UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP "Júlio de Mesquita Filho" Faculdade de Engenharia de Bauru – FEB Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

USINAGEM A VERDE VOLTADA À MELHORIA DA DISTORÇÃO E ACABAMENTO SUPERFICIAL DE CERÂMICAS SINTERIZADAS

GILL BUKVIC

Bauru – SP

GILL BUKVIC

USINAGEM A VERDE VOLTADA À MELHORIA DA DISTORÇÃO E ACABAMENTO SUPERFICIAL DE CERÂMICAS SINTERIZADAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Estadual Paulista, como requisito à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, sob a orientação do Prof. Dr. Luiz Eduardo de Angelo Sanchez.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Luiz Eduardo de Angelo Sanchez

FEB/UNESP - Bauru

Prof. Dr. Carlos Alberto Fortulan EESC/USP – São Carlos

Prof. Dr. Gilberto de Magalhães Bento Gonçalves FEB/UNESP – Bauru

Bauru, 18 de janeiro de 2011

Bukvic, Gill. Usinagem a verde voltada à melhoria da distorção e acabamento superficial de cerâmicas sinterizadas / Gill Bukvic, 2011. 105 f. : il. Orientador: Dr. Luiz Eduardo de Angelo Sanchez Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2011 1. Usinagem a verde. 2. Cerâmica. 3. Gradiente de densidade. 4. Distorção. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título. unesp

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO" CAMPUS DE BAURU FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE GILL BUKVIC, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DO(A) FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU.

Aos 18 dias do mês de janeiro do ano de 2011, às 14:00 horas, no(a) ANFITEATRO DA SEÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO DA FACULDADE DE ENGENHARIA, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. LUIZ EDUARDO DE ANGELO SANCHEZ do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. CARLOS ALBERTO FORTULAN do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Escola de Engenharia de São Carlos-Usp, Prof. Dr. GILBERTO DE MAGALH B GONCALVES do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de São Carlos-Usp, Prof. Dr. GILBERTO DE MAGALH B GONCALVES do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a argüição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de GILL BUKVIC, intitulado "USINAGEM A VERDE VOLTADA A MELHORIA DA DISTORÇÃO E ACABAMENTO SUPERFICIAL DE CERÂMICAS SINTERIZADAS". Após a exposição, o discente foi argüido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: <u>APPOVADO</u> ______. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que, após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. LUIZ EDUARDO DE ANGELO SANCHEZ

Prof. Dr. CARLOS ALBERTO AORTULAN

Prof. Dr. GILBERTO DE MAGALH B GONCALVES

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a **DEUS**, por permitir que eu alcançasse mais essa vitória e por todas as bênçãos recebidas durante a minha conquista.

Aos meus **PAIS** *Gilberto Bukvic* e *Teresa Maria Andrade Bukvic*, aos quais devo a minha vida e tudo o que sou, e à minha **IRMÃ** *Mariana Bukvic*. Com eles, aprendi valores e princípios que levarei por toda a vida. Obrigado pelo incentivo e por sempre acreditarem no meu potencial.

Ao meu **ORIENTADOR** *Luiz Eduardo de Angelo Sanchez*, obrigado por sua contribuição ao longo de todo o desenvolvimento desse trabalho. Agradeço o empenho, a dedicação, a confiança e a paciência. Serei sempre grato por ter me ajudado a conquistar mais essa vitória.

Ao **PROFESSOR** *Carlos Alberto Fortulan*, obrigado por sua contribuição na fabricação dos corpos-de-prova e no desenvolvimento desse trabalho.

Aos meus **AMIGOS** *Arthur Alves Fiocchi, Caio Italiano Monteiro, Renan Luis Fragelli, Gilmar Vicentin,* que, de maneiras distintas, muito contribuíram para a execução deste trabalho e que estarão sempre presentes na minha vida.

Aos FUNCIONÁRIOS DA FACULDADE ENGENHARIA DE BAURU, especialmente Hamilton José de Mello, Prof. Paulo Roberto de Aguiar, Prof. Carlos Alberto Soufen, Prof. Yukio Kobayashi e Prof. Edson Antônio Capello Sousa obrigado pelo auxílio e pelo empenho na concretização deste trabalho.

Ao **PROFESSOR** *Renato Goulart Jacinevicius*, obrigado pela contribuição com a medição de rugosidade, o que auxiliou no desenvolvimento do trabalho.

Agradeço também aos **PROFESSORES** *Carlos Eduardo Bianchi, Gilberto de M. B. Gonçalves e Geraldo Luis Palma,* por terem participado da minha banca de qualificação, e com isso terem contribuído para o melhoramento do trabalho.

Agradeço à **CAPES** (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela bolsa de estudos concedida.

Agradeço a todos que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a consumação de mais uma etapa em minha vida.

RESUMO

A usinagem de cerâmicas avançadas geralmente é feita com o objetivo de corrigir as deformações após a etapa de sinterização, conferir precisão dimensional e qualidade superficial. Para cumprir esta tarefa é utilizada, principalmente, a retificação com rebolo de diamante sob baixas taxas de remoção de material. O torneamento com ferramenta de diamante pode ser aplicado para a maioria das cerâmicas, mas esbarram em condições limites de remoção de material, como profundidades de corte nanométricas, que se ultrapassadas mudam o regime de remoção de dúctil para frágil. Uma alternativa é a usinagem da peça no estado verde, a qual apresenta fácil usinagem com a diminuição da introdução de defeitos prejudiciais à resistência mecânica. Após a sinterização invariavelmente ocorrem distorções devido à distribuição heterogênea de gradientes de densidade que se localizam nas porções mais externas do compactado. Na tentativa de remover estes gradientes, o presente trabalho analisou a influência da remoção de sobrematerial no estado verde na distorção da peça após a sinterização. Corpos-de-prova de alumina, com 99,8% de pureza, foram torneados com sobremateriais de 1,0, 2,0, 3,0, 4,0 e 5,0 mm por uma ferramenta de metal duro sob condições constantes de usinagem. Além da distorção, outras variáveis de saída foram analisadas, como desgaste de ferramenta, força de corte (F_c) e rugosidade média aritmética (Ra) do compactado em verde e sinterizado. Os resultados apontam uma redução da distorção da peça sinterizada de até 81,4% com o maior valor de remoção de sobrematerial em verde e a influência do desgaste da ferramenta na rugosidade da peça em verde e na correspondente peça sinterizada.

VI

Palavras-chave: Usinagem a Verde, Cerâmica, Gradiente de Densidade, Distorção, Prensagem Uniaxial.

ABSTRACT

Advanced ceramics machining is generally done with the objective of correcting distortions in pieces after sintering. In order to comply with this task grinding with a diamond grinding wheel is mainly used with low material removal rates. Turning can be done with diamond tool to most of the ceramics, but it runs into very narrow material removal limit conditions, as nanometric cutting depths, which if exceeded change the removal system from ductile to brittle. An alternative is machining the piece on the green state, which presents easy machining without the introduction of harmful defects to mechanical resistance. However, after sintering there are invariably distortions caused by the heterogeneous distribution of density gradients that are located in the most outlying portions of the compacted. In an attempt to remove these gradients, this study examined the influence of different allowance values removed and the corresponding distortion after sintering. Alumina specimens are used for this procedure, with 99.8 % purity, from which allowances of 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 e 5.0 mm are removed by turning with a cemented carbide tool under constant machining conditions. Besides distortion, other output variables were analyzed, such as tool wear, cutting force and surface roughness of the green ceramics and the sintered. The results presents a reduction of the distortion of the sintered piece of 81.4% with the greater green allowance removal values and the influence of tool wear on the green machining surface roughness and on the corresponding sintered piece.

Keywords: Green Machining, Ceramic, Density Gradient, Distortion, Uniaxial Pressing.

VIII

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 - Processo corrente de produção de peças cerâmicas (SCHELER, 1994)5
FIGURA 2.2 - Técnicas de processamento para materiais cerâmicos (EL-WARDANY et al., 2009)6
FIGURA 2.3 - Moinho vibratório (FORTULAN et al., 1996)8
FIGURA 2.4 - Sedimentação da suspensão antes da coagulação (TULLIANI et al., 2009)9
FIGURA 2.5 - Queimadores catalíticos de cerâmica feitos pela prensagem isostática a quente de nitreto de silício (LARKER e LUNDBERG, 1999)10
FIGURA 2.6 - Prensagem uniaxial por (a) simples ação e (b) dupla ação (ALBARO, 2001 - modificado)11
FIGURA 2.7 - Distribuição da densidade aparente em peças obtidas por prensagem uniaxial (BENCOE et al., 2008 - modificado)12
FIGURA 2.8 - Densidade relativa no raio do compactado em duas posições (WESTERHEIDE et al., 1996 - modificado)14
FIGURA 2.9 - Gradiente de densidade (g/cm ³) em peça prensada uniaxialmente (RICHERSON, 1992 - modificado)14
FIGURA 2.10 - Mecanismo da sinterização entre 2 grãos (MAZALI, 2006 - modificado)16
FIGURA 2.11 - Morfologia dos riscos produzidos por diferentes intensidades de
carga (MALKIN E RITTER, 1989 - modificado)18
FIGURA 2.12 - Rz e a F_c resultante versus velocidade de corte, taxa de avanço e profundidade de corte, "modo de corte" dominante, nível de pressão de 150,0 MPa, corpo-de-prova \emptyset = 80,0 mm (MAIER e MICHAELI, 1997)24

FIGURA 2.13 - Acabamento da usinagem em função da quantidade e tipo de aglomerantes plásticos (KOH e HALLORAN, 2004 - modificado)......25

FIGURA 2.14 - Forças tangencial e normal durante a retificação de peças verdes e brancas feitas por gelcast (KAMBOJ, DHARA e BHARGAVA, 2002 - modificado)...25

FIGURA 2.17 - Tipo de trinca na região fraturada, (a) intergranular, (b) intergranular/transgranular e (c) transgranular (DESFONTAINES et al., 2005)......27

FIGURA 3.1 - MEV do pó do material produzido pelo método de "spray dryer", com aumento de (a) 100x, (b) 500x, (c) 5000x e (d) 20000x......30

FIGURA 3.2 - Montagem esquemática do banco de ensaio de usinagem......32

FIGURA 3.4 - Aspecto visual da condição de usinagem variando n e mantendo fixos

 $f = 90,0 \text{ mm/min e } a_p = 0,5 \text{ mm}.....35$

FIGURA 3.7 - Aspecto visual da condição de usinagem variando a_p , (a) $a_p = 0.5$ mm e (b) $a_p = 1.0$ mm e mantendo fixo o n = 1000 rpm e o f = 22.4 mm/min......38

FIGURA 3.9 - Rampa de aquecimento e temperatura do processo de sinterização.....43 FIGURA 3.10 - Ilustração dos parâmetros envolvidos nos ensaios......43 FIGURA 4.1 - Amplitude de distorção em função dos sobremateriais removidos.....46 FIGURA 4.2 - Porcentagem de redução da amplitude de distorção em função do sobrematerial removido......47 FIGURA 4.4 - Desgaste da ferramenta em função do número de passes executados......50 FIGURA 4.5 - MEV das pontas das ferramentas, (a) nova, (b) após 5 passes realizados pela base de referência mais compactada e (c) após 5 passes realizados pela base de referência menos compactada......51 FIGURA 4.6 - MEV das ferramentas evidenciando o VB_{max}, (a) após 5 passes realizados pela base de referência mais compactada e (b) após 5 passes realizados pela base de referência menos compactada.....51 FIGURA 4.7 - MEV da superfície de saída da ferramenta, (a) após 5 passes realizados pela base de referência mais compactada e (b) após 5 passes realizados pela base de referência menos compactada......52 FIGURA 4.8 - EDS da superfície da ferramenta nova (a) e da região do flanco desgastado......52 FIGURA 4.9 - MEV do cavaco produzido durante a usinagem com aumento de (a) 100x, (b) 500x, (c) 5000x e (d) 20000x.....53 FIGURA 4.10 - Rugosidade dos corpos-de-prova em verde e depois de sinterizado ao final da remoção de cada sobrematerial......55 FIGURA 4.11 - MEV das superfícies em verde (a) não usinada e usinadas com os sobremateriais de (b) 1,0 mm, (c) 2,0 mm, (d) 3,0 mm, (e) 4,0 mm e (f)5,0 mm, pela base mais compactada, aumento 500x......57 FIGURA 4.12 - MEV das superfícies em verde (a) não usinada e usinadas com os sobremateriais de (b) 1,0 mm, (c) 2,0 mm, (d) 3,0 mm, (e) 4,0 mm e (f)5,0 mm, pela base mais compactada, aumento 3000x.....58

