densidade de 3,78 g.cm³, este valor é mais confiável pelo fato de não considerar parte dos espaços tomados pela porosidade. A análise dos valores da tabela V-05, na qual estão apresentados os valores médios das densidades calculadas permite verificar as densidades aparentes, a relação entre as densidades aparente D_{ap} e teórica D_{th} e a retração de compactação e da sinterização ao longo do processo produtivo. FORTULAN (1997) observa que a retração decorrente do processo de sinterização possibilita, em maior ou menor grau, distorções geométricas e dimensionais comprometendo assim o projeto do

componente estrutural, lembra ainda que a densidade teórica da alumina 99,5% é $3,92 \text{ g/cm}^3$.

TABELA V-05: Densidades aparentes e retrações ao longo do processo de fabricação

Estágio de fabricação	Densidade		Retração volumétrica %
	Valor g/cm^3	D_{ap}/D_{th} [%]	
Pó	3,92	-	-
Compactado e secado (Verde)	2,13	54,3	-
Pré-queimado	2,05	52,3	2,33
Sinterizado	3,78	96,4	45,22
Retração total entre o corpo-de-prova verde e sinterizado			46,50

5.1.2 Avaliação superficial

Os corpos de prova foram avaliados com o objetivo de conhecer as estruturas superficiais microscópicas das faces retificadas e as características das superfícies resultantes da ruptura por flexão.

As amostras utilizadas para a caracterização da microestrutura não sofreram qualquer outra operação de usinagem, pretendeu-se com isto, não alterar as condições impostas às superfícies, quer sejam fissuras ou grãos relativamente soltos devido aos ensaios de retificação e flexão. A análise foi feita com o auxílio

do *Digital Scanning Microscope D.S.M. – 960 ZEISS*. Estas amostras foram coladas em suportes metálicos e ligados com tinta de prata condutora para aterramento elétrico, a superfície de ensaio recebeu ainda uma película de 20 nm de ouro para permitir o estabelecimento do feixe eletrônico no microscópio. A figura 5-02 apresenta uma amostra preparada para a análise no D.S.M.

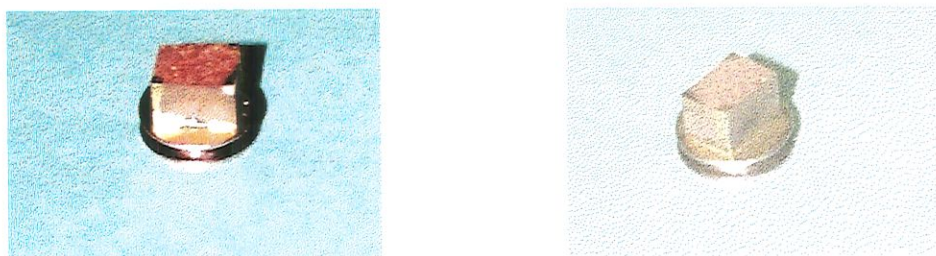


Figura 5-02: Preparação da amostra para a caracterização da estrutura

A Figura 5-03 mostra uma ampliação da superfície externa do corpo-de-prova após a sinterização. A face avaliada não sofreu qualquer tipo de usinagem, buscou-se com isto, mostrar as características superficiais do corpo-de-prova ainda em bruto, ou seja, antes da retificação. Pela foto, podem ser observadas as porosidades existentes e as irregularidades superficiais geradas durante a compactação.

A figura 5-04 mostra a superfície retificada da mesma amostra onde as irregularidades superficiais da prensagem foram removidas. As condições utilizadas na retificação são as mais brandas (profundidade de corte de 1,0 μm e velocidade de passagem

a 7,5 mm/s), o que resulta numa superfície isenta de imperfeições e trincas.

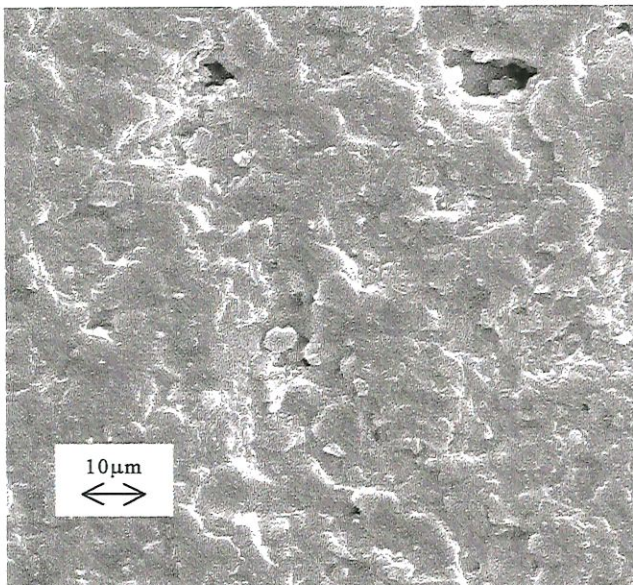


Figura 5-03: Microestrutura da Alumina 99,5% prensada uniaxialmente com ampliação de 1000vezes (corpo-de-prova 02).

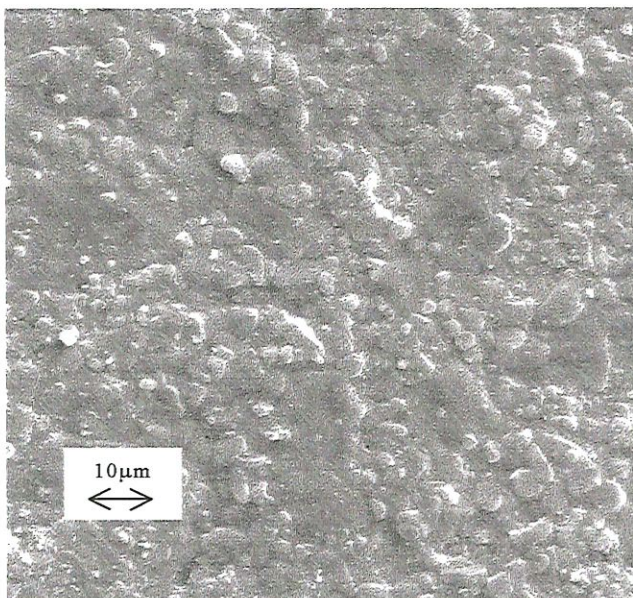


Figura 5-04: Superfície retificada, com condições brandas de retificação, com ampliação de 1000 vezes. (corpo-de-prova 02)

A figura 5-05 mostra a superfície retificada do corpo-de-prova número 46. Nesta caso as condições de usinagem foram muito severas. Observam-se na figura, grandes parcelas destacadas e, na região central, quantidades de material com alto índice de deformação plástica após a passagem de um grão abrasivo. Esta superfície lisa é gerada provavelmente devido a alta carga e alta temperatura durante o contato grão/peça, que possibilita este nível de deformação plástica na cerâmica. A mesma região onde o grão abrasivo deixa a superfície com textura diferenciada pode ser observada com maior ampliação na foto da figura 5-06. Nesta foto observa-se melhor o grau de deformação a que foi submetido o material cerâmico. A visualização de trincas não é evidente em nenhuma das superfícies retificadas, uma vez que a camada deformada em alta temperatura deve cobrir tais trincas, que passam a ser sub-superficiais.

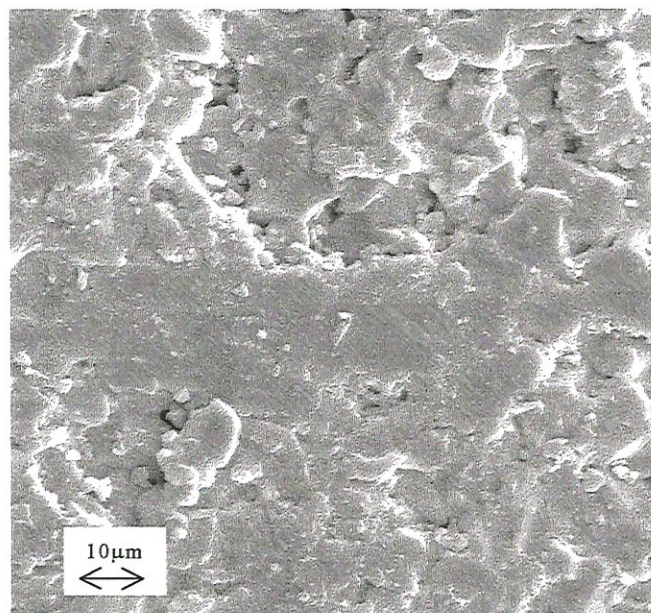


Figura 5-05: Superfície retificada com condições severas e ampliada em 1000 vezes. (corpo-de-prova 46).

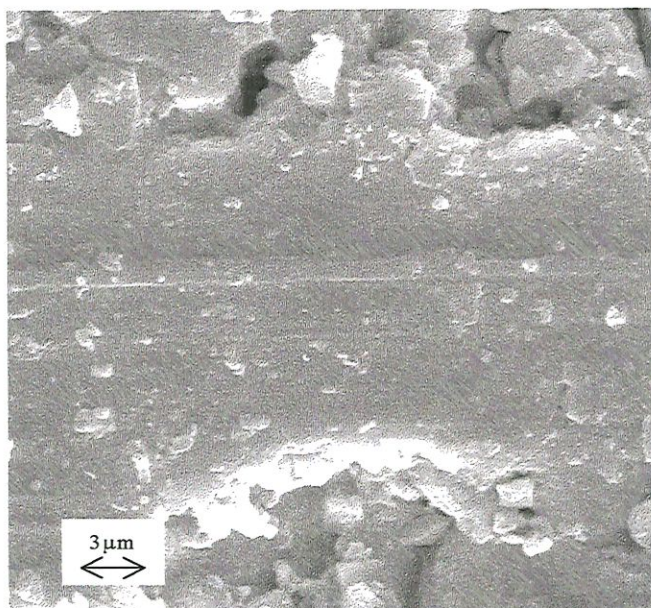


Figura 5-06: Região deformada pela ação do grão abrasivo do rebolo (corpo-de-prova 46) com aumento de 3000 vezes.

Para melhor se observar as trincas sub-superficiais, foram fotografadas as superfícies resultantes da fratura do ensaio de flexão numa região próxima à superfície retificada. A Figura 5-07 mostra esta região onde a parte superior da figura apresenta-se perpendicularmente à superfície do papel, a textura superficial do processo de retificação de um corpo-de-prova cortado com uma condição média de trabalho. É possível se observar que, após a ruptura, ficaram parcelas quase destacadas de material que indicam a existência de regiões sub-superficiais enfraquecidas pela existência de trincas.

Outro fato interessante refere-se às indicações de compactação superficial sofrida pelo material durante a retificação. Esta deformação superficial, associada às altas temperaturas de contato possibilitaram a formação das superfícies indicadas na figura 5-06. Entretanto, como a temperatura abaixo da superfície é mais

baixa, as deformações ultrapassaram os limites de resistência intergranular formando as trincas dispersas.

O detalhe indicado na figura 5-07 com um círculo mostra que mesmo numa região mais distante da superfície ocorrem trincas intragranulares, o que contribui para a hipótese de que estas falhas são geradas durante a retificação. Este detalhe pode ser melhor observado na figura 5-08.

