

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU – FEB
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**EFEITOS DOS PARÂMETROS DE USINAGEM NO ACABAMENTO
SUPERFICIAL DE MATERIAIS CERÂMICOS A VERDE**

MARCOS GONÇALVES JÚNIOR

BAURU – SP

2014

MARCOS GONÇALVES JÚNIOR

**EFEITOS DOS PARÂMETROS DE USINAGEM NO ACABAMENTO
SUPERFICIAL DE MATERIAIS CERÂMICOS A VERDE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Câmpus de Bauru, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Cesar Renato Foschini.

BAURU – SP

DEZEMBRO DE 2014

Gonçalves Júnior, Marcos.

Efeitos dos parâmetros de usinagem no acabamento superficial de materiais cerâmicos a verde / Marcos Gonçalves Júnior, 2014

64 f.

Orientador: Cesar Renato Foschini

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2014

1. Cerâmica avançada. 2. Usinagem de cerâmica a verde. 3. Força de corte. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

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

Aos 05 dias do mês de dezembro do ano de 2014, às 09:00 horas, no(a) Anfiteatro do S.T.I., da Faculdade de Engenharia de Bauru, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. CESAR RENATO FOSCHINI 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. THIAGO VALLE FRANÇA do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de MARCOS GONÇALVES JUNIOR, intitulado "EFEITOS DOS PARÂMETROS DE USINAGEM NO ACABAMENTO SUPERFICIAL DE MATERIAIS CERÂMICOS A VERDE". Após a exposição, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADO. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que, após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. CESAR RENATO FOSCHINI



Prof. Dr. CARLOS ALBERTO FORTULAN



Prof. Dr. THIAGO VALLE FRANÇA



AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, nosso Pai, por me ter concedido paz e serenidade para a execução desta pesquisa científica e por permitir que eu alcançasse mais essa vitória.

Aos meus pais, pelos ensinamentos e confiança, pois sem uma origem não temos como definir nossos destinos, ao meu irmão, a minha namorada e demais familiares. Obrigado pelo apoio, compreensão e incentivo.

Agradeço ao meu orientador Cesar Renato Foschini, não só pela constante orientação neste trabalho, mas sobretudo pela sua amizade, apoio e paciência que nortearam cada um dos meus passos para realizar o trabalho. Obrigado pelos diálogos, incentivo e por sua orientação clara e detalhista.

Aos professores do departamento de mecânica, que contribuíram para o melhoramento do trabalho com ensinamentos, conhecimentos e opiniões, em especial aos professores, Luiz Eduardo de Angelo Sanchez e Thiago Valle França, pela ajuda e auxílio no desenvolvimento do mesmo.

Ao professor Carlos Alberto Fortulan, pelo fornecimento do laboratório e de materiais necessários para elaboração dos corpos de prova, como também, na orientação para melhorias no trabalho.

Aos meus amigos, pelo convívio, amizade e estudos, especialmente ao Rubens Roberto Ingraci Neto, pelo auxílio e sugestões na elaboração da montagem da bancada de ensaios, sendo fundamental para execução deste trabalho.

Ao Gil Bukvic e Luiz Adalberto Penazzi, pela ajuda e informações na fabricação dos corpos de prova, sem as quais este trabalho não poderia ter sido realizado da maneira como foi.

Ao professor do departamento de ciências Paulo Noronha Lisboa Filho, a Luciana Daniele Trino e a Thais Peres Zanetine Marques, pelos equipamentos disponibilizados e ajuda na análise das amostras.

Agradeço a CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de nível Superior) pela bolsa concedida.

Enfim, a todos de que algum modo colaboraram para a realização deste trabalho. Muito obrigado!

"Você nunca sabe que resultados virão da sua
ação. Mas se você não fizer nada, não existirão
resultados".

(Mahatma Gandhi).

RESUMO

A usinagem de cerâmica verde tem sido investigada como um método para fabricação de formas complexas. Tal método fornece uma alternativa possível para a fabricação de cerâmica de geometria complexa com dimensões próximas as finais, devido à baixa resistência mecânica, apresentando vantagens em termos de custo benefício e melhoria no acabamento superficial, em comparação com a usinagem realizada somente após a sinterização. Neste trabalho foram medidas as forças de usinagem de corpos cerâmicos a verde, e analisado a sua correlação com os parâmetros de corte e com o acabamento superficial. A correlação entre a potência de corte e a taxa de remoção são parâmetros importantes para definir o projeto em produtos cerâmicos, nos quais parâmetros inadequados podem produzir danos superficiais excessivos na peça. O presente trabalho objetivou a elaboração e a concepção de um sistema de aquisição de dados das forças de usinagem, utilizando um dinamômetro de três coordenadas, para monitorar as forças de corte, avanço e profundidade. Para isso, corpos de prova cilíndricos de alumina de 99,8% de pureza foram conformados em prensa isostática a 200 MPa, sendo torneados com diferentes parâmetros de corte por três tipos de ferramenta de cermet sob condições constantes de usinagem. Foram confrontados com os esforços variáveis como acabamento e rugosidade superficial, raio de ponta e desgaste da ferramenta de corte e a temperatura durante a usinagem, registrada através de um microtermopar inserido próximo da ponta da ferramenta de corte. Os resultados mostraram forte influência do desgaste da ferramenta de corte no incremento dos esforços e no acabamento superficial, como também, o raio de ponta da ferramenta teve influência no acabamento superficial e na vida útil da ferramenta. Foi verificado que a profundidade de corte não teve efeito considerável sobre a qualidade da superfície, sendo a velocidade de corte e de avanço as variáveis que apresentaram maior efeito no acabamento. A força de avanço apresentou maiores incrementos de esforços e a força de profundidade os menores incrementos durante a usinagem. A temperatura registrada não influenciou no processo, tendo variações máximas de 36% em relação à temperatura ambiente, já o acabamento superficial da peça verde teve influência direta na peça sinterizada, sendo benéfico a usinagem do compacto verde para melhoria do acabamento após a sinterização.

PALAVRAS - CHAVE: Cerâmica avançada, Usinagem de cerâmica a verde, Força de corte.

ABSTRACT

The machining of green ceramic has been investigated as a method for manufacturing of complex shapes. Such method provides a possible alternative for manufacturing of ceramic of complex geometry with dimensions close to the final, due to low mechanical strength, presenting advantages in terms of cost-benefit and improved surface finishing compared to machining performed only after the sintering. In this work, the forces of machining of green ceramic workpiece and analyzed its correlation with the cutting parameters and surface finishing were measured. The correlation between the cutting power and removal rate are important parameters in order to define the project in ceramic products, in which inadequate parameters can produce excessive damage to the work piece surface. The present paper aimed the elaboration and conception of data acquisition system of the machining forces, using a dynamometer three coordinates for monitoring the cutting forces, feed and depth. For this purpose, cylindrical specimens of alumina 99.8% purity were conformed into isostatic press at 200 MPa, being turned with different cutting parameters by three types of cermet tool under machining constant conditions. Efforts were confronted with variables such as finishing and surface roughness, tip radius and wear of the cutting tool and the temperature during the machining, registered through a microtermopar inserted next to the tip of the cutting tool. The results showed a strong influence of the wear of the cutting tool in increased efforts and surface finish, as well as the radius of the tool tip had influence on surface finishing and in the tool life. It was verified that the depth of cut had no significant effect on the surface quality, being the cutting speed and feed the variables that had greater effect on the finishing. The feed force showed major increase efforts and the force of depth minor increments during the machining. The recorded temperature did not influence the process, with maximum variations of 36% compared to the room temperature, and the surface finishing of the green workpiece had a direct influence on the sintered workpiece, being beneficial the machining of the green compact to improve the finishing after the sintering.

KEYWORDS: Advanced ceramic, Green ceramic machining, Cutting forces.

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 - Concentração química dos materiais contidos na alumina utilizada	46
Tabela 4.1 - Condições testadas indicando cada parâmetro utilizado.	69
Tabela 4.2 - Rugosidade mensurada dos compactos a verde variando a profundidade de corte.	77
Tabela 4.3 - Condições utilizadas mantendo a profundidade de corte fixa e variando velocidade de avanço e rotação.	92

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Projeção de desenvolvimento no crescimento de investimentos no mercado dos EUA de cerâmicas avançadas até 2015 (RÖDEL et al., 2009).	20
Figura 2.2 - Processo corrente de produção de peças cerâmicas (SCHELER, 1994 - modificado).....	22
Figura 2.3 - Esquema do processo <i>Spray-Dryer</i> , sendo: a) rotativo e b) bico (RICHERSON, 1992 - modificado por MARGARIDO, 2011).	24
Figura 2.4 - Prensagem uniaxial por (a) simples ação e (b) dupla ação (ALBARO, 2000 - modificado).....	26
Figura 2.5 - Distribuição da densidade aparente em peças obtidas por prensagem uniaxial: a) simples ação e b) dupla ação (ALBARO, 2001 - modificado).....	27
Figura 2.6 - Variação da densidade em peças em função da conformação, sendo: a) prensagem isostática e b) prensagem uniaxial (RICHERSON, 1992 - modificado).	28
Figura 2.7 - Prensagem isostática: a) técnica do molde úmido e b) técnica do molde seco (REED, 1995 - modificado).....	29
Figura 2.8 - Densidade relativa à verde das amostras após a compactação (DAGUANO et al.,2009).....	29
Figura 2.9 - Teoria dos mecanismos de compactação (ALBARO, 2000).	30
Figura 2.10 - Processo de sinterização: a) partículas empacotadas, b) início da união dos grãos, c) coalescimento das partículas e d) redução da porosidade e formação do contorno de grão (MUTSUDDY e FORD, 1995).	32
Figura 2.11 - Mecanismos de sinterização (MAZALI, 2006).	33
Figura 2.12 - Densidade relativa em função da pressão de compactação e da temperatura de sinterização (DAGUANO et al.,2009).	34
Figura 2.13 - Micrografia das amostras de alumina prensadas isostaticamente a 300 MPa, sendo a) 1450 °C e b) 1550°C (DAGUANO et al.,2009).	34
Figura 2.14 - Influência da velocidade de corte no torneamento de cerâmica a verde (XU e JAHANMIR, 1996).	39
Figura 2.15 - Influência do avanço no torneamento de cerâmica a verde (XU e JAHANMIR, 1996).....	39
Figura 2. 16 - Análise da rugosidade e força resultante (F) obtida por diferentes parâmetros de corte (MAIER e MICHAELI, 1997).	40

Figura 2.17 - Retração média linear em cinco posições em amostras sinterizadas depois usinadas em valores diferentes de remoção.	41
Figura 2.18 - Força de corte em diferentes valores de remoção de material.	42
Figura 3.1 - Fluxograma do processo.....	44
Figura 3.2 - MEV da alumina produzida pelo método de “ <i>spray dryer</i> ” em diferentes escalas.	45
Figura 3.3 - Conjunto formador por: a) molde, b) punção inferior e c) punção superior.	47
Figura 3.4 - Prensa manual e pressão utilizada para prensagem uniaxial (LTC-EESC-USP).	47
Figura 3.5 - Compacto inserido no elastômero e bomba de vácuo utilizada (LTC-EESC-USP).	48
Figura 3.6 - Câmara e pressão utilizada para prensagem isostática (LTC-EESC-USP).....	49
Figura 3.7 - Aspecto visual do compacto após a etapa de prensagem com aumento de 100x.	49
Figura 3.8 - Dureza dos materiais (HV) em função da temperatura (KYOCERA, 2014).	51
Figura 3.9 - Raio de ponta dos insertos utilizados.	52
Figura 3.10 - Conjunto formado pela base e corpo de prova.	53
Figura 3.11 - Proteção elaborada em torno do cabeçote e na guia da máquina.	53
Figura 3.12 - Sistema de controle de dados.	54
Figura 3.13 - Direção das componentes da força de usinagem no torneamento.....	55
Figura 3.14 - Adaptador (calço) e conjunto fixado na guia da máquina formado pelo calço e dinamômetro.	56
Figura 3.15 - Ferramenta de corte: a) sem microtermopar e b) com microtermopar.....	56
Figura 3.16 - Interface de aquisição de dados em <i>LabView</i> ®.....	57
Figura 3.17 - Superfície do compacto verde mensurada em 3D.	58
Figura 3.18 - Profile do programa LeicaSCAN DCM3D atuando como sistema de mensuração da rugosidade dos compactos.....	59
Figura 3.19 - Rampa de aquecimento e temperatura do processo de sinterização.....	59
Figura 3.20 - Máquina e equipamentos para o ensaio.....	61
Figura 3.21 - Montagem esquemática do banco de ensaio.	62
Figura 4.1 - Fluxograma de seleção de parâmetros de corte (rotação e vel. de avanço).	63
Figura 4.2 - Aspecto visual da condição de usinagem (r-ponta 0,2 mm) variando (n) e mantendo fixos velocidade de avanço (f) = 45,0 mm/min e ap= 0,5 mm.....	64
Figura 4.3 - Danos devidos aos parâmetros inadequados de usinagem.	65
Figura 4.4 - Aspecto visual da condição de usinagem (r-ponta 0,2 mm) variando (f) e mantendo fixos (ap) = 0,25mm e (n) = 1000 RPM.....	66

Figura 4.5 - Aspecto visual da condição de usinagem (r-ponta 0,1 mm) variando (f) e mantendo fixos (a) = 0,25mm e (n) = 710 RPM.	67
Figura 4.6 - Aspecto visual da condição de usinagem (r-ponta 0,05 mm) variando (f) e mantendo fixos (ap) = 0,25mm e (n) = 710 RPM.	68
Figura 4.7 - Desgaste da ponta da ferramenta (r-ponta 0,2 mm) obtido após três passes com profundidade de corte de 0,25 mm.	70
Figura 4.8 - Desgaste da ponta da ferramenta (r-ponta 0,1 mm) obtido após quatro passes com profundidade de corte de 0,25 mm.	70
Figura 4.9 - Desgaste da ponta da ferramenta (r-ponta 0,05 mm) obtido após quatro passes com profundidade de corte de 0,25 mm.	71
Figura 4.10 - Aspecto visual da condição de usinagem utilizando três tipos de inserto e mantendo fixos os valores: (f) = 22,4mm/min, (n) = 710 RPM, variando o (ap) de 0,5 e 1,0 mm.	72
Figura 4.11 - Fluxograma.	73
Figura 4.12 - Aspecto visual dos compactos utilizando três profundidades de corte diferentes mantendo a rotação e velocidade de avanço fixo.	74
Figura 4.13 - Aspecto visual da borda (superior e inferior) do compacto em cada condição após os passes executados, variando a profundidade de corte, sendo: a) = 0,25 mm, b) = 0,50 mm e c) = 1,0 mm.	76
Figura 4.14 - Aspecto visual da superfície do compacto em cada condição após os passes executados, variando a profundidade de corte, sendo: a) = 0,25 mm, b) = 0,50 mm e c) = 1,0 mm.	77
Figura 4.15 - Média dos esforços mensurados em cada condição utilizando r-ponta 0,05 mm e variando a profundidade de corte.	78
Figura 4.16 - Desgaste de flanco VB max da ferramenta de corte em função dos números de passes executados, utilizando três profundidades de corte diferentes.	79
Figura 4.17 - Desgaste gerado na ferramenta após os passes executados.	80
Figura 4.18 - Cavaco produzido durante a usinagem.	81
Figura 4.19 - Temperaturas mensuradas em cada condição.	81
Figura 4.20 - Fluxograma.	82
Figura 4.21 - Comparação dos esforços mensurados utilizando os mesmos parâmetros (n = 710 RPM, f = 22,4 mm/min e ap = 1,0 mm).	83
Figura 4.22 - Esforços mensurados em cada condição variando o raio de ponta da ferramenta (0,2 - 0,1 - 0,05 mm).	84

Figura 4.23 - Esforços mensurados em cada condição por variável (F_x - F_y - F_z).	84
Figura 4.24 - Força resultante obtida em cada condição variando o raio de ponta da ferramenta de corte.	85
Figura 4.25 - Desgaste de flanco $V_{B \text{ max}}$ da ferramenta de corte em função dos números de passes executados, variado três raios de pontas (0,05 - 0,1 - 0,2 mm).	86
Figura 4.26 - Acabamento superficial e rugosidade mensurada em cada condição, sendo: a) r - ponta 0,05 mm, b) r- ponta 0,1 mm e c) r - ponta 0,2 mm.	87
Figura 4.27 - Superfícies do compacto em 3D mantendo os mesmo parâmetros de corte alterando somente o raio de ponta, sendo: a) 0,05 mm - b) 0,1 mm - c) 0,2 mm.	88
Figura 4.28 - Ilustração esquemática do estado de tensão com efeito do raio de ponta (NEO et al., 2012).	89
Figura 4.29 - Acabamento superficial e rugosidade mensurada em cada condição após a sinterização, sendo: a) r - ponta 0,05 mm, b) r- ponta 0,1 mm e c) r - ponta 0,2 mm.	89
Figura 4.30 - Temperatura mensurada em função dos números de passes executados em cada condição, variado três raios de pontas (0,05 - 0,1 - 0,2 mm).	90
Figura 4.31 - Fluxograma.	91
Figura 4.32 - Esforços mensurados em cada condição variando os parâmetros de corte e mantendo fixa a ferramenta de raio de ponta 0,1 mm.	93
Figura 4.33 - Esforços mensurados nas condições (A- B - C- D - E) separados por variável.	93
Figura 4.34 - Força resultante obtida em cinco condições de usinagem diferentes.	94
Figura 4.35 - Trinca introduzida durante a usinagem com parâmetros inadequados.	95
Figura 4.36 - Desgaste de flanco máximo obtido em dois passes com cinco parâmetros diferentes.	96
Figura 4.37 - Fluxograma.	97
Figura 4.38 - Desgaste de flanco máximo obtido variando o raio de ponta da ferramenta (0,05 - 0,1 - 0,2 mm) mantendo os mesmo parâmetros.	98
Figura 4.39 - Desgaste gerado no flanco e na ponta do inserto após os passes executados mantendo os mesmo parâmetros.	99
Figura 4.40 - MEV da ponta da ferramenta após a usinagem com ampliação de 100x e 200x, sendo: a) r - ponta 0,05mm, b) r - ponta 0,1mm e c) r - ponta 0,2mm.	100
Figura 4.41 - Fluxograma.	101
Figura 4.42 - Acabamento superficial a verde obtido após a usinagem executados por passes distintos ($a_p = 1,0$ mm), sendo: a) sem usinar, b) 1 passe, c) 2 passes e d) 3 passes.	102
Figura 4.43 - Rugosidade R_a e R_q mensurada em cada condição.	103

Figura 4.44 - Acabamento superficial após a sinterização obtido por passes distintos ($a_p = 1,0$ mm) executados no estado verde, sendo: a) sem usinar, b) 1 passe, c) 2 passes e d) 3 passes.

..... 104

Figura 4.45 - MEV do Acabamento superficial após a sinterização obtido por passes distintos ($a_p = 1,0$ mm) executados no estado verde, sendo: a) sem usinar, b) 1 passe, c) 2 passes e d) 3 passes.