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 - Resumo do efeito do acabamento de peças em verde e sinterizadas
sobre sua resistência mecânica (MAIER e MICHAELI, 1997)23
TABELA 3.1 - Composição química da alumina utilizada

LISTA DE EQUAÇÕES

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AI_2O_3	Óxido de alumínio
a _p	Profundidade de corte (mm)
B_2O_3	Óxido de boro
CaO	Óxido de cálcio
EDS	Sistema de Energia Dispersa
EDM	Usinagem por descarga elétrica
EEA	Etileno Etil Acrilato
f	Avanço (mm/min.)
Fc	Força de corte (N)
FEB	Faculdade de Engenharia de Bauru
Fe ₂ O ₃	Óxido de ferro
h	Altura (mm)
IBMA	Isobutil Metacrilato Composto
ISO	International Organization for Standardization
I	Comprimento (mm)
LATUS	Laboratório de Tecnologia da Usinagem
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MgO	Óxido de magnésio
Na₂O	Óxido de sódio
PEG	Polietileno Glicol
Pi	Plano inicial
P _f	Plano final
PVAI	Álcool de polivinila
Ra	Rugosidade média aritmética [µm ou nm]
TiC	Carboneto de titânio
SiO ₂	Óxido de silício
SM	Sobrematerial
USM	Usinagem por Ultra-som
VB _{max}	Desgaste de flanco máximo (mm)

Vc	Velocidade de corte (m/min)
ZrO ₂	Óxido de zircônio
Ø	Diâmetro (mm)
ρ	Densidade (g/cm³)
Δ_{T}	Amplitude de distorção

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	V
RESUMO	VI
ABSTRACT	VIII
LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE TABELAS	XIII
LISTA DE EQUAÇÕES	XIV
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	XV
SUMÁRIO	XVII
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos do trabalho	2
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 Características e propriedades dos materiais cerâmicos	4
2.2 Etapas de fabricação de uma peça cerâmica	5
2.2.1 Mistura	7
2.2.2 Compactação	8
2.2.3 Sinterização	15
2.3 Usinagem de cerâmica	16
2.3.1 Usinagem de cerâmica sinterizada	16
2.3.2 Usinagem de cerâmica verde	19
3 MATERIAIS E MÉTODOS	29
3.1 Corpos-de-prova	29
3.2 Operação de usinagem	
3.3 Parâmetros de usinagem	
3.4 Procedimento para o ensaio	
3.5 Medição da força de corte	40
3.6 Medição do desgaste da ferramenta	40
3.7 Medição da Rugosidade	40
3.8 Medição da distorção dos corpos-de-prova	40
3.9 Processo de sinterização	42
3.10 Resumo do procedimento experimental	43
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
4.1 Análise da distorção	44
4.2 Análise da força de corte	
4.3 Análise do desgaste da ferramenta	49

4.4 Análise da rugosidade e superfície dos corpos-de-prova	54
4.5 Análise das superfícies da peças	56
5 CONCLUSÕES	64
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	65
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66
ANEXO	76
Anexo 1: Resultados das medições dos diâmetros para cada plano de co em função do sobrematerial removido para corpos-de-prova em verde e sinterizados.	r te 76
Anexo 2: Contração linear média (%) dos corpos-de-prova para diferentes sobremateriais em função do plano de corte.	; 88

1 INTRODUÇÃO

Avanços na ciência e tecnologia tem resultado no crescimento do desenvolvimento de componentes cerâmicos já existentes bem como em novas aplicações, os quais são dependes de técnicas de processamentos capazes de produzir formas e estruturas desejadas. Diferente dos metais, a maioria das cerâmicas técnicas não pode ser fabricada por moldes via fundição, pois possuem alto ponto de fusão e baixa condutividade térmica (DHARA e SU, 2005). Investigações cientificas não estão somente focadas no material propriamente dito e na sua transformação em pó ou grânulos, mas também nos estágios seguintes de processamento e usinagem (KLOCKE, GERENT e SCHIPPERS, 1997)

Trabalhos realizados com cerâmica sido concentrados na usinagem de acabamento de peças sinterizadas (KLOCKE, GERENT e SCHIPPERS, 1997), porém para a manufatura de formas complexas não é a melhor opção, devido a ocorrência de lascamentos e trincas, tanto superficiais quanto sub-superficiais, gerados durante o processo de usinagem (DHARA e SU, 2005).

Uma alternativa é a usinagem de peças cerâmicas em seu estado não sinterizado, também chamado de estado verde (KLOCKE, GERENT e SCHIPPERS, 1997). A usinagem a verde agrega recursos aos métodos de conformação que sozinhos não são capazes de produzir geometrias intrincadas de compactados (SHEPPARD, 1999). Os processos de usinagem são possíveis devido a baixa resistência mecânica apresentada pelo estado verde do material, permitindo o uso de ferramentas de geometria definida e proporcionando altas taxas de remoção de material em comparação com a retificação de sinterizados (MAIER e MICHAELI, 1997; JANSSEN, SCHEPPOKAT e CLAUSSEN, 2008).

Na manufatura da peça cerâmica, a etapa de compactação contribui na resistência mecânica e no tempo de sinterização da peça, uma vez que são criadas grandes tensões entre as partículas que a constituem (GROENOU, 1981). No entanto, durante a compactação, o atrito entre as partículas do pó e também o atrito entre elas com a superfície do molde impedem que a pressão aplicada a uma ou mais superfícies da peça seja integral e uniformemente distribuída em todas as regiões da peça, o que provoca a existência de gradientes de densidade nas peças conformadas, resultando na distorção do mesmo durante a sinterização (ALBARO, 2000).

Diversos autores, como BENCOE, 2008; ALBARO, 2001; MAIER e MICHAELI, 1996 e WESTERHEIDE et al., 1996, identificaram menores variações nos gradientes de densidades a medida que se avança em direção ao centro da peça, formando uma região de compactação mais uniforme e teoricamente menos propensa a deformações com a sinterização.

1.1 Objetivos do trabalho

O objetivo deste trabalho foi verificar o efeito da remoção de material, em compactados a verde, na distorção gerada nas mesmas peças após a sinterização. Para isso, foram torneadas várias peças em verde de alumina, obtidas por prensagem uniaxial, com valores crescentes de remoção de sobrematerial. Como conseqüência, buscou-se em cada peça, a progressiva diminuição do gradiente de densidade localizada nas camadas mais externas e a correspondente redução da sua distorção dimensional após a sinterização. Ao mesmo tempo, foi monitorado a força de corte e acompanhado o desgaste da ferramenta no qual se verificou a sua

influencia sobre o acabamento superficial da peça em verde e, principalmente, sobre o acabamento da peça depois de sinterizada. Isto se torna especialmente importante em casos no qual as peças sinterizadas podem ser usadas sem a necessidade de usinagem.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são abordados os aspectos básicos de obtenção de peças cerâmicas, sua usinagem e os problemas associados à remoção de material.

2.1 Características e propriedades dos materiais cerâmicos

Devido ao continuo progresso no desenvolvimento de novos materiais, a importância das cerâmicas não é apenas em relação à substituição de outros materiais, mas também para permitir que novos produtos sejam desenvolvidos no qual não se encontra materiais com propriedades adequadas (UHLMANN et al., 2001). Dentre a ampla abrangência dos materiais cerâmicos, as cerâmicas avançadas se distinguem pelo elevado desempenho, desenvolvidas a partir de matérias-primas sintéticas de alta pureza e por meio de processos finos e de rigoroso controle (CARVALHO e FORTULAN, 2006).

Essas cerâmicas, empregadas na engenharia, apresentam várias propriedades positivas, como alta resistência ao desgaste e a temperatura, estabilidade química e baixa densidade (ARGAWAL e RAO, 2008; JANSSEN, SCHEPPOKAT e CLAUSSEN, 2008; SCHELER, 1994).

No entanto, independentemente das suas excelentes propriedades estruturais, a cerâmica não é amplamente utilizado na indústria como deveriam e poderiam ser (JANSSEN, SCHEPPOKAT e CLAUSSEN, 2008), pois apresentam características negativas que limitam sua aplicação, especialmente pela baixa tenacidade à fratura, responsável pela baixa resistência ao impacto e desprezível deformação plástica (ARGAWAL e RAO, 2008), além de outros problemas

relacionados como a reprodutibilidade, confiabilidade e alto custo de fabricação que precisam ser resolvidos, especialmente em peças de formas complexas (SATO, BESSHI e MATSUI, 1998).

2.2 Etapas de fabricação de uma peça cerâmica

No atual modo de produção de cerâmica, cuja seqüência pode ser ilustrada na Figura 2.1, os pós que as constituem são moídos e misturados, depois adicionados aglomerantes e aditivos para melhorar a conformação e sinterização. Esses são prensados em moldes metálicos para dar forma às peças compactadas, também chamadas de peças em verde em alusão ao seu estado não sinterizado, que posteriormente devem ser levadas ao aquecimento para a sinterização e, então, atingir a dureza e a densidade final desejada (SCHELER, 1994).



FIGURA 2.1 - Processo corrente de produção de peças cerâmicas (SCHELER,

Um requisito comum e básico de peças cerâmicas é a fabricação dentro das dimensões especificadas, incluindo as tolerâncias (AYDIN, BRISCOE е SANLITURK, 1997), e assim como as peças metálicas, pode-se utilizar a usinagem para alcançar tais dimensões. Mas para as cerâmicas, o processo de usinagem pode estar presente nas diferentes etapas de fabricação após a sinterização (ou queima), após a sua queima parcial e em verde (com ou sem aglomerante). Na Figura 2.2, são apresentadas as cerâmicas prensadas, em que a usinagem branca (feita após a pré queima) e verde são opções para a fabricação de peças pequenas e simétricas (EL-WARDANY et al., 2009).



FIGURA 2.2 – Tipos de usinagem de materiais cerâmicos em função da fase de seu

processamento (EL-WARDANY et al., 2009).

O controle da dimensão da peça em verde para aproximação das medidas finais depois de sinterizada é conhecido por "near-net-shape" (WESTERHEIDE et al, 1996). Geralmente, está técnica pode ser feita de duas maneiras, a chamada aproximação "bottom-up", na qual a peça é retirada diretamente do molde, ou a aproximação "top-down", na qual a forma da peça é dada através da usinagem a verde (DHARA e SU, 2005), passando normalmente pela posterior sinterização, a fim de minimizar os custos introduzidos nessa última fase de manufatura (KLOCKE, GERENT e SCHIPPERS, 1997; ROBERT-PERRON et al., 2005).

2.2.1 Mistura

Na mistura dos pós, uma combinação de álcool de polivinila (PVAI) e polietileno glicol (PEG) podem ser adicionados como ligantes, cujo processo pode ser feito em moinhos, que pode ser de bolas, vibratório ou outros, utilizando água deionizada, tendo seu pH ajustado para permitir uma maior dispersão. A suspensão é então seca no equipamento de "spray dryer" para formar os grânulos secos e fluidos, que facilitam o preenchimento da cavidade do molde (EL-WARDANY et al., 2009; LU e LANNUTTI, 2000).

A importância do moinho vibratório, não se dá apenas para a mistura dos pós e seus aditivos, mas também para a quebra das partículas do material, que é realizada com o auxilio de cilindros cerâmicos introduzidos com a mistura dentro do recipiente (vaso). Partículas pequenas, com tamanho submicrométrico, são necessárias em aplicações de cerâmicas avançadas, pois apresentam alta reatividade, favorecendo a sinterização e garantindo a elevada resistência mecânica

do produto final. A Figura 2.3 ilustra um moinho vibratório com seus principiais elementos (CARVALHO e FORTULAN, 2006).



Figura 2.3 - Moinho vibratório (FORTULAN et al., 1996).

Como a usinagem pode ser conduzida em peça seca ou úmida, o ligante desempenha importante função na peça em verde, uma vez que sua resistência depende das características e do volume do ligante empregado, fazendo com que o material usado na peça seja resistente o suficiente para se manter coeso durante o processo de usinagem (SHEPPARD, 1999).