As figuras 5-09 e 5-10 mostram as superfícies rompidas de corpos de prova retificados com uma condição mais severa de trabalho (altos valores de heq e $Q'w$). Observam-se grandes partículas soltas (a ampliação da fotos é de 1000 vezes), o que indica que a região sub-superficial do material estava repleta de trincas e rupturas intergranulares provocadas pelos altos esforços advindos as ação dos grão abrasivos. Estas hipóteses deverão ser confirmadas com os ensaios de flexão e emissão acústica.

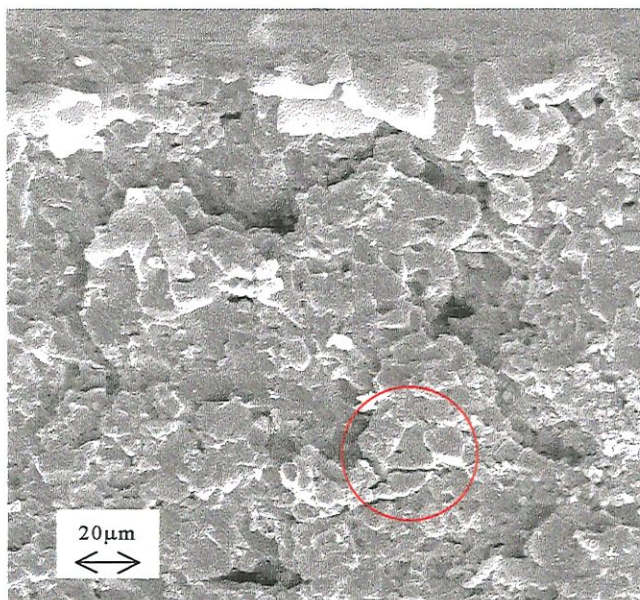


Figura 5-07: Fratura da amostra 29 com ampliação de 500 vezes

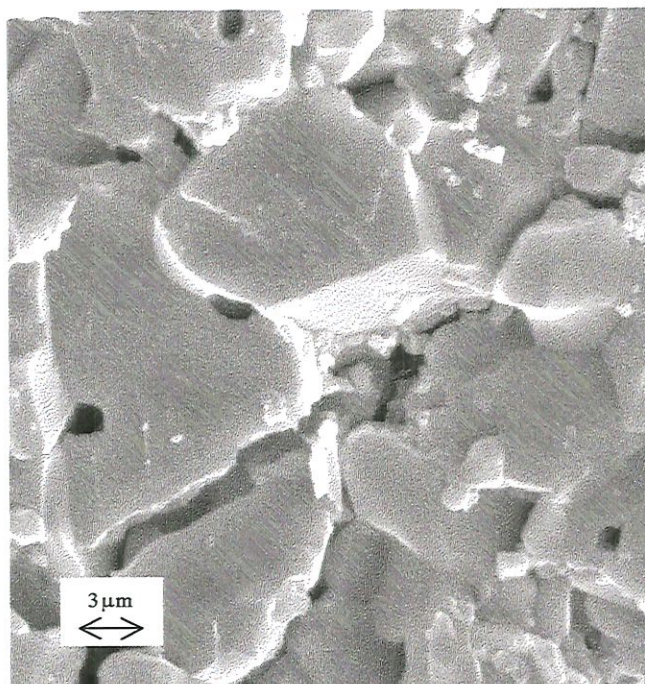


Figura 5-08: Fratura da amostra 29 com ampliação de 3000 vezes.
(Detalhe indicado na figura anterior)

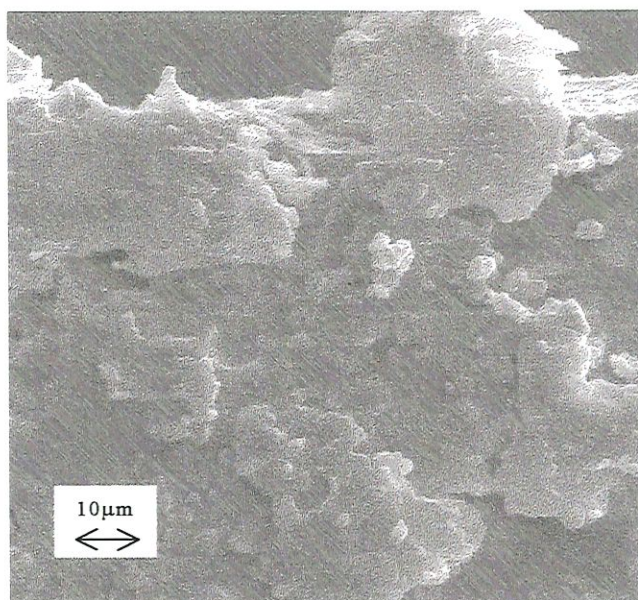


Figura 5-09: Fratura do corpo-de-prova retificado com condições severas de trabalho (corpo-de-prova número 38), com aumento de 1000 vezes

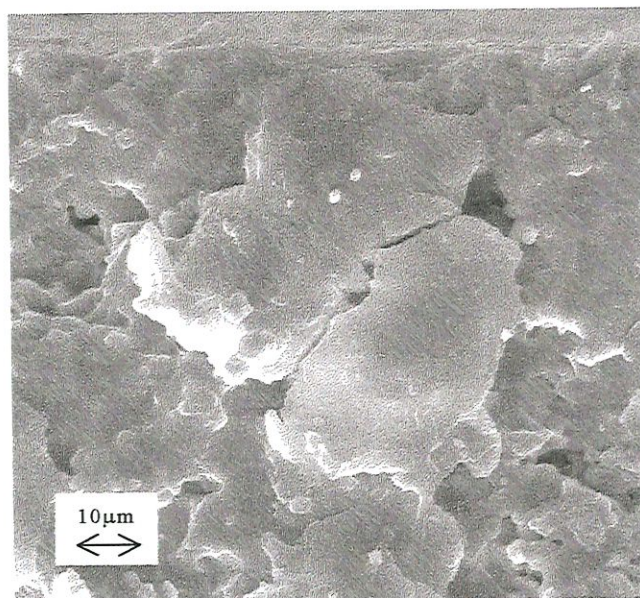


Figura 5-10:Fratura do corpo-de-prova retificado com condições severas de trabalho (corpo-de-prova número 46), com aumento de 1000 vezes

5.2 Resultados obtidos nos testes de retificação e flexão

Os resultados foram obtidos através dos ensaios de retificação, acompanhados do monitoramento com um sistema de emissão acústica, e de testes de resistência à flexão são aqui apresentados. A avaliação do nível de emissão acústica RMS permitiu identificar o nível de energia acústica liberada pelo processo de retificação, que entende-se que deve ser maior quanto maior for o nível de geração de trincas sub-superficiais. Os testes de flexão permitiram avaliar efetivamente a perda de resistência provocada pelo aumento nos danos gerados nas condições de trabalho mais severas de retificação.

5.2.1 Visão geral dos resultados obtidos

Os ensaios exigiram um grande número de passadas de retificação. Procederam-se em torno de 4000 passes de retificação nos corpos de prova. A tabela V-06 apresenta o resumo dos valores resultantes dos ensaios especificando as dimensões das amostras, os parâmetros de corte, os níveis de emissão acústica obtidos e os dados oriundos do ensaio de flexão.

A tabela V-06 apresenta as amostras divididas em quatro grupos de doze corpos de prova que foram escolhidos de forma aleatória.

Após a sinterização os corpos de prova sofreram pequenos desvios de dimensões na seção transversal. Nas colunas das dimensões estão relacionadas as medidas da altura e da largura efetiva consideradas para o cálculo da tensão de flexão.

Cada grupo de amostras foi retificado com parâmetros de corte distintos, os quais foram subdivididos em condições severas e condições brandas de corte. As condições severas, referem-se àquelas onde a profundidade de corte (a) é maior que $20 \mu\text{m}$ e concomitante com uma velocidade de avanço (v_w) maior que $18,75 \text{ mm/s}$. Como condições brandas de corte, são identificadas as usinagens executadas com profundidade de corte menor que $20 \mu\text{m}$ e velocidade de avanço menor que $18,75 \text{ mm/s}$.

Os parâmetros de corte mais importantes no processo de retificação e utilizados no ensaio estão listados. Para cada grupo de corpos de prova, foram escolhidos parâmetros indiretos que indicam a severidade da operação, estes são: o volume de cavaco removido por unidade de tempo (Q'_w), a espessura de corte equivalente (h_{eq}) e

a espessura máxima do cavaco (h_{max}). A partir destes parâmetros, foram escolhidas condições de trabalho (como profundidade de corte (a) e velocidade da mesa (V_w) que permitissem atingir esta gama de variação. Buscou-se uma ampla variação na severidade da operação de retificação. Este fato foi priorizado (tendo em vista o número de corpos de prova disponíveis) em relação às possíveis investigações com combinações minuciosas das condições e trabalho.

A emissão acústica foi verificada para cada passada do rebolo na peça, totalizando em torno de 4000 medições, apresenta-se também na tabela o valor médio das tensões elétricas geradas pelo sistema de emissão acústica.

O ensaio de flexão teve como resultado direto, a força de ruptura do corpos de prova e através da equação da tensão em barras retangulares foram calculadas as tensões para cada amostra, a tensão média do grupo e respectivo desvio padrão também são apresentados.

Os corpos de prova avaliados através do sistema de emissão acústica, apresentaram como resultados níveis de tensão variáveis conforme os parâmetros da retificação. A observação dos números apresentados na tabela V-06, mostra um crescimento do nível de emissão acústica com o aumento da profundidade e da taxa de remoção de material, para a mesma variação deste parâmetro, a força limite de ruptura e respectiva tensão de ruptura tem a suas médias diminuídas.

TABELA V-06: Resumo dos valores de ensaio

Peça	Dimensões		Parâmetros de corte					Emissão acústica		Ensaio de flexão													
	largura média	altura média	a [μm]	Vw [mm/s]	Q'w mm2/s	heq [μm]	hmax [μm]	medida [volts]	média [volts]	Força [Kgf]	Tensão [MPa]	Tensão média [MPa]	Desvio padrão [MPa]	Módulo de Weibull									
2	8,63	6,06	1,0	7,50	0,0075	0,0003	0,0291	0,60	0,67	189	358	325	23	14									
4	8,69	6,12						0,58		163	300												
6	8,68	6,00						0,60		187	359												
15	8,64	6,12						0,58		170	316												
16	8,69	6,13						0,70		184	339												
17	8,67	6,10						0,91		159	296												
18	8,60	6,19						0,51		180	328												
19	8,64	6,20						1,00		171	309												
21	8,65	6,11						0,44		179	333												
22	8,66	6,10						0,73		185	345												
23	8,67	6,14						0,64		160	294												
24	8,71	6,09						0,76		174	324												
1	8,69	6,10						20,0		18,75	0,3750				0,0130	0,3255	2,28	2,95	157	291	319	28	11
3	8,66	6,14															2,34		188	346			
5	8,63	6,14	2,16	194	358																		
7	8,61	6,10	3,34	198	371																		
8	8,70	6,11	3,60	162	299																		
9	8,66	6,09	3,45	164	307																		
25	8,65	6,03	3,84	167	319																		
26	8,65	6,09	3,14	168	314																		
27	8,67	6,09	2,35	172	321																		
28	8,63	6,15	3,03	173	318																		
29	8,67	6,14	2,59	166	305																		
30	8,68	6,15	3,31	150	274																		
10	8,69	6,03	40,0	29,20	1,1680	0,0406	0,7170		4,03			4,00	163	310			306		9	31			
11	8,61	6,09							4,13				159	299									
12	8,66	6,14						3,98	164	302													
13	8,62	6,15						3,80	167	308													
14	8,60	6,19						4,02	168	307													
20	8,67	6,09						3,99	151	282													
31	8,69	6,09						3,91	169	315													
32	8,65	6,07						3,95	163	307													
33	8,61	6,11						4,32	170	318													
34	8,65	6,18						4,05	171	311													
35	8,65	6,10						3,85	167	311													
36	8,64	6,09						4,02	162	304													
37	8,63	6,04						55,00	86,50	4,7575	0,1652		2,4905	4,32	4,23	133		254			267	29	9
38	8,68	6,09												4,22		141		263					
39	8,62	6,21	4,16	161	291																		
40	8,61	6,15	4,32	147	271																		
41	8,62	6,06	4,05	149	283																		
42	8,64	6,01	4,15	125	240																		
43	8,71	6,05	4,31	152	286																		
44	8,65	6,10	4,24	156	291																		
45	8,62	6,22	4,31	178	321																		
46	8,64	6,10	4,25	121	226																		
47	8,65	6,18	4,36	137	249																		
48	8,66	6,16	4,10	122	223																		