..... 105

SÍMBOLOS

Al_2O_3	Óxido de alumínio
ap	Profundidade de corte (mm)
B_2O_3	Óxido de boro
CaO	Óxido de cálcio
F	Força resultante (N)
f	Velocidade de avanço (mm/min)
Fc	Força de corte (N)
Ff	Força de avanço (N)
Fp	Força de profundidade (N)
Fe_2O_3	Óxido de ferro
FX	Força na direção do eixo x (N)
FY	Força na direção do eixo y (N)
FZ	Força na direção do eixo z (N)
MgO	Óxido de magnésio
n	Rotação (RPM)
Na_2O	Óxido de sódio
Ra	Rugosidade média aritmética (μm)
Rq	Rugosidade média quadrática (μm)
SiO_2	Óxido de silício
T1	Temperatura da ferramenta de corte ($^{\circ}\text{C}$)
T2	Temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$)
Ti	Titânio
V_{Bmax}	Desgaste de flanco máximo (mm)
Vc	Velocidade de corte (m/min)
ZrO_2	Óxido de zircônio
ρ	Densidade (g/cm^3)
\emptyset	Diâmetro (mm)

ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
EUA	Estados Unidos
EDM	Usinagem por descarga elétrica
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
FEB	Faculdade de Engenharia de Bauru
FX	Força na direção do eixo X do dinamômetro
FY	Força na direção do eixo Y do dinamômetro
FZ	Força na direção do eixo Z do dinamômetro
HV	Dureza Vickers
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LTC	Laboratório de Tribologia e Compósitos
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
PVAL	Álcool polivinílico
RMS	<i>Root Mean Square</i>
USP	Universidade de São Paulo
USM	Usinagem por Ultra-som

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
1.1 Objetivos	18
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 Materiais Cerâmicos	19
2.1.1 Propriedades e Aplicações das Cerâmicas Avançadas.....	20
2.2 Etapas de Fabricação da Peça Cerâmica	21
2.2.1 Aditivos	22
2.2.2 Secagem	24
2.2.3 Processos de Conformação	25
2.2.4 Sinterização.....	31
2.3 Usinagem de Cerâmica	35
2.3.1 Usinagem Pós-Sinterização	35
2.3.2 Usinagem de Cerâmica a Verde	37
3. MATERIAIS E MÉTODOS	43
3.1 Corpo de Prova	44
3.1.1 Formulação Cerâmica	44
3.2 Conformação dos Corpos de Prova	46
3.2.1 Prensagem Uniaxial	46
3.2.2 Prensagem Isostática	48
3.3 Operação de Usinagem	50
3.3.1 Parâmetros de Usinagem	50
3.3.2 Ferramenta de Corte	51
3.4 Preparação para o Banco de Ensaio de Usinagem	52
3.5 Sistemas de Monitoramento das Condições de Corte e Aquisição de Dados	54
3.6 Métodos de Análise da Ferramenta de Corte e dos Corpos de Prova.....	57

3.7 Processo de Sinterização	59
3.8 Resumo dos Equipamentos e Programas Utilizados no Trabalho	60
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	63
4.1 Seleção da Rotação e Velocidade de Avanço e Análise Preliminar dos Insetos	63
4.2 Seleção e Análise da Profundidade de Corte	73
4.3 Análise da Influência do Raio de Ponta da Ferramenta de Corte.....	82
4.4 Análise da influência da Rotação e Velocidade de Avanço nos Esforços.....	91
4.5 Análise do Desgaste e Avarias dos Insetos Utilizados	97
4.6 Análise da Superfície Usinada com Diferentes Valores de Remoção de Material.....	101
5. CONCLUSÕES	107
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	109
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	111

1. INTRODUÇÃO

A ciência e a tecnologia estão avançando em um ritmo cada vez mais acelerado e as maneiras pelas quais as interagem com a economia, a sociedade e o meio ambiente estão se tornando cada vez mais complexas (RÖDEL et al., 2009). Na medida em que a tecnologia se torna mais sofisticada, os materiais utilizados devem ser consequentemente mais sofisticados (NGOI e SREEJITH, 2000).

Houve um aumento do interesse nos últimos anos na utilização de materiais cerâmicos avançados, devido as suas propriedades físicas e mecânicas únicas. Uma das cerâmicas mais estudadas e tradicionalmente utilizadas como cerâmica estrutural é a alumina (óxido de alumínio - Al_2O_3), devido a sua elevada dureza, alta resistência ao desgaste, estabilidade química, baixa densidade, alta temperatura de fusão, alta resistividade elétrica e baixo custo, e oferta abundante. (WEFERS e MISRA, 1987; KUMAR et al., 2004).

Apesar das cerâmicas avançadas a base de alumina ou zircônia apresentarem várias propriedades positivas, estes materiais também apresentam características negativas que limitam a sua aplicação, especialmente a baixa tenacidade à fratura, responsável pela baixa resistência ao impacto e desprezível deformação plástica (MIYAHARA, SHIGEGAKI e SASA, 2003; ARGAWAL e RAO, 2008).

A usinagem, de cerâmica sinterizadas, por retificação com rebolo de diamante é o principal processo utilizado para obter as tolerâncias desejadas e de acabamento superficial, mas este processo faz com que eleve o custo de usinagem da peça (BESSHI, SATO e TSUTSUI, 1999). No entanto, existem muitos problemas a serem resolvidos, tais como reprodutibilidade, fiabilidade e de fabricação, especialmente de formas complexas (SATO et al., 1998). A forma complexa de componentes cerâmicos requer um processamento caro, com custos elevados para a produção se for realizada no estado sinterizado (WESTERHEIDE et al., 1996).

Devido a tais problemas, na tentativa de reduzir custos devido às exigências econômicas, uma alternativa é optar pela usinagem da cerâmica no seu estado verde, sendo este processo favorável para alcançar uma forma complexa nos estágios iniciais de processamento da cerâmica, como também, reduzir as distorções geradas após a sinterização. Na usinagem de cerâmica verde, os processos convencionais de usinagem são possíveis devido à baixa resistência mecânica apresentada neste estado do material, permitindo o uso de ferramentas de geometria definida e proporcionando altas taxas de remoção de material em

comparação com a retificação de corpos cerâmicos sinterizados (WESTERHEIDE et al., 1996; MAIER e MICHAELI, 1997; JANSSEN et al., 2008). Em produção de lotes pequenos ou quando há uma diversa variedade de partes, a usinagem a verde proporciona uma vantagem considerável em termos de qualidade, eficiência, economia e flexibilidade (KLOCKE, GERENT e SCHIPPERS, 1997).

A fim de otimizar o comportamento do compacto verde durante a usinagem, a caracterização da usinabilidade dos compactos verdes é de grande importância (SHEPPARD, 1999). Vários estudos consideram a usinabilidade da cerâmica verde a partir da influência dos parâmetros de usinagem, como velocidade de corte e de avanço, profundidade de corte, força de corte (KLOCKE, GERENT e SCHIPPERS, 1997), rugosidade da superfície e a resistência do compacto verde (MAIER e MICHAELI, 1997). O desgaste da ferramenta também pode ser um fator como indicador de usinabilidade (JANASOVITS et al., 1999; KONIG E WAGEMANN, 1993).

Para adequar uma aplicação, é necessário ter conhecimento da correlação entre as propriedades e microestruturas, sendo que a microestrutura depende da rota de processamento. Os métodos de processamento são fatores fundamentais para o desenvolvimento do mercado de cerâmica (FANTOZZI et al., 2001). O processo para obter as dimensões da peça cerâmica a verde, próximas das medidas finais, depois de sinterizada, é conhecido por “*near-net-shape*”.

1.1 Objetivos

O objetivo deste trabalho foi verificar a influência das forças de corte e dos parâmetros de usinagem na superfície do corpo cerâmico a verde de alumina, analisando o acabamento superficial. Para isso, os compactos obtidos pela prensagem isostática foram submetidos à operação de torneamento, com o monitoramento dos esforços através de um dinamômetro de três coordenadas, e simultaneamente, foi monitorada a temperatura próxima da ponta da ferramenta de corte e do ambiente de trabalho, através de termopares. Foram utilizados três tipos ferramentas de corte, ambas de cermet com as mesmas propriedades, alterando somente o raio de ponta, visando relacionar sua influência nos esforços e no acabamento superficial, e ao mesmo tempo, o desgaste da ferramenta foi mensurado e analisado.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são abordados conceitos sobre os materiais cerâmicos, propriedades, etapas de fabricação, processos de usinagem, problemas relacionados à remoção de material, e o desenvolvimento destes materiais no mercado.

2.1 Materiais Cerâmicos

Os materiais cerâmicos são materiais inorgânicos e não-metálicos, obtidos geralmente através de tratamentos térmicos em altas temperaturas, ou seja, a sinterização a partir de matérias-primas na forma de pó. O termo “cerâmica” vem da palavra grega *keramikos*, que significa “matéria queimada” (CALLISTER, 2008; VAN VLACK, 2000).

O assunto cerâmica abrange uma vasta gama de materiais, podendo ser divididos em duas categorias, sendo as cerâmicas tradicionais e cerâmicas avançadas. As tradicionais são produtos à base de argila que são materiais extraídos e processados diretamente de fontes naturais, já as cerâmicas avançadas, são desenvolvidas a partir de matérias-primas sintéticas de alta pureza, por meio de processos finos e de rigoroso controle. As cerâmicas tradicionais ainda representam uma parte importante da indústria de cerâmica, mas o interesse nos últimos anos tem se concentrado em cerâmicas avançadas, que com poucas exceções, têm sido desenvolvidos nos últimos 50 anos (RAHAMAN, 2003).

Alguns dos primeiros artefatos das civilizações antigas testemunham a utilização de materiais cerâmicos pelo homem ao longo da história. A cerâmica permaneceu como uma arte, muitas vezes com segredos bem guardados para a maior parte da história registrada. Somente no século passado tornou-se ciência, com pressões cada vez mais exigentes para o desenvolvimento de aplicações de alta tecnologia (CONSTANT, 2005).

A fim de mostrar uma ideia sobre o desenvolvimento dos materiais cerâmicos, a figura 2.1 exibe uma perspectiva de crescimento para o setor cerâmico nos EUA. Enquanto os outros setores apresentam pouca variação em crescimento de investimentos, o setor de crescimento da demanda de materiais cerâmicos avançados apresenta uma projeção de crescimento superior em relação às outras. Trata-se de um trabalho de (RÖDEL et al., 2009), que prioriza como objetivo principal mapear e identificar os principais mercados e setores de maior

investimento e avanço tecnológico associado ao campo de cerâmicas avançadas.

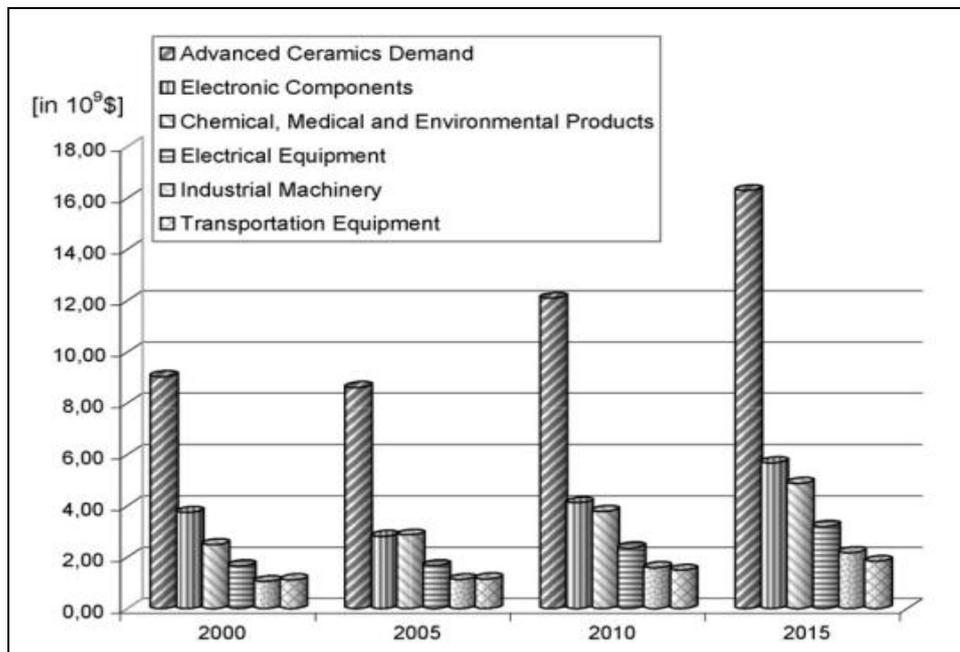


Figura 2.1 - Projeção de desenvolvimento no crescimento de investimentos no mercado dos EUA de cerâmicas avançadas até 2015 (RÖDEL et al., 2009).

O aumento da possibilidade cada vez maior de ferramentas analíticas ajudará a tecnologia para investigar ainda mais a estrutura e as propriedades dos materiais cerâmicos. A ciência da cerâmica está avançando a um ritmo sem precedentes (CONSTANT, 2005). Pode-se dizer que o futuro da alumina demonstra-se brilhante. Tendo constantes melhorias nos processos produtivos, visando baixo custo e alta qualidade, pesquisas e desenvolvimento de novos produtos e aplicações tem sido a força motriz para o grande interesse na alumina (GOLDEMBERG, 1987).

2.1.1 Propriedades e Aplicações das Cerâmicas Avançadas

Dentre as vantagens das cerâmicas avançadas, encontram-se elevada dureza, resistência ao desgaste e à temperatura elevada, estabilidade química, baixa densidade, inércia a produtos químicos e boa funcionalidade. (ARGAWAL e RAO, 2008; LIU et al., 2014). Diferente dos metais, a maioria das cerâmicas técnicas não pode ser fabricada por moldes via

fundição, pois possuem alto ponto de fusão, e apresentam baixa condutividade térmica (DHARA e SU, 2005).

Estes materiais podem ser subdivididos em seis grupos, sendo: cerâmicas eletrônicas, ópticas, magnéticas, biológicas, nucleares e estruturais. As cerâmicas estruturais têm aplicações na engenharia mecânica, química e de materiais, apresentam propriedades importantes, tais como: elevada resistência em altas temperaturas, elevada resistência a choques térmicos, elevada resistência à fluência em altas temperaturas, elevada resistência à oxidação, elevada resistência à corrosão e elevada resistência à abrasão. (MUNZ e FETT, 1999; MIYAHARA, SHIGEGAKI e SASA, 2003).

Devido as suas propriedades, encontram-se aplicações na indústria eletrônica e automotiva em isoladores elétricos, isolantes térmicos em termopares e câmaras de combustão, trocadores de calor para agentes corrosivos na indústria química, próteses e peças para implantes ósseos e dentários na medicina, devido à compatibilidade com o organismo humano, rolamentos de precisão para uso na indústria nuclear e para fabricação de ferramentas de corte e componentes de usinagem. (REZENDE, 1997; ARGAWAL e RAO, 2008).

A utilização de materiais cerâmicos como alumina e zircônia abrange praticamente todos os setores industriais e estão se tornando cada vez mais importantes (FANTOZZI et al., 2001). No entanto, independentemente das suas excelentes propriedades estruturais, a cerâmica ainda não é amplamente utilizada na indústria, devido aos altos preços de peças cerâmicas, e a falta de conhecimento de cerâmica na engenharia (JANSSEN, SCHEPPOKAT e CLAUSSEN, 2008), características negativas que limitam sua aplicação, especialmente pela baixa tenacidade à fratura, e também, problemas relacionados como processos de fabricação e reprodutibilidade (ARGAWAL e RAO, 2008). Para conseguir usufruir das características tecnologicamente importantes de tal material, torna-se necessário o processamento mais adequado possível (FANTOZZI et al., 2001).

2.2 Etapas de Fabricação da Peça Cerâmica

Para produzir uma peça cerâmica existe uma sequência que esta ilustrada pela figura 2.2, as etapas do processo de produção. Os pós que as constituem são moídos e misturados, sucessivamente são adicionados aditivos para melhorar o processo. Esses são prensados em

moldes metálicos ou flexíveis para dar forma às peças compactadas, em que estão no seu estado verde, ou seja, não sinterizadas, posteriormente são levadas ao aquecimento para a sinterização, para assim, atingir a dureza e a densidade final desejada do compacto (SCHELER, 1994).

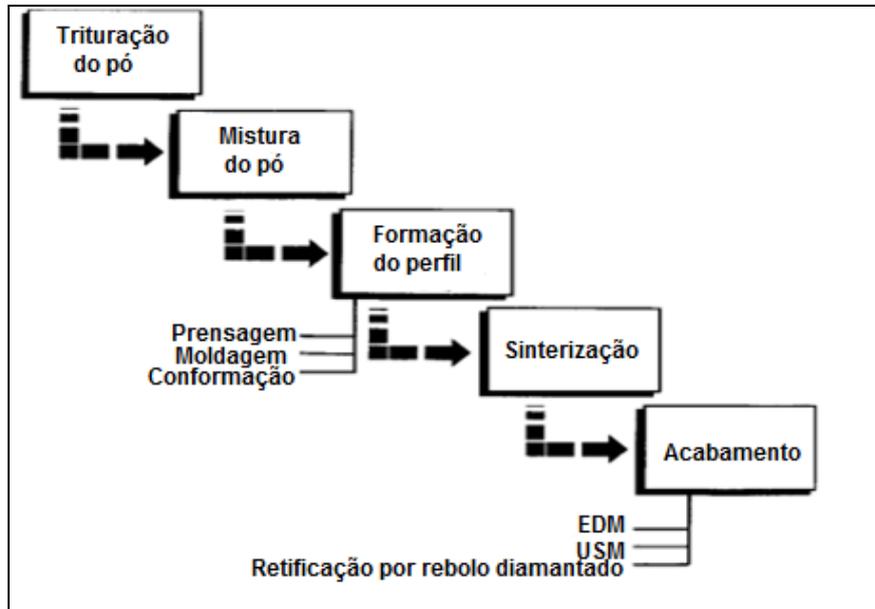


Figura 2.2 - Processo corrente de produção de peças cerâmicas (SCHELER, 1994 - modificado).

Tanto a seleção e dosagem das matérias-primas a serem empregadas como as condições de operação envolvidas em todas as etapas do processo de fabricação da cerâmica devem ser consideradas como uma sequência de etapas integradas, cada uma das etapas não pode ser tratada de maneira isolada (ALBARO, 2000).

Diversos parâmetros podem influenciar nas propriedades mecânicas das cerâmicas, tais como: tensões superficiais, defeitos e falhas, temperatura, atmosfera, taxa de deformação, geometria e tamanho do compacto (ZANOTTO e MILGIORE, 1991).

2.2.1 Aditivos

Os aditivos são materiais orgânicos ou inorgânicos adicionados às partículas para melhorar o processamento da cerâmica, como: lubrificantes, ligantes, plastificantes e

defloculantes. Os aditivos a serem utilizados, como também a proporção com que são adicionados à massa, devem ser cuidadosamente selecionados, pois influenciam no comportamento mecânico tanto dos grânulos como da peça conformada. Os aditivos mais empregados pela indústria cerâmica são descritos a seguir (ALBARO, 2000; PANDOLFELLI et al., 1981).

- Ligantes: a função de conferir ao grânulo e a peça conformada uma suficiente resistência mecânica;
- Plastificantes: aumentam a deformabilidade do ligante, como também, auxilia a deformação plástica dos grânulos;
- Lubrificante: tem como funções reduzir o atrito entre os grânulos da massa e a parede do molde durante a etapa de compactação, e também reduzir o atrito entre a peça conformada e a parede do molde durante a etapa de extração da peça;
- Defloculante: permite a dispersão e controla a carga superficial das partículas.

O ligante tem um papel importante no processamento do compacto verde, sendo que a resistência da peça de trabalho depende das características e do volume de ligante utilizado. O Ligante é o aditivo mais importante que é adicionado durante o processamento de pós cerâmicos, a fim de melhorar as propriedades mecânicas dos produtos verdes, durante e após a operação de conformação (SHEPPARD, 1999; KUMAR et al., 2013).

Um dos aditivos ligantes solúvel em meio aquoso mais utilizado e largamente usado como ligante durante a prensagem a seco do pó cerâmico é o álcool polivinílico – PVAL, provavelmente o ligante mais comum na indústria cerâmica. A excelente resistência química e as propriedades físicas têm estendido amplamente seu uso industrial. Este polímero é um excelente adesivo, sendo que sua resistência a solventes, óleos e graxas, é igualada por poucos polímeros. Apresenta ótimas propriedades como agente emulsificante devido a sua baixa tensão superficial (POTOCZEK, HENECZKOWSKI e OLEKSY, 2003; MARGARIDO, 2011; KUMAR et al., 2013).