2.2.2 Compactação

O processo convencional de moldagem de materiais cerâmico mais empregado é a prensagem a seco, que inclui a prensagem isostática à frio, colagem e injeção por molde. Para o sucesso da prensagem a seco, é necessário pó bruto com fluidez suficiente para preencher a cavidade do molde uniformemente (SATO, BESSHI e MATSUI, 1998; SEIDEL, CLAUSSERF e RIIDELHT, 1997).

Com o Gelcasting, processo que envolve a dispersão do pó cerâmico em uma solução aquosa de monômero polimerizável para formar um líquido ou lama concreta que é coagulado no molde, é particularmente adequado para a fabricação sob encomenda já que não há necessidade de criar estruturas especializadas para a fabricação de peças (DHARA et al., 2002; TULLIANI et al., 2009), a exemplificação da Figura 2.4 mostra a zona empobrecida (impoverished zone) e a zona sedimentada (sedimented zone), que ocorre no processo Gelcasting antes da coagulação. Este método oferece vantagens distintas como uma alternativa para os mais convencionais de moldagem de cerâmica, tais como prensagem seca, colagem e moldagem por injeção (NUNN e KIRBY).



Figura 2.4. Sedimentação da suspensão antes da coagulação (TULLIANI et al., 2009).

Na prensagem isostática a quente a forma da peça pode ser controlada rigorosamente, como ocorre, por exemplo, na fabricação de queimadores catalíticos

e até mesmo para componentes de formas complexas como rotores de turbinas, Figura 2.5 (LARKER e LUNDBERG, 1999)



Figura 2.5 – Queimadores catalíticos de cerâmica conformados por prensagem isostática a quente de nitreto de silício (LARKER e LUNDBERG, 1999).

Mas para a maioria das peças cerâmicas, a fabricação através do pó está bem estabelecida na indústria, principalmente devido ao custo relativamente baixo deste tipo de processo e, muitas vezes, inclui a compactação uniaxial do pó cerâmico em uma matriz com usinagem posterior da peça verde (ZIPSE, 1997), preferencialmente em peças com pequeno número de seções diferentes.

Neste processo, uma quantidade controlada de pó é introduzida em sua cavidade, a qual é fechada com uma punção e, no lado oposto, uma outra punção aplica uma pressão. Na fase final do ciclo de compactação, a pressão é removida e a peça em verde é extraída para além dos limites da parede do molde, Figura 2.6 (a). Como resultado dessas operações, uma peça é obtida contendo certo grau de heterogeneidade, ou seja, com distribuições de densidade variáveis ao longo do comprimento e do raio da peça (AYDIN, BRISCOE e SANLITURKB, 1997).



FIGURA 2.6 - Prensagem uniaxial por (a) simples ação e (b) dupla ação (ALBARO, 2001- modificado).

Na prensagem do pó, sabe-se que ocorre intenso atrito entre as partículas adjacentes e mais intensos ainda, delas com a parede do molde. Como resultado, tem-se um preenchimento heterogêneo do pó na cavidade do molde, obtendo-se uma peça compactada com vários gradientes de densidade A existência de gradientes de densidade distintos faz com que a sinterização em cada correspondente região sofra contração volumétrica de diferente intensidade, e conseqüentemente com valores de contrações diferentes, levando à deformação da peça sinterizada (BENCOE et al., 2008; ROBERT-PERRON et al., 2005). Para minimizar este efeito, é usada a prensagem uniaxial de dupla ação, na qual as punções superiores e inferiores tem movimentos simultâneos ou em uma parte do ciclo de conformação, Figura 2.6 (b), nesse caso, a área com menor densidade geralmente estará localizada perto da altura média do componente (ROBERT-

PERRON et al., 2005; GROENOU, 1981). A Figura 2.7 mostra a situação descrita, na qual se pode observar a existência de gradientes de densidade na peça em verde, representado pela mudança de coloração ao longo da peça, que foi produzida por prensagem uniaxial de simples ação, e a densidade remanescente, após a sua sinterização, chamada também de densidade principal (BENCOE et al., 2008).



FIGURA 2.7 - Distribuição da densidade aparente em peças obtidas por prensagem uniaxial de simples ação (BENCOE et al., 2008 - modificado).

Assim, uma das tarefas mais desafiadoras na manufatura de peças em cerâmicas de engenharia é estimar o comportamento e corrigir a contração de um compactado intrinsecamente não-uniforme, devido ao estado verde ter de 50 a 60% da densidade teórica, considerando necessária a retração para atingir uma densidade principal em torno de 98%. Neste caso, heterogeneidades introduzidas durante a prensagem são conhecidas por afetar o desenvolvimento de sinterização e a microestrutura (LU e LANNUTTI, 2000).

Dessa forma quando a peça verde prensada possui grande gradiente de densidade, ela pode sofrer distorções, tensões residuais, e até mesmo produzir trincas na peça sinterizada (ZIPSE, 1997; KOK et al.). Como regra geral, apenas gradiente de densidade não superior a 1%/mm pode ser tolerado na peça. Isto significa que as regiões de grande gradiente deveriam ser removidas por usinagem a verde (ZIPSE, 1997).

No trabalho de WESTERHEIDE et al. (1996), o foco principal foi a qualidade de peças obtidas com pó reaproveitado da usinagem a verde. No entanto, também foi realizada uma análise numérica da variação da densidade no compactado em verde, cujo resultado é disposto na Figura 2.8, o qual mostra a densidade relativa ao longo do raio da peça prensada uniaxialmente tomado em duas posições: na borda superior da peça; e no meio desta. Como se pode observar a densidade na extremidade da periferia diametral do compactado é bastante diferente nas duas posições analisadas, sendo esta diferença progressivamente diminuída a medida que se caminha em direção ao centro da peça. Diante deste resultado, é sugerido a usinagem de um sobrematerial suficientemente grande para remover a porção da peça em verde que contém os maiores gradientes de densidade e, como consegüência desta prática, a peça sinterizada sofreria menor distorção. De fato, observações semelhantes já haviam sido feitas por RICHERSON (1992) que na Figura 2.9 ilustrou os gradientes de densidade em uma peça cerâmica em verde compactada uniaxialmente pelo método de simples ação, no qual apenas um punção se movimenta em relação ao molde. Nesta representação são mostrados os valores de densidades mais altos na porção superior da peça do que na inferior onde é comum se observar avarias.



FIGURA 2.8 - Densidade relativa no raio do compactado em duas posições (WESTERHEIDE et al., 1996 - modificado).



FIGURA 2.9 - Gradiente de densidade (g/cm³) em peça prensada uniaxialmente (RICHERSON, 1992 - modificado).

2.2.3 Sinterização

Na operação de queima, conhecida por sinterização, os produtos adquirem suas propriedades finais quando são submetidas a temperaturas elevadas, que para a maioria dos produtos situa-se à cerca de 70% da sua temperatura de fusão, em fornos do tipo contínuos ou intermitentes que operam em três fases: aquecimento da temperatura ambiente até a temperatura desejada; patamar durante certo tempo na temperatura especificada e resfriamento até temperaturas inferiores a 200 °C (ABC, 2010).

Nos trabalhos como o de BENCOE et al. (2008) e o de LU e LANNUTTI (2000), a sinterização foi feita com uma rampa de aquecimento e pico de temperatura constante de 1400 °C com permanência de 1h, e posteriormente seguido por um resfriamento progressivo. Temperaturas de patamares maiores e menores, e também tempo de permanência maior e menor, geram peças com características distintas que dependendo do tipo de produto pode variar de alguns minutos até vários dias.

Durante esse tratamento ocorre uma série de transformações em função dos componentes da massa, tais como: perda de massa, desenvolvimento de novas fases cristalinas, formação de fase vítrea e formação e crescimento de grãos. Portanto, em função do tratamento térmico e das características das diferentes matérias-primas são obtidos produtos para as mais diversas aplicações (ABC, 2010).

MAZALI (2006) explica que no aquecimento do material a uma temperatura adequada, os mecanismos de transporte de massa (componentes de massa) passam a ser importantes, e que de um total de seis mecanismos possíveis que ocorrem, durante a sinterização de duas esferas cristalinas, no entanto, somente os mecanismos 4, 5 e 6 levam a densificação, isto é, retração nas dimensões do monólito compactado, com conseqüente aumento da densidade, Figura 2.10.



FIGURA 2.10 - Mecanismo da sinterização entre 2 grãos (MAZALI, 2006 -

modificado).

2.3 Usinagem de cerâmica

2.3.1 Usinagem de cerâmica sinterizada

A usinagem por meio de ferramenta de diamante, como na retificação, é a principal maneira de atingir as dimensões desejadas e o acabamento da superfície das peças cerâmicas, mas esse processo gera um alto custo de usinagem

(BESSHIA, SATOB e TSUTSUIB, 1999), devido ao correspondente alto custo das ferramentas de diamante. Além disso, há exigência de máquinas-ferramenta de alta rigidez tornando economicamente inviável o processo de remoção de material das cerâmicas avançadas (STRAKNA et al., 1996; MAYER et al., 1995).

No entanto, devido à sua alta fragilidade, os componentes invariavelmente sofrem danos, como trincas superficiais ou subsuperficiais, durante o processo de remoção de material, resultando em perda de resistência mecânica (AYDIN, BRISCOE e SANLITURKB, 1997; STRAKNA et al., 1996; MAYER et al., 1995). E como resultado, da usinagem de peças de cerâmicas sinterizadas, verificam-se diferentes tipos de danos em conseqüência de três mecanismos distintos de remoção de material: fratura intergranular e deslocamentos de grãos; microfratura e formação de fragmentos de grão através de trincas intragranulares; e remoção de grandes porções de grãos, por meio de lascamentos devido à propagação de trincas transgranulares (XU e JAHANMIR, 1995; SWAIN, 1979).

Dependendo de condições altamente controladas de usinagem pode-se minimizar os mecanismos de remoção frágil, que envolvem a formação de trincas, ou mesmo alcançar a usinagem dúctil, na qual estão presentes mecanismos de remoção por deformação plástica como nos metais. Estes dois modos de remoção de material, dúctil ou frágil, estão associados com uma profundidade de corte crítica que, se excedida, pode resultar em defeitos críticos (ZHONG, 2003; AJJARAPU et al., 2004; BHATTACHARYA et al., 2006 PATTEN e CHERUKURI, 2001; NGOI e SREEJITH, 2000; KUMBERA et al, 2001;). Para diminuí-los, muitos autores, como BLACKLEY e SCATTERGOOD (1991, 1994), MALKIN e RITTER (1989) e MARSHAL et al, (1983), recomendam o uso de taxas de remoção de material muito mais baixas do que aquelas praticadas no acabamento de peças metálicas. Mesmo

assim, este procedimento não garante que as peças cerâmicas estarão isentas de microtrincas. A Figura 2.11 ilustra possíveis defeitos que podem acompanhar a remoção de material cerâmico como os lascamentos e trincas.



Figura 2.11 – Morfologia dos riscos produzidos por diferentes intensidades de carga (MALKIN e RITTER, 1989 - modificado).

Para se ter uma idéia dos custos envolvidos na usinagem de peças cerâmicas, WESTERHEIDE et al. (1996) apontam que do valor total de uma válvula de nitreto de silício, 44 % representam o custo da usinagem enquanto que 23 % o custo do pó e 6 % a moldagem. Segundo JANSSEN, SCHEPPOKAT e CLAUSSEN (2008); FANTOZZI et al. e UHLMANN et al. (2001), embora o custo distribuído no
processo varie, os custos da usinagem contribui com uma fração substancial e pode em alguns casos representar 80 % dos custos da produção global de um componente cerâmico, daí a importância de se desenvolver processos mais econômicos. A partir dessas informações, os autores apontam a usinagem a verde e o reaproveitamento do pó como um caminho para a redução dos custos de fabricação de peças cerâmicas.

2.3.2 Usinagem de cerâmica verde

Nota-se que as exigências de tecnologia de fabricação de componentes cerâmicos estão aumentando em função de peças com geometrias cada vez mais complexas, além de rigorosos requisitos relacionados à tolerância da forma das peças sinterizadas que devem ser cumpridas pelo fabricante (ZIPSE, 1997).