5.2.2 Influência da taxa de remoção no valor de E.A.

Os níveis de emissão acústica medidos para as diversas condições de retificação apresentaram valores variáveis. O resultado obtido teve variações conforme os parâmetros de corte, porém numa mesma amostra e mantendo-se constante as condições de trabalho, verificaram-se diferentes amplitudes da emissão acústica. As maiores diferenças indicadas por picos de tensão ocorrem quando o rebolo entra e sai da peça. Este fenômeno ocorre principalmente pela falta de refrigeração e lubrificação durante o corte ocasionando assim, a necessidade de maior energia para a remoção dos cavacos.

A figura 5-11 apresenta de modo esquemático, a característica do sinal típico da emissão acústica durante um ciclo de corte onde a parte esquerda do gráfico representa a usinagem discordante e o lado direito o concordante.

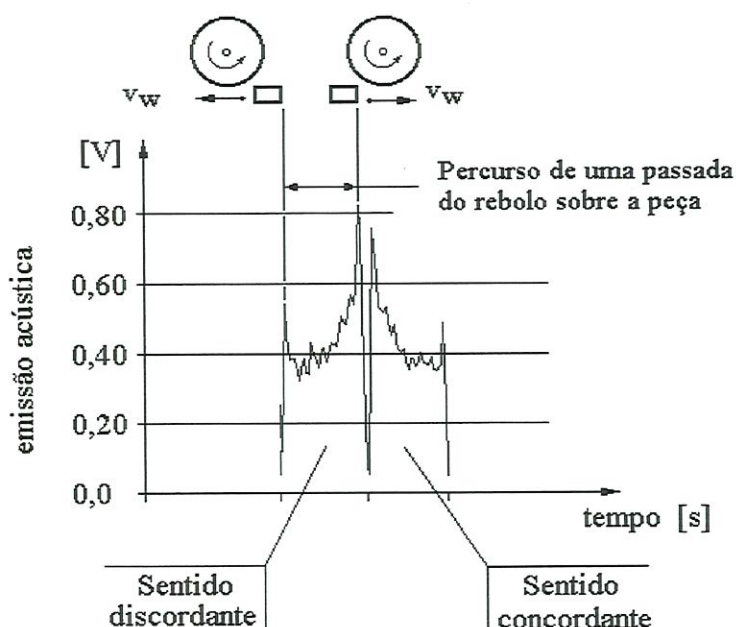


Figura 5-11: Característica da variação do nível da emissão Acústica (RMS) na retificação discordante e concordante.

A figura 5-12 mostra as variações do nível de emissão acústica na retificação de uma amostra com profundidade de corte(a) de $1,0 \mu\text{m}$ e velocidade da mesa (v_w) de $7,5 \text{ mm/s}$, verifica-se na figura o tempo efetivo de corte para cada passada e os picos de emissão acústica durante o trabalho.

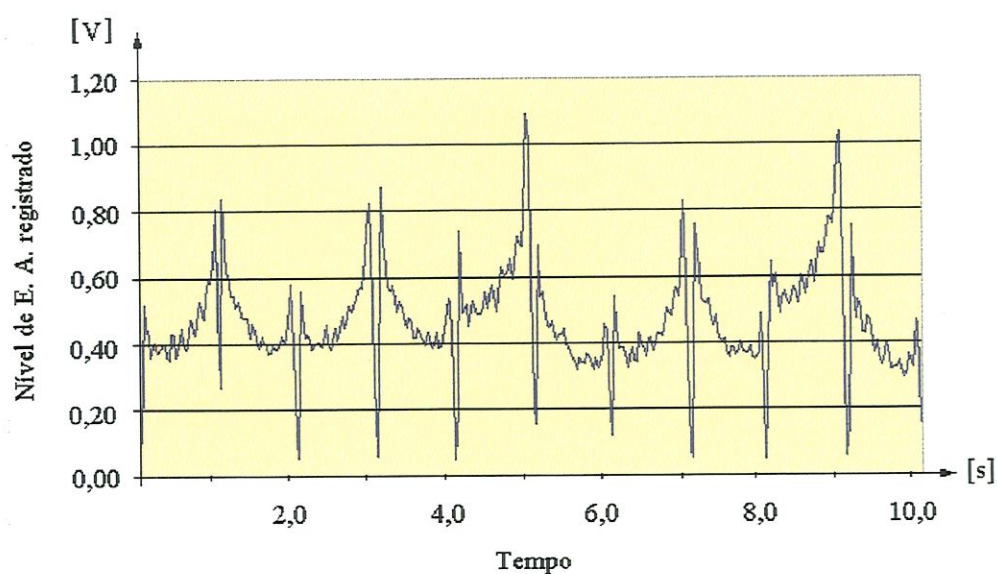


Figura 5-12: Variação da emissão acústica ao longo da retificação. (Espessura de penetração $a=1,0 \mu\text{m}$; Velocidade da mesa porta-peça $V_w=7,50 \text{ mm/s}$; Velocidade do rebolo $V_s=28,8 \text{ m/s}$)

Observa-se na figura 5-13 que o nível de emissão acústica cresce com o aumento do valor da taxa de remoção de material Q_w . Esta constatação permite inferir que o aumento do volume de cavaco removido por unidade de tempo, com conseqüente exigência de mais energia para a remoção dos cavacos, implica na introdução de

possíveis fissuras críticas na peça retificada. Entretanto a partir de um determinado nível de taxa de remoção o nível RMS do sinal de emissão acústica apresenta uma saturação. Isso significa que a partir de uma determinada severidade do processo existe uma limitação no crescimento do nível RMS da emissão acústica. Esta saturação pode ocorrer devido a problemas relacionados com o tamanho das partículas fraturadas sub-superficialmente. Quanto mais severa for a condição usada na retificação maiores são as parcelas fraturadas sub-superficialmente, mas a energia liberada é a mesma. O mesmo ocorre do processo de dressagem de rebolos conforma estudado anteriormente por Coelho 1991. Neste trabalho Coelho conclui que quanto maior a profundidade de dressagem de um rebolo maior sua aspereza, entretanto, a partir de uma determinada profundidade a aspereza não aumenta mais devido ao fato de que vários grãos passam a ser arrancados inteiramente. Este fenômeno foi comprovado mais tarde por Marinelli, 1997, que também mediu a emissão acústica no processo de dressagem de rebolos de óxido de alumínio.

O comportamento apresentado na figura 5.13 mostra que a partir de uma determinada taxa de remoção de material (da ordem de $1\text{mm}^3/\text{s.mm}$) trincas maiores são geradas com maior distância entre si, englobando uma maior quantidade de grãos, gerando uma mesma quantidade de emissão acústica. Da mesma forma deve haver então um limite máximo de taxa de remoção, acima do qual, a retificação danifica a peça.

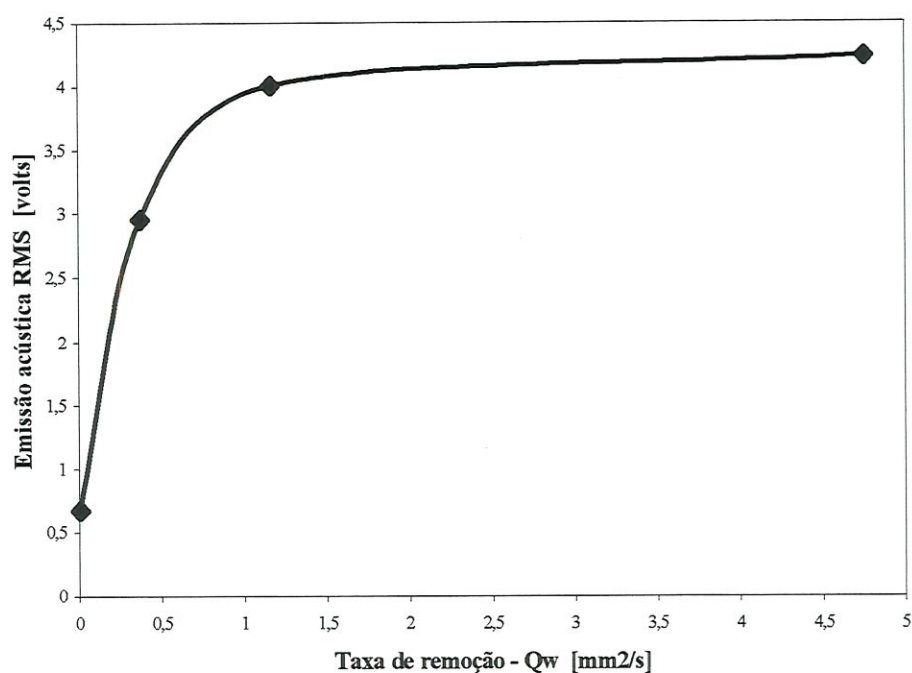


Figura 5-13: Influência da taxa de remoção no nível RMS da emissão acústica

5.2.3 Influência da taxa de remoção e espessura máxima na tensão de ruptura

A Tabela V-07 mostra um resumo dos resultados da tensão de ruptura à flexão em relação aos valores da taxa de remoção de material na retificação e a espessura de corte equivalente. Observa-se uma queda na tensão média para cada grupo de experimentos em relação ao aumento da severidade nas condições de retificação.

Os valores de resistência a flexão obtidos estão compatíveis com os métodos de fabricação dos corpos de prova. A dispersão

obtida nos ensaios de flexão é representada pelo módulo de Weibull que neste trabalho variou de 12 à 31, observa-se que estes valores pertencem à faixa usual para componentes cerâmicos.

Tabela V-07 – Resumo dos resultados da tensão de ruptura à flexão em relação aos parâmetros de retificação.

Q'w [mm ² /s]	heq [μm]	Tensão [MPa]			Módulo de Weibull
		Máx.	Mín.	Média	
0,0075	0,0003	357,81	294,36	325,04	14
0,3750	0,0130	358,35	274,30	318,80	11
1,1680	0,0406	315,32	281,76	306,07	31
4,7575	0,1652	320,76	223,12	266,61	9

O gráfico apresentado na figura 5.14 apresenta a correlação entre a taxa de remoção específica na retificação e a tensão de ruptura à flexão. As barras apresentadas no gráfico representam os valores máximos e mínimos obtidos em cada grupo de experimentos. Observa-se uma queda quase linear da tensão de ruptura em relação ao acréscimo na taxa de remoção de material na retificação. Isso confirma as hipóteses apresentadas de que quanto mais severas as condições de retificação, maior a quantidade de trincas sub-superficiais geradas na peça.