A preparação da massa tem por objetivos: proporcionar uma mistura íntima e homogênea das matérias-primas, adequar a massa para a etapa de prensagem, uma elevada fluidez, para que a massa escoie rapidamente e preencha o molde de maneira homogênea e reprodutível, e uma elevada densidade de preenchimento (ALBARO, 2000).

2.2.2 Secagem

Para secagem de pós, um dos processos mais utilizados e eficientes usados na indústria de cerâmica é o “*Spray-Dryer*”. Esta técnica consiste em atomizar a suspensão de pó cerâmico recém-moído em uma atmosfera de ar quente e seco. Sendo que, com a atomização a área superficial do material aumenta facilitando a evaporação do líquido. O pó cerâmico deposita-se no fundo da lâmina de secagem. Podem ser adotados dois tipos de atomizador, sendo o rotativo e o de bico, ilustrados na figura 2.3 (RICHERSON, 1992; MASTERS, 1994).

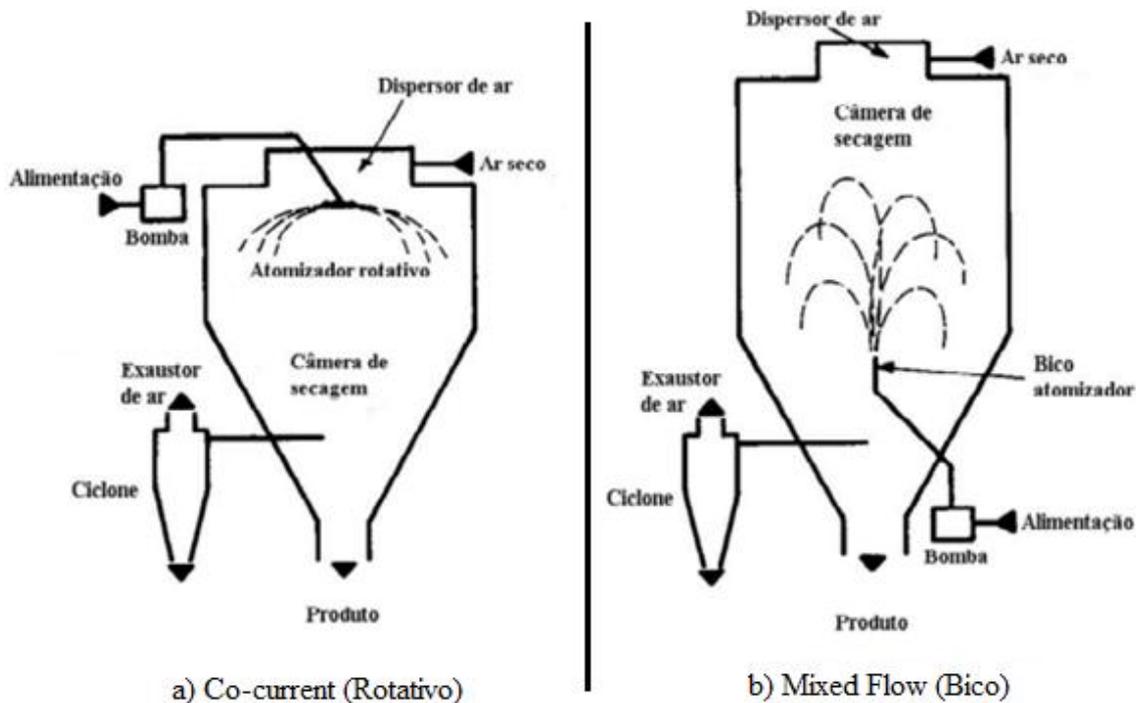


Figura 2.3 - Esquema do processo *Spray-Dryer*, sendo: a) rotativo e b) bico (RICHERSON, 1992 - modificado por MARGARIDO, 2011).

A técnica de preparação empregada na obtenção da massa (granulação ou atomização) influenciam as características da massa resultante, como também, a distribuição de tamanho de partículas, a forma e textura dos grânulos (atomização) ou aglomerados (granulação), que influenciam na etapa de prensagem e as características microestruturais da peça a verde fabricada (ALBARO, 2000).

2.2.3 Processos de Conformação

A maioria dos processos de conformação de cerâmica parte da matéria-prima na forma de pó, podendo ser utilizados diferentes métodos de compactação. O objetivo é obter um alto grau de empacotamento das partículas e de homogeneidade. Quanto maior for o grau de homogeneidade do empacotamento do pó, menor a probabilidade de distorção e de problemas microestruturais durante a sinterização (REED, 1995; RICHERSON, 1992).

Os processos de conformação visam a maior produtividade a um menor custo, e cada processo de conformação influencia de modo diferente a camada superficial da peça a ser usinada (RICHERSON, 1992). Existem diferentes processos de conformação, como: colagem, injeção em moldes, gelcasting, prensagem uniaxial (simples e dupla ação) e prensagem isostática (técnica do molde seco e molde úmido). No decorrer do texto são descritos os processos de conformação por prensagem, sendo neste trabalho os corpos de prova compactados por prensagem uniaxial de simples ação e prensagem isostática pela técnica do molde úmido.

A prensagem é a operação de compactação de um pó granulado, contido no interior de uma matriz rígida ou de um molde flexível, através da aplicação de pressão. Pode ser dividida a operação em três etapas ou fases, sendo o preenchimento da cavidade do molde, compactação da massa e extração da peça. Esse é um dos processos de conformação mais utilizado pela indústria cerâmica, devido a sua elevada produtividade, facilidade de automação, produzir formas e tamanhos variados, sem contração de secagem e boa tolerância dimensional (ALBARO, 2000). Para obter sucesso na prensagem, é necessário pó bruto com fluidez suficiente para preencher a cavidade do molde de modo uniforme (SATO, BESSHI e MATSUI, 1998).

Na prensagem uniaxial de ação simples, a pressão é aplicada através do punção superior (móvel), que é introduzido na cavidade do molde que contém o pó, sendo fixo o molde e o punção inferior, permanecendo imóveis. Após a compactação da peça, o punção superior é retirado e feito a extração do compacto do molde. Devido à fricção entre os aglomerados e a parede do molde, surgem gradientes de densidade na peça (ALBARO, 2001). A peça é obtida contendo certo grau de heterogeneidade, com distribuições de densidade variáveis ao longo do comprimento e do raio da peça (AYDIN, BRISCOE e SANLITURKB, 1997). A utilização deste método normalmente é quando se necessita obter peças de geometria simples e de espessura reduzida (ALBARO, 2001). O sistema de prensagem

mecânica simples tem uma alta taxa de produção e pode ser facilmente automatizado (REED, 1995).

A prensagem uniaxial de dupla ação é utilizada quando a espessura da peça é muito grande, tornando inviável na técnica de ação simples. O punção superior como o inferior exerce pressão sobre o pó contido no molde. Neste processo a distribuição de densidades ao longo da peça é simétrica. Na figura 2.4 é ilustrado o esquema de prensagem uniaxial por simples ação (a) e dupla ação (b), e na figura 2.5, a distribuição da densidade aparente em peças obtidas pelo tipo de prensagem utilizado.

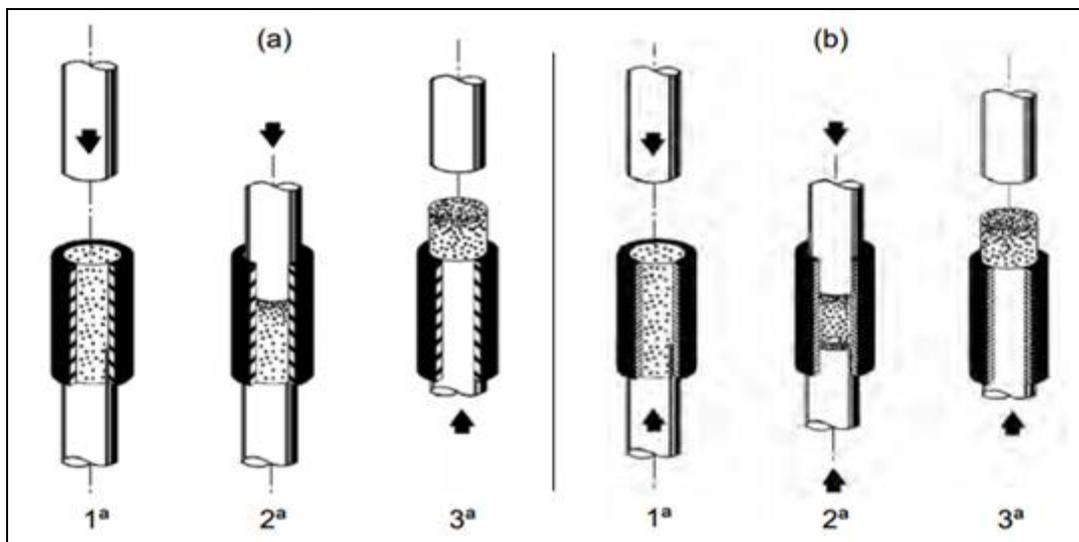


Figura 2.4 - Prensagem uniaxial por (a) simples ação e (b) dupla ação (ALBARO, 2000 - modificado).

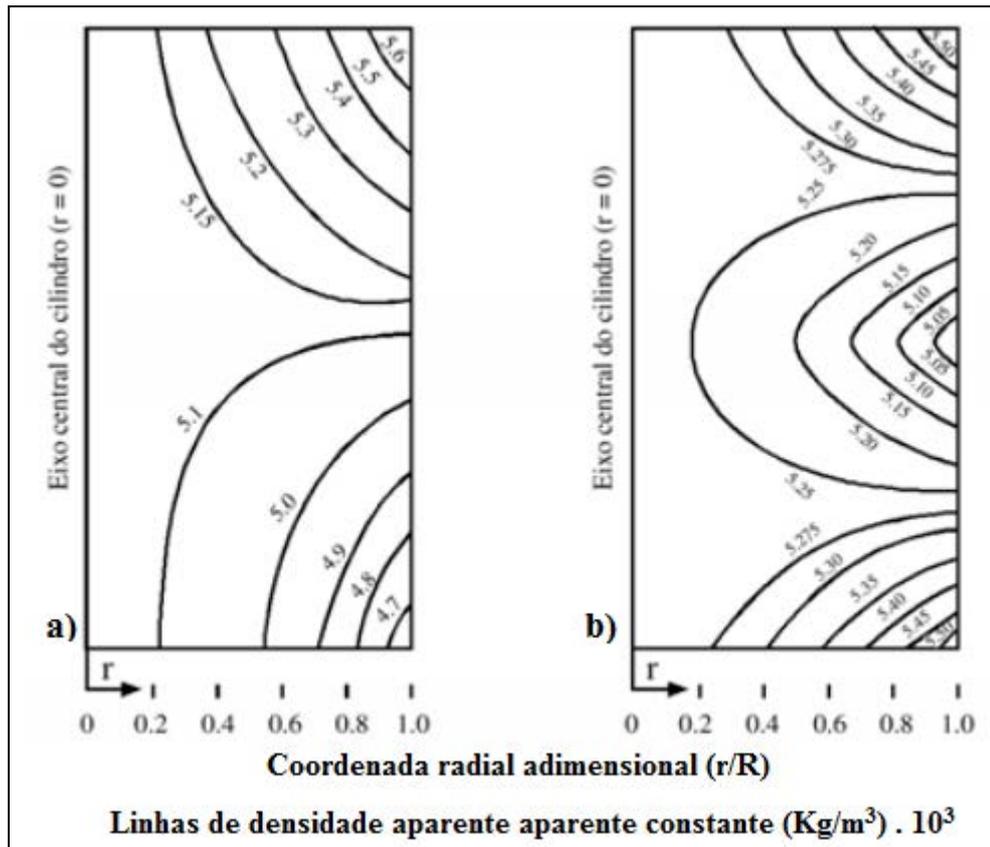


Figura 2.5 - Distribuição da densidade aparente em peças obtidas por prensagem uniaxial: a) simples ação e b) dupla ação (ALBARO, 2001 - modificado).

Na prensagem do pó pelo método uniaxial, ocorre intenso atrito entre as partículas adjacentes e com a parede do molde, resultando em um preenchimento heterogêneo do pó na cavidade do molde, assim, a peça compactada apresenta vários gradientes de densidade. A existência de gradientes de densidade distintos faz com que em cada região da peça tenha contração volumétrica de diferente intensidade na sinterização, e conseqüentemente com valores de contrações diferentes, resultando em deformação da peça sinterizada (BENCOE et al., 2008).

Já a prensagem isostática consiste na aplicação da pressão em todas as direções do compacto, conseguindo alcançar uma grande uniformidade na compactação, assegurando uma distribuição homogênea da pressão sobre a superfície, independente da geometria da peça. Na figura 2.6 é demonstrada a comparação da distribuição da densidade pela prensagem isostática e prensagem uniaxial.

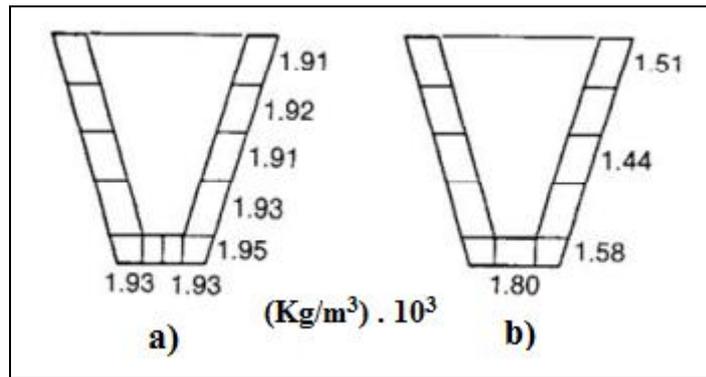


Figura 2.6 - Variação da densidade em peças em função da conformação, sendo: a) prensagem isostática e b) prensagem uniaxial (RICHERSON, 1992 - modificado).

A compactação do pó se dá dentro de um molde flexível, na qual atua um fluido pressurizado. Normalmente é utilizado na fabricação de peças de geometria complexas e em formas que apresentam relevos em duas ou mais direções, também, em peças onde uma das dimensões é maior que as demais. Podem ser empregados dois tipos de prensagem isostática: a técnica de molde úmida e de molde seco (RICHERSON, 1992; ALBARO, 2000).

- Molde úmido (*Wet Bag*): a massa é colocada dentro de um molde flexível e impermeável ao fluido pressurizado. Após fechado, o molde é submerso no líquido (geralmente água com adição de óleo solúvel) contido na câmara de pressão, na qual o líquido é pressurizado deformando o molde flexível e transmitindo de modo uniforme a pressão na massa. Após completo o ciclo de compactação, à medida que é reduzida a pressão do líquido ocorre uma expansão tanto do molde como da peça, o que facilita a remoção;
- Molde seco (*Dry Bag*): nesta técnica, o fluido pressurizado circula em canais internos, em vez de submergir o molde em um fluido. Esse método foi desenvolvido para aumentar a velocidade de produção em relação à técnica de molde úmido. A dificuldade deste método é na elaboração do molde, pois além de resistente deve ser capaz de transmitir a pressão de modo uniforme.

No método *Wet Bag* o fluido mais empregado é a água com adição de óleo solúvel, pois lubrifica e previne as partes metálicas contra a corrosão, mas qualquer fluido incompressível pode ser utilizado.

Na figura 2.7 é demonstrado o processo de compactação por prensagem isostática pela técnica do molde úmido e do molde seco.

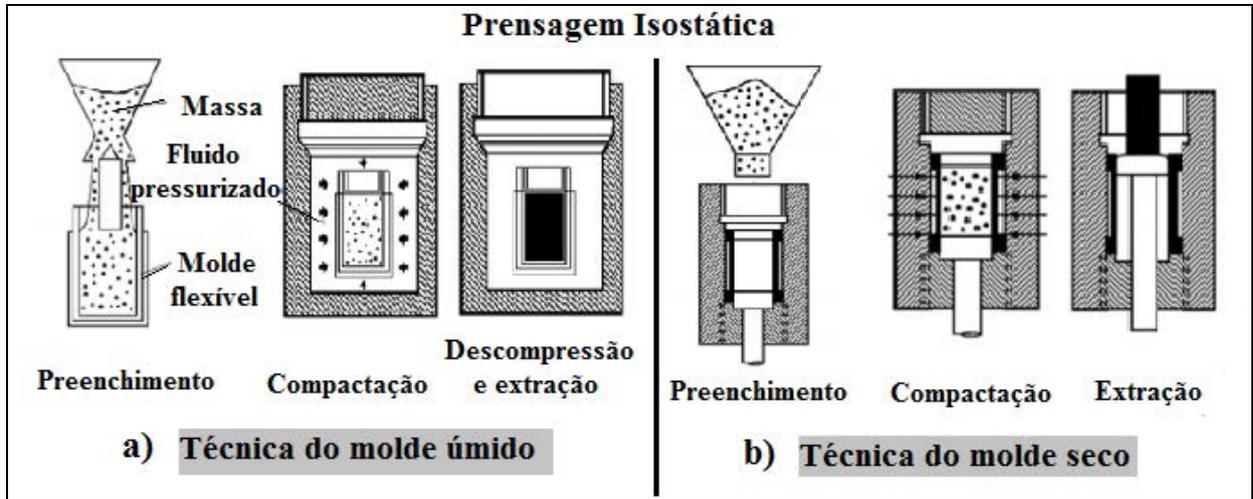


Figura 2.7 - Prensagem isostática: a) técnica do molde úmido e b) técnica do molde seco (REED, 1995 - modificado).

Para analisar a influência da pressão de compactação na densidade relativa a verde, no trabalho de DAGUANO et al. (2009), foi realizada a prensagem dos pós de alumina pelo método uniaxial de três compactos com valores diferentes de pressão: 93, 124 e 155 MPa, e um compacto por prensagem isostática sob pressão de 300MPa, ambas por 30 segundos. A figura 2.8 apresenta os resultados do efeito da pressão de compactação na densidade relativa a verde dos compactos, sendo possível verificar que quanto maior a pressão aplicada, maior a porcentagem da densidade relativa à verde.

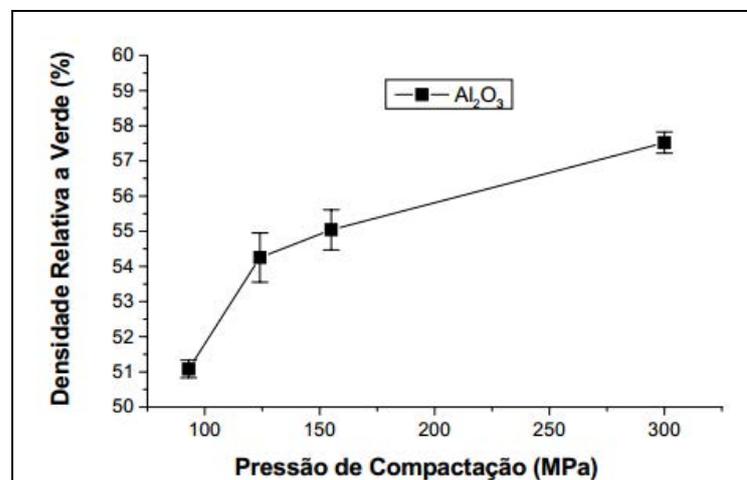


Figura 2.8 - Densidade relativa à verde das amostras após a compactação (DAGUANO et al.,2009).

A amostra prensada pelo método isostático sofreu uma maior carga na aplicação da pressão de compactação, obtendo uma densidade a verde significativamente superior em relação às amostras prensadas uniaxialmente e também melhor distribuição dos gradientes de densidade. Um fator importante que interfere na densidade a verde na prensagem uniaxial é o atrito entre as paredes da matriz de compactação.

Alguns estudos mostram que a pressão de compactação influencia na qualidade da usinagem a verde, o mecanismo de remoção de material atravessa a fase inicial de fratura intra-aglomerado para uma fase mista e posteriormente fase inter-aglomerado, onde se verifica maiores danos superficiais (KAMBOJ et al., 2003). Assim, há uma necessidade de compreender os efeitos das variáveis de conformação.