Na tentativa de contornar os problemas envolvendo a usinagem de cerâmicas sinterizadas, pode-se lançar mão do uso da técnica da usinagem da peça compactada em seu estado não sinterizado, em verde, dessa forma, pode-se produzir formas complexas, detalhes e também deixá-las com dimensões mais próximas possíveis das medidas finais, prevendo, evidentemente, a contração inerente à fase de sinterização. Esta técnica requer menos energia, torna a operação de usinagem mais fácil e menos dispendiosa do que após a sinterização da peça, uma vez que no estado verde elas possuem baixa resistência mecânica conferindo boa usinabilidade (SU et al., 2008 e EKABARAM, 2008), colaborando na manufatura de peças com formas complexas e normalmente difíceis de se obter (BESSHIA, SATOB e TSUTSUIB, 1999). Além disso, a técnica da usinagem a verde permite altas taxas de remoção de material (JANSSEN, SCHEPPOKAT e

CLAUSSEN, 2008), baixa geração de calor na zona de corte (ROBERT-PERRON et al., 2007), baixa F_c e desgaste de ferramenta acentuadamente menor que nas cerâmicas sinterizadas (CAUSTON e SCHADE, 2003).

Outro fator benéfico está na observação de que as peças usinadas em verde apresentam propriedades mecânicas mais elevadas após serem sinterizadas do que componentes usinados após a sinterização. (ROBERT-PERRON, BLAIS e PELLETIER, 2009).

Devido a todas essas vantagens, a fabricação de uma peça por meio da usinagem a verde pode ser até 1000 vezes mais rápida do que a usinagem convencional de cerâmicas sinterizadas e pode ser realizada com quase todas as ferramentas convencionais e técnicas utilizadas para os metais. (DESFONTAINES et al, 2005).

Porém, a fragilidade das peças compactadas em verde é um problema, uma vez que traz dificuldades durante a usinagem (EL-WARDANY et al., 2009), como a geração de rugosidade alta, bordas fraturadas e partes quebradas na região de fixação da peça e, como agravante, ainda que não se observe defeitos aparentes na peça em verde eles podem se revelar após sinterização. Em geral, uma alta densidade da peça verde também é tradicionalmente associada com maior resistência do compactado, sendo um pré-requisito para a usinagem de peças nesse estado (ROBERT-PERRON et al., 2007). Segundo BESSHIA, SATOB e TSUTSUIB (1999) a fragilidade em verde é um dos limitantes para aplicação da técnica de usinagem inibindo sua prática, trazendo como conseqüência poucos trabalhos na área.

A usinabilidade de uma peça cerâmica em verde é dependente de suas características e das condições de usinagem. A peça deve possuir ligação mecânica

suficiente entre as partículas através da utilização de aglomerantes para evitar lascamentos na usinagem (KOH e HALLORAN, 2004). A melhora da usinabilidade, resistência e plasticidade da peça podem ser ajustadas pelo tipo e quantidade de aglomerante. O PVAI e emulsões acrílicas são exemplos de aglomerantes de alta resistência (KING, 2002).

Os avanços nos aglomerantes/lubrificantes e em tecnologia de compactação levaram ao desenvolvimento de peças com alta resistência, de modo que permitem à usinagem a verde características de alta qualidade, possibilitando a confecção de furos e sulcos, especialmente quando se usa a compactação a quente associada aos novos de aglomerantes (ROBERT-PERRON ET AL, 2007; SCHEXLER, 1994)

Na usinagem a verde, os parâmetros de corte devem ser cuidadosamente controlados para evitar danos ao material, tendo a velocidade de corte limitada em operações de torneamento devido a força centrifuga máxima permitida, a qual é determinada pela resistência mecânica da peça em verde (SHEPPARD, 1999).

Quanto às forças de usinagem, elas tendem a aumentar com o desgaste da ferramenta de corte, principalmente se ela for feita de aço rápido, ou mesmo de metal duro quando usada em alguns tipos de cerâmicas mais abrasivas. SHEPPARD (1999) e NG et al. (2006) citam que desgastes de flanco maiores que 0,1 mm já podem causar danos superficiais à peça devido a excessiva pressão específica de corte criada pela área de contato. Outro problema comumente apontado são as precauções necessárias para se adotar na proteção da máquina ferramenta em virtude do material removido se dar em forma de pó e por isso penetrar facilmente nos componentes vitais da máquina, como guias e rolamentos, fazendo com que o desgaste destas partes acelere.

Vários estudos consideram a influência dos parâmetros de usinagem, como a velocidade de corte, o avanço e a profundidade do corte, na força de usinagem, na rugosidade e na resistência mecânica da peça em verde. Alguns autores, como JANASOVITS (1999) e KONIG e WAGEMANN (1993), utilizam o desgaste da ferramenta como um indicador de usinabilidade, no entanto, o melhor critério é o nível de qualidade superficial das peças após a usinagem, porém esta característica é muito subjetiva e difícil de quantificar. A geração de defeitos parecidos com escamas é geralmente considerada um problema importante e pode levar ao descarte da peça. A retenção da borda também é usada para caracterizar a usinabilidade, constituindo em mais um elemento de análise da peça durante a usinagem (DESFONTAINES et al.,2005).

Além da possibilidade da usinagem a verde servir para produzir formas complexas na peça, minimizar suas distorções e aproximar a medida da peça sinterizada de sua medida final, MAIER e MICHAELI (1997) observaram clara relação entre a qualidade superficial da peça em verde usinada e a sua resistência mecânica depois de sinterizada. De maneira parecida com a usinagem de peças cerâmicas sinterizadas o mecanismo de remoção na usinagem a verde guardam estreita semelhança. Nos dois casos, a usinagem sob condições severas é caracterizada por lascamentos com remoção de numerosos grãos juntos, invariavelmente acompanhado de microtrincas na superfície da peça, enquanto que a usinagem sob condições brandas é isenta de defeitos e sobre a superfície gerada são deixadas marcas inequívocas da ponta da ferramenta. A estes dois mecanismos, MAIER e MICHAELI (1997) denominaram modo de lascamento e modo de corte, respectivamente. Em seus ensaios os autores encontraram influência do acabamento superfícial das peças usinadas em verde, sob os dois modos

diferentes de remoção, na resistência à flexão das peças sinterizadas. Na Tabela 2.2, procura-se sintetizar os resultados encontrados, da seguinte maneira: as peças em verde possuem resistência mecânica muito próximas, independente do acabamento superficial produzido; tomando-se como referência a peça sinterizada sem usinagem, a peça usinada com o melhor acabamento superficial apresenta resistência mecânica mais elevada, em cerca de 8%; já a peça sinterizada com acabamento superficial pobre apresenta resistência mecânica menor, em aproximadamente 10%.

TABELA 2.1 - Resumo do efeito do acabamento de peças em verde e sinterizadas sobre sua resistência mecânica (MAIER e MICHAELI, 1997).

	RESISTÊNCIA À FLEXÃO	
	VERDE	SINTERIZADO
USINADO f = 0,1 mm/volta "modo de corte"	=	Î
NÃO USINADO	0	0
USINADO f = 0,4 mm/volta "modo de lascamento"	=	Ţ

Ainda em relação ao trabalho de MAIER e MICHAELI (1997), que tornearam compactados de alumina com 99,7% de pureza, eles observaram, de modo geral, que: o aumento da velocidade de corte produziu leve diminuição da rugosidade e a F_c permaneceu praticamente constante; o aumento do avanço produziu aumento de ambos, rugosidade e F_c; e o aumento da profundidade de usinagem causou leve diminuição da rugosidade, mas aumento expressivo da F_c, conforme apresentado na Figura 2.12.



FIGURA 2.12 - Rz e a F_c resultante (F) versus velocidade de corte (V_c), taxa de avanço (f) e profundidade de corte (a_p), "modo de corte" dominante, nível de pressão de 150 MPa, corpo-de-prova Ø = 80 mm (MAIER e MICHAELI, 1997).

Por outro lado, apesar da F_c ser dependente das condições de usinagem, essa também deve variar da mesma forma que o gradiente de densidade, sendo esperado que pequenas variações na densidade em verde sejam refletidas na F_c . Além disso, a usinabilidade das peças em verde é uma função da resistência em verde e o acabamento superficial varia da mesma forma. (ROBERT-PERRON et al., 2005).

Na usinagem a verde, a rugosidade superficial é fortemente dependente das propriedades da peça, tal como a sua resistência em verde. Esta, por sua vez, varia com o tipo e quantidade de aglomerante plástico, como se observa na Figura 2.13 na qual se nota-se que com pequeno aumento em seu volume as superfícies usinadas mostram diferentes graus de acabamento superficial.

Os tipos de aditivos orgânicos (aglomerantes) e a resistência dos grânulos podem produzir grande aumento da F_c durante a usinagem, inclusive gerando aumento ainda maior da força em função dos sucessivos números de passes

realizados (DESFONTAINES et al., 2005; KAMBOJ, DHARA e BHARGAVA, 2002), tal como é exemplificado pelos gráficos da Figura 2.14.



FIGURA 2.13 - Acabamento da usinagem em função da quantidade e tipo de

aglomerantes plásticos (KOH e HALLORAN, 2004 - modificado).



FIGURA 2.14 - Forças tangencial e normal durante a retificação de peças verdes e brancas feitas por gelcasting (KAMBOJ, DHARA e BHARGAVA, 2002 - modificado).

No trabalho de SCHEXLER (1994), os parâmetros de avanço, velocidade de corte e profundidade de corte, não causaram diferenças significativas na quantidade de lascamentos, e todas as peças apresentaram lascamentos na saída da ferramenta. Todo cavaco produzido pelo processo foi o oposto ao cavaco dúctil associado à usinagem de metais. A usinagem dessas peças produziu pó, exatamente como o utilizado para fazer a compactação.

Segundo ROBERT-PERRON et al. (2007), o avanço da ferramenta demonstrou ser o principal parâmetro de influência sobre os lascamentos nas bordas das peças, sugerindo avanços de 0,0635 a 0,1016 mm/rev para evitar esse tipo de dano, conforme pode ser visto na Figura 2.15. No entanto, verifica-se que estes valores são bem maiores que os sugerido em outras literaturas. A usinabilidade foi caracterizada como uma função do desgaste da ferramenta cujo aumento causou a deterioração do acabamento superficial após várias peças (ROBERT-PERRON et al., 2007), conforme se observa pelo aspecto superficial das imagens da Figura 2.16.



FIGURA 2.15 - Largura média típica dos lascamentos na borda de saída caracterizado pela microscopia eletrônica (dentro do diâmetro dos anéis), após a usinagem a verde das peças: (a) 35 cm³, (b) 1100 cm³ e (c) 3500 cm³ (ROBERT-PERRON et al., 2007).



FIGURA 2.16 - Superfície típica caracterizado pela microscopia eletrônica após a usinagem de (a) 35 cm³, (b) 1100 cm³, e (c) 3500 cm³ (ROBERT-PERRON et al., 2007).

A melhora da usinabilidade pode ser também conseguida com baixa resistência verde, enquanto for possível o manuseio das peças compactadas. A diferença na resistência em verde resulta em comportamentos diferentes da F_c e danos, conduzindo a uma fratura do tipo intergranular ou transgranular (PFRENGLE et al., 2009; DESFONTAINES et al., 2005), como sugere a Figura 2.17.



FIGURA 2.17 – Tipo de trinca na região fraturada, (a) intergranular, (b) intergranular/transgranular e (c) transgranular (DESFONTAINES et al., 2005).

A ocorrência de alta densidade e resistência não necessariamente são equiparadas com boas características de usinagem, observado que o lubrificante

também desempenha papel importante na determinação dos níveis de lascamentos na saída da ferramenta (DEGNAN, KENNEDY e SHIPWAY, 2007). Resultados nesta direção podem ser vistos na Figura 2.18, onde o aumento do nível de adição de lubrificante propiciou a redução dos níveis de lascamentos da peça.



FIGURA 2.18 - Tamanho médio dos lascamentos plotados com relação ao nível Kenolube adicionado: todas as amostras foram compactados com pressão de 850 MPa (DEGNAN, KENNEDY e SHIPWAY, 2007).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho foi proposto a conformação de corpos-de-prova cilíndricos por prensagem uniaxial de simples ação, com a relação entre diâmetro por comprimento de 1:1,5. Esta relação ressaltará a variação da densificação provocando distorção na sinterização.