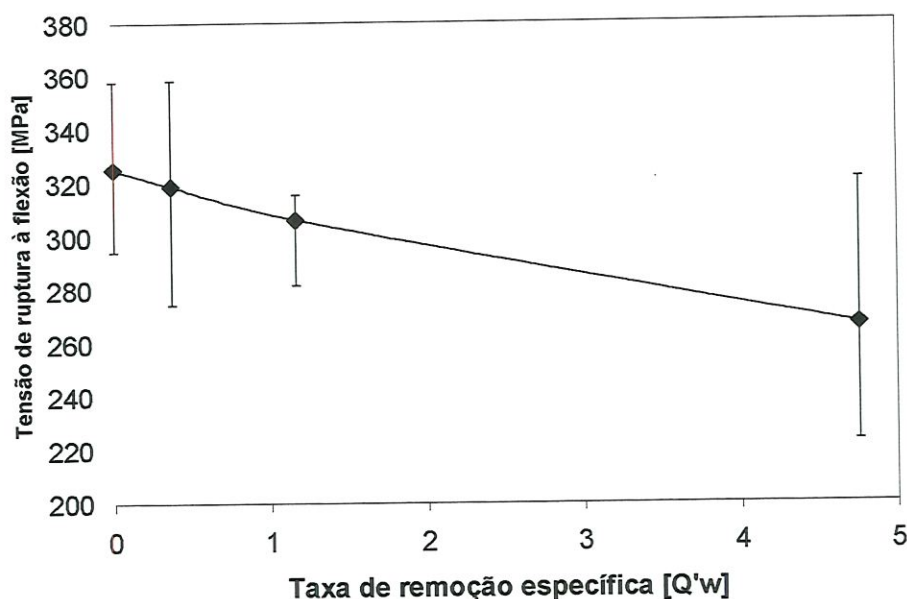


Figura 5-14: Influência da taxa de remoção específica ($Q'w$) no valor da tensão de ruptura

A linearidade do comportamento entre a severidade das condições de retificação e a resistência à ruptura dos corpos de prova aumenta ainda mais quando o parâmetro utilizado é a espessura máxima teórica do cavaco gerado na retificação (figura 5-15). Na figura estão apresentados a equação da reta de regressão e o coeficiente de correlação, sendo que este último tem o seu valor bem próximo da unidade.

A espessura do cavaco teórico no processo de retificação plana tangencial apresenta no plano de referência principal uma geometria similar à uma vírgula, sendo a espessura máxima representada pela maior cota medida na direção do raio correspondente do rebolo. Os grãos abrasivos ativos nesta região do cavaco desenvolvem maior energia em virtude de estarem removendo maior volume de material. A espessura máxima teórica do cavaco representa também o valor

teórico médio da máxima profundidade de penetração dos grãos abrasivos na peça. As barras apresentadas neste gráfico e também nos próximos apresentam o valor da dispersão da tensão de ruptura à flexão.

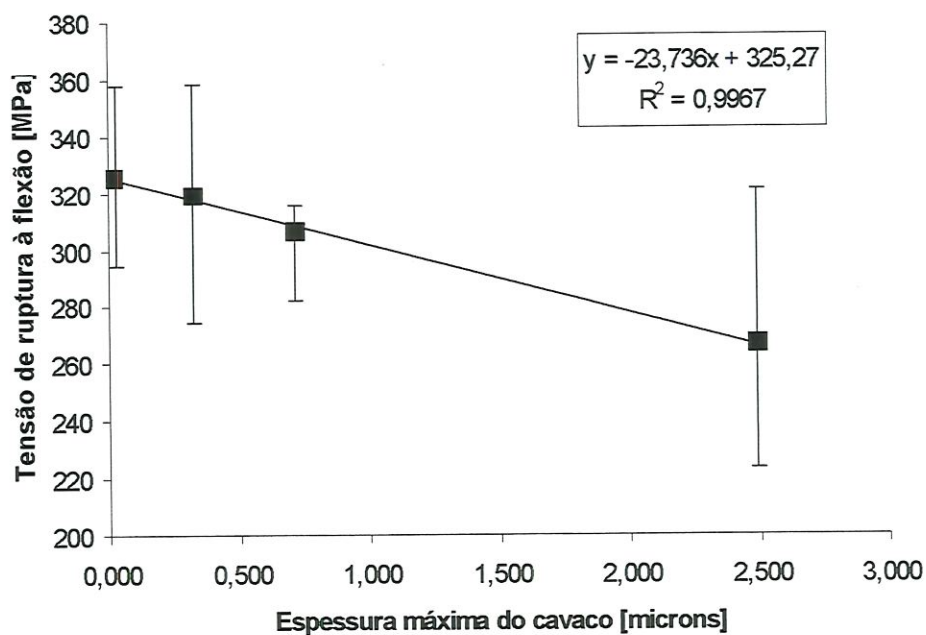


Figura 5-15: Influência da espessura máxima (h_{\max}) no valor tensão de ruptura

5.2.4 Inter-relação entre EArms e tensão de ruptura.

A figura 5.16 mostra a inter-relação entre a tensão de ruptura à flexão e o nível de emissão acústica medido durante a retificação dos corpos de prova. Devido ao fenômeno da saturação do sinal descrito anteriormente, ocorre um comportamento interessante entre as duas grandezas em análise.

Até o valor de 3,5 volts de emissão acústica, a queda no nível de tensão de ruptura é pouco significativo. A partir deste valor aproximadamente, observa-se uma brusca queda no nível de resistência à flexão para uma pequeno acréscimo no nível de emissão acústica.

Este comportamento pode ser explicado pelo fenômeno do crescimento do tamanho das trincas sub-superficiais, observado pelas maiores partículas soltas nas fotos de microscopia eletrônica, em condições muito severas de retificação.

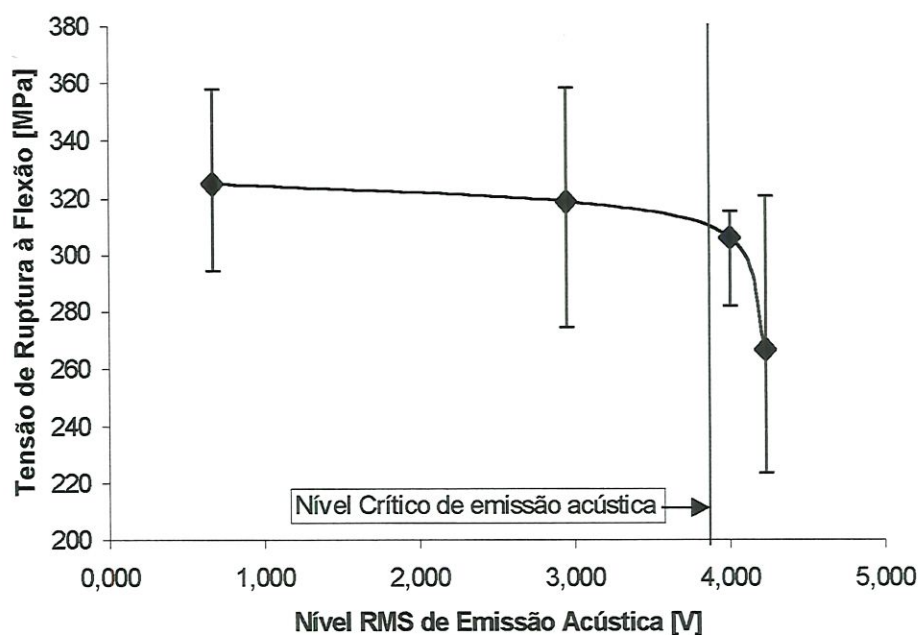


Figura 5-16: Influência da Emissão acústica no valor da tensão de ruptura

Existe portanto um nível crítico de emissão acústica na retificação, a partir do qual passa-se a correr risco de se obter um componente danificado e com baixa resistência mecânica. Este

resultado é muito importante pois torna o monitoramento do processo para que não se ultrapasse o valor limite, minimizando os danos causados pela retificação.

É interessante observar que o comportamento dos sinais e da tensão faz com que a faixa de emissão acústica que indica a retificação com baixa geração trincas seja bem ampla, o que torna a sua utilização para monitoramento mais adequada.

Obviamente esta é uma primeira investigação sobre este assunto, e mais confirmações dos fenômenos aqui propostos podem ser obtidas para se aumentar a confiabilidade sobre este método viabilizando seu uso industrial. Entretanto, os resultados desta pesquisa são muito animadores.

5.3 Aplicação da metodologia na retificação de cerâmicas policristalinas de Al_2O_3

Os fenômenos discutidos neste capítulo indicam uma maneira de se monitorar o processo de retificação de componentes cerâmicos visando a minimização na geração de danos sub-superficiais.

O experimento proposto possibilitou um número de amostras que resultou num cálculo de médias consistentes que puderam fornecer subsídios para a análise do comportamento do processo. Conforme pôde ser verificado, o nível da emissão acústica tem comportamento dividido em dois modos bem distintos. Nas amostras onde a tensão média de ruptura é praticamente constante em torno de 320 MPa, o nível da tensão elétrica resultante em função da

emissão acústica não ultrapassou o valor de 3,0 volts, porém verificase um decréscimo violento no valor médio da tensão de ruptura quando a tensão da emissão acústica ultrapassa 3,5 volts.

Com esta avaliação torna-se possível determinar o momento de cessar o aumento da taxa de remoção de cavaco durante a fabricação de componentes cerâmicos, ele é indicado pelo valor da emissão acústica que corresponde à faixa de tensão de ruptura na qual, a retificação tenha induzido um volume de fissuras que reduza significativamente a resistência do componente.

Com estas informações em mãos, um operador de retificadora pode estabelecer as condições de trabalho para a produção de um lote em mínimo tempo e com garantia da mínima geração de trincas na retificação.

Para isso, basta aplicar uma metodologia simplificada que possibilite a calibração do sistema de emissão acústica visando a obtenção do nível crítico de sinal. Isto pode ser feito com a utilização de valores extremos de condições de usinagem para a produção de amostras. Tais condições podem ser as limites máxima e mínima da retificadora. Durante a retificação das amostras, ajusta-se o ganho sistema de emissão acústica para possibilitar que o fundo de escala do sinal coincida com a condição mais severa de retificação. Com as amostras retificadas, faz-se testes de ruptura por flexão e verifica-se o nível de tensão admissível para cada caso.

Sabendo-se que a relação entre a resistência a flexão e a taxa de remoção de material na retificação é linear, busca-se, por interpolação linear, a condição de trabalho que proporcione um nível de tensão adequada. A partir daí retifica-se um conjunto de peças e ajusta-se o sistema de emissão acústica para acusar, por um alarme, caso as condições de trabalho sejam mais severas que o valor

ajustado. Desta forma pode-se garantir a produção do lote em mínimo tempo e com mínima geração de danos sub-superficiais.

É interessante notar que esta metodologia já está sendo usada no laboratório onde foi gerada esta pesquisa para a produção de corpos de prova para outros tipos de avaliação.