Em teoria, na compactação de um material granular a diminuição do volume dos poros e de seus tamanhos ocorre através de três mecanismos, identificada na figura 2.9.

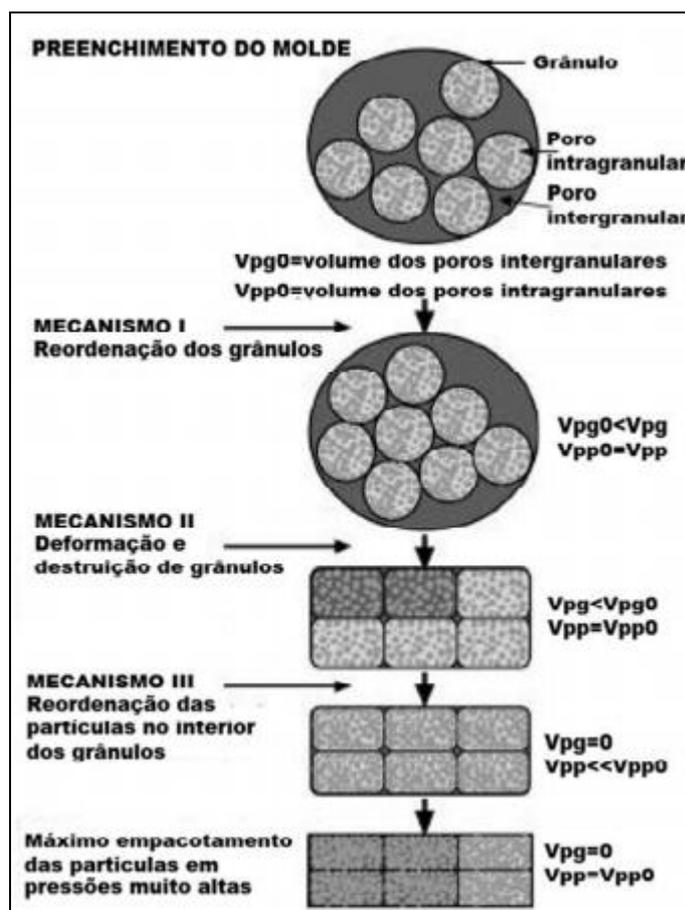


Figura 2.9 - Teoria dos mecanismos de compactação (ALBARO, 2000).

Os três mecanismos podem ser definidos como:

- Mecanismo 1: Redução do volume ocupado pelos poros intergranulares através do deslocamento e reordenação dos grânulos.
- Mecanismo 2: Redução do volume e redução do tamanho dos espaços intergranulares por deformação plástica, como também podendo ocorrer por destruição dos grânulos, dependendo das características mecânicas, como dureza, deformabilidade e resistência mecânica.
- Mecanismo 3: Consiste na diminuição de volume e tamanho dos poros intragranulares pelo deslizamento e reordenação das partículas alcançando um empacotamento mais denso.

2.2.4 Sinterização

Na operação de queima, os compactos são submetidos a temperaturas elevadas, que para a maioria dos produtos situa-se entre 800 °C a 1700 °C, normalmente em torno de 70% da sua temperatura de fusão. Podem ser realizados em fornos do tipo contínuos ou intermitentes, que operam em três fases: aquecimento até a temperatura desejada; patamar durante certo tempo na temperatura especificada e resfriamento até temperaturas inferiores a 200 °C. Este ciclo de queima compreendendo as três fases, dependendo do tipo de produto, pode variar de alguns minutos até vários dias. (RAHAMAN, 2003; NAMPI et al., 2011).

A sinterização é o processo de união entre as partículas do pó cerâmico, em outras palavras, pode ser definido como a consolidação térmica de uma peça verde, sem ligantes, através da redução da porosidade, por processos difusivos e coalescimento das partículas, o que leva a um grande aumento na resistência mecânica e redução da porosidade e do volume (RICHERSON, 1992).

A figura 2.10 ilustra os estágios de sinterização, sendo a formação de “pescoço” o estágio inicial de contato entre as partículas, como as partículas estão em contato umas com as outras e com aumento da temperatura, ocorre um coalescimento e formação de uma junção entre elas, denominada como pescoço (RICHERSON, 1992). No estágio intermediário ocorre o encolhimento e a diminuição da porosidade e no estágio final se tem a formação do contorno de grão, na qual a área de contato entre os grãos é máxima.

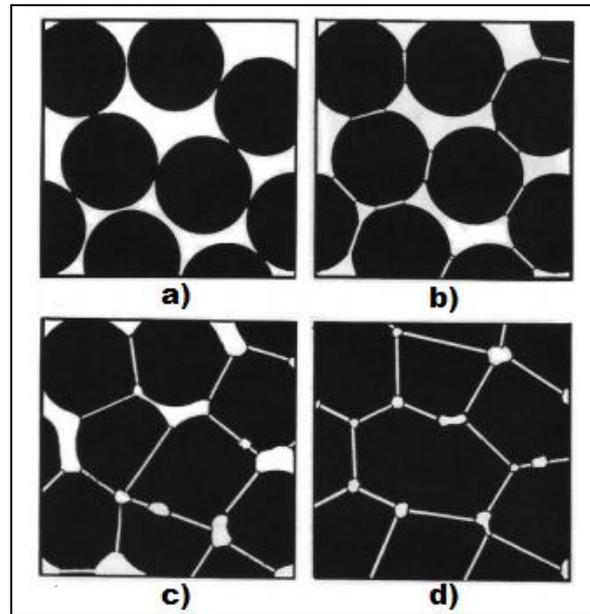


Figura 2.10 - Processo de sinterização: a) partículas empacotadas, b) início da união dos grãos, c) coalescimento das partículas e d) redução da porosidade e formação do contorno de grão (MUTSUDDY e FORD, 1995).

No processo de sinterização da cerâmica, os compactos são aquecidos a uma temperatura adequada, em que os mecanismos de transporte de massa passam a ser importantes. Sendo seis possíveis mecanismos de transporte de massa podem ocorrer durante a sinterização de duas esferas cristalinas, no entanto, somente os mecanismos 4, 4', 5 e 6 levam a densificação (figura 2.11), isto é, retração nas dimensões do monólito compactado, com conseqüente aumento da densidade (MAZALI, 2006).

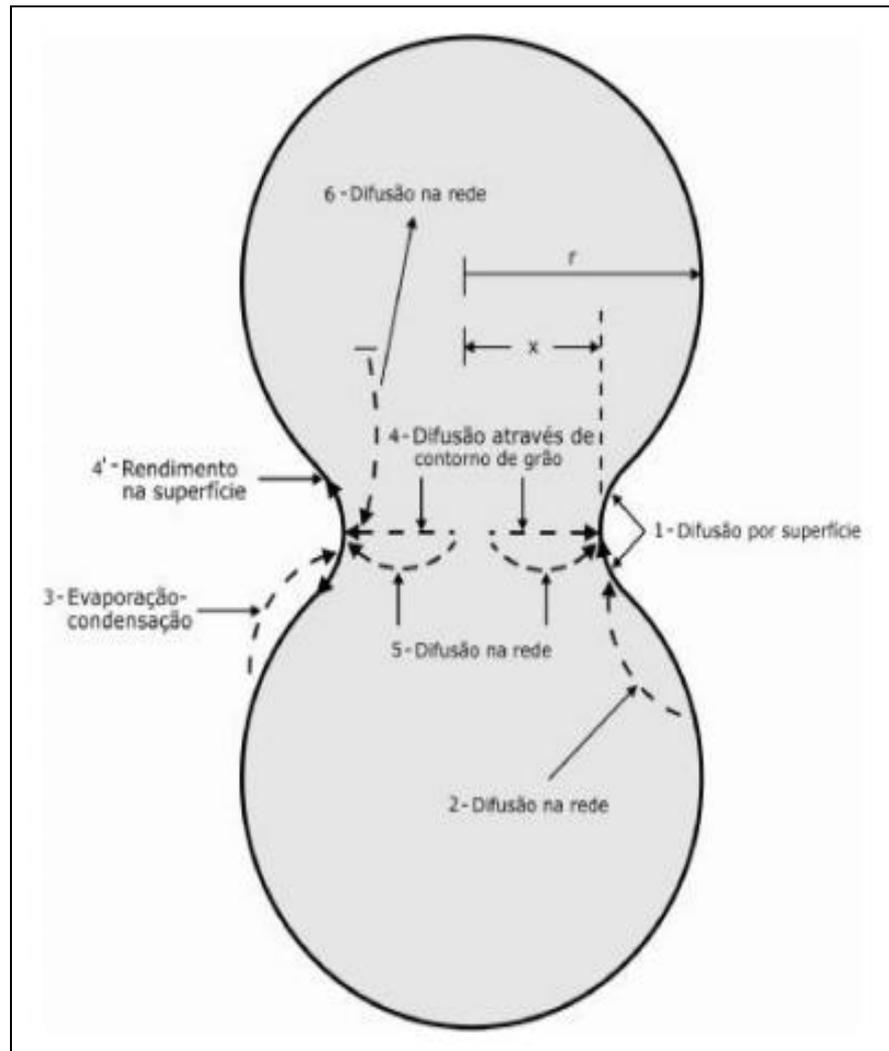


Figura 2.11 - Mecanismos de sinterização (MAZALI, 2006).

A figura 2.12, do trabalho de DAGUANO et al. (2009), é demonstrado os resultados da densidade relativa em função da temperatura de sinterização utilizada e da pressão de compactação da alumina.

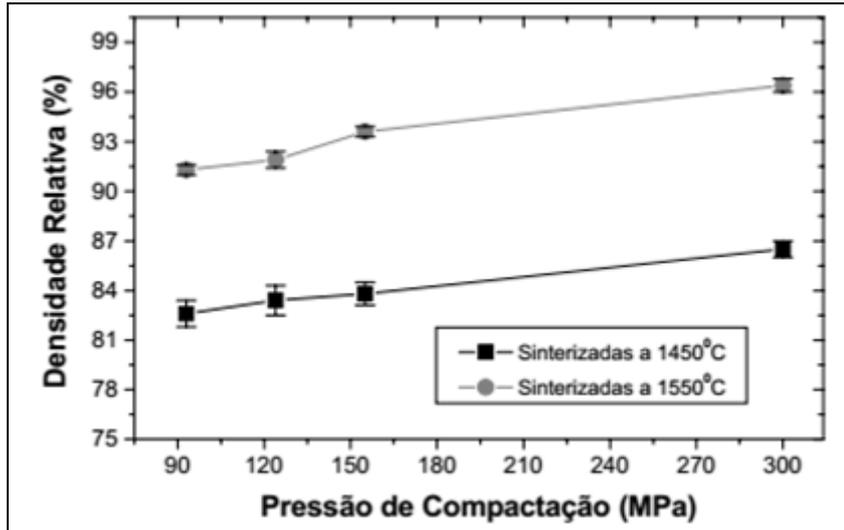


Figura 2.12 - Densidade relativa em função da pressão de compactação e da temperatura de sinterização (DAGUANO et al.,2009).

DAGUANO (2009) verificou que a amostra sinterizada com uma temperatura (1550°C) obteve uma densificação do material mais eficiente do que a amostra sinterizada a uma temperatura inferior (1450°C). Uma diferença média de aproximadamente 10% na eficiência da densificação do material para a temperatura de sinterização 1550°C, em relação a 1450°C. De acordo com a densificação do material, e notando que uma maior densificação significa menos porosidade, é possível afirmar que as propriedades mecânicas do material, diretamente ligadas à porosidade, serão melhores para a amostra sinterizada em 1550°C. A figura 2.13 apresenta as microestruturas sinterizadas em cada temperatura das amostras de alumina prensadas com 300 MPa.

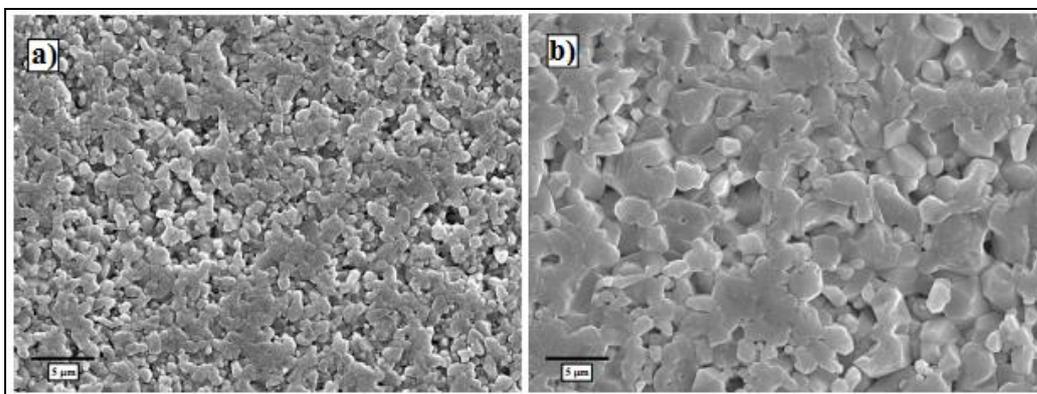


Figura 2.13 - Micrografia das amostras de alumina prensadas isostaticamente a 300 MPa, sendo a) 1450 °C e b) 1550°C (DAGUANO et al.,2009).

O controle da retração das tolerâncias dimensionais nos projetados é fundamental para cerâmica técnica. Portanto, uma das tarefas mais desafiadoras para engenharia cerâmica é determinar e corrigir o comportamento encolhimento de um compacto intrinsecamente não uniforme (LU e LANNUTTI, 2000).

2.3 Usinagem de Cerâmica

O processo de usinagem de cerâmicas avançadas é utilizado para obter a precisão dimensional e forma dos corpos cerâmicos, podendo ser realizado antes e após a sinterização.

Devido às exigências do mercado, a usinagem é utilizada para se obter uma alta qualidade nos componentes cerâmicos, em que na maioria das vezes somente é alcançada por este processo. A usinagem pode influenciar a resistência mecânica e comportamento de serviço dos componentes cerâmicos, também representa uma parte considerável dos custos de fabricação. Portanto os parâmetros de usinagem devem ser otimizados, em relação aos aspectos econômicos e também, garantir que o dano na camada superficial não excede os limites admissíveis (PFEIFFER e HOLLSTEIN, 1997).

2.3.1 Usinagem Pós-Sinterização

A usinagem direta de componentes cerâmicos sinterizados nem sempre é viável devido à sua alta dureza e baixa tenacidade à fratura, principalmente devido à alta taxa de desgaste de ferramenta levando a impedimentos na remoção de materiais. Além disso, os defeitos na superfície usinada reduzem significativamente a resistência do produto final (MOHANTY, RAMESHBABU e DHARA, 2013). Geralmente é inevitável utilizar tecnologias de acabamento de alta precisão, pois a qualidade da produção influencia diretamente o comportamento funcional das peças de cerâmica (MARINESCU, 2006).

Usinagem de cerâmica por meio de retificação com rebolo de diamante é o processo usado para alcançar as tolerâncias desejadas e integridade da superfície. Processo de retificação eficiente na cerâmica avançada exige uma seleção criteriosa dos parâmetros operacionais para maximizar a taxa de remoção, enquanto controla a integridade da

superfície. A retificação usando altas taxas de remoção de material é limitada principalmente pelos danos na peça cerâmica, por causa das trincas médias e laterais causadas durante a usinagem (ARGAWAL e RAO, 2008).

Devido à sua alta fragilidade, os componentes invariavelmente sofrem danos, como trincas superficiais durante o processo de remoção de material, resultando em perda de resistência mecânica (AYDIN et al., 1997; STRAKNA et al., 1996). Os danos causados durante a usinagem dependem do mecanismo de remoção de material, podendo ser classificados em duas categorias: modo frágil (lascamento) e modo dúctil (deformação plástica – cisalhamento), 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 (NGOI e SREEJITH, 2000). A eficiência no processo requer uma seleção criteriosa dos parâmetros operacionais, para maximizar a taxa de remoção e controlar a integridade superficial (ARGAWAL e RAO, 2008).

As máquinas-ferramentas para usinagem de cerâmica, principalmente após a sinterização, devem muitas vezes se encontrar no mais alto nível de exigências. Além dos requisitos gerais, tais como equipamento de limpeza, sistemas de fixação adequados, alta rigidez estática e dinâmica, entre outros dispositivos, devem ser integrados nas máquinas-ferramentas. Portanto, o processo de usinagem assume uma posição importante em termos de economia e precisão (MARINESCU, 2006).

Devido a elevada dureza e fragilidade que apresentam os materiais cerâmicos após a sinterização, existem poucas técnicas de usinagem convencional destes materiais. Assim, por tal motivo, a usinagem convencional da peça em verde em muitos casos é utilizada (WU e MCANANY, 1995).

Pode-se dizer que, para obter um acabamento de alto nível na usinagem após a sinterização, é necessário utilizar equipamentos específicos, como ferramenta de diamante, tornando a operação muito cara e podendo representar até 80% dos custos da produção de um componente cerâmico. Já a usinagem a verde é um processo mais rápido, podendo ser realizado com quase todas as ferramentas convencionais e com as técnicas utilizadas para os metais DESFONTAINES et al., (2004) . Assim, alguns autores visam à necessidade de se aprimorar e desenvolver novos métodos e rotas de processamento mais econômico para fabricação de componentes cerâmicos, sendo uma alternativa através da usinagem a verde.

2.3.2 Usinagem de Cerâmica a Verde

A usinagem de cerâmica verde tem sido investigada como um método para fabricação de formas complexas, onde a cerâmica “não sinterizada”, ou seja, no seu estado verde são usinadas. Tal método fornece uma alternativa possível para a rápida fabricação de cerâmica de geometria complexa com dimensões próximas as finais, tendo vantagens em termos de custo benefício e acabamento superficial, em comparação com outras tecnologias utilizadas para fabricação. Para utilização desta técnica é necessário processamento adequado para usinagem de cerâmica verde, levando em consideração o controle da retração causada durante a sinterização (SU et al., 2008).

Para obter eficiência na usinagem a verde, deve ser utilizado adequadamente o ligante, sendo este responsável pela resistência da peça, de modo que as partículas não desprendam enquanto uma ferramenta de corte está executando movimento e empurrando com alguma força contra a superfície da peça, e ao mesmo tempo permitir uma remoção rápida do material. Mas, se a resistência mecânica a verde for muito alta, problemas como a redução da vida da ferramenta, vibração, deformação e fratura catastrófica pode ocorrer. Em alguns casos um plastificante pode ser adicionado à formulação para evitar estes problemas (SHEPPARD, 1999).

Este método permite uma excelente vantagem em relação à ferramenta de corte, além de não exigir ferramentas caras, as forças de corte aplicada na ferramenta são pequenas e a geração de calor durante o processo é baixa. Também permite elevada remoção de material, exigindo menos esforços de corte que reduzem os custos das operações de acabamento final, assim, a fabricação de uma peça através da usinagem de cerâmica a verde pode ser até 1000 vezes mais rápida do que a usinagem convencional de cerâmicas sinterizadas. (DESFONTAINES et al, 2005; PERRON et al., 2005).

O sistema de remoção de material no processo de usinagem de cerâmica verde é diferente em relação aos metais, são usinadas através da fratura do material e não da deformação plástica. A aresta de corte esmaga a cerâmica que entra em contato enquanto se move. Isto forma pequenas partículas que resultam em um pó ao invés de cavacos, como na usinagem de metais (HERLINGER et al., 2006).

Em alguns casos, que há grande remoção de material, é essencial remover de forma contínua os resíduos cerâmicos a medida que são formados a partir do ponto de usinagem, a acumulação de pó cerâmico exacerba o desgaste da ferramenta e aumenta a pressão da

ferramenta, que pode levar a uma possível fratura do material da peça de trabalho. Assim, o sistema de aspirar o pó deve funcionar de forma eficiente (HERLINGER et al., 2006; SHEPPARD, 1999).