A escolha pela alumina deve-se ao fato de se tratar de um material cerâmico tido como universal, além de sua alta dureza que promoverá um maior desgaste da ferramenta de corte.

3.1 Corpos-de-prova

Para a fabricação dos corpos-de-prova cerâmicos, foi utilizado uma mistura de alumina com aglomerantes realizada em moinho de bolas com elementos cilíndricos de zircônia (\emptyset 12,0 mm x 12,0 mm). Uma suspensão com 30 % em volume de alumina em pó foi dispersa num volume de 68 % de água destilada e deionizada e acrescentados 1 % em volume de PVAI e o restante, 1 % em volume, de poliacrilato de amônia (Dispersal 130).

Seguindo a recomendação de LERICHE et al. (1988), foi feito o uso de defloculante associado à mistura mecânica a fim de garantir uma homogeneização mais eficiente da mistura Al₂O₃-ZrO₂. Em seguida a mistura foi seca pela técnica de "spray dryer", produzindo um pó com partículas, constituída de pequenos aglomerados de partículas de alumina, de formato circular, com a fluidez necessária para um eficiente preenchimento de moldes.

Na Figura 3.1, a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) mostra a aumento progressivo das imagens do pó, de (a) a (d), sendo observado o aglomerado de partículas de formato circular. Somente na imagem (d), com o aumento de 20000x, é possível visualizar o tamanho das partículas de alumina.



Figura 3.1 - MEV do pó do material produzido pelo método de "spray dryer", com aumento de 100x (a), 500x (b), 5000x (c) e 20000x (d).

A Tabela 3.1 traz a composição da cerâmica empregada no trabalho, que se trata da Alumina Calcinada A1000-SG (Almatis, Inc.) com partículas de 0,4 μ m de diâmetro médio equivalente, área superficial de 7,7 mm²/g e ρ_{real} = 3,99 g/cm³.

<u>%</u> %%%%%	<u> </u>			_	. 0203		$\pi_{12} \cup 3$
	%	%	%	%	%	%	%
99.8 0.03 0.02 0.07 0.02 0.001	0.04	0.001	0.02	0.07	0.02	0.03	99.8

TABELA 3.1 - Composição química da alumina utilizada, % em peso.

O pó produzido foi então conformado em uma matriz por prensagem uniaxial de simples ação, sob pressão de 120,0 MPa, fornecendo corpos-de-prova, no estado verde, de formato cilíndrico com dimensões aproximadas de Ø 25,0 x 39,0 mm.

3.2 Operação de usinagem

A usinagem dos corpos-de-prova foi realizada em uma fresadora universal adaptada para o torneamento e com o auxilio de um dispositivo. O corpo-de-prova foi então preso no cabeçote vertical da máquina, que proporcionou o movimento de rotação. A ferramenta de corte foi fixada no dispositivo rígido preso sobre a mesa da máquina, que executou o movimento vertical sobre a peça para o avanço de usinagem, e o movimento horizontal para produzir o movimento radial para a profundidade de usinagem.

A opção pelo uso de uma fresadora foi em função da alta rigidez da máquina, facilidade de acesso em torno da peça com espaço disponível para fixação de dispositivos e instrumentos, maior precisão no posicionamento da ferramenta e também pela mesa ter baixa velocidade de movimento o que possibilita avanços pequenos, menores do que num torno convencional, caso fosse necessário.

O dispositivo, preso à mesa da máquina, foi especialmente construído para o trabalho tendo como principais características a alta rigidez e a capacidade para

fixação de uma célula de carga, a qual foi utilizada como um porta-ferramenta para a fixação da ferramenta de corte, como o observado na Figura 3.2.



FIGURA 3.2 - Montagem esquemática do banco de ensaio de usinagem

A ferramenta de corte usada para tornear as amostras é de metal duro sem revestimento e sem quebra-cavacos, comercializada pela Kyocera sob designação TPGB 1102005, de Classe K10 e raio de ponta de 0,05 mm. Em conformidade com a Norma ISO 3685, o final de vida da ferramenta é alcançado quando o desgaste de flanco máximo (VB_{max}) atinge 0,4 milímetros.

Um procedimento utilizado com o intuito de evitar danos na peça em sua região de fixação, como a deformação e o colapso total provocado pela baixa resistência mecânica do compactado cerâmico em verde, foi não fixá-la diretamente na pinça máquina. Processo semelhante foi utilizado no trabalho de Robert-Perron et al. (2005). Para isso, uma base com uma cavidade cilíndrica do tamanho aproximado do diâmetro do corpo-de-prova foi confeccionada em aço com o intuito de ser colado com um adesivo quente à base de cera.

Depois de colado, o conjunto formado pela base e corpo-de-prova pôde ser firmemente fixado na pinça da fresadora para a realização da usinagem. Para descolar o corpo-de-prova a fim de reutilizar a base de aço, a região de adesão foi aquecida até o ponto de derretimento da cera. O corpo-de-prova com a base de aço é mostrado na Figura 3.3.



FIGURA 3.3 - Corpo-de-prova antes de fixado à base (a), fixado (b), usinado (c) e destacado (d).

3.3 Parâmetros de usinagem

Os parâmetros de entrada dos ensaios foram conduzidos segundo cinco valores diferentes de sobrematerial de torneamento: 1,0; 2,0; 3,0; 4,0 e 5,0 mm. A remoção desses sobremateriais foi realizada sob parâmetros de usinagem fixos, sendo esses: profundidade de corte (a_p) de 1,0 mm, rotação (n) de 1000 rpm e velocidade de avanço (f) de 22,4 mm/min.

A seleção dos parâmetros de usinagem foi realizada para uma gama de valores, baseados no aspecto visual do acabamento superficial da peça após o teste de cada parâmetro, e observados com o auxilio de imagens obtidas por meio de um estéreo microscópio ótico da marca Nikon, modelo SMZ800, acoplado a uma câmara digital de alta resolução. Parâmetros inadequados produziram danos superficiais excessivos na peça, especialmente o aparecimento de pequenos vazios caracterizados como sendo destacamentos de aglomerados de grãos do material.

O inicio dos testes para a obtenção dos parâmetros de usinagem mais adequados foi realizado com parâmetros comumente aplicados na usinagem de metais, demonstrando a aplicação dos métodos convencionais de usinagem na usinagem a verde. A Figura 3.4 mostra os acabamentos superficiais obtidos com a influência da alteração da velocidade de corte, por variação da rotação, mantendose constante $a_p = 0,5$ mm e f = 90,0 mm/min. Conforme pode ser observado, aumentando-se n, foi obtido uma superfície mais uniforme, o que demonstra uma melhora do acabamento superficial da peça.



FIGURA 3.4 - Aspecto visual da condição de usinagem variando n e mantendo fixos $f = 90,0 \text{ mm/min e } a_p = 0,5 \text{ mm}.$

Nova análise dos parâmetros foi feita, porém mantendo-se constante o $a_p = 0,5$ mm e variando-se o avanço (f) com valores menores que o teste anterior, com o objetivo de obter acabamento superficial melhor, sendo esses valores comparados a duas rotações, n = 2000 rpm e n = 1000 rpm. Como ilustra a Figura 3.5, observa-se que com a diminuição de f e da n foi constatado uma melhora do acabamento superficial.

Selecionado o melhor acabamento, observado para n = 1000 rpm, os avanços foram novamente testados, porém com duas opções a mais de menor valor de f e com o a_p ainda fixo em 0,5 mm. Foi então observado que a condição com o f = 22,4 mm/min foi o que apresentou o aspecto mais liso da superfície, ou seja, o melhor acabamento superficial observado na Figura 3.6.



FIGURA 3.5 - Aspecto visual da condição de usinagem nas n = 1000 rpm e n = 2000 rpm mantendo fixo o $a_p = 0.5$ mm.



FIGURA 3.6 - Aspecto visual da condição de usinagem variando f e mantendo fixos o n = 1000 rpm e $a_p = 0,5$ mm.

Dessa forma, para obter a validação dessa condição, um teste foi realizado com os parâmetros: n = 1000 rpm, f = 22,4 mm/min e $a_p = 0,5$ mm, até a remoção do maior sobrematerial de 5,0 mm, com um total de 10 passes da ferramenta, porém, foi observado um grande lascamento da borda da peça, levando ao descarte da mesma. Para corrigir ou minimizar o lascamento, o ap foi modificado para 1,0 mm, e um novo teste foi realizado, assim para alcançar o maior valor do sobrematerial foi necessário apenas 5 passes da ferramenta, e o lascamento da borda do corpo-deprova foi minimizado, sem inutilizar a peça, além de não modificar o aspecto visual do acabamento superficial, validando dessa forma os parâmetros de usinagem para a realização dos ensaios.

A Figura 3.7 ilustra a diferença observada entre os dois a_p . A ocorrência do lascamento para o $a_p = 0,5$ mm pode ser gerado pela F_c da usinagem, que causa o desprendimento das partículas compactadas na borda, uma vez que a peça compactada verde apresenta baixa resistência mecânica, e que é evidenciado pelo fato da necessidade de um maior numero de passes da ferramenta, duas vezes a quantidade necessária para o $a_p = 1,0$ mm.



FIGURA 3.7 – Aspecto visual da condição de usinagem variando a_p , (a) $a_p = 0,5$ mm e (b) $a_p = 1,0$ mm e mantendo fixo o n = 1000 rpm e o f = 22,4 mm/min.

3.4 Procedimento para o ensaio

Levando-se em consideração que a técnica usada na compactação dos corpos-de-prova produz duas bases com diferentes densidades, uma mais compactada formada devido a punção superior, que aplica toda a pressão exercida pela prensagem, e uma outra menos compactada formada devido a punção inferior, que recebe a pressão da prensagem com grande perda devido ao atrito do sistema (RICHERSON, 1992; WESTERHEIDE et al., 1996 e BENCOE, 2008), o procedimento do ensaio de usinagem dos diâmetros dos corpos-de-prova foi realizado tomando como referência as duas bases da peça usadas para a fixação da peça na usinagem.

Foram usinados pelo lado da base de referência mais compactada três corpos-de-prova em verde, para cada valor de sobrematerial, e outros três corposde-prova usinados pelo lado da base de referência menos compactada, também para cada valor de sobrematerial, com um total de trinta corpos-de-prova utilizados para o ensaio de usinagem. Outros três corpos-de-prova foram deixados sem usinagem para serem usados como referência.

Para cada corpo-de-prova foi utilizada uma nova aresta de corte da ferramenta, assim, levando em consideração o $a_p = 1,0$ mm foram obtidas arestas submetidas ao número de passes equivalentes ao valor do sobrematerial, ou seja, para o sobrematerial de 1,0 mm, a aresta de corte foi utilizada para um passe, e nos outros sobremateriais de 2,0, 3,0, 4,0 e 5,0 mm, foram realizados dois, três, quatro e cinco passes, respectivamente. Dessa forma, cada aresta de corte da ferramenta teve um determinado valor de VB_{max}, com um respectivo comportamento observado na medição da F_c de cada sobrematerial em função da base de referência.

3.5 Medição da força de corte

Uma célula de carga da marca *R*&*S*, modelo MB, foi utilizada para medir a F_c durante a usinagem, e essa teve os sinais de dados coletados por um sistema de aquisição da *National Instruments*[®] e o programa computacional *Labview*[®] *7.1*.

3.6 Medição do desgaste da ferramenta

Para a medição do VB_{max}, imagens das pontas das ferramentas de corte foram obtidas por meio do estéreo microscópio, juntamente com a imagem de uma escala obtida com o mesmo aumento utilizado para as ferramentas, e com o auxilio do programa computacional *AutoCad*[®], foi possível a obtenção das medidas de desgaste com precisão.

3.7 Medição da Rugosidade

A rugosidade média aritmética (Ra) foi medida em um rugosímetro óptico, sem contato, da marca *Veeco*[®], modelo *Wyko*[®] NT 1100, uma vez que um apalpador mecânico poderia produzir um risco na superfície da peça em verde e, assim, ter a medida mascarada.

3.8 Medição da distorção dos corpos-de-prova

A distorção das peças foi baseada nas medições dos diâmetros em varias posições da mesma, desde o plano inicial (1) até o plano final (16), enquanto ainda

no estado verde e depois de sinterizada, para registrar as contrações advindas da sinterização. Os diâmetros foram medidos em uma máquina de medição tridimensional da marca *Tesa*[®], modelo *Micro-Hite 3D*[®]. Todas as peças em verde e sinterizadas tiveram seus diâmetros medidos na área usinada. Para os corpos-de-prova sem usinagem foi adotado o mesmo procedimento de medição.