6. CONCLUSÕES.

Seguem a seguir as principais conclusões do que foi apresentado:

- A resistência de componentes cerâmicos de Al_2O_3 retificados depende das condições de retificação utilizadas em sua fabricação.
- Em condições brandas de retificação ($a = < 20 \mu m$ e $v_w < 18,75$ mm/s) as superfícies obtidas são uniformes e isentas de lascamentos e trincas.
- A análise das superfícies dos componentes mostraram que em condições severas de retificação ocorrem trincas sub-superficiais que prejudicam a resistência a flexão dos componentes.
- Nos teste de resistência à flexão foi verificado que condições de retificação mais severas reduzem a resistência à flexão em até 20% do valor máximo obtido com condições brandas de trabalho.
- A resistência à flexão tem um comportamento inversamente proporcional à taxa de remoção de material na retificação.
- A relação entre a espessura teórica do cavaco e a resistência à flexão dos componentes cerâmicos testados mostraram uma boa correlação linear com coeficiente de correlação da ordem de 0,997.

- O nível de emissão acústica aumenta com a taxa de remoção de material na retificação. Seu crescimento tem um comportamento de saturação a partir de taxas de remoção específicas da ordem de $1 \text{ mm}^3/\text{s}\cdot\text{mm}$.
- É possível monitorar o processo de retificação plana com o uso de sensores de emissão acústica. Neste sistema um nível máximo de emissão acústica seria obtido experimentalmente e utilizado como garantia de que o processo não ultrapasse o seu limite.
- A metodologia proposta neste trabalho pode ser aplicada com o objetivo de se minimizar os danos gerados pelo processo de retificação em componentes cerâmicos de Al_2O_3 . Isso torna possível a obtenção de amostras de maneira mais rápida e de forma mais confiável em estudos futuros sobre cerâmicas estruturais.

7. Propostas para trabalhos futuros.

Esta pesquisa abre uma frente de trabalho onde diversos outros estudos podem abrir caminhos para o melhor conhecimento dos fenômenos envolvidos nos processo de fabricação de cerâmicas. Alguns deles são:

- Realizar testes com vários tipos de rebolos, mantendo-se a taxa de remoção constante, mas variando-se a espessura máxima teórica do cavaco com o objetivo de avaliar a influência destas duas grandezas isoladamente.
- Realizar testes com diferentes direções de retificação visando conhecer a influência deste parâmetro na resistência dos componentes retificados.
- Verificar o comportamento do sinal de emissão acústica para diferentes geometrias de corpos de prova com o objetivo de conhecer a influência desta característica no nível RMS medido durante a retificação.
- Aplicar a mesma metodologia desenvolvida neste trabalho na retificação de outros tipos de materiais cerâmicos como o Nitreto de Silício, que é um material muito aplicado em componentes estruturais.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A lista de referências bibliográfica a seguir é composta pela literatura citada e consultada para o desenvolvimento do presente trabalho.

8.1 Referências citadas

ANUÁRIO BRASILEIRO DE CERÂMICA. Em busca da tecnologia nacional. (1989). São Paulo. p.73-76 .

ABRAHAM, T. (1993). Current US markets for advanced ceramics and projections for future growth. *Ceramic Engineering Science Proceedings*, v.14, n.7/8. p.25-35.

ASHBY, M. F. (1992). Materials selection in mechanical design. New York, *Pergamon Press*.

ARNOT, Neil; FISCHBACHER R. (1995). Werkzeugschleifen im Trockenschliff. *VDI-Zeitschrift*, Düsseldorf, v.137, n.7/8, p.36-38, jul./ago.

ASTM C 1161-90 (1991). Standard test method for flexural strength of advanced ceramics at ambient temperature. *American Society for testing and materials*. 7p .

- ASTM C 1239-94** (1994). Standard practice for reporting uniaxial strength data and estimating Weibull distribution parameters for advanced ceramics. *American Society for testing and materials*. 18p .
- AWAJI, H. & NAGNO, Y.** (1993). Compressive testing of ceramics. *Journal of the ceramic Society of Japan*. v.101, p.920-924 .
- BAIK, S.; MOON, J.H.** (1991). Effects of magnesium oxide on grain-boundary segregation of calcium during sintering of alumina. *Journal American Ceramic Society*. v.74, n.4, p.819-822 .
- BIFANO^(a), THOMAS G.; FAWCETT, STEVEN C.** (1991). Specific grinding energy as an in-process control variable for ductile-regime grinding. *Precision Engineering*. v.13, n.4, p.256-262, out.
- BLOMBERG, A.; OLSSON, M.; HOGMARK, S.** (1994). Wear mechanisms and tribo mapping of Al₂O₃ and Sic in dry sliding. *Wear*. v. 171, p.77-89 .
- BORETIUS, MANFRED.** (1995). *Fügen von Hochleistungskeramik: Verfahren-Auslegung-Prüfung-Anwendung*. Düsseldorf, VDI-Verlag.
- BOSCHI, ANSELMO O.** (1996). Tecnologia de cerâmicas avançadas aplicadas a revestimentos cerâmicos. *Cerâmica Industrial*, v.1, n.02, p.7-9, mai./jun.
- BRESCIANI FILHO, E.** (1991). *Seleção de Materiais Metálicos*. Campinas, Editora da Unicamp. p.19.

- CALLISTER Jr., W. W.** (1994). *Materials science and engineering: An introduction*. New York : John Wiley & Sons.
- CASARINI, J. R.** (1993). Cerâmicas anunciam o século 21. *Revista Politécnica*, v. 9, n. 04, p.21-22.
- CERÂMICA Avançada: Em Busca da Tecnologia Nacional** (1989). *Anuário Brasileiro de Cerâmica*, p.73-76.
- CHEREMISINOFF, N. P.** (1992). *Handbook of Ceramics and Composites: Mechanical Properties and specialty applications*. v.2. New York, Marcel Dekker.
- CNPQ** (1988). *O desafio dos novos materiais*. Ministério da Ciência e Tecnologia. Brasília.
- COELHO, R. T.** (1991). *Estudo experimental da profundidade de dressagem de rebolos na retificação de precisão usando o método do disco retificado*. Dissertação de Mestrado. EESC-USP, 106p.
- COELHO, J. M. et al.** (1996). Custo Brasil na comercialização dos minerais industriais. *Cerâmica Industrial*, v.01, n.01, p.14-22, mar./abr.
- DICK, R. M.; FOLTZ, G. J.** (1997). Os fluídos usados na transformação de metais têm de ser bem gerenciados. *Máquinas e Metais*, v.32, n.380, p.34-50, set.
- DIFER**. Catálogo de rebolos com abrasivos de diamante. 26p./Folder/ .

- FORTULAN, C. A.** (1997). *Desempenho das cerâmicas estruturais associado aos métodos de conformação por injeção, prensagem isostática e projetos de equipamentos e moldes*. São Carlos. 189p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- FORTULAN, C. A. ; PURQUERIO, B. M.** (1995). *Seleção, propriedades e processamento de materiais não metálicos para projetos mecânicos*. Apostila de curso. LAMAFE-DEM-EESC/USP, PUBLICAÇÃO 067/95, São Carlos.
- GROOVER, M. P.** (1996). *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes and Systems*. New Jersey, Prentice-Hall.
- HAUSNER, H.; LANDFERMANN, V. H.** (1988) *Keramische Werkstoff Herstellung: Eigenschaften und Anwendug*. Essen, Vulkanverlag. p.11-15 .
- HEBBAR, R. R.; CHANDRASEKAR, S.; FARRIS, T. N.** (1992). Ceramic grinding temperatures. *Journal of the American Ceramic Society*, v.75, n.10, p.2742-2748.
- HEITMANN, A.** (1991). Keramik – der andere Werkstoff. Eine Herausforderung für den Konstrukteur. *Konstruktion*, n.43, p.167-169.
- HENNIG, B.** (1990). *Technologie des Feinschleifens*. Dusseldorf, VDI-Verlag.

- HERZOGENRATH, MATTHIAS P.** (1994). Innovation durch Keramik in Wälzlagern. *VDI-Zeitschrift Special Antriebstechnik*, p.86-90, abril.
- IMASAVA, F. J. et al.** (1989). Uso do computador nos cálculos do método estatístico de Weibull para a medida de resistência dos materiais frágeis. In: *Anais do 33º Congresso de cerâmica*, 1989, Serra Negra : ABC, p.985-999 .
- INASAKI, I.; TÖNSHOFF, H. K.; HOWES, T.D.** (1993). Abrasive machining in the future. In: *Annals of the CIRP*. Paris, 1993. CIRP. Paris, v.42/2, p.723-732.
- JIS R 1601** (1987). Testing method for flexural strength (Modulus of rupture) of high performance ceramics. *Japanese industrial standard* . 6p.
- KLOCKE, F.; HILLEKE, M.; SINHOFF, V.** (1995). Hochleistungskeramik im Automobilbau - nur eine Vision? *VDI-Zeitschrift Special Ingenieur-Werkstoffe*, Düsseldorf, p.20-23, set.
- KONDO, Y. et al.** (1994). Grinding forces and elastics recovery in ceramic materials. *Journal of the American Ceramic Society*, v.77, n.6, p.1653-1654.
- KÖNIG, W.** (1991). *Fertigungsverfahren: Schleifen, Honen, Lappen*. 2º v., Bad 2 Dusseldorf, VDI-Verlag.
- KÖNIG, W.; MATTHIAS, P.** (1989). Precision machining of advanced ceramics. *American Ceramics Society Bulletin*. v.68, n.3, p.550-555.

- KUBICKI, B.** (1995). *Sintered machine elements*. New York. Ellis Horwood.
- LACAVA, U.** (1988). A década das cerâmicas. *Revista Brasileira de Tecnologia*, n.6, p.63-65 .
- LI, X. S.; LOW, I. M.** (1991). Grinding of engineering ceramics with diamond wheels. *Key Engineering Materials*, v.53-55, p.307-312.
- LI, X. S. et al.** (1993). Machining of Engineering Ceramic Materials. *Transactions of Mechanical Engineering*, v.18, n.3, p.307-312, nov.
- LIMA, M. J.** (1996) *Desgaste de cerâmicas avançadas*. Dissertação de Mestrado. EESC-USP, 125p.
- MAKSOU, T. M. A. et al.** (1994). Grinding of ceramics: The effect on their strength properties. *Journal of Materials Processing Technology*, v.43, p.65-75.
- MARINELLI, N.** (1997) *Monitoramento da operação de dressagem de rebolos através da emissão acústica*. Dissertação de Mestrado. EESC-USP, 112p.
- MATSUHIRO, K. ; MIWA, S.** (1994). Ceramic valves in the automobile construction of tomorrow. *Interceram*. v.43, n.2, p.77-79.
- MIGUEL, P.A.C.** (1997). Pequenos erros, grandes problemas. *Controle de qualidade*. v.60, n.7, p.56-65 .

- MURRAY, G. T.** (1993). *Introduction to Engineering Materials*. New York : Marcel Dekker .
- MUSIKANT, S.** (1990). *What every engineer should know about Ceramics*. New York : Marcel Dekker .
- NEVES, Carlos** (1991). O fantástico mundo da cerâmica. *Aquecimento industrial*, p.6-14, maio.
- NUSSBAUM, G. Ch.** (1989). *Rebolos & Abrasivos: Tecnologia básica*. São Paulo : Ícone Editora .
- OLIVEIRA, J.F.G.** (1988). *Análise da ação do macroefeito da dressagem de rebolos no desempenho do processo de retificação*. São Carlos. 272p. Tese de doutorado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Carlos.
- OLLER, SERGIO.** (1989). *Nuevos Materiales Estructurales Ceramicos en Ingeniería* . Barcelona, Centro Internacional de Metodos Numericos en Ingenieria.
- PASCUCCI, M.R. & KATS, R.N.** (1993). Modern day applications of advanced ceramics. *Interceram*, v.42, n.2.
- PRICE, W.M. & AUSTELL, St.** (1974). Green strength of ceramics: Techniques for measuring the tensile strength of unfired clays and ceramic bodies. *Interceram*, v.3, n.197.