As forças de corte envolvidas durante a usinagem estão fortemente influenciadas pela resistência do material. Vários parâmetros devem ser otimizados para se obter resultados satisfatórios em termos de acabamento da superfície, conformidade geométrica e produtividade. Outras considerações, como tipos de aditivos, resistência dos grânulos e gradientes de densidade dos compactos verdes, também influenciam no resultado final do processo (PERRON et al., 2005; KONIG e WAGEMANN, 1993).

O estudo das forças de usinagem pode auxiliar o processo de planejamento na escolha de condições de corte adequadas, como também, reduzir o desgaste da ferramenta e a probabilidade de quebra da ferramenta. As forças de corte inadequadas podem afetar a qualidade final da peça (SCHROETER, BASTOS e CRICHIGNO FILHO, 2007). Assim, os parâmetros de usinagem devem ser cuidadosamente selecionados e controlados, para evitar tensões excessivas do material frágil, o que pode resultar em trincas, quebra ou acabamento superficial ruim (NG, HULL e HENSHALL, 2006).

No estudo realizado por SHEPPARD (1999), verificou que a velocidade máxima de usinagem é limitada ao que produz uma superfície adequada, sem trincas e lascamento, e que a força de corte aumenta linearmente com o aumento da velocidade de corte e as taxas de alimentação, podendo ter forças totais de usinagem de até 25 Newtons (N). Também verificou que a profundidade de corte não tem efeito relevante sobre a qualidade da superfície. O ideal é que a superfície acabada deve ser alcançada no primeiro corte. Parâmetros de usinagem devem, assim, ser controlados cuidadosamente para evitar danos ao material verde frágil.

Segundo XU e JAHANMIR (1996), a velocidade de corte pouco influencia no acabamento superficial da peça cerâmica a verde, verificado na figura 2.14. Assim, com um aumento na velocidade de corte, o tempo de usinagem pode ser reduzido significativamente, e também, possibilita a redução do desgaste da ferramenta, pelo fato de menor tempo de contato entre a peça e a ferramenta. Entretanto, devido à baixa resistência apresentada no material cerâmico verde e os esforços impostos pelo aumento da força centrífuga, a velocidade de corte é limitada em operações de torneamento.

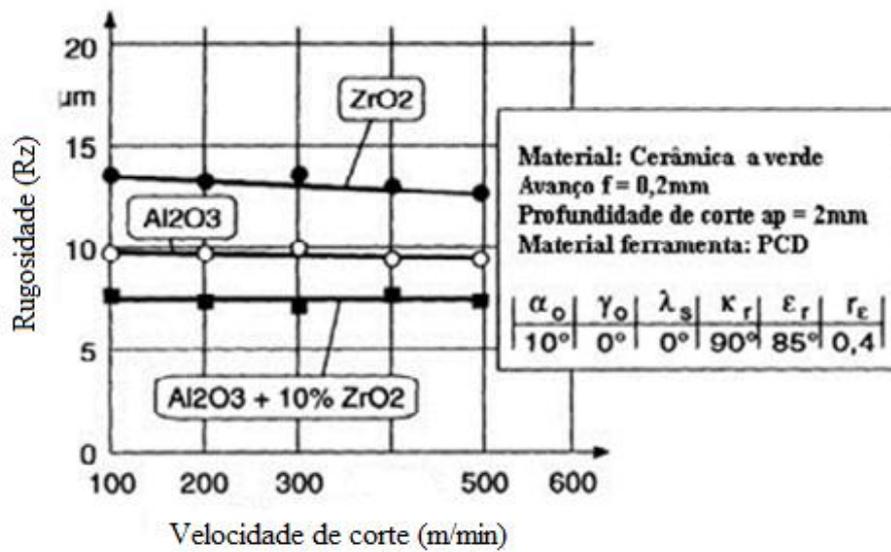


Figura 2.14 - Influência da velocidade de corte no torneamento de cerâmica a verde (XU e JAHANMIR, 1996).

Já em relação da influência do avanço na operação de torneamento (figura 2.15), foi verificado que o aumento do avanço gerou maiores valores de rugosidade, sendo observado que o menor avanço obteve rugosidade entre 5 e 9 μm , e com o maior avanço obteve rugosidade entre 18 e 24 μm , conseqüentemente prejudicando a qualidade superficial do compacto.

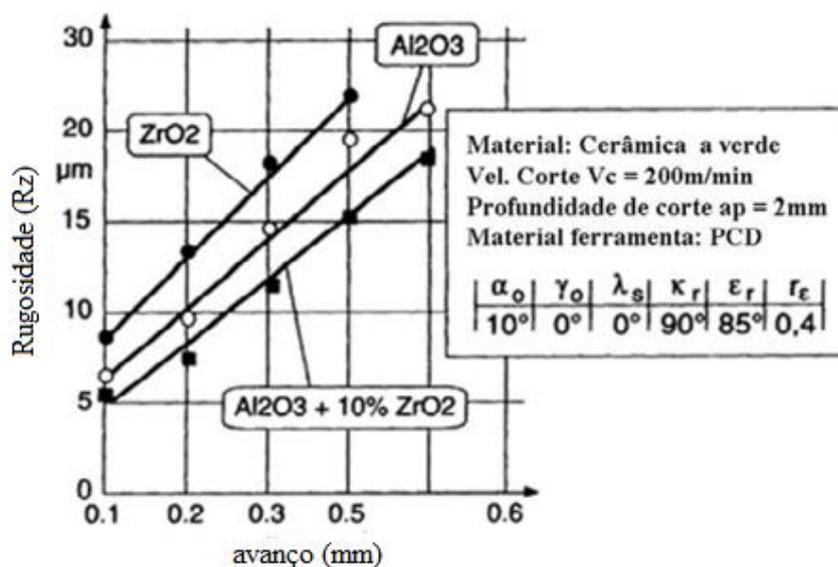


Figura 2.15 - Influência do avanço no torneamento de cerâmica a verde (XU e JAHANMIR, 1996).

No trabalho realizado por MAIER e MICHAELI (1997), foram torneados peças de alumina com 99,7% de pureza compactados por 150 MPa, sendo observado de modo geral que o aumento da velocidade de corte gerou uma diminuição da rugosidade e a força resultante permaneceu praticamente constante, o aumento do avanço produziu incremento significativo da rugosidade e força resultante, já o aumento da profundidade de corte causou diminuição da rugosidade, mas gerou aumento da força resultante, conforme visto na figura 2.16.

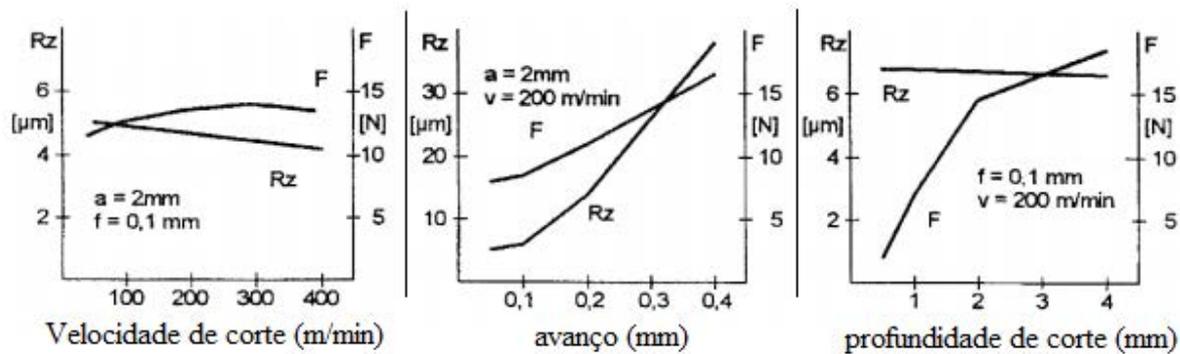


Figura 2. 16 - Análise da rugosidade e força resultante (F) obtida por diferentes parâmetros de corte (MAIER e MICHAELI, 1997).

No estudo realizado por BUCVIK et al., (2012), foram usinados compactos verdes de alumina prensados uniaxialmente, torneados com quatro valores de profundidade de corte, sendo: 0,25; 0,50; 0,75 e 1,0 mm, ambas mantendo os mesmos parâmetros. Após a usinagem, as amostras foram sinterizadas e feito uma análise da distorção, juntamente foi sinterizado um compacto sem usinar. Na figura 2.17 são identificadas as contrações após a sinterização, sendo possível observar que a menor retração ocorreu na amostra usinada com valor de profundidade de corte de 1,0 mm e a maior distorção ocorreu na peça que não foi usinada, devido ao gradiente do compacto.

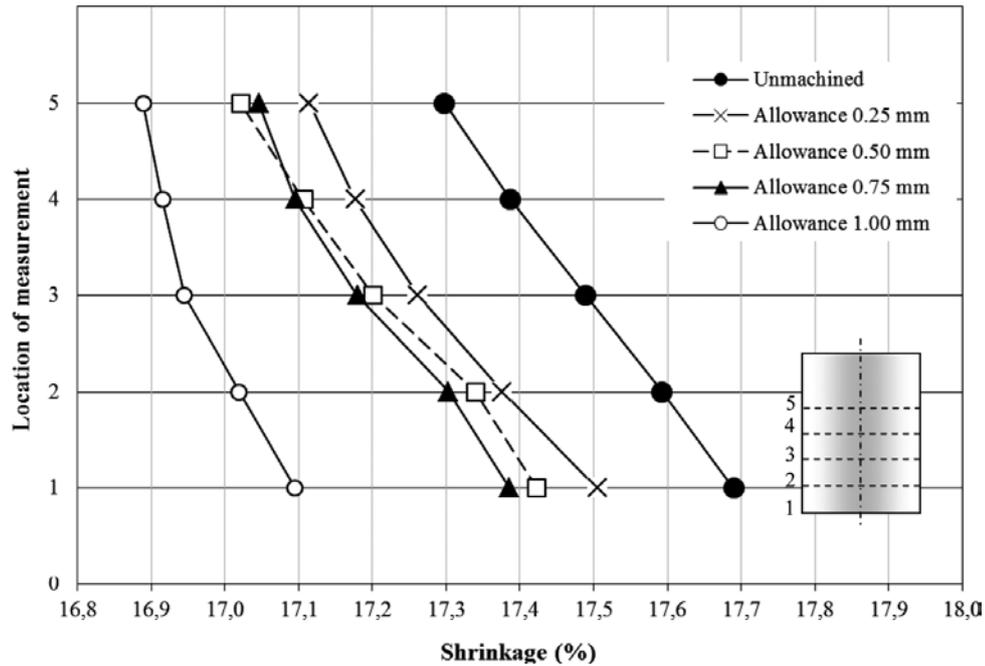


Figura 2.17 - Retração média linear em cinco posições em amostras sinterizadas depois usinadas em valores diferentes de remoção.

É verificado que a redução mais significativa ocorreu no ponto 1 em todos os compactos, em que foi situada uma parte da região que continha menor de densidade, isso demonstra que o método da pressão uniaxial de simples ação é um indutor de gradiente de densidade. Ao mesmo tempo, no sentido crescente das seções (1-5) existem aparentemente valores mais elevados de densidade que resultam em menor contração na amostra sinterizada devido a uma maior interação entre os grãos de alumina no compacto verde. Analisando os resultados, a remoção de 1,0 milímetros apresentou a retração mais moderada, especialmente do ponto 3. Assim, a remoção de 1,0 mm foi capaz de alcançar as estruturas mais densas e mais homogêneas,

Também foi demonstrado no estudo o comportamento da força média de corte na usinagem de cada uma das amostras de ensaio, através de uma célula de carga, cada ferramenta de corte utilizada para usinar o mesmo valor de sobrematerial, sendo uma ferramenta para cada cinco amostras. Na condição de 1,0 mm, utilizou a mesma ferramenta para apenas quatro amostras, durante os ensaios não foi atingindo o critério de desgaste máximo de flanco. O comportamento dos esforços é verificado na figura 2.18.

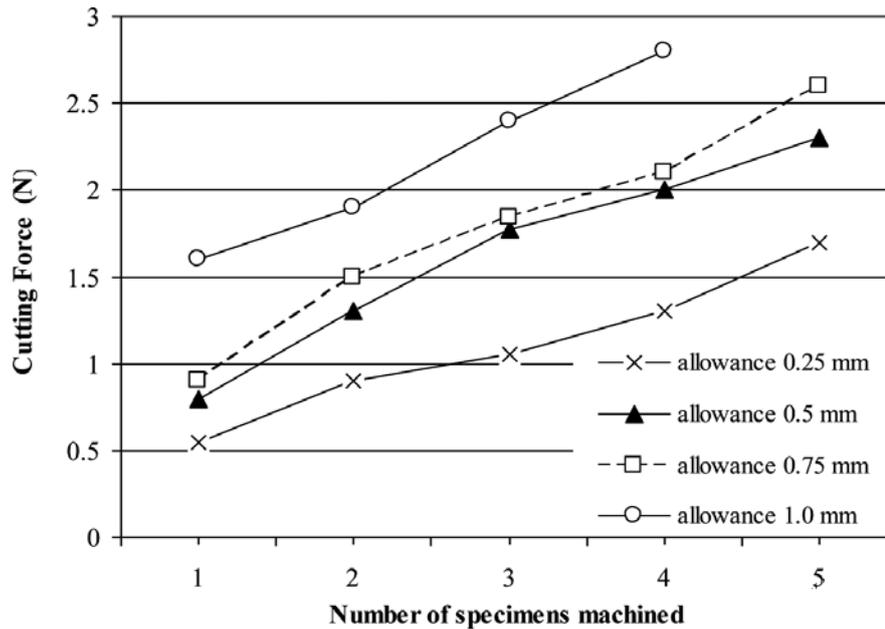


Figura 2.18 - Força de corte em diferentes valores de remoção de material.

A força de corte em alumina verde provou ser muito susceptíveis ao desgaste da ferramenta de corte. Como pode ser visto, mesmo com uma taxa de desgaste baixa, a força de corte aumenta claramente no decorrer dos passes executados. As forças de corte médias foram de 1,6, 0,9, 0,8 e 0,55 N, respectivamente. Assim, foi concluído que a remoção de sobrematerial na peça verde através de usinagem é uma boa alternativa, uma vez que as áreas periféricas de amostras compactadas contêm as maiores variações na densidade, que diminuem progressivamente com o raio.

Um fato importante para utilizar o método da usinagem a verde é a necessidade de adotar precauções para proteção da máquina, devido ao sistema de remoção de material se dar em forma de pó durante a usinagem a verde, e o mesmo pode penetrar facilmente nos componentes da máquina, como nas guias e demais componentes, fazendo com que acelere o desgaste destas partes, podendo afetar a precisão da máquina (NG, HULL e HENSHALL, 2006).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentadas todas as etapas de concepção, métodos de desenvolvimento, instalação, monitoramento e análises de dados.

As amostras cilíndricas de alumina obtidas por prensagem isostática via “*Wet Bag*” foram submetidas ao processo de usinagem em uma fresadora adaptada para o torneamento, sendo monitoradas as forças de corte através de um dinamômetro de três coordenadas (Fx - Fy - Fz). Também, foi monitorada a temperatura próxima da ponta da ferramenta de corte durante a usinagem através de um microtermopar (tipo K), e um termopar (tipo J) monitorando a temperatura ambiente.

Para realizar o torneamento, foram utilizados três tipos de insertos de cermet alterando somente o raio de ponta (0,2 - 0,1 - 0,05 mm), foram elaboradas proteções para a máquina e desenvolvidos suportes para adaptar o dinamômetro na máquina e o microtermopar na ferramenta de corte. Foi realizado o processo de sinterização em algumas amostras num forno elétrico tipo câmara, e feito análise do acabamento superficial no estado verde e sinterizado. Para análise de dados, foram utilizados microscópios e programas computacionais. A figura 3.1 ilustra o fluxograma do processo, com os materiais, métodos, equipamentos e programas utilizados neste trabalho.

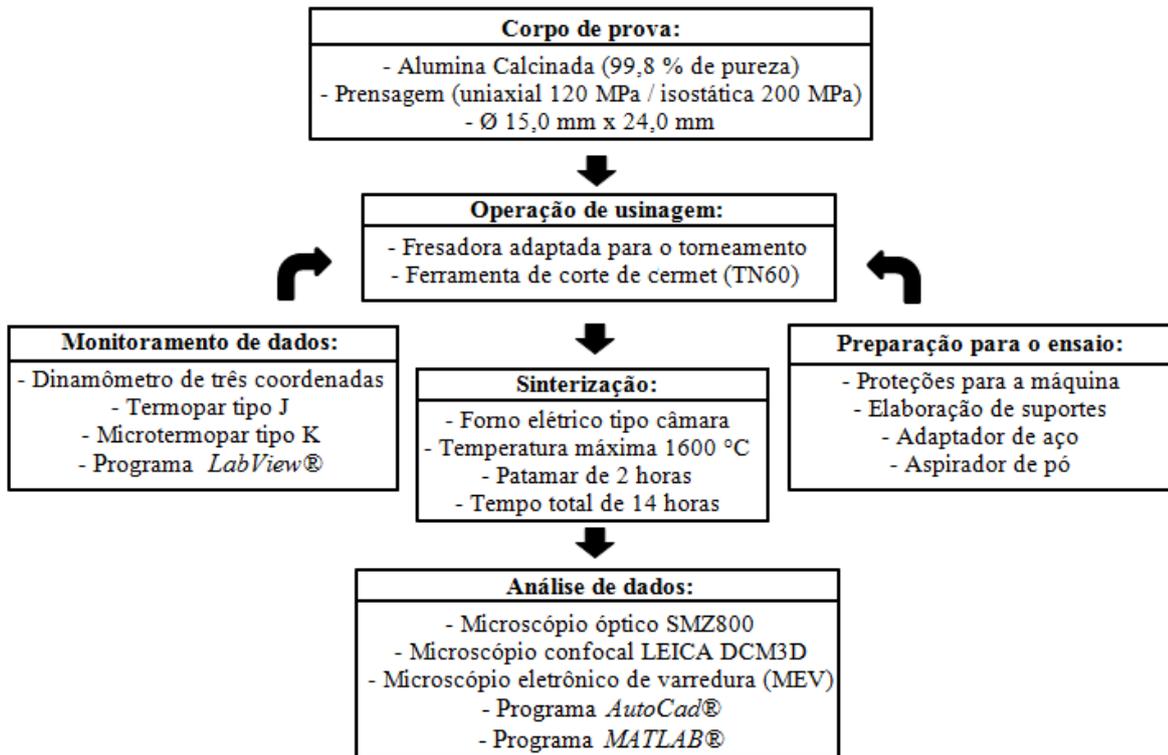


Figura 3.1 - Fluxograma do processo.

3.1 Corpo de Prova

Foram preparados corpos de prova de Alumina (Al_2O_3), de formatos cilíndricos compactados por prensagem uniaxial de simples ação e posteriormente por prensagem isostática, com dimensões de $\text{Ø } 15,0 \text{ mm} \times 24,0 \text{ mm}$ tendo relação entre diâmetro por comprimento de 1:1,6.

3.1.1 Formulação Cerâmica

A mistura da alumina com aglomerantes foi realizada em moinho de bolas com elementos cilíndricos de zircônia ($\text{Ø } 12,0 \text{ mm} \times 12,0 \text{ mm}$). 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 PVAL (álcool polivinílico) e o restante, 1 % em volume, de poliacrilato de amônia (Dispersal 130).

Foi feito o uso de defloculante associado à mistura mecânica a fim de garantir uma homogeneização mais eficiente da mistura, seguindo a recomendação de LERICHE et al. (1988). A mistura foi seca pela técnica da secagem de “Spray-Dryer”, produzindo um pó com partículas, constituída de pequenos aglomerados de alumina, de formato circular, tendo fluidez necessária para um eficiente preenchimento dos moldes.

A figura 3.2 ilustra o pó utilizado no trabalho feito através da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), sendo observado o aglomerado de partículas de formato circular nas imagens (a - b - c) e na imagem (d), o tamanho das partículas de alumina.