FIGURA 3.8 - Posições medidas nos corpos-de-prova em verde e sinterizados sem

usinagem e usinados.

Para a análise detalhada da distorção da peça, foram selecionadas dezesseis posições diferentes ao longo da geratriz dos corpos-de-prova e, a partir destes perímetros, medidos os respectivos diâmetros. A distância escolhida entre cada plano de corte ao longo da geratriz dos corpos-de-prova em verde foi de 1,0 mm e de 0,833 mm nos corpos-de-prova sinterizados, uma vez que o valor da contração linear média encontrado foi de 16,77 %, e essa relação foi levada em consideração. O esquema ilustrativo deste procedimento está representado na Figura 3.8.

Para o cálculo da distorção foi levado em consideração o valor da diferença de diâmetro encontrada entre o último plano medido (P_f) e o primeiro plano (P_i), tanto da peça em verde quanto da peça sinterizada. O valor total da distorção representa a amplitude de distorção (Δ_T), no qual quanto menor o valor obtido, menor será a distorção. Portanto, a equação 3.1 expressa a medida da distorção.

$$\Delta_{\mathrm{T}} = \left| \left(\mathsf{P}_{\mathrm{fV}} - \mathsf{P}_{\mathrm{iV}} \right) - \left(\mathsf{P}_{\mathrm{fS}} - \mathsf{P}_{\mathrm{iS}} \right) \right|$$

$$[3.1]$$

3.9 Processo de sinterização

O processo de sinterização dos corpos-de-prova foi feito em um forno elétrico do tipo câmara, da marca *Lindberg Blue*[®], com uma rampa de aquecimento, patamar e rampa de resfriamento, com duração total de 900 minutos, e temperatura máxima de 1600 °C com um patamar de 120 minutos de duração. O tempo e a temperatura descritos foram os necessários para alcançar as características de sinterização requeridas para o material da peça, como o aumento do tamanho de grão necessário e alcançar a melhor resistência mecânica, Figura 3.9.



FIGURA 3.9 – Rampa de aquecimento e temperatura do processo de sinterização.

3.10 Resumo do procedimento experimental

Os parâmetros de entrada e as variáveis de saída envolvidas no procedimento experimental podem ser resumidamente mostrados no esquema ilustrativo da Figura 3.10.



FIGURA 3.10 - Ilustração dos parâmetros envolvidos nos ensaios.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Tomando-se os valores de profundidade de corte, avanço e rotação selecionados nos ensaios preliminares, respectivamente $a_p = 1 \text{ mm}$, f = 22,4 mm e n = 1000 rpm, prosseguiram-se os ensaios para a remoção dos sobremateriais de 1,0, 2,0, 3,0, 4,0 e 5,0 mm.

4.1 Análise da distorção

Após a sinterização, todas as amostras apresentaram contração diametral. Com o aumento do número do plano de corte houve redução da contração, e amplitude medida entre eles foi maior em relação à base de referência menos compactada, que segundo BENCOE, 2008; ALBARO, 2001; MAIER e MICHAELI, 1996; e WESTERHEIDE et al., 1996, representa a região com menor densidade aparente numa peça obtida por compactação uniaxial.

A usinagem realizada pela base de referência mais compactada do corpo-deprova, apesar de apresentar os maiores valores de densidade aparente, também apresentou certa amplitude entre a diferença do décimo sexto e o primeiro plano, porém menor que para a base menos compactada. Uma possível explicação seria o fato de que durante o processo de sinterização, a borda da peça se aquecer mais rapidamente que o centro, e dessa forma ficar por mais tempo sob a temperatura máxima do forno, e assim o processo ter sido mais intenso, promovendo a distorção dessa região.

O comportamento diferenciado da amplitude observado entre as bases da peça evidencia a presença da diferença de densidade, uma vez que uma peça com densidade homogênea, não deva apresentar uma diferença de diâmetro ao longo de toda a sua extensão.

As amplitudes médias calculadas para as peças não usinadas e para as usinadas com os seus respectivos sobremateriais, mostra o comportamento da distorção dos corpos-de-prova, tanto para a base mais compactada quanto para a base menos compactada. De modo geral, é possível notar que a maior amplitude de distorção da peça sinterizada ocorre na situação em que ela não é usinada e para a base menos compactada, anotando-se um valor médio de 0,119 mm. Com a remoção dos sobremateriais o valor da amplitude diminui até alcançar o menor nível, de 0,067 mm, verificado na condição de remoção de sobrematerial de 4,0 mm. Esta distorção também é destacadamente menor que nos casos de remoção de sobremateriais menores, onde foi obtido para o menor sobrematerial, de 1,0 mm, uma distorção de 0,093 mm, enquanto que para o sobrematerial de 2,0, 3,0 e 5,0 mm obteve-se 0,085, 0,069 e 0,082 mm de distorção, respectivamente. O fato de a destacada menor distorção ter sido conseguida com a remoção do sobrematerial de 4,0 mm, sugere que com esse valor tem-se significativa redução do gradiente de densidade no corpo-de-prova em verde e a consegüente minimização da distorção após a sinterização, sendo nesse caso, o máximo sobrematerial necessário na peça, Figura 4.1.

Para a base mais compactada e sem usinagem, nota-se um valor médio de 0,070 mm, e com a remoção de sobrematerial o valor da amplitude de distorção diminui até alcançar o menor nível, de 0,013 mm, verificado na condição de remoção de sobrematerial de 5,0 mm. Esta distorção também é destacadamente menor que

nos casos de remoção de sobremateriais menores, assim, para o menor sobrematerial, de 1,0 mm, encontrou-se uma distorção de 0,042 mm, enquanto que para o sobrematerial de 2,0, 3,0 e 4,0 mm obteve-se 0,033, 0,025 e 0,048 mm de distorção, respectivamente. O fato de a destacada menor distorção ter sido conseguida com a remoção do maior sobrematerial de 5,0 mm, sugere que com esse valor tem-se significativa redução do gradiente de densidade no corpo-de-prova em verde e a conseqüente minimização da distorção após a sinterização, sendo nesse caso, o máximo sobrematerial necessário da peça, Figura 4.1.





Um cálculo da porcentagem realizado sobre a redução da amplitude de distorção causado pela remoção dos sobremateriais em relação a peça sem usinagem, demonstrou a eficiência da usinagem a verde na remoção dos gradientes de densidade. Com a operação de remoção foi possível obter uma redução da

distorção de até 81,4% da peça usinada pela base mais compactada e com o sobrematerial de 5,0 mm, e para a base menos compactada com o sobrematerial de 4,0 mm foi obtida uma redução de 43,7%, Figura 4.2.



Figura 4.2 – Porcentagem de redução da amplitude de distorção em função do sobrematerial removido.

De fato, se for considerada a Figura 2.6 extraída de Richerson (1992) e calculado o valor da porcentagem do sobrematerial removido em função do raio do corpo-de-prova, 4,0 mm seria equivalente a 32,0 % de remoção e 5,0 mm o equivalente a 40,0 %. Os 32,0 % representariam o equivalente a retirada de cinco gradientes de densidade, e os 40,0 % o equivalente a retirada de seis gradientes de densidade do corpo-de-prova como um todo. Dessa forma ajudando a explicar os resultados obtidos com a usinagem.

4.2 Análise da força de corte

No gráfico da Figura 4.3 é mostrado o comportamento da F_c na usinagem, em cada um dos cinco valores diferentes de sobrematerial, com valores RMS (*Root Mean Square*) e o desvio padrão. Pode ser observado que F_c foi crescente em função do maior número de passes efetuado pela ferramenta, fato que também pode ser explicado em função do desgaste crescente da mesma. Além disso, Sabe-se que com a diminuição do diâmetro da peça usinada, e o correspondente aumento da velocidade de corte, a força de corte tende a aumentar. Nos metais a tendência da diminuição da pressão específica de corte com o aumento da velocidade atenua o aumento da força, não se verificando seu crescimento linear. Ainda que não se tenha informações a respeito da pressão específica de corte da cerâmica em verde utilizada no trabalho, nota-se que o aumento da força provocado pela redução da velocidade de corte não é linear, portanto sugerindo que a pressão específica também diminua com o aumento da velocidade de corte.

Com relação a base do corpo-de-prova usinado, a base mais compactada necessitou de uma maior força para a realização da usinagem que a base menos compactada, demonstrando que a variação da densidade exerce grande influência nas variáveis de saída da usinagem.

Da mesma maneira que os metais, a F_c na usinagem da alumina em verde também se mostra bastante suscetível ao desgaste da ferramenta de corte. Mesmo com baixa taxa de desgaste a F_c é claramente crescente como, por exemplo, se constata no caso da remoção do sobrematerial de 1,0 mm no qual o VB_{max} foi de 0,04 mm ao final do passe pela base menos compactada.



FIGURA 4.3 - Valor RMS da F_c em função do número de passes.

Observação semelhante pode ser feita considerando a usinagem dos corposde-prova, que para remover os sobremateriais de 5,0, 4,0, 3,0 e 2,0 mm foram necessários executar cinco, quatro, três e duas vezes o número de passes usados na remoção do sobrematerial de 1,0 mm. Tendo como diferença apenas o aumento do número de passes, e conseqüentemente o desgaste da ferramenta, obtiveram-se forças médias de 1,25, 0,9, 0,82, 0,6 e 0,53 N, respectivamente. Para a base mais compactada, a força média necessária para remover os sobremateriais de 5,0, 4,0, 3,0, 2,0 e 1,0 mm foi de 1,5, 1,3, 1,2, 0,92 e 0,56 N, respectivamente.

4.3 Análise do desgaste da ferramenta

Na Figura 4.4 é apresentado o valor do VB_{max} com o correspondente número de passes de usinagem necessários para a remoção do material total dos corpos-

de-prova de cada condição. Mais uma vez a influência da diferença de densidade da peça foi determinante no desgaste da ferramenta, sendo maior o desgaste quando feita a usinagem pela base de referência mais compactada do corpo-de-prova, alcançando um valor máximo de 0,15 mm, e para base de referência menos compactada um valor máximo de 0,12 mm.



FIGURA 4.4 - Desgaste da ferramenta em função do número de passes executados.

Pelas imagens obtidas por MEV das ferramentas desgastadas após a execução dos 5 passes, pode ser observado na comparação entre a ferramenta (a) nova e as que executaram a remoção de material pela (b) base de referência mais compactada e pela (c) base de referência menos compactada, que o desgaste foi causado pela natureza abrasiva dos grãos de alumina da peça, com a ausência de qualquer avaria ou adesão de material sobre a ferramenta, que pode ser atribuída a baixa temperatura e F_c envolvidos na usinagem de compactados em verde, uma vez que a peça apresenta baixa resistência mecânica como demonstra a Figura 4.5.

Nas imagens da Figura 4.6, foi apontado pela seta a região do VB_{max}, onde é apenas possível observar os riscos na posição vertical deixados pela peça na ferramenta, e que representam o sentido de remoção do material, para a (a) base de referência mais compactada e para a (b) base de referencia menos compactada.



Figura 4.5 - MEV das pontas das ferramentas, (a) nova, (b) após 5 passes realizados pela base de referência mais compactada e (c) após 5 passes realizados pela base de referência menos compactada.



Figura 4.6 - MEV das ferramentas evidenciando o VB_{max} , (a) após 5 passes realizados pela base de referência mais compactada e (b) após 5 passes realizados

pela base de referência menos compactada.

Imagens da superfície de saída das ferramentas mostram a ausência de desgaste por cratera, sendo em geral causado pelo atrito do cavaco na superfície de saída ocasionando uma depressão pela remoção de material da ferramenta por difusão, como pode ser observado nas imagens da Figura 4.7, após o número total de passes executados pela (a) base de referência mais compactada e (b) base de referência menos compactada.



Figura 4.7 - MEV da superfície de saída da ferramenta, (a) após 5 passes realizados pela base de referência mais compactada e (b) após 5 passes realizados pela base





Figura 4.8 – EDS da superfície (a) ferramenta nova e (b) região do flanco desgastado.