- REINHOLD, R.; CLAUSNITZER, M.** (1988). *Schleifen: Grundlagen und Intensivierung*. Berlin, Veb Verlag Technik.
- RATTERMAN, E.** (1992). *Grinding structural ceramics: A systems approach*. p.1101-1079.
- RICHERSON, D. W.** (1992). *Modern Ceramic Engineering: Properties, Processing, and Use in Design*. Cap. 12: Final Machining, p.596-619. New York, Marcel Dekker.
- ROSENBERGER, R.; WARNECKE, G.** (1994). Assessment of tool and process condition in grinding of advanced ceramics. v.22, p.179-185 .
- SILVA, G.** (1992). *Estudo do processo de retificação de precisão em operação de passagem*. São Carlos. 89p. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- TAGUCHI, M.** (1987). Applications of high-technology ceramics in japanese automobiles. *Advanced ceramic materials*. v.2, n.4, p.754-762 .
- TERPSTRA, R.A. et al.** (1995). *Ceramic Processing*. London, Chapman & Hall
- TIMONEY, S. G.** (1992). Ceramics in I.C. engines. *Key Engineering Materials*. v.72-74, p.205-214.
- TROSSINGEN, FRE Zilling.** (1989). Präzisions-Keramik für hohe Genauigkeiten. *Der Zuliefermarkt*, jul., p.96-100.

- VIGNEAU, JÖEL. (1997). Obtendo alta produtividade na usinagem de ligas de titânio e superligas. *Máquinas e Metais*, v.32, n.380, p.16-32, set.
- WADA, S. (1988). *Ceramic application for automotive components*. In: Advanced Ceramics. Oxford : Oxford University Press. Cap. 13, p.227-239.
- WARNECKE, G.; ROSENBERGER, U. (1995). Basics of Process Parameter Selection in Grinding of Advanced Ceramics. *Annals of the CIRP*, v. 44, p. 283-286.
- WILLMANN, G. (1988). Keramik auf neue Wegen oder Abwegen? *VDI-Zeitschrift*, v.128, n.23/24, p.915-919, dez. I/II.
- XU, H. H. K.; PADTURE, N. P.; JAHANMIR, S. (1995). Effect of microstructure on material-removal mechanisms and damage tolerance in abrasive machining of silicon carbide. *Journal of the American Ceramic Society*, v.78, n.9, p.2443-2448.
- XU, H. H. K.; JAHANMIR, S. (1994). Simple technique for observing subsurface damage in machining of ceramics. *Journal of the American Ceramic Society*, v.77, n.5, p.1388-1390.
- ZANOTTO, E. D.; MIGLIORE JR., A. R. (1991). Propriedades mecânicas de materiais cerâmicos: Uma introdução. *Cerâmica*, n.37, p.7-16, jan./fev.

8.2 Bibliografia consultada

AIDAR, JOSÉ LUIZ. (1991). Cytrynowicz Roney. A idade dos novos materiais. *Revista Politécnica*, n. 12, p.14-19.

BANDYOPADHYAY, B. P. (1995). The effects of grinding parameters on the strength and surface finish of two silicon nitride ceramics. *Journal of Materials Processing Technology*, v.53, p.533-543.

BIFANO, THOMAS G.; DOW, T. A.; SCATTERGOOD, R. O. (1991). Ductile-regime grinding: A new technology for machining brittle materials. *Journal of Engineering for industry*. v.113, p.184-189.

BIFANO, THOMAS G.; YI, Y. (1992). Acoustic emission as an indicator of material-removal regime in glass micro-machining. *Precision Engineering*. v.14, n.4, p.219-228, out.

BOOR, UDO (1995). Kühlschmierstoffe für das Tiefschleifen. *VDI-Zeitschrift*, Düsseldorf, v.137, n.6, p.40-47, jun.

BREVAL, E.; SRIKANTH, V.; SUBBARAO, E. C. (1995). Acoustic emission and microcracking in sapphire, sintered Al_2O_3 , Al/ Al_2O_3 composite, and aluminum. *Journal of the American Ceramic Society*, v.78, n.9, p.2541-2544.

CALOMINO, A. M. (1992). Controlled crack growth specimen for brittle systems. *Journal of the American Ceramic Society*, v.75, n.1, p.206-208.

- CARR, A. J.** (1993). A critical re-evaluation of the abrasive wear of brittle solids. *Key Engineering Materials*, v.86-87, p.301-306.
- CHENG, S.;** LLOYD, I. K. (1992). Modification of surface texture by grinding and polishing lead zirconate titanate ceramics. *Journal of the American Ceramic Society*, v.75, n.8, p.2793-2796.
- CHETWYND, D.G.** (1989). Materials classification for fine mechanics *Precision Engineering*. v.11, n.4, p.203-209, out.
- CHILDS, T.H.C.;** MAHMOOD, P.S.; YOON, H.J. (1994). The material removal mechanism in magnetic fluid grinding of ceramic ball bearings. *Proceedings Institute Mechanicals Engineering*, v.208, p.47-59.
- FALKENBERG, Y.;** HARTMANN, M. (1995). Abrichten von CBN-Schleifscheiben. *VDI-Zeitschrift*, Düsseldorf, v.137, n.7/8, p.38-39, jul./ago.
- FAWCETT, S.C.;** DOW, T.A. (1991). Development of a model for precision contour grinding of brittle materials. *Precision Engineering*. v.13, n.4, p.270-276, out.
- FISCHER, T.E.** (1990). Friction and wear of ceramics. *Scripta Metallurgica et Materialia*, v.24, n.5, p.833-838.
- GOGOTSI, G.** (1991). Test methods of advanced ceramics-reasonable approaches to certification of ceramics. *Key Engineering Materials*, v.56-57, p.419-434.

- GRABEC, I; KULJANIC, E. (1994).** Characterization of manufacturing processes based upon acoustic emission analysis by neural networks. In: *Annals of the CIRP*, 1994, Paris : CIRP, v.43/1, p.77-80.
- KHANTHA, M.; POPE, D. P.; VITEK, V. (1994).** The brittle-to-ductile transition - I: Cooperative dislocation generation instability. *Scripta Metallurgica et Materialia*, v.31, n.10, p.1349-1354.
- KONSZTOWICZ, K. J. (1990).** Crack growth and acoustic emission in ceramics during thermal shock. *Journal of the American Ceramic Society*, v.72, n.3, p.502-508.
- LASTRES, H.M.M. (1987).** Importância dos novos materiais no mundo e no Brasil. *Inf. Int.*, v.19, n.38, p.3-4, jan./abr.
- LEE, C. S. et al. (1995).** Acoustic emission measurement of fatigue crack closure. *Scripta Metallurgica et Materialia*, v.32, n.5, p.701-706.
- LIAO, T. W. (1995).** Fractal and DDS characterization of diamond wheel profiles. *Journal of Materials Processing Technology*, v.53, p.567-581.
- LIAO, T. W. et al. (1995a).** Characterization of grinding-induced cracks in ceramics. *International Journal of Mechanical Science*, v.37, n.9, p.1035-1050.
- LIAW, B. M.; KOBAYASHI, A. S. (1992).** Computer impact damage model for ceramics and ceramic coatings. *Key Engineering Materials*, v.71, p.121-136.

- LIAW, B. M.; KOBAYASHI, A. S.; EMERY, A. F. (1984). Theoretical model of impact damage in structural ceramics. *Journal of the American Ceramic Society*, v.67, n.8, p.544-548.
- MALKIN, S.; RITTER, J. E. (1992). Grinding mechanisms and strength degradation for ceramics. *Key Engineering Materials*, v.71, p.195-212.
- MARINESCU, J. D. et al. (1983). Some Aspects Concerning Wear and Tool Life of Diamond Wheels. In: *Annals of the CIRP*. Paris, 1983. CIRP. Paris, v.32/1, p.251-254.
- MAYER JR. J. E. (1995). Effect of Grinding Parameters on Surface Finish of Ground Ceramics. In: *Annals of the CIRP*. Paris, 1995. CIRP. Paris, v.44, p.279-282
- MIZUTANI, K.; KAWANO, T.; TANAKA, Y. (1990). A piezoelectric-drive table and its application to microgrinding of ceramic materials. *Precision Engineering*. v.12, n.4, p.219-226, abril/mai.
- MÖHLEN, H. (1990). Verschleißverhalten von Diamantschleifscheiben bei der Bearbeitung Hochfester Keramikwerkstoffe. *Feingerätetechnik*. p.276-287.
- MORITA, K. et al. (1993). Surface roughness of yttria-containing aluminosilicate glass-ceramics as indicative of their machinability. *Journal of the American Ceramic Society*, v.76, n.7, p.1861-1864.

- MORRELL, R.** (1985). Design in cerâmics: Dimensional tolerances and surface finish: *An introduction for the engineer and designer*. p.230-264. Londres, Majesty's Stationary.
- NAKAJIMA, Y. U.; FUJIWARA, T.** (1989). Cutting mechanism of fine ceramics with a single point diamond. *Precision Engineering*. v.11, n.1, p.19-25, jan.
- NETO, FRANCISCO P.** (1988). Pesquisa e desenvolvimento de cerâmicos avançados na Divisão de Materiais do IPD/CTA. In: *Encontro Estadual sobre novos materiais*, 1988, Rio de Janeiro : Secretaria da Ciência e Tecnologia do R.J. p.491-499.
- NEVES, C.; VOGLER, R.** (1991). Para onde vai a indústria brasileira de cerâmica. *Aquecimento industrial*, p.15-21, maio.
- NOVOS métodos para determinar a qualidade de cerâmicas** (1988). *Mundo Mecânico*, p.37-43, jul.
- O ESPAÇO promissor da cerâmica avançada entre os biomateriais** (1989). *Cerâmica*, n.238, p.5A/12A.
- OISHI, M. et al.** (1993). Correlations between strength and acoustic properties in yttria-stabilized zirconia polycrystals. *Journal of the American Ceramic Society*, v.76, n.12, p.3159-3162.
- PADGETT, G. C.** (1991). Classification and standardization of advanced technical ceramics. *Key Engineering Materials*, v.56-57, p.411-418.



- PANDIT, S. M.; STACEY, J. D.** (1993). Data Dependent Systems Analysis of Acoustic Emission in Grinding. *Manufacturing and Science Engineering*, p. 437-444.
- PANDOLFELLI, V. C.; FADEL, M. T.** (1989). Choque térmico em cerâmicas avançadas e refratários. *Cerâmica*, n.35, p.1-6, jan.
- RAMANATH, S. et al.** (1991). Progress in precision grinding of technical advanced fine/electronic ceramics. *Society of Manufacturing Engineers*, MR91-178, 23p.
- RICE, R. W.** (1993). Correlation of machining-grain-size effects on tensile strength with tensile strength-grain-size behavior. *Journal of the American Ceramic Society*, v.76, n.4, p.1608-1070.
- RICE, R. W.** (1993). Evaluating parameters for porosity-property relations. *Journal of the American Ceramic Society*, v.76, n.7, p.1801-1808.
- RICE, R. W.** (1994). Porosity effects on machining direction-strength anisotropy and failure mechanisms. *Journal of the American Ceramic Society*, v.77, n.8, p.2232-2236.
- ROSENBERGER, U. ; GUENTER W.** (1994). Assessment of tool and process condition in grinding of advanced ceramics. *Transactions of NAMRI/SME*, v.22, p.179-185.
- SCHUMACK, M. R. et al.** (1991). Analysis of fluid flow under a grinding wheel. *Transactions of the ASME-Journal of Engineering for Industry*, v.113, p.190-197, mai.