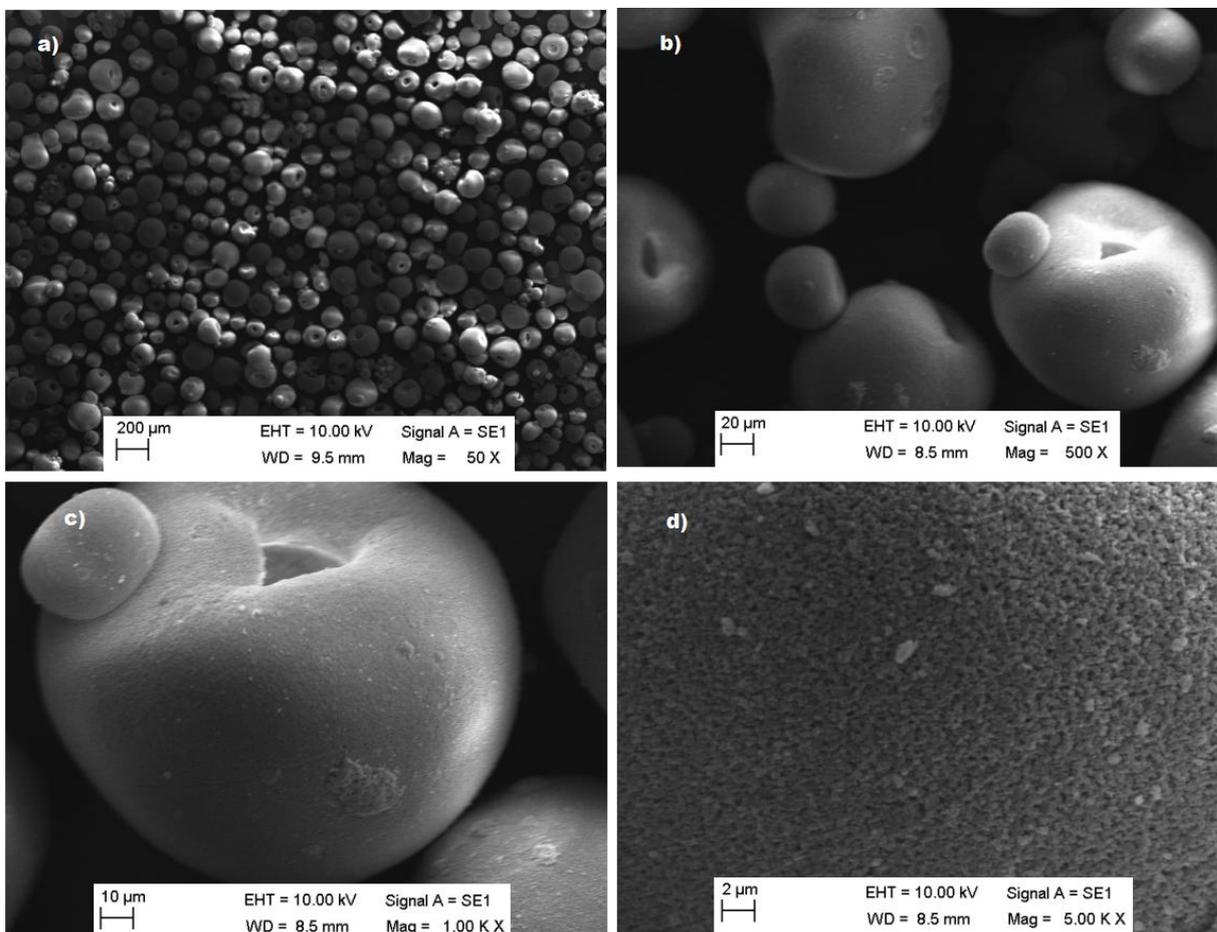


Figura 3.2 - MEV da alumina produzida pelo método de “*spray dryer*” em diferentes escalas.

A Tabela 3.1 traz a composição da cerâmica empregada no trabalho, que se trata da Alumina Calcinada A1000-SG (Almatis, Inc.) com área superficial de $7,7 \text{ mm}^2/\text{g}$ e $\rho_{\text{real}} = 3,99 \text{ g/cm}^3$.

Tabela 3.1 - Concentração química dos materiais contidos na alumina utilizada.

Elemento	Al_2O_3	Na_2O	MgO	SiO_2	CaO	Fe_2O_3	B_2O_3
Concentração (%)	99,8	0,07	0,04	0,03	0,02	0,02	0,001

3.2 Conformação dos Corpos de Prova

Para manter as dimensões desejadas nos compactos e apresentar uma distribuição mais homogênea possível dos gradientes de densidade, os corpos de prova foram conformados por prensagem uniaxial de simples ação e posteriormente prensados pelo método isostático por técnica do molde úmido.

3.2.1 Prensagem Uniaxial

Para conformação dos corpos de prova foi selecionado o molde juntamente com o punção superior e inferior (figura 3.3), após a seleção, foi verificado a quantidade de pó utilizada para preenchimento do molde para compactação de cada peça, sendo de aproximadamente 9,8 gramas de alumina.

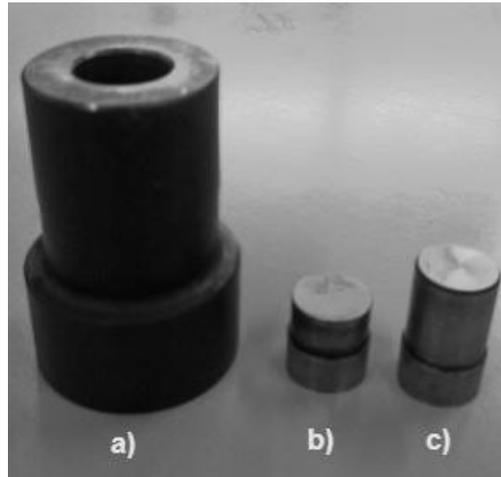


Figura 3.3 - Conjunto formador por: a) molde, b) punção inferior e c) punção superior.

Um procedimento importante antes do preenchimento do molde, foi utilizar o óleo Ácido Oleico P.A ($C_{18}H_{34}O_2$) para lubrificação interna do molde e dos punções, como também, foi utilizado uma bancada de vibração para melhor distribuição e acomodação dos grãos no interior do molde, melhorando o grau de compactação. Após o preenchimento do molde metálico com pó de alumina, o mesmo foi posicionado na prensa manual (figura 3.4) e feito à prensagem para obter uma pressão de compactação de 120 MPa.

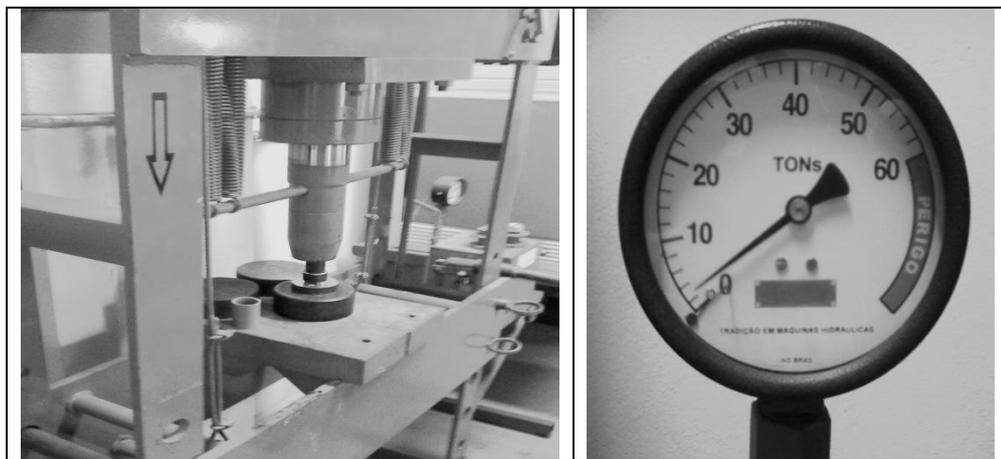


Figura 3.4 - Prensa manual e pressão utilizada para prensagem uniaxial (LTC-EESC-USP).

Após alcançar na prensa o valor desejado, foi estabelecida a permanência na pressão em torno de 30 a 60 segundos para estabilizar o grau de compactação da peça, e posteriormente foi feito o descarregamento e retirada do punção superior e inferior

lentamente, na tentativa de não infligir danos à peça. É necessário ter cuidado na remoção do compacto do molde, pois no seu estado verde encontra-se frágil.

3.2.2 Prensagem Isostática

Para realizar a prensagem isostática pelo método “*Wet Bag*” os corpos obtidos por prensagem uniaxial de simples ação foram embalados à vácuo com um elastômero, utilizando uma bomba de vácuo (figura 3.5). Se realizada a prensagem tendo presença de ar no elastômero, a pressão não será aplicada e distribuída de forma homogênea, e também, pode ocorrer de romper o elastômero no momento da compactação ocasionando a contaminação e perda do compacto verde.

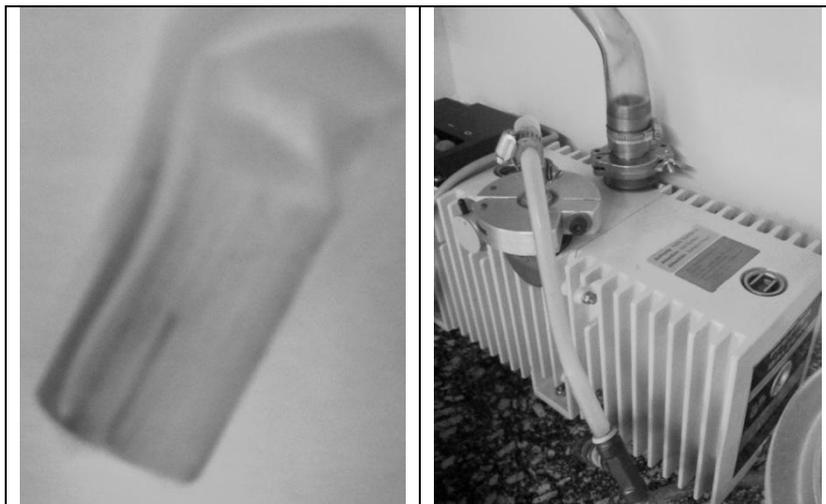


Figura 3.5 - Compacto inserido no elastômero e bomba de vácuo utilizada (LTC-EESC-USP).

Após a embalagem, as amostras foram devidamente seladas para impedir a entrada de ar e inseridas na câmara para prensagem isostática. Foi estabelecido uma pressão 200 MPa equivalente a 30.000 psi utilizado na prensa (figura 3.6). Feito o carregamento total até a pressão desejada, foi aguardado o tempo de um minuto para estabilizar a pressão e obter um alto grau de homogeneidade. Ao final do tempo esperado, a pressão foi reduzida lentamente até a zero.

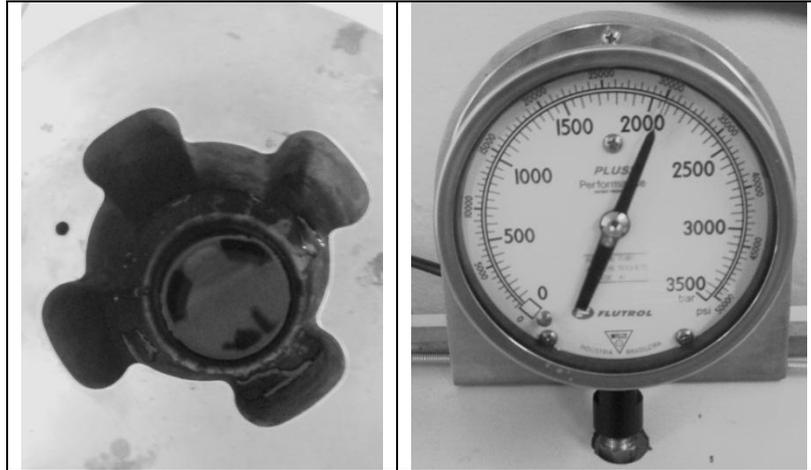


Figura 3.6 - Câmara e pressão utilizada para prensagem isostática (LTC-EESC-USP).

Concluído a prensagem, os elastômeros foram retirados da prensa isostática e secados para posteriormente remover os compactos, com intuito de não introduzir líquidos nas amostras. A figura 3.7 ilustra o aspecto visual do compacto após a etapa da prensagem obtido pelo microscópio Confocal, sendo possível visualizar a marca gerada na extração do compacto na prensagem uniaxial.

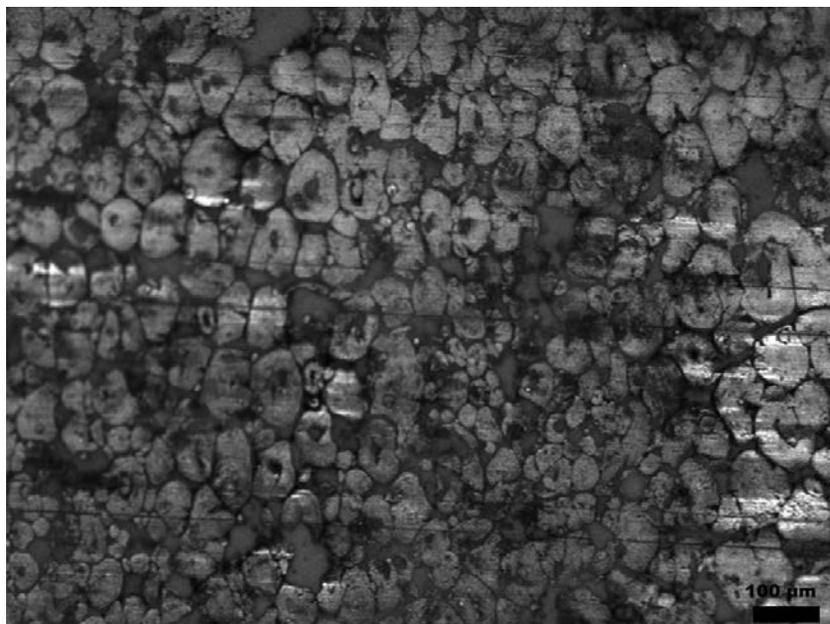


Figura 3.7 - Aspecto visual do compacto após a etapa de prensagem com aumento de 100x.

3.3 Operação de Usinagem

A operação de usinagem dos corpos-de-prova foi realizada em uma fresadora universal adaptada para o torneamento, utilizando comando manual. O corpo de prova foi fixado no cabeçote vertical da máquina, que proporcionou o movimento de rotação. A ferramenta de corte foi fixada no suporte do dinamômetro, sendo o dinamômetro preso sobre a mesa da máquina, que executou o movimento vertical sobre a peça para o avanço de usinagem, e o movimento horizontal usado para produzir a profundidade de usinagem.

A utilização da fresadora para os ensaios de usinagem foi devido à alta rigidez da máquina, facilidade de acesso em torno da peça com espaço disponível para fixação do dinamômetro e instrumentos, e também pela maior precisão no posicionamento da ferramenta.

3.3.1 Parâmetros de Usinagem

A análise e seleção dos parâmetros de usinagem foram previamente realizadas utilizando diversas combinações baseadas no aspecto visual do acabamento superficial da peça após cada teste, observado com o auxílio de imagens obtidas por meio de um estereó microscópio óptico acoplado a uma câmara digital de alta resolução.

Foram monitorados as forças de corte (F_c), avanço (F_f) e profundidade (F_p) dos corpos de prova usinados com os parâmetros selecionados, acompanhando também o desgaste da ferramenta, sendo o processo realizado em condições constantes de usinagem. O estudo das forças de usinagem permite otimizar os parâmetros de corte e assim, assegurar menor consumo de energia e melhor acabamento. Além disso, as forças de usinagem são determinantes para a qualidade geométrica e dimensional da superfície usinada. As variáveis possíveis de se alterar na máquina para o torneamento são:

- Rotação (n): dado em RPM, tendo a alteração da velocidade de corte por variação da rotação, valores para seleção de 355 - 500 - 710 - 1000 - 1400 - 2000;
- Velocidade de avanço (f): dado em mm/min, possíveis valores de 11,2 - 16,0 - 22,4 - 31,5 - 45,0 - 63,0 - 90,0;
- Profundidade de corte (a_p): dado em mm, definido pelo operador.

Foram estabelecidos alguns valores para início dos testes para a obtenção da condição de usinagem mais adequada, optando-se por parâmetros normalmente aplicados na usinagem de metais, demonstrando a aplicação dos métodos convencionais de usinagem na usinagem a verde.

3.3.2 Ferramenta de Corte

A ferramenta de corte selecionada para torneiar os compactos foi de Cermet sem revestimento e sem quebra-cavacos, utilizando porta ferramentas STGPL 1212-H-11, ambas da Kyocera. A escolha por um inserto sem quebra-cavacos foi definida devido ao sistema de remoção do material cerâmico, no seu estado verde, ser de forma abrasiva, e também, para melhor análise de desgaste.

Cermet é um material composto por cerâmica e metal, é um metal duro com partículas duras à base de titânio. Os componentes principais do cermet são carbeto de Ti e nitreto de Ti (KYOCERA, 2014). A figura 3.8, demonstra a dureza Vickers (HV) em função da temperatura (°C) do cermet e de outros materiais para ferramenta de corte.

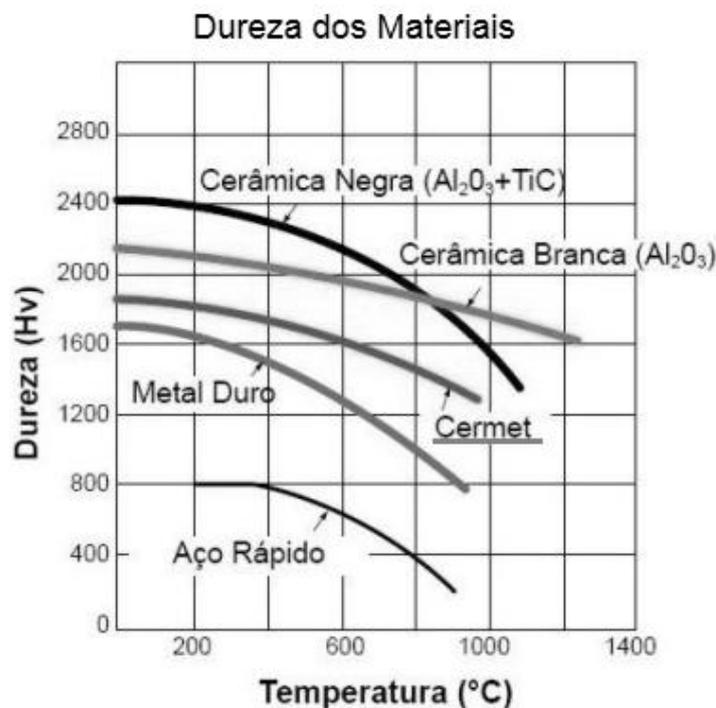


Figura 3.8 - Dureza dos materiais (HV) em função da temperatura (KYOCERA, 2014).

Para realização dos ensaios foram utilizados três insertos, a fim de investigar a influência do raio de ponta, verificando o desempenho durante a usinagem e os efeitos sobre a integridade das superfícies usinadas do compacto verde. Ambos insertos com as mesmas composições e dimensões, alterando somente o raio de ponta (0,2 - 0,1 - 0,05 mm), ilustrados na figura 3.9.