A realização de uma medição da composição química, por Sistema de Energia Dispersa (EDS), na (a) ferramenta nova e na (b) região do flanco desgastado, mostrou a presença dos mesmos elementos químicos constituintes para ambos, confirmando a ausência de adesão de material da peça na ferramenta, como o observado na Figura 4.8.



Figura 4.9 – MEV do cavaco produzido durante a usinagem com aumento de (a) 100x, (b) 500x, (c) 5000x e (d) 20000x.

Todo o cavaco produzido pelo torneamento foi no formato de pó e em pequenos aglomerados de grãos de formato aleatório, sem qualquer semelhança

com o pó obtido pelo método de "spray dryer", como pode ser observado na Figura 4.9, pelo aumento progressivo do cavaco nas imagens de (a) a (d) obtidas pelo MEV.

4.4 Análise da rugosidade e superfície dos corpos-de-prova

Verifica-se ao longo dos ensaios que a rugosidade dos corpos-de-prova usinados acompanha o desgaste da ferramenta de corte. Conforme pode-se observar no gráfico da Figura 4.10, os valores de rugosidade foram crescentes com o aumento do VB_{max}. Essa se mostrou inversa em função do lado da base de referência usinada do corpo-de-prova, para a base mais compactada a rugosidade apresentou valores menores do que para a base menos compactada, nas três primeiras medições de desgaste da ferramenta, porém nas duas últimas medições de desgaste, a rugosidade se mostrou maior.

Uma explicação possível seria o fato de a base mais compactada, com a sua densidade relativa maior, não gerar o desprendimento involuntário de grãos, fato que pode ser mais presente na base menos compactada, gerando um acabamento ligeiramente pior nas primeiras medições de desgaste. Mas o fato das duas últimas medições do VB_{max} realizados para a base de referência mais compactada, ter sido maiores que o maior desgaste medido para a base de referência menos compactada, sugere os maiores valores de rugosidade encontrados, independente da maior compactação presente.

Observa-se que em todas as peças, a rugosidade diminui após a sinterização e o melhor acabamento superficial obtido nos corpos-de-prova sinterizados foi com o correspondente melhor acabamento superficial em verde. Esta diferença pode ser
creditada à minimização dos defeitos da superfície após a sinterização. Como o mecanismo de sinterização atua em direção à coesão da estrutura granular, a superfície da peça em verde que apresenta defeitos passa por um restabelecimento de sua estrutura tendo os mesmos minimizados.



FIGURA 4.10 - Rugosidade dos corpos-de-prova em verde e depois de sinterizado

ao final da remoção de cada sobrematerial.

Pode ser observado, também, que apesar de algumas medições de rugosidade nas peças verdes usinadas terem apresentados valores maiores que para a peça sem usinagem, após a sinterização foi possível notar valores menores de rugosidade, dessa forma, mesmo com um desgaste de 0,14 mm da ferramenta utilizada na usinagem pela base de referência mais compactada, foi anotado um valor de rugosidade da peça sinterizada menor que para a peça sem usinagem sinterizada. Isto devido à sinterização promover retração juntamente com o mecanismo de transporte de átomos. Já para a usinagem realizada pela base de referência mais compactada, a pela base de referência menos compactada, com o desgaste de 0,08 mm, apresentou valores de rugosidade da peça sinterizada menor que para a sem usinagem sinterizada.

4.5 Análise das superfícies da peças

Imagens obtidas por MEV das peças verdes não usinadas e usinadas pela base de referência mais compactada, para um aumento de 500x, mostra na imagem (a) os riscos deixados pelo molde na peça sem usinagem. Em seguida para as imagens (b), (c), (d), (e) e (f), sendo as peças submetidas à remoção dos sobremateriais de 1,0, 2,0, 3,0 4,0 e 5,0 mm, respectivamente, é possível observar os riscos deixados pela ponta da ferramenta e um aspecto visual da superfície se tornando grosseiro, causado pelo desgaste progressivo da ponta da ferramenta e o aumento da F_c, em função do número de passes necessário para alcançar cada remoção do sobrematerial, como pode ser observado na Figura 4.11.



Figura 4.11 - MEV das superfícies em verde (a) não usinada e usinadas com os sobremateriais de (b) 1,0 mm, (c) 2,0 mm, (d) 3,0 mm, (e) 4,0 mm e (f) 5,0 mm, pela base mais compactada, aumento 500x.

Com um aumento de 3000x fica evidenciado o aspecto visual das superfícies, observado na imagem (a) os vazios existentes entre os contornos dos aglomerados de grãos, para as imagens (b) e (c) foi observado uma superfície usinada com aspecto uniforme, e para as imagens (d), (e) e (f), onde o desgaste da ferramenta começou a se acentuar, é possível observar a introdução de possíveis defeitos como aglomerados soltos e o deslocamento e arrastamento de aglomerados de grãos, formando uma superfície com aspecto parecido com escamas, conforme Figura 4.12.



Figura 4.12 - MEV das superfícies em verde (a) não usinada e usinadas com os sobremateriais de (b) 1,0 mm, (c) 2,0 mm, (d) 3,0 mm, (e) 4,0 mm e (f) 5,0 mm, pela base mais compactada, aumento 3000x.

Após o processo de sinterização das peças, pode ser observado na Figura 4.13, com o aumento de 500x, que de uma forma geral a superfícies tiveram uma resposta em relação a sinterização, tendo em vista que essa promove o crescimento de grãos, obtendo assim uma maior uniformidade no aspecto visual do acabamento. Afirmativa que pode ser justificada com o fato da redução do Ra medido após a sinterização das mesmas.

Com o aumento de 3000x, a imagem (a) da peça sem usinagem sinterizada mostrou a ausência dos vazios dos contornos dos aglomerados de grãos vistos anteriormente na peça verde. Para as imagens (b) e (c) das peças usinadas sinterizadas é evidenciado o aspecto de maior uniformidade da superfície, e para as imagens (d), (e) e (f), com o desgaste acentuado da ferramenta, o aspecto de escamas ficou em evidência, conforme pode ser observado na Figura 4.14.



Figura 4.13 - MEV das superfícies sinterizadas (a) não usinada e usinadas com os sobremateriais de (b) 1,0 mm, (c) 2,0 mm, (d) 3,0 mm, (e) 4,0 mm e (f) 5,0 mm, pela base mais compactada, aumento 500x.



Figura 4.14 - MEV das superfícies sinterizadas (a) não usinada e usinadas com os sobremateriais de (b) 1,0 mm, (c) 2,0 mm, (d) 3,0 mm, (e) 4,0 mm e (f) 5,0 mm, pela base mais compactada, aumento 3000x.

Para as imagens obtidas por MEV das peças verdes não usinadas e usinadas pela base de referência menos compactada, para um aumento de 500x, mostra na imagem (a) da peça sem usinagem os riscos deixados pelo molde e os contornos dos aglomerados são visto com nitidez, evidenciando a menor compactação do material nessa região. Em seguida para as imagens (b), (c), (d), (e) e (f), sendo as peças submetidas à remoção dos sobremateriais de 1,0, 2,0, 3,0 4,0 e 5,0 mm, respectivamente, é possível observar os riscos deixados pela ponta da ferramenta e um aspecto visual da superfície menos grosseiro que o observado com a usinagem pela base mais compactada, porém o efeito do desgaste progressivo da ferramenta, em função dos sobremateriais removidos, é ainda observado na perda da uniformidade do aspecto visual das peças, de acordo com a Figura 4.15.



Figura 4.15 - MEV das superfícies em verde (a) não usinada e usinadas com os sobremateriais de (b) 1,0 mm, (c) 2,0 mm, (d) 3,0 mm, (e) 4,0 mm e (f) 5,0 mm, pela base menos compactada, aumento 500X.

Com um aumento de 3000x fica evidenciado o aspecto visual das superfícies, observado na imagem (a) vazios ainda maiores existentes entre os contornos dos aglomerados de grãos, para as imagens (b), (c) e (d) foi observado uma superfície usinada com aspecto uniforme, e para as imagens (e) e (f), onde o desgaste começou a se acentuar, é possível observar a introdução de possíveis defeitos como grãos soltos e o deslocamento e arrastamento de aglomerados de grãos, formando uma superfície com aspecto parecido com escamas, além disso, na imagem (f) ainda foi possível observar o aparecimento de pequenas fissuras apontadas na imagem, conforme Figura 4.16.



Figura 4.16 - MEV das superfícies em verde (a) não usinada e usinadas com os sobremateriais de (b) 1,0 mm, (c) 2,0 mm, (d) 3,0 mm, (e) 4,0 mm e (f) 5,0 mm, pela base menos compactada, aumento 3000x.

Após o processo de sinterização das peças, pode ser observado na Figura 4.17, com o aumento de 500x, que de uma forma geral a superfícies tiveram a mesma resposta em relação a sinterização observada anteriormente, obtendo assim uma maior uniformidade no aspecto visual do acabamento. Afirmativa que pode ser justificada com o fato da redução do Ra medido após a sinterização das mesmas.

Com o aumento de 3000x, observado na Figura 4.18, a imagem (a) da peça sem usinagem sinterizada mostrou a ausência dos vazios dos contornos dos aglomerados de grãos vistos anteriormente na peça verde. Para as imagens (b), (c) e (d) das peças usinadas sinterizadas é evidenciado o aspecto de maior uniformidade da superfície, e para as imagens (e) e (f), com o desgaste acentuado da ferramenta, o aspecto de escamas ficou mais evidente, além de pequenas fissuras observadas e apontadas na imagem (f).



Figura 4.17 - MEV das superfícies sinterizadas (a) não usinada e usinadas com os sobremateriais de (b) 1,0 mm, (c) 2,0 mm, (d) 3,0 mm, (e) 4,0 mm e (f) 5,0 mm, pela base menos compactada, aumento 500x.



Figura 4.18 - MEV das superfícies sinterizadas (a) não usinada e usinadas com os sobremateriais de (b) 1,0 mm, (c) 2,0 mm, (d) 3,0 mm, (e) 4,0 mm e (f) 5,0 mm, pela base menos compactada, aumento 3000x.

5 CONCLUSÕES

Em função dos resultados obtidos nesse trabalho, pode-se concluir que:

 A redução da quantidade de gradientes de densidade diminui a distorção das peças sinterizadas. Para isso, a remoção de sobrematerial da peça em verde por meio do torneamento, se mostra como uma boa alternativa na redução gradual do gradiente;

- A distorção dos corpos-de-prova usinados que mais diminuiu após a sinterização se deu com o maior dos sobremateriais, de 5,0 mm;

 O acabamento superficial da peça em verde tem influência direta na peça sinterizada, sendo que a usinagem do compactado em verde é benéfica na redução da rugosidade da peça sinterizada;

 Devido à usinagem a verde, a redução da distorção da peça sinterizada e a melhora do acabamento superficial vislumbra a possibilidade da aplicação direta do produto após a sinterização, sem a necessidade de outra etapa subseqüente de usinagem, dependendo da aplicação;

 O desgaste da ferramenta de corte tem influência direta na rugosidade das peças usinadas e o mecanismo de desgaste predominante observado foi do tipo abrasivo;

Por fim, a partir deste trabalho e de outros citados ao longo do texto, pode-se extrair que a usinagem no estado em verde não é somente interessante para a obtenção de formas complexas de peças em estágio anterior à sinterização e aproximar o compactado o máximo possível das dimensões pretendidas para a peça sinterizada, mas também para reduzir suas distorções e melhorar o acabamento superficial.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

 Reaproveitamento do pó para a confecção de novas peças, analisando as suas características de usinabilidade, compactação, acabamento superficial e distorção.

 Análise da distorção e acabamento superficial de corpos-de-prova de geometria complexa.

Quantificação e qualificação do gradiente de densidade das amostras compactadas visando otimizar a usinagem a verde.

 Análise da influência da usinagem a verde na integridade superficial e nas propriedades mecânicas da peça sinterizada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABC, **Associação Brasileira de Cerâmica.** Disponível em: www.abceram.org. Acesso em: 2010.

ALBARO, J. L. A. A operação de prensagem: considerações técnicas e sua aplicação industrial. Parte I: o preenchimento da cavidade do molde. Cerâmica Industrial, v. 5, 2000.

ALBARO, J. L. A. A operação de prensagem: considerações técnicas e sua aplicação industrial. Parte v: descrição da etapa de prensagem. Cerâmica Industrial, v. 6, 2001.