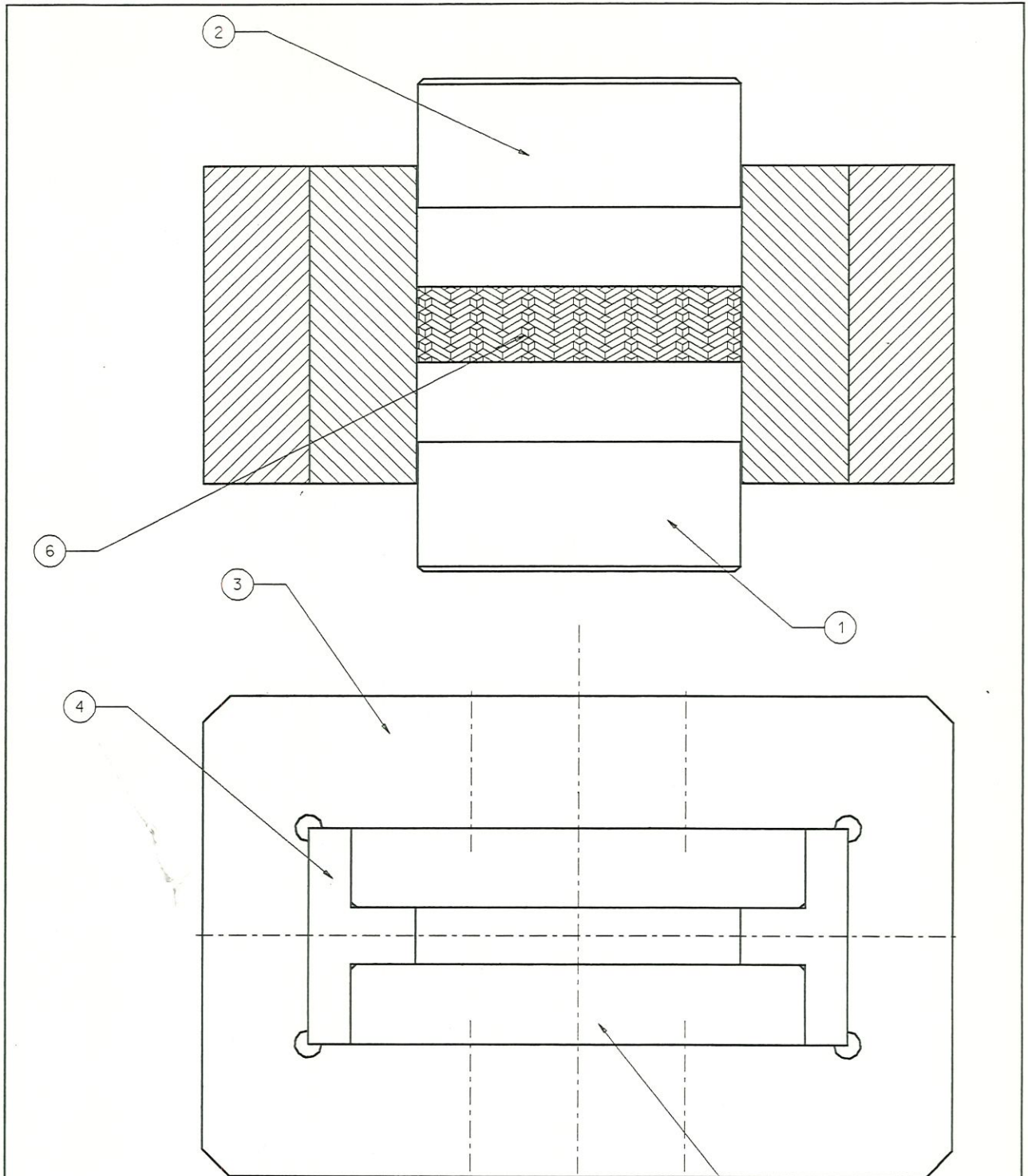
- SHAW, M. C. (1995). Precision Finishing. In: *Annals of the CIRP*, 1995, Paris, CIRP, v.44/1, p.343-348.
- SHAW, M. C. (1994). A production engineering approach to grinding temperatures. *Journal of Materials Processing Technology*, v.44, p.159-1694.
- SILVA, F. A.; AMMANN, J. J.; NAZAR, A. M. M. (1995). Caracterização de poros em cerâmicas avançadas através de um método automático de análise de imagens. In: *Anais do 39º Congresso Brasileiro de Cerâmica*, Aguas de Lindoia-SP, Finep/Associação Brasileira de cerâmica, p.912-917.
- SRIHARI, G.; LAL, G. K.. (1994). Mechanics of vertical surface grinding. *Journal of Materials Processing Technology*, v.44, p.14-28.
- SUBRAMANIAN, K. (1988). Precision finishing of ceramic componentes with diamond abrasives. *Ceramic Bulletin*, v.67, n.6, p.1026-1029.
- SUBRAMANIAN, K.; KOPP, R. N. (1988). Grinding advanced ceramics: A forest for for the 1990s. *Ceramic Bulletin*, v.67, n.12, p.1892-1893.
- SUBRAMANIAN, K.; REDINGTON, PATRICK D. (1991). Ceramic machining technology center-An innovative approach for precision production grinding. *Society of Manufacturing Engineers -SME*. EM91-256, Chiba, 8p.

- SUBRAMANIAN, K.; RAMANATH, S.; MATSUDA, YOSHI O. (1990). Precision production grinding of fine ceramics. *Proceedings of the First International Conference on New Manufacturing Technology*. Chiba, p.309-315.
- SUGISHITA, G.; KAWABATA, N.; KUMAMOTO, K. (1991). Grinding performance of an aluminium-bonded diamond wheel on ceramics and glass. *Precision Engineering*. v.13, n.3, p.184-188, jul.
- TANIKELLA, B. V.; SCATTERGOOD, R. O. (1995). Acoustic emission during indentation fracture. *Journal of the American Ceramic Society*, v.78, n.6, p.1698-1702.
- TOJEK, M. M.; GREEN, D. J. (1989). Effect of residual surface stress on the strength distribution of brittle materials. *Journal of the American Ceramic Society*, v.72, n.10, p.1885-1890.
- TUERSLEY, I. P.; JAWAID, A.; PASHBY, I. R. (1994). Various methods of machining advanced ceramic materials. *Journal of Materials Processing Technology*, v.42, p.377-390.
- VEIGA, MARCELLO M. et al. (1989). Estudo do mercado brasileiro de cerâmicas avançadas. *Cerâmica*, n.279, p.6A/16A.
- WILSON, B. A.; CASE, E. D. (1993). Comparison of mechanical fatigue with thermal fatigue in ceramics. *Scripta Metallurgica et Materialia*, v.28, n.12, p.1571-1576.

ZHANG, BI; HOWES, T. D. (1995). Subsurface Evaluation of Ground Ceramics. *Annals of the CIRP*, v. 44, p. 263-266.

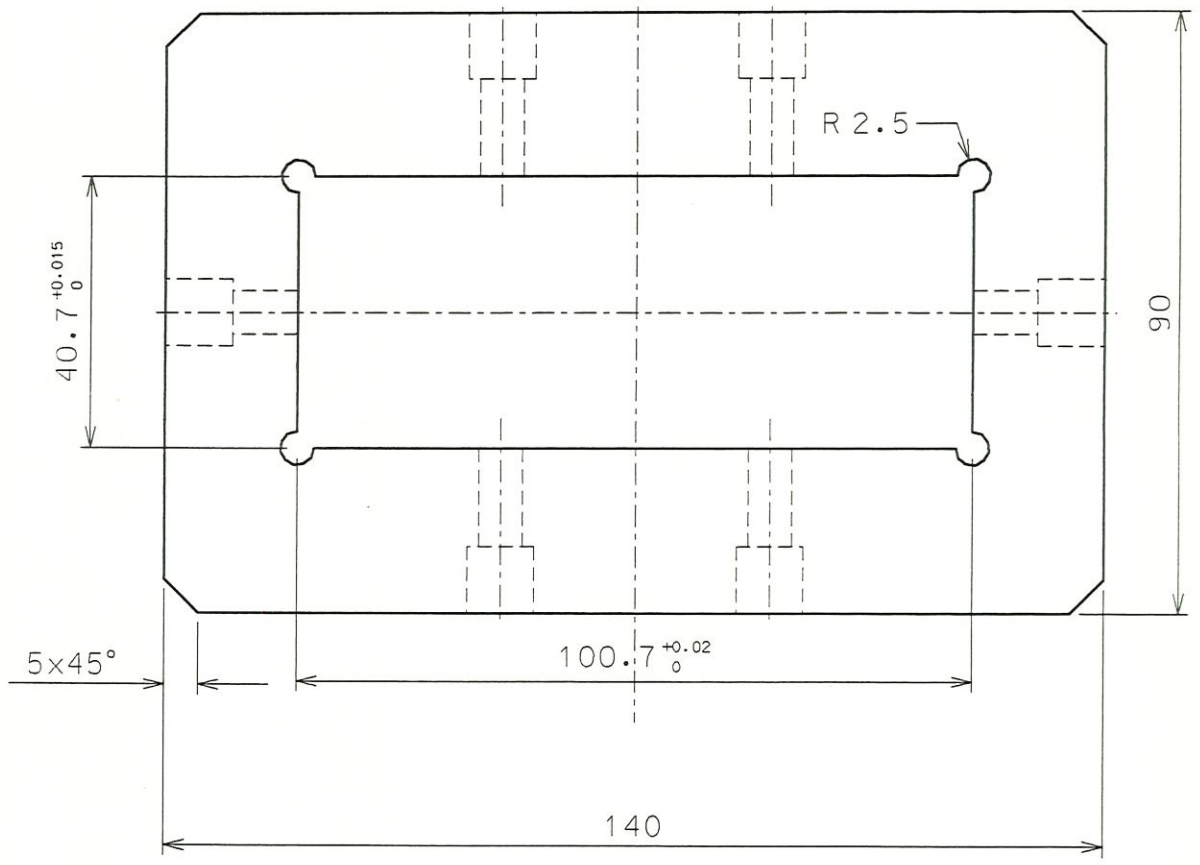
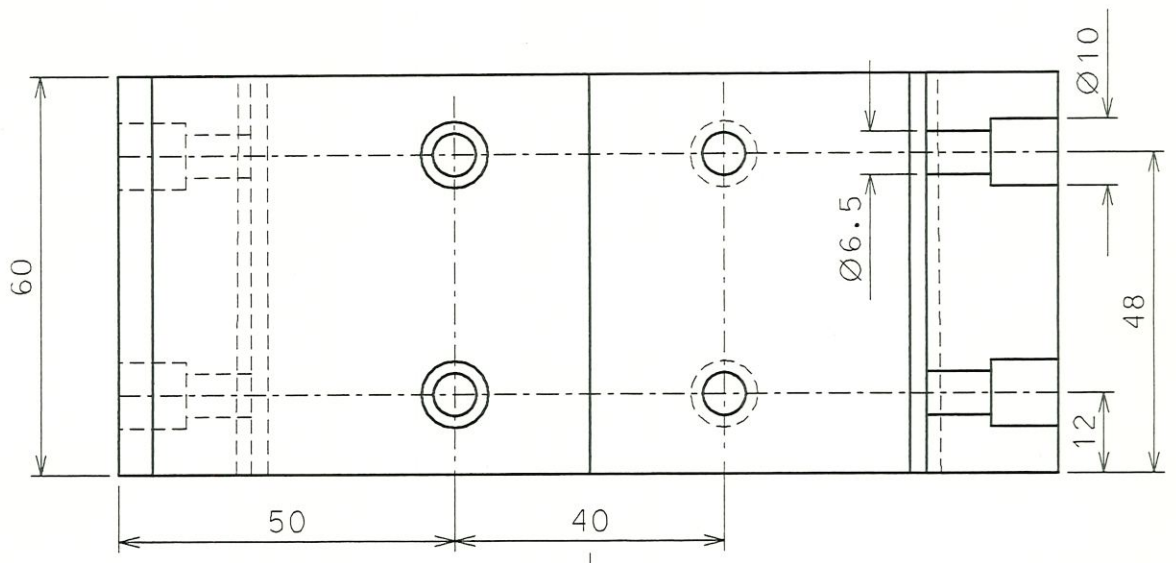
ZHANG, L. C.; SUTO, T.; NOGUCHI, H.; WAIDA, T. (1995). A study of creep-feed grinding of metallic and ceramic materials. *Journal of Materials Processing Technology*, v.48, p.267-274.