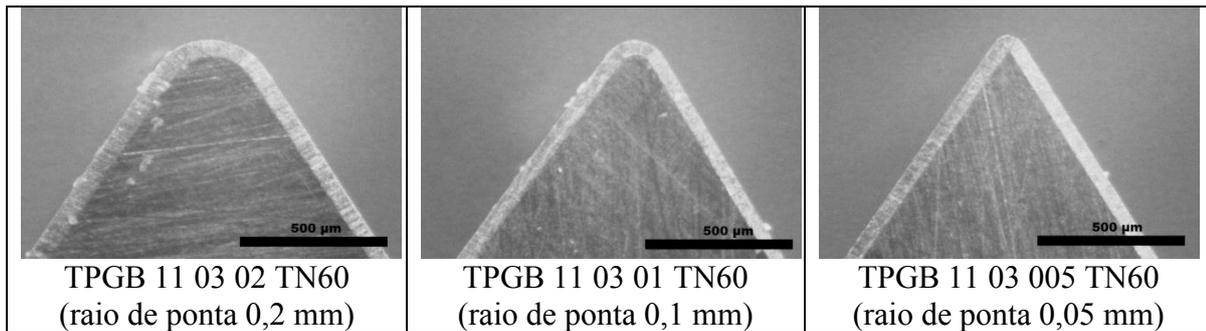


Figura 3.9 - Raio de ponta dos insertos utilizados.

3.4 Preparação para o Banco de Ensaio de Usinagem

Um procedimento na tentativa 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 a verde, foi confeccionar uma base de aço com uma cavidade cilíndrica com diâmetro semelhante ao do corpo de prova para não fixá-la diretamente no cabeçote da máquina. Segundo HERLINGER et al. (2006), as trincas internas na cerâmica verde geralmente podem ser prevenidas evitando pressões excessivas no momento da fixação.

Os corpos de provas foram fixados por adesão, com termocera, no suporte metálico elaborado, o que garantiu uma rígida fixação e propiciou uma fácil remoção pelo aquecimento em torno de 100°C, com a finalidade de reutilizar a base metálica. A fixação na pinça da máquina de usinagem ocorreu na superfície metálica do suporte. Procedimento semelhante foi utilizado no trabalho de BUCVIK et al. (2012). Assim, depois de fixado, o conjunto formado pelo suporte e corpo de prova pode ser verificado na figura 3.10.



Figura 3.10 - Conjunto formado pela base e corpo de prova.

Em relação á máquina, foi elaborada uma proteção (suporte) de plástico transparente em torno do cabeçote devido á natureza altamente abrasiva dos resíduos e partículas geradas durante a usinagem, sendo em forma de “pó”. Esta proteção facilita na limpeza da máquina, como também, ajuda a evitar a dispersão do pó no ambiente de trabalho e nos equipamentos. Na guia da máquina, foi inserida uma proteção em plástico bolha com intuito de protegê-la dos resíduos da alumina. Para sucção dos resíduos cerâmicos foi utilizado um aspirador de pó, aspirando de forma contínua durante o processo de usinagem. As proteções elaboradas podem ser vistas na figura 3.11.

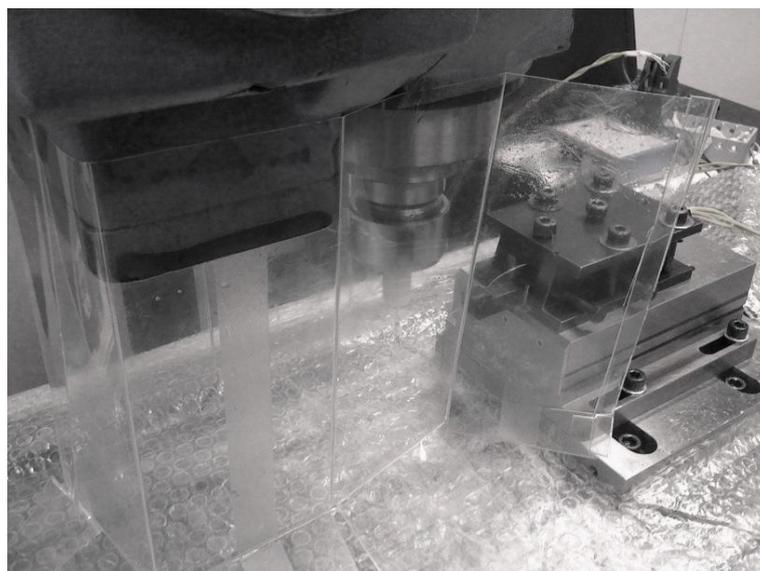


Figura 3.11 - Proteção elaborada em torno do cabeçote e na guia da máquina.

3.5 Sistemas de Monitoramento das Condições de Corte e Aquisição de Dados

Os esforços de corte foram captados por um dinamômetro de três coordenadas da Kistler - 9257BA conectado a unidade de controle 5233A1 (figura 3.12), que possui um filtro passa-baixo de 200Hz e permite a seleção do range apropriado para os esforços em cada direção (utilizado 1 kN no sentido do eixo Z e 500N para os eixos X e Y). As saídas coaxiais da unidade de controle do dinamômetro estão conectadas a um módulo de aquisição de dados analógicos da National Instrument modelo NI-9207, que se comunica a um notebook através do chassi de ethernet cDaq-9188, a uma frequência de aquisição de 200Hz.

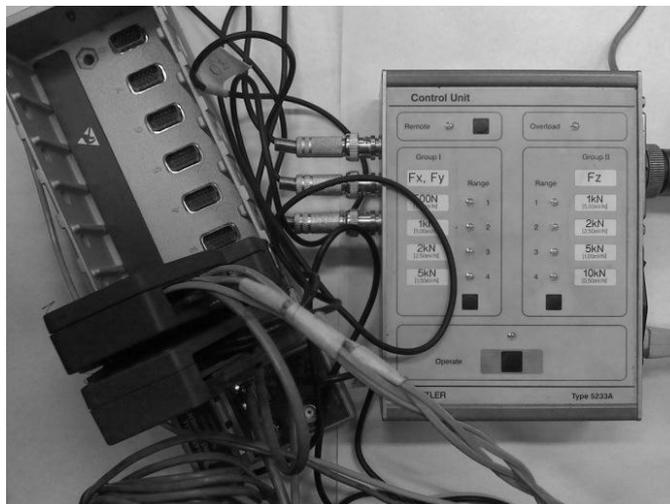


Figura 3.12 - Sistema de controle de dados.

Com o dinamômetro, foi possível mensurar a força de corte (F_c) = F_x , a força de avanço (F_f) = F_z e a força de profundidade (F_p) = F_y . Para melhor análise em algumas condições, foi feito o cálculo da força resultante (F). A força de usinagem, representada para o processo de torneamento, pode ser calculada a partir de suas componentes: força de corte (F_c), força de avanço (F_f) e força passiva ou força de profundidade (F_p), representada através da equação:

$$F = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2}$$

A figura 3.13 ilustra as componentes e as direções da força de usinagem geradas no processo de torneamento.

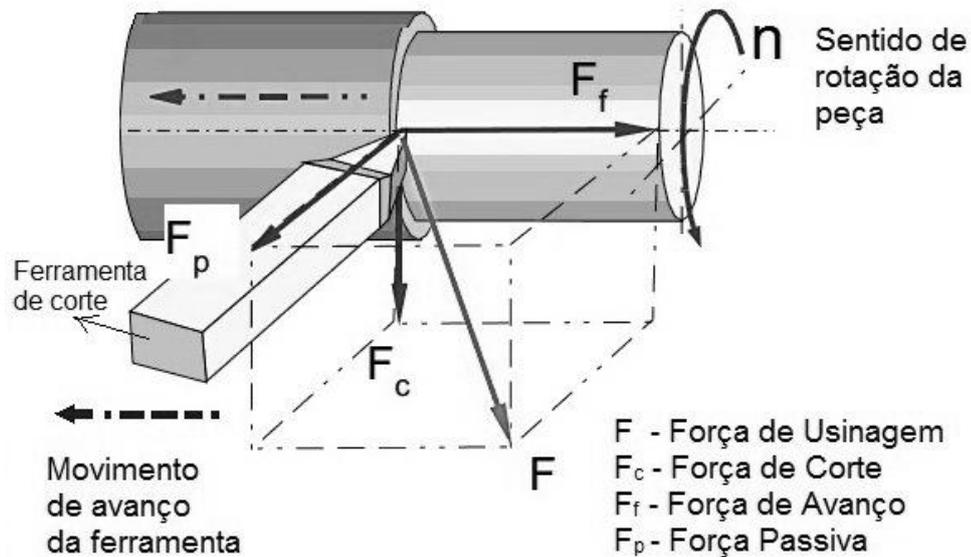


Figura 3.13 - Direção das componentes da força de usinagem no torneamento.

Conhecendo as forças atuantes sobre a ferramenta de corte, pode-se não só estimar a potência necessária à realização do corte, como também dispor de valores importantes para a construção de máquinas-ferramentas rígidas capazes de garantir um melhor desempenho. O monitoramento de forças tem se constituído um valioso instrumento de controle do desgaste das ferramentas de corte. As forças de usinagem podem ainda representar um índice de usinabilidade e funcionar como parâmetro para controle adaptativo de processo (RODRIGUES et al., 2007).

Para fixar o dinamômetro na guia da fresadora foi utilizado um adaptador de aço, assim, foi possível manter corretamente o posicionamento da ferramenta de corte na linha de centro do corpo de prova, e também, assegurar rigidez do dinamômetro sobre a guia. O modelo deste calço e o conjunto pronto formado pelo calço e dinamômetro são ilustrados na figura 3.14.

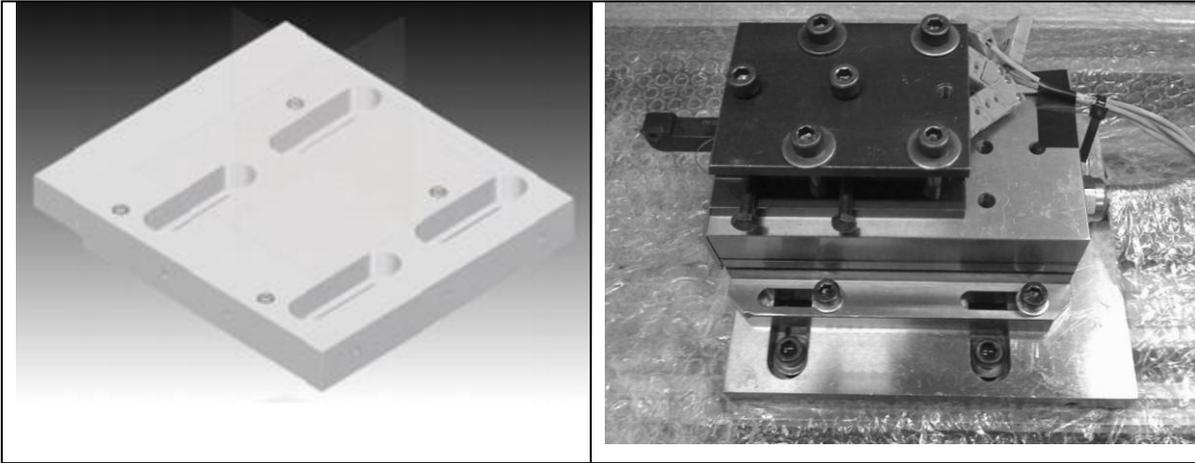


Figura 3.14 - Adaptador (calço) e conjunto fixado na guia da máquina formado pelo calço e dinamômetro.

Para registrar a temperatura durante o processo de usinagem foram utilizados dois termopares, sendo um microtermopar tipo K, controlando a temperatura da ferramenta durante o processo de usinagem e um termopar tipo J, utilizado para monitoramento da temperatura ambiente, com intuito de verificar se a temperatura influencia no processo, como no desgaste da ferramenta. O microtermopar foi posicionado em contato com a superfície de saída da ferramenta de corte a 1,2 mm da extremidade da aresta de corte, para sua fixação foi fabricado um “case” em resina compósita de epóxi conforme as dimensões da ferramenta para um encaixe adequado, com um canal interno revestido de silicone para inserir e fixar permanentemente o microtermopar no molde, facilitando a remoção do mesmo da ferramenta e evitando movimentos da posição para não ter erros de medição. Na figura 3.15 é possível visualizar a ferramenta de corte sem e com o microtermopar inserido.

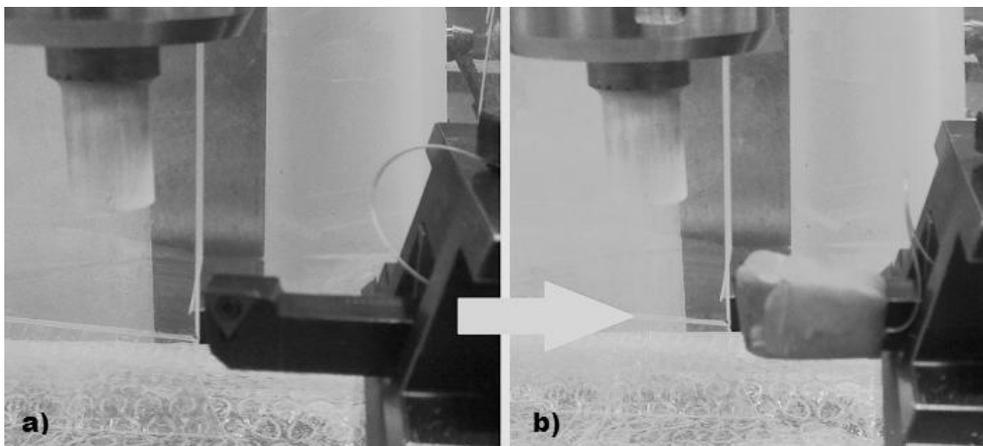


Figura 3.15 - Ferramenta de corte: a) sem microtermopar e b) com microtermopar.

O valor de tensão registrado pelo termopar foi mensurado através do módulo de entrada analógica para termopares NI-9214, através do mesmo chassi, a uma frequência de 1,04 Hz. Estando distante o módulo de aquisição de temperatura e a ferramenta de corte, o micro termopar têm seus dados transmitidos por de cabo de extensão tipo KX. Um programa em ambiente *LabView*® foi utilizado para atuar como interface da conexão e gravação dos dados captados pelo chassis à um notebook. A tela do painel frontal atuando como interface de aquisição de dados (força e temperatura), está apresentada na figura 3.16.

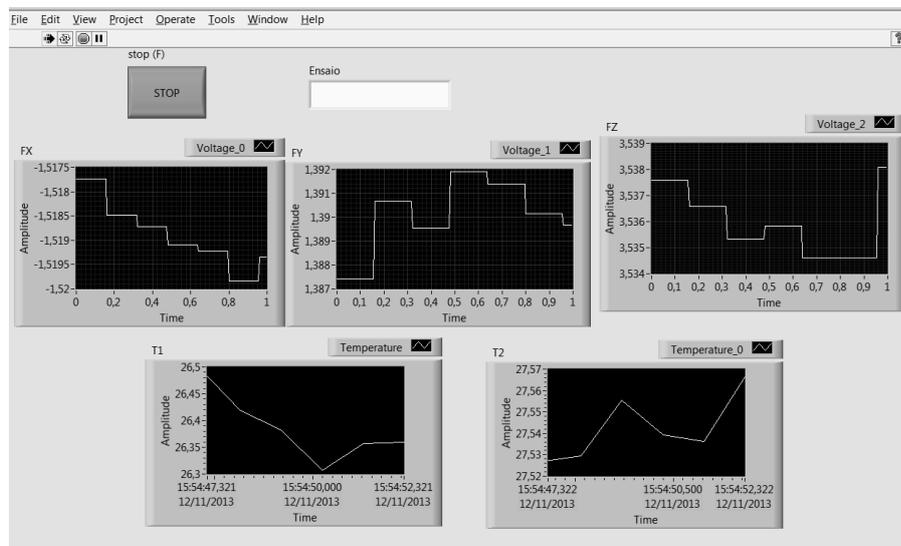


Figura 3.16 - Interface de aquisição de dados em *LabView*®.

Foi possível fazer a aquisição de força e de temperatura simultaneamente devido ao fato de ter sido utilizado dois módulos de aquisição diferentes conectados ao chassi (figura 3.12), tendo cada módulo sua própria configuração. Os esforços de corte e as temperaturas registradas durante os ensaios foram salvos em arquivos binários e então analisados por rotinas desenvolvidas no programa *MATLAB*®.

3.6 Métodos de Análise da Ferramenta de Corte e dos Corpos de Prova

Os ensaios foram executados com a mesma aresta de corte visando à análise gradual do desgaste. O desgaste de flanco máximo (V_{Bmax}) que determina o final de vida da ferramenta foi em conformidade com a Norma ISO 3685, sendo este valor de 0,6 milímetros.

As imagens para acompanhar o desgaste da ponta da ferramenta de corte foram obtidas por meio de um microscópio óptico modelo SMZ800 da Nikon, e com o auxílio do programa computacional *AutoCad*®, foi possível a obtenção das medidas de desgaste com precisão. A vida de uma ferramenta pode ser definida como sendo o tempo em que a mesma trabalhe efetivamente, sem perder o corte ou até que se atinja o critério de fim de vida previamente estabelecido.

O microscópio óptico também foi utilizado para acompanhar e analisar o aspecto visual dos compactos durante os ensaios realizados. Em algumas determinadas condições de usinagem, foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura (MEV), fabricante ZEISS, modelo EVO LS15, para uma análise mais precisa do compacto e da ferramenta de corte.

Para analisar a rugosidade produzida na peça a verde e sinterizada, como também, obter imagem em 3D da região mensurada, foi utilizado um microscópio Confocal LEICA DCM3D, devido ao fato de não necessitar de contato, e com isso não alterar a superfície. As rugosidades mensuradas foram: R_a (μm), denominada rugosidade média e R_q (μm), denominado RMS (Root Mean Square), ambas as rugosidades mensuradas na direção axial do compacto. Na figura 3.17 é ilustrada uma superfície mensurada em 3D e a figura 3.18 o perfil das rugosidades obtidas em uma das amostras.

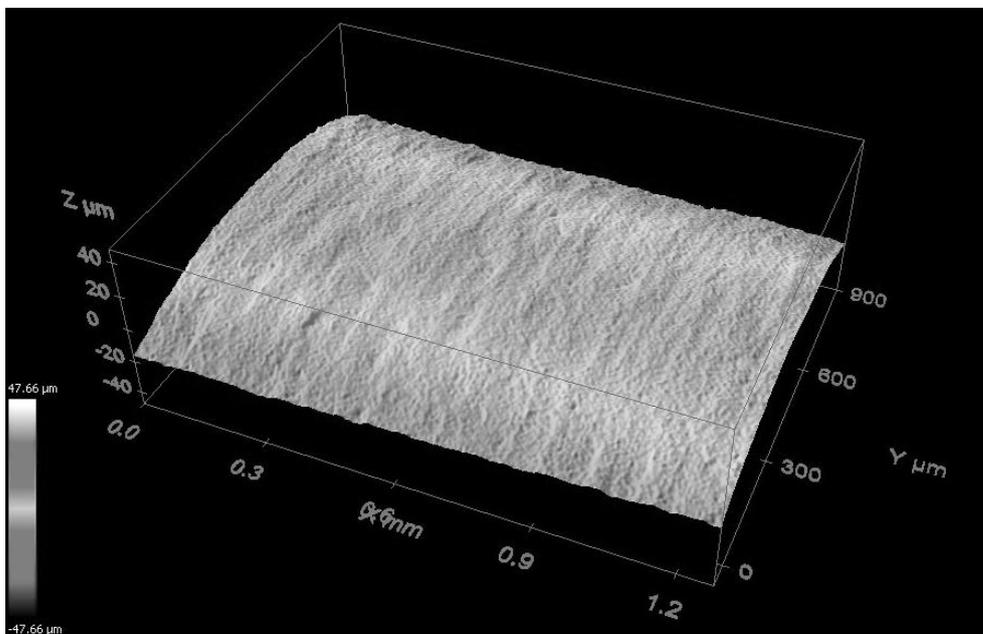


Figura 3.17 - Superfície do compacto verde mensurada em 3D.