ARGAWAL, A.; RAO, P. V. Experimental investigation of surface/subsurface damage formation and material removal mechanisms in SiC grinding. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v. 48, p. 698-710, 2008.

AYDIN, A.; BRISCOE, B. J.; SANLITURKB, K. Y. **Dimensional variation of diepressed ceramic green compacts: comparison of a finite element modelling with experiment.** Journal of the European Ceramic Sociery, v. 17, p. 1201-1212, 1997.

BENCOE, D. N.; DIANTONIO, C. B.; EWSUK K. G. **Density gradient evolution in alumina powder compacts during sintering.** Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM 87185-1349, 2008.

BESSHIA, T.; SATOB, T.; TSUTUIB, I. Machining of alumina green bodies and their dewaxing. Journal of Materials Processing Technology, v. 95, p. 133-138, 1999.

BHATTACHARYA, B.; PATTEN, J. A.; JACOB, J. **Single point diamond turning of cvd coated silicon carbide.** 2006 ASME International Conference on Manufacturing Science and Engineering October 8-11, Ypsilanti, Michigan, 2006.

BLACKLEY, W. S.; SCATTERGOOD, R. O. **Ductile regime machining model for diamond turning of brittle materials.** Precision Engineering, v. 13, p. 95-103, 1991.

BLACKLEY, W. S.; SCATTERGOOD, R. O. **Chip topography for ductile-regime machining of germanium**. ASME Journal of Engineering for Industry, v. 116, p. 263-266, 1994.

CARVALHO, R. C.; FORTULAN, C. A. **Projeto de um minimoinho vibratório auxiliado por técnicas de metodologia de projeto.** LTC – Laboratório de Tribologia e Compósitos – SEM – EESC-USP, 2006

CAUSTON, R. J.; SCHADE, C. Machinability: a material property or process response. PM²TEC, Las Vegas, 2003.

DEGNAN, C. C.; KENNEDY, A. R.; SHIPWAY, P. H. **Relationship between physical structure and machinability of green compacts.** Powder Metallurgy, v. 50, n.1, p. 14-20, 2007.

DESFONTAINES, M.; JORAND, Y.; GONON, M.; FANTOZZI, G. Characterisation of the green machinability of AIN powder compacts. Journal of the Europem Ceramic Society, v. 25, p. 781-791, 2005.

DHARA, S.; KAMBOJ, R. K.; PRADHAN, M.; BHARGAVA, P. Shape forming of ceramics via gelcasting of aqueous particulate slurries. Bulletin Material Science, v. 25, n. 6, p. 565-568, 2002.

DHARA, S.; SU, B. Green machining to net shape alumina ceramics prepared using different processing routes. International Journal of Applied Ceramic Technology, v. 2, n. 3, p. 262-270, 2005.

EKABARAM, V. **Optimization of green ceramic grinding.** Thesis, The University of Toledo, OH, 2008.

EL-WARDANY, T.; BARTH, R.; HOLOWCZACK, J.; TREDWAY, W.; CHEN, L. J. **Optimum process parameters to produce green ceramic complex parts.** CIRP Annals – Machining Technology, v. 58, p. 109-112, 2009.

FANTOZZI, G.; ROUBY, D.; CHEVALIER, J.; REYNAUD, P. **Advanced ceramic materials: summary of possible applications.** Materials: Science and Engineering.

FORTULAN, C. A.; PURQUERIO, B. M. **Projeto e desempenho de um moinho vibratório para cerâmica avançada**. Congresso de Engenharia Mecânica Norte-Nordeste, Recife, 4., 1996.

GROENOU, A. B. V. **Compactation of ceramic powders.** Powder Technology, v. 28, p. 221-228, 1981.

JANASOVITS, U.; GROTHE, A.; POHLMANN, H. J.; LANG, G. Improvement of green machining process of Si₃N₄. Ber. Deutsche Keramishe Gesellschaft , V. 76, N. 5, P. 24-28, 1999.

JANSSEN, R.; SCHEPPOKAT, S.; CLAUSSEN, N. Tailor-made ceramic-based components—Advantages by reactive processing and advanced shaping techniques. Journal of the European Ceramic Society, v. 28, p. 1369-1379, 2008.

KAMBOJ, R. K.; DHARA, S.; BHARGAVA, P. **Machining behaviour of green gelcast ceramics.** Journal of the European Ceramic Society, v. 23, p. 1005-1011, 2003.

KING, G. A. **Ceramic technology and processing.** Noyes Publication: William Andrew Publishing, Norwich, New York, 2002. 528 p. ISBN 0-8155-1443-3.

KLOCKE, F.; GERENT, O.; SCHIPPERS, C. **Machining of advanced ceramics in the green state.** Ceramic Forum International, v. 74, n⁻6, p. 288-290, 1997.

KOH, Y.; HALLORAN, J. W. Green machining of a thermoplastic ceramicethylene ethyl acrylate/isobutyl methacrylate compound. Journal of the American Ceramic Society, v. 87, n. 8, p. 1575-1577, 2004.

KOH, Y.; YOON, C.; LEE, S.; KIM, H. Thermoplastic green machining for the fabrication of a piezoelectric ceramic/polymer composite with 2-2 connectivity. Journal of the American Ceramic Society, v. 88, n. 4, p. 1060-1063, 2005.

KOK, C.; KWON, P.; RACHEDI, R. R.; KLENOW, B. A. **Finite simulation of the uniaxial die pressing of ceramic powder.** Department of Mechanical Engineering, Michigan State University, East Lansing, MI 48823, USA.

KONIG, W.; WAGEMANN, A. **Machining of ceramic components: processtechnological potentials.** Proceedings of the International Conference on Machining of Advanced Materials, July 20-22, 1993, U.S., Gaithersberg, NIST Special Publication v. 847, p. 3-16.

KUMBERA, T. G.; PATTEN, J. A.; CHERUKURI, H. P. **Machining force analysis for ductile machining of silicon nitride.** University of North Carolina at Charlotte, Charlotte, NC 28223 USA, 2004.

LARKER, H. T.; LUNDBERG, R. Near net shape production of monolithic and composite high temperature ceramics by hot isostatic pressing (HIP). Journal of the European Ceramic Society, v. 19, p. 2367-2373, 1999.

LERICHE, A.; MOORTGAT, G.; CAMBIER, F.; HOMERIN, P.; THEVENOT, F.; ORANGE, G.; FANTOZZI, G. **Preparation and microstructure of zirconia toughened alumina ceramics.** Journal of the American Ceramic Society, v. 24, p.1033-1041, 1988.

LU, P. K.; LANNUTTI, J. J. **Density gradients and sintered dimensional tolerance in compacts formed from spray-dried alumina.** Journal of the American Ceramic Society, v. 83, n. 6, p. 1393-1398, 2000.

MAIER, H. R.; MICHAELI, N. Green machining of alumina. Key Engineering Materials, v. 132-136, p. 436-439, 1997.

MALKIN, S.; RITTER, J. E. Grinding mechanisms and strength degradation for ceramics. ASME Journal of Engineering for Industry, v. 111, p. 67-174, 1989.

MARSHALL, D. B.; EVANS, A. G.; KHURI YAKUB, B. T.; TIEN, J. W.; KINO, G. S. **The nature of machining damage in brittle materials.** Proceedings of the Royal Society, v. 385, p. 461-475, 1983.

MAYER, J. E.; FANG, G. P. Effect of grinding parameters on strength and finishing of ceramics. In Proceedings 1st International Machining and Grinding Conference-SME, September, p. 151-164, 1995.

MAZALI, I. O. Cálculo da variação da densidade em função da temperatura a partir de dados de termodilatometria. LQES - Laboratório de Química do Estado Sólido - Instituto de Química – UNICAMP, 2006.

NG, S.H.; HULL, J.B.; HENSHALL, J.L. **Machining of novel alumina/cyanoacrylate green ceramic compacts.** Journal of Materials Processing Technology, v. 175, p. 299-305, 2006.

NGOI, B. K. A.; SREEJITH, P. S. **Ductile regime finish machining - a review.** International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 16, p. 547-550, 2000.

NUNN, S.; KIRBY, G. H. Green machining of gelcasting ceramic materials. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN 3783 1-6087.

PATTEN, J.; CHERUKURI, H. Ductile machining phenomena of nominally brittle materials at the nanoscale. Center for Precision Metrology, University of North Carolina at Charlotte, Charlotte, NC 20223, U.S.A, 2001.

PFRENGLE, A.; BINDER, J. R.; RITZHAUPT-KLEISSL, H.; HAUSSELT, J.; MULLER, C.; GIETZELT, T. **Optimizing net-shape ceramics for green machining.** International journal of Applied Ceramic Technology, v. 7, n. 2, p. 189-196, 2009.

RICHERSON, D. W. Modern ceramic engineering: properties, processing and use in design. 2nd edition, Marcel Dekker, Inc. USA, 1992.

ROBERT-PERRON, E.; BLAIS, C.; PELLETIER, S. **Tensile properties of sinter hardened powder metallurgy components machined in their green state.** Powder Metallurgy, v. 52, n.1, p. 80-83, 2009.

ROBERT-PERRON, E.; BLAIS, C.; PELLETIER, S.; THOMAS, Y. Machinability of green powder metallurgy components: part II. sintered properties of components machined in green state. The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International, v. 38A, p. 1337-1342, 2007.

ROBERT-PERRON, E.; BLAIS, C.; PELLETIER, S.; THOMAS, Y. Machinability of green powder metallurgy components: part I. characterization of the Influence of tool wear. The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International, 2007.

ROBERT-PERRON, E.; BLAIS, C.; THOMAS, Y.; PELLETIER, S.; DIONNE, M. An integrated approach to the characterization of powder metallurgy components performance during green machining. Materials Science and Engineering, v. A402, p. 325-334, 2005.

SATO, T.; BESSHI, T.; MATSUI, M. A new near net-shape forming process for alumina. Journal of Materials Processing Technology, v. 79, p. 125-132, 1998.

SCHELLER, W. L. Conventional machining of green aluminum/aluminum nitride. The Ohio Journal of Science, v. 94, p. 151-154, 1994.

SHEPPARD, L. M. Green machining: tools and considerations for machining unfired ceramic parts. Ceramic Industry, v. 149, n. 6, p. 65-77, 1999.

STRAKNA, T. J.; JAHANMIR, S.; ALLOR, R. L.; KUMAR K. V. Influence of grinding direction on fracture strength of silicon nitride. Journal of Engineering Materials and Technology, v. 118, p. 335-342, 1996.

SU, B.; DHARA, S.; WANG, L. Green ceramic machining: a top-down approach for the rapid fabrication of complex-shaped ceramics. Journal of the European Ceramic Society, v. 28, p. 2109-2115, 2008.

SWAIN, M. V. Microfracture about scratches in brittle solids. Proceedings of the Royal Society, v. A366, p. 575-597, 1979.

TULLIANI, J.; NAGLIERI, V.; LOMBARDI, M.; MONTONARO, L. Gel casting of porous alumina and zirconia bodies. The Azo journal of Materials Online, v. 6, 2009.

UHLMANN, E.; RABE, H.; BUBLATH, B.; Brücher, M. Turning of ceramics with diamond tools. Industrial Diamond Review, p. 30-35, 2001

XU, H. H. K.; JAHANMIR, S. Microfracture and material removal in scratching of alumina. Journal of Matierals Science, v. 30, p. 2235-2247,1995.

ZHONG, Z. W. Ductile or partial ductile mode machining of brittle materials. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 21, p. 579-585, 2003.

ZIPSE, H. **Finite-elemlent simulation of the die pressing and sintering of a ceramic component.** Journal of the European Ceramic Society, v. 17, p. 1707-1713, 1997.

WESTERHEIDE, R.; DRIISEDAU, K. A.; HOLLSTEIN, T.; SCHWICKERT, T.; ZIPSE, H. **Advances in characterisation of machined green compacts.** Journal of the Europem Ceramic Society, v. 17, p. 467-472, 1996. Anexo 1: Resultados das medições dos diâmetros para cada plano de corte em função do sobrematerial removido para corpos-de-prova em verde e sinterizados.

























Anexo 2: Contração linear média (%) dos corpos-de-prova para diferentes sobremateriais em função do plano de corte.