ANEXOS



- 1 Punção Inferior
- 2 Punção Superior
- 2 Matriz
- 4 Guia (2 Peças)
- 5 Postiço (2 peças)
- 6 Corpo de prova
- 7 12 parafusos - W1/4"x 1"

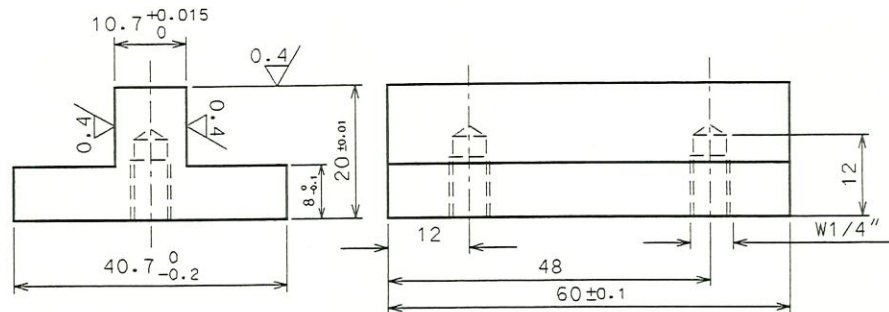
ESC.	TÍTULO	CURSO	
1:1	Matriz de compactação de corpos de provas	FATEC	
	Nº	DATA	Geraldo



Material :Aco SAE 1045

ESC.	TÍTULO		CURSO
1:1	Matriz de compactação de corpos de provas		FATEC
	Nº	DATA	Geraldo

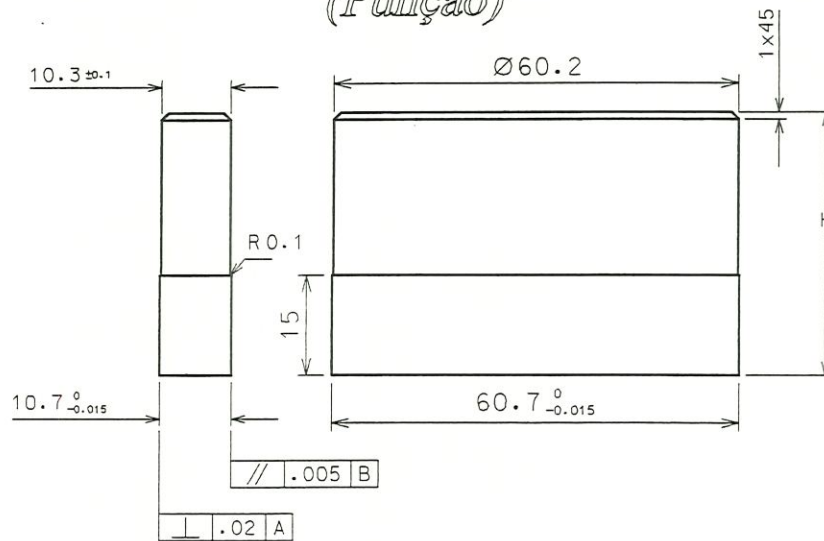
(GUILA)



0.8 / (0.4 /)

Ajustar a matriz
Material : VC-130
Temperar e revenir

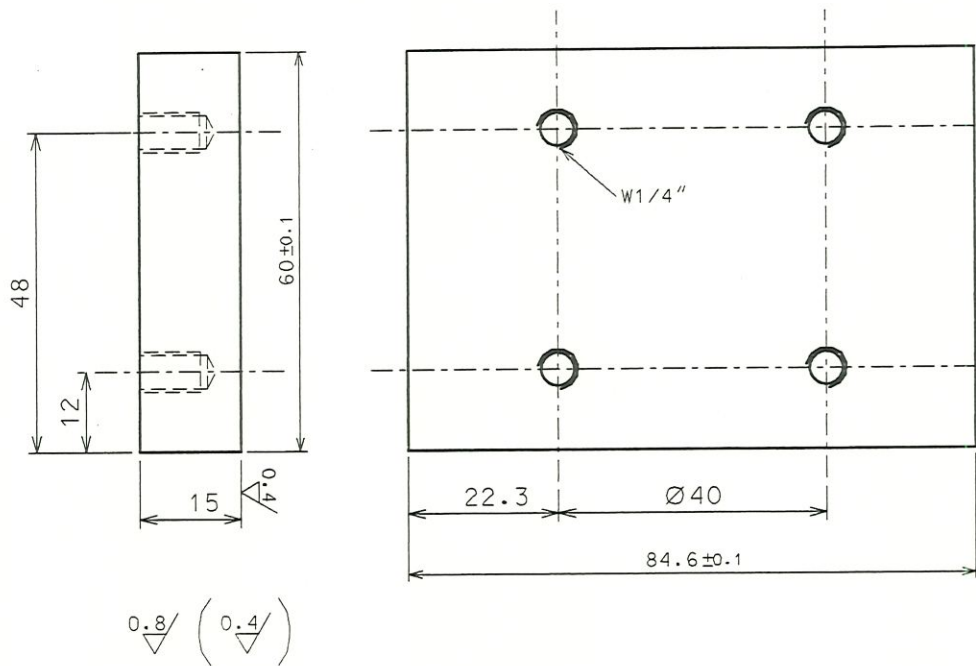
(Punção)



Ajustar a matriz
Material : VC-130
Temperar e revenir

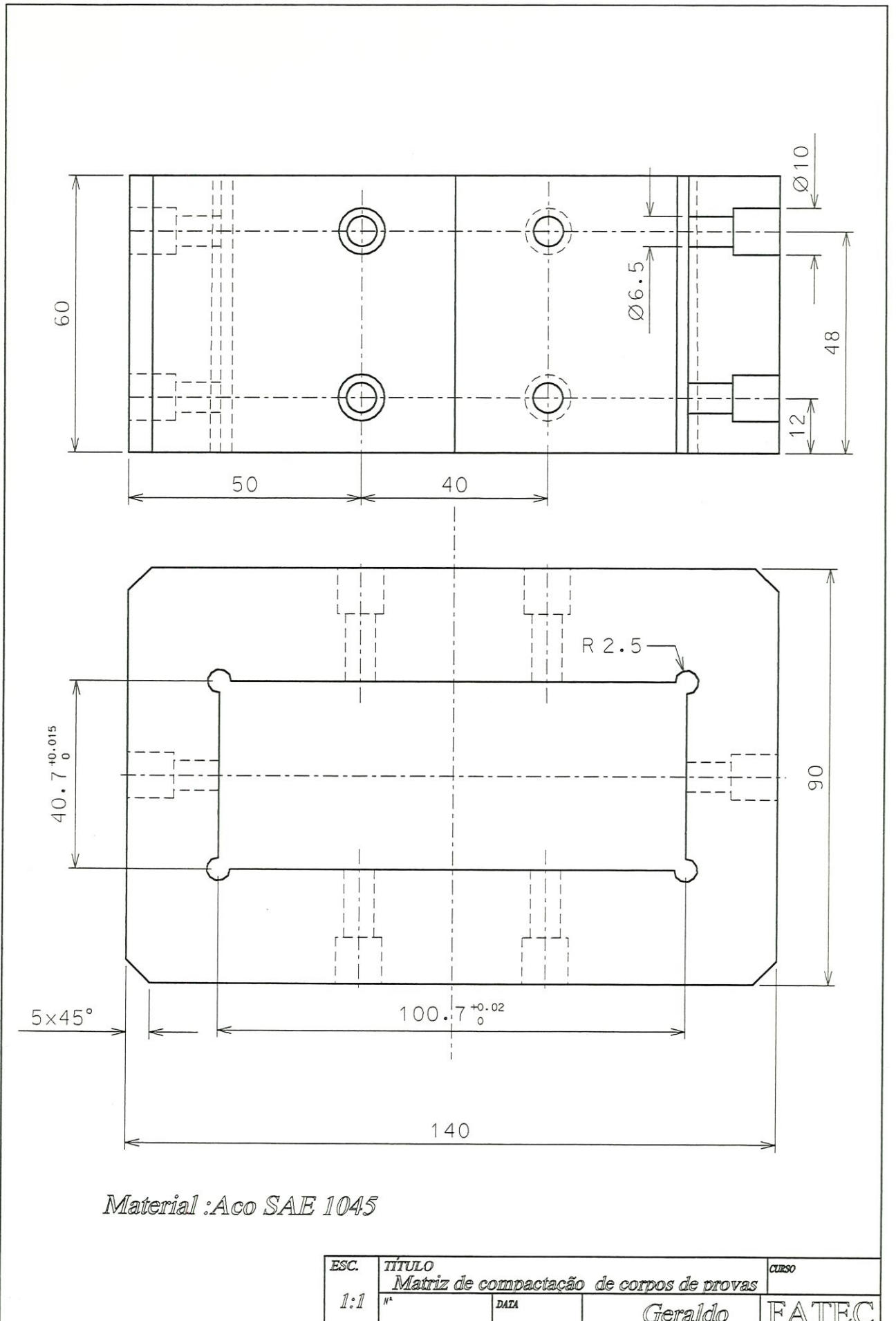
ESC.	TÍTULO		CURSO
1:1	Matriz de compactação de corpos de provas		
	#*	DATA	
		Geraldo	FATEC

(Postiço)



Ajustar a matriz
Material : VC-130
Temperar e revenir

ESC.	TÍTULO	CURSO	
1:1	Matriz de compactação de corpos de provas	Geraldo	
	Nº	DATA	FATEC



Material :Aço SAE 1045

ESC.	TÍTULO		CURSO
1:1	Matriz de compactação de corpos de provas		
	Nº	DATA	
		Geraldo	FATEC