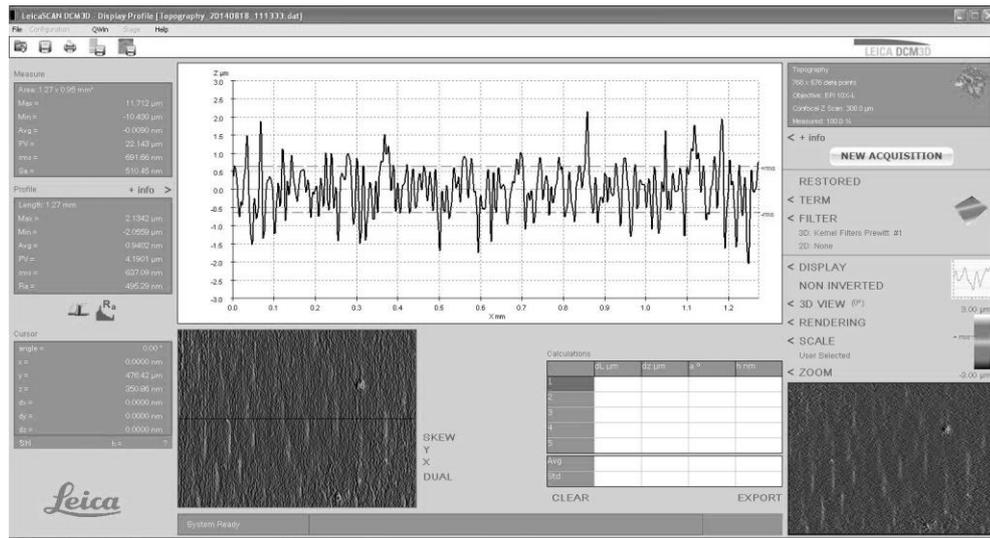


Figura 3.18 - Profile do programa LeicaSCAN DCM3D atuando como sistema de mensuração da rugosidade dos compactos.

3.7 Processo de Sinterização

O processo de sinterização dos compactos foi realizado em um forno elétrico do tipo câmara, da marca Lindberg Blue® (LTC-EESC-USP), com uma rampa de aquecimento, patamar e rampa de resfriamento, tendo a máxima temperatura utilizada de 1600 °C com patamar de 2 horas e duração total do processo em torno de 14 horas, ilustrado na figura 3.19.

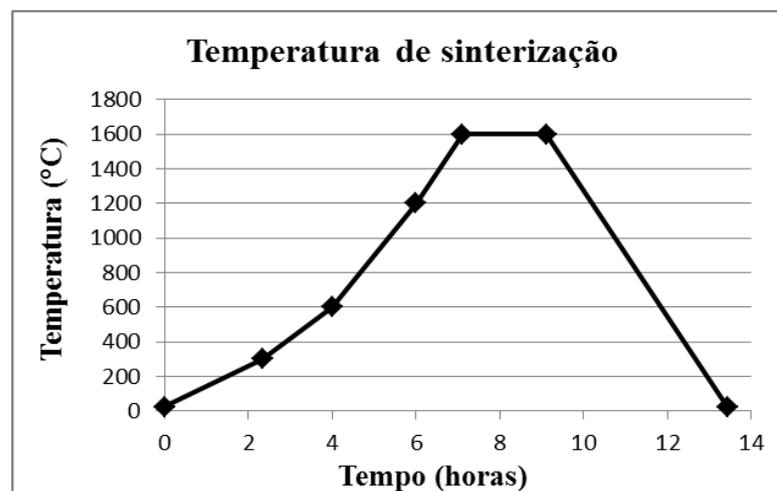


Figura 3.19 - Rampa de aquecimento e temperatura do processo de sinterização.

O tempo e a temperatura determinado neste trabalho para a sinterização foram os necessários para alcançar as características de sinterização requeridas para o material da peça, para promover um aumento do tamanho do grão e alcançar a melhor resistência mecânica.

3.8 Resumo dos Equipamentos e Programas Utilizados no Trabalho

Foram utilizados para o devido trabalho:

- Fresadora Universal ZOCCA U-30 adaptada para o torneamento;
- Prensa hidráulica manual, para a compactação uniaxial de 120 MPa;
- Prensa isostática a frio, para estabelecer uma pressão de 200 MPa;
- Corpos de prova de alumina, com dimensões de Ø 15,0 mm x 24,0;
- Dinamômetro de três coordenadas da Kistler – 9257BA, para captar e avaliar os esforços da ferramenta sobre as amostras;
- Porta ferramentas STGPL 1212-H-11, insertos: TPGB 11 03 02 TN60, TPGB 11 03 01 TN60 e TPGB 11 03 005 TN60, ambos de Cermet;
- Aspirador de pó, para aspiração de forma contínua dos resíduos cerâmicos durante o processo de usinagem;
- Forno elétrico tipo câmara da Lindberg Blue® para o processo de sinterização;
- Microtermopar tipo K (T1) com 0,3 mm de diâmetro, posicionado próximo da ponta da ferramenta de corte, controlando a temperatura da ferramenta de corte durante a usinagem;
- Termopar tipo J (T2), controlando a temperatura do ambiente;
- Microscópio confocal LEICA DCM3D, para analisar a rugosidade superficial dos compactos em verde e sinterizados;
- Microscópio óptico, modelo SMZ800 da Nikon, para análise da ferramenta de corte e das amostras;
- Microscópio eletrônico de varredura (MEV), fabricante ZEISS, modelo EVO LS15, para análise da ferramenta de corte e das amostras;
- Programa *LabView*®, atuando como interface da conexão e gravação dos dados captados pelo chassis à um notebook;

- Programa *MATLAB*®, analisando os esforços de corte e as temperaturas registradas durante os ensaios por rotina desenvolvida no programa.
- Programa *AutoCad*®, para acompanhar os desgastes da ferramenta de corte com precisão.

A máquina com os devidos equipamentos instalados pode ser visualizada na figura 3.20, e a montagem esquemática do banco de ensaio na figura 3.21.



Figura 3.20 - Máquina e equipamentos para o ensaio.

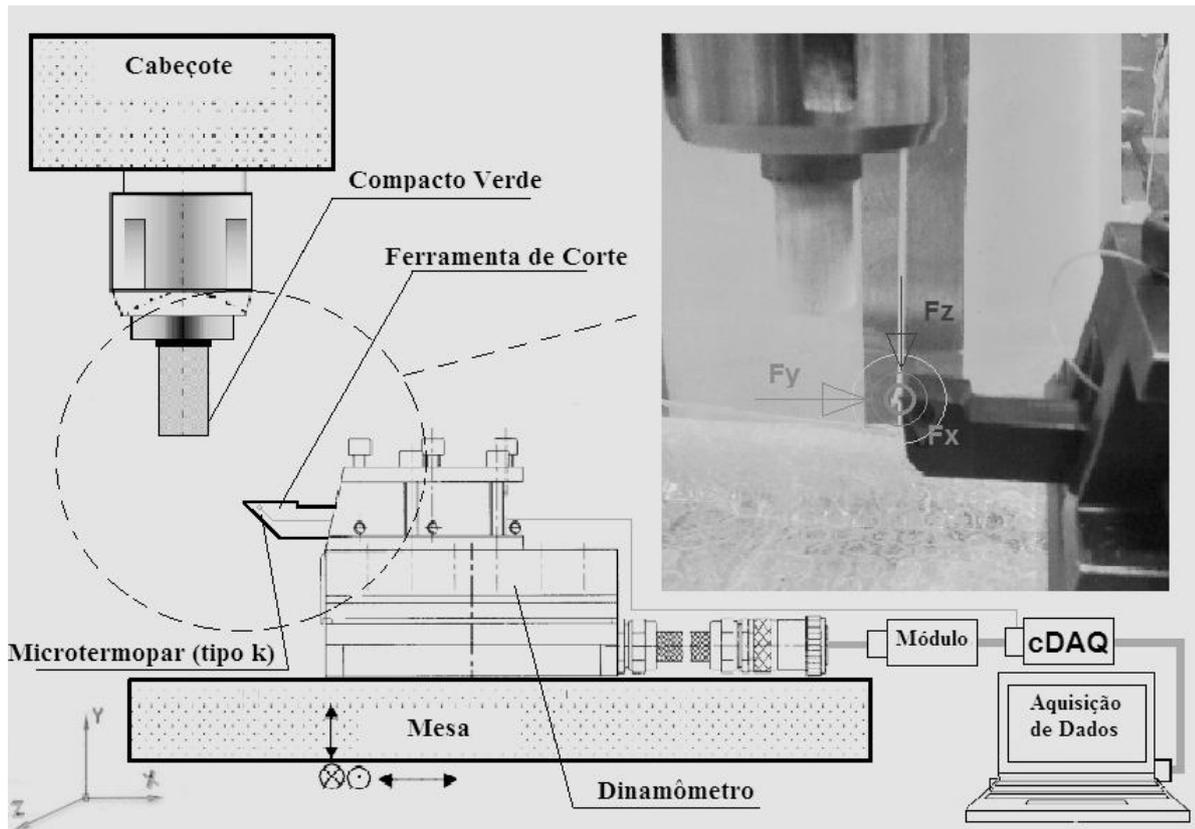


Figura 3.21 - Montagem esquemática do banco de ensaio.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Seleção da Rotação e Velocidade de Avanço e Análise Preliminar dos Insertos

Foram realizados ensaios com combinações de parâmetros de corte para se estabelecer a rotação (RPM) e velocidade de avanço (mm/min) adequados. A figura 4.1 ilustra o fluxograma do processo de seleção das condições de corte.

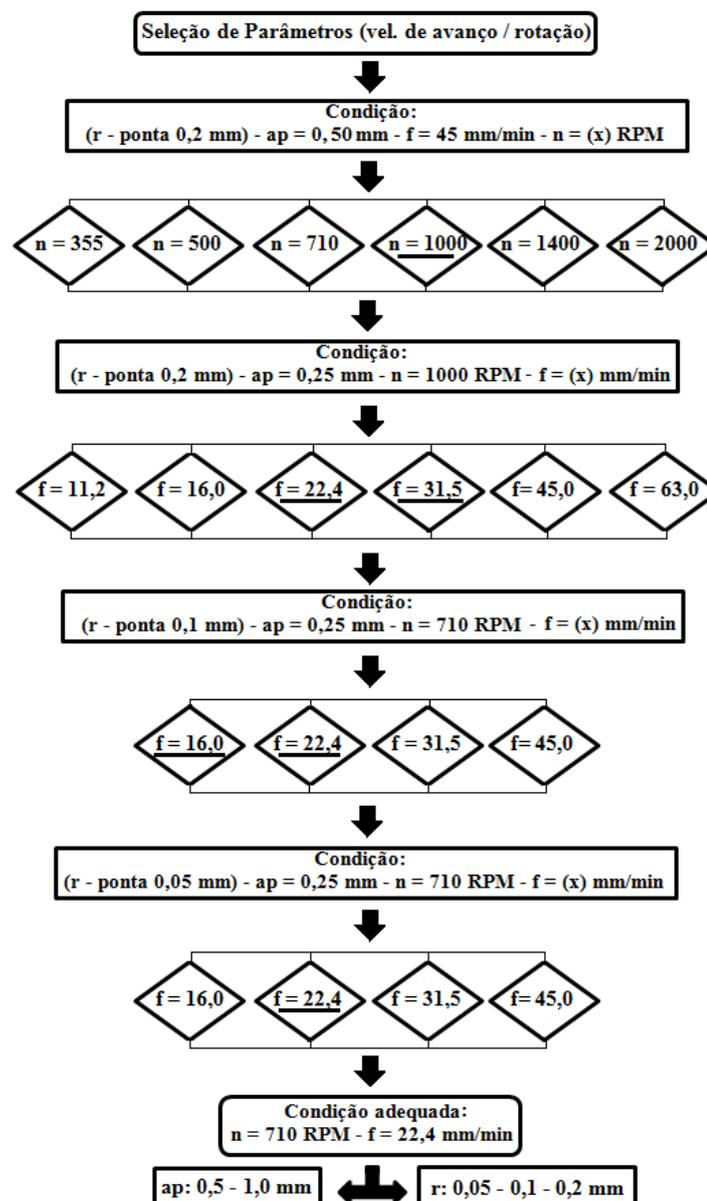


Figura 4.1 - Fluxograma de seleção de parâmetros de corte (rotação e vel. de avanço).

Para início dos testes foi escolhido o inserto com maior raio de ponta (TPGB 11 03 02 TN60), de 0,2 mm. A Figura 4.2 mostra os acabamentos superficiais obtidos com a influência da alteração da velocidade de corte, por variação da rotação (n), mantendo os valores constante de profundidade de corte (a_p) = 0,5 mm e velocidade de avanço (f) = 45,0 mm/min, sendo o valor escolhido de (f) intermediário entre os possíveis para usinagem.

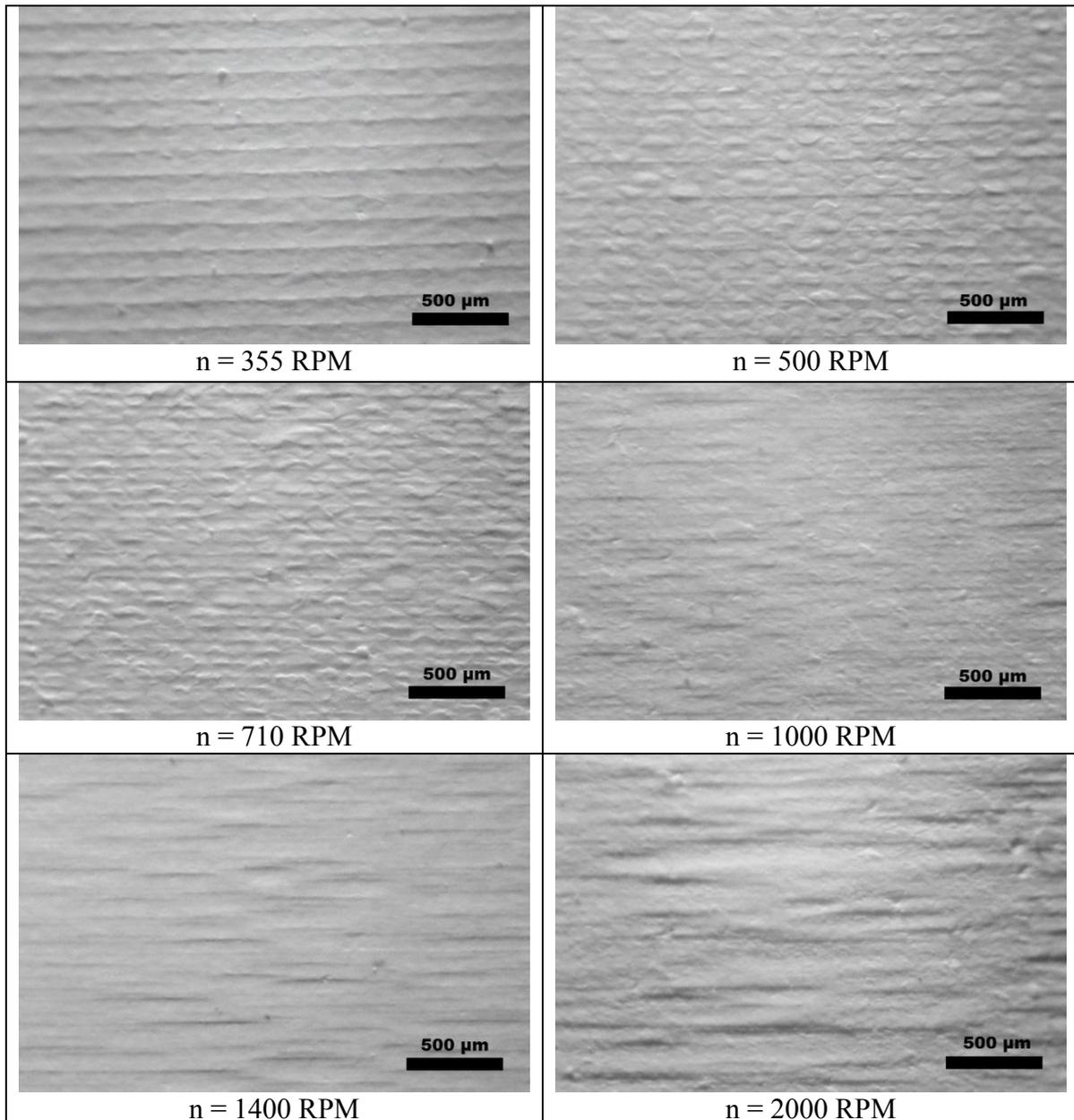


Figura 4.2 - Aspecto visual da condição de usinagem (r -ponta 0,2 mm) variando (n) e mantendo fixos velocidade de avanço (f) = 45,0 mm/min e a_p = 0,5 mm.

Analisando as superfícies usinadas, a que apresentou melhor acabamento superficial obtido foi utilizando rotação de 1000 RPM, sendo a condição com menos danos em relação às outras, mas também, verificou-se que a velocidade de avanço de 45,0 mm/min introduziu muitos danos, sendo considerada elevada para o processo. Para verificação de conceitos, foi refeitos alguns testes e foi possível verificar que a velocidade de corte era alta utilizando rotações de 1400 e 2000 RPM surgiram na borda do compacto trincas e lascamentos, gerando grandes danos superficiais devido aos esforços de usinagem. A ocorrência de lascamento pode ser gerada pela força de corte da usinagem, que causa o desprendimento das partículas compactadas na borda, uma vez que a peça compactada verde apresenta baixa resistência mecânica, os danos são ilustrados na figura 4.3.

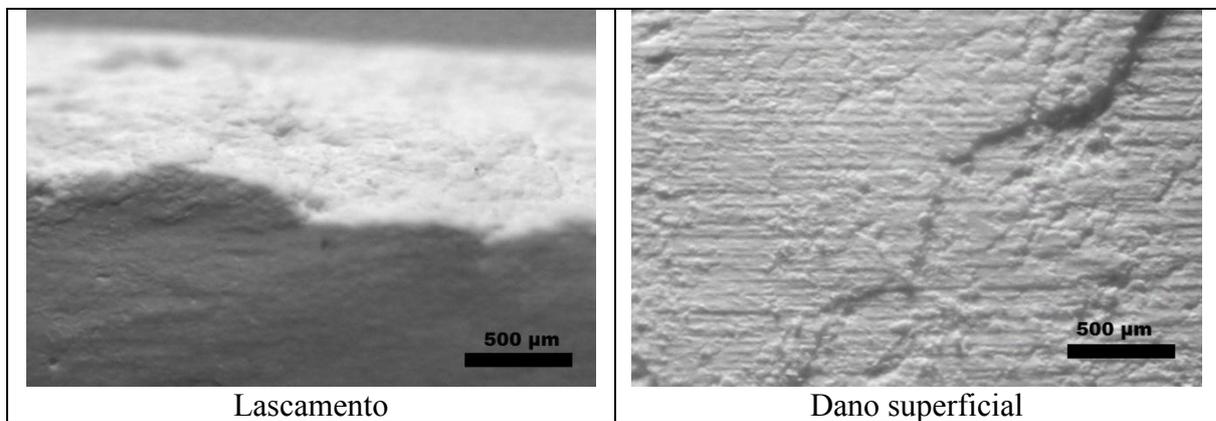


Figura 4.3 - Danos devidos aos parâmetros inadequados de usinagem.

Após analisar os dados obtidos, na tentativa de minimizar os danos e esforços excessivos no compacto verde para selecionar as melhores condições, a rotação de 1000 RPM que apresentou melhores resultados foi selecionada e a profundidade de corte (a_p) de 0,5 mm foi alterada para 0,25 mm para continuidade da seleção de parâmetros, ambos os valores foram mantidos fixos. Assim, nova análise de parâmetros foi testada variando a velocidade de avanço (f), com intuito de obter melhor o acabamento superficial.

A figura 4.4 demonstra o acabamento superficial de seis parâmetros diferentes mantendo fixos os valores de profundidade (a_p) e rotação (n), variando a velocidade de avanço (f). Valores inferiores a (f) = 11,2 mm/min e maiores que (f) = 63,0 mm/min não foram testados, pois o valor mínimo e máximo estabelecidos já apresentavam danos superficiais excessivos na peça, especialmente o aparecimento de pequenos vazios

caracterizados como sendo destacamentos de aglomerados de grãos do material, considerados parâmetros inadequados.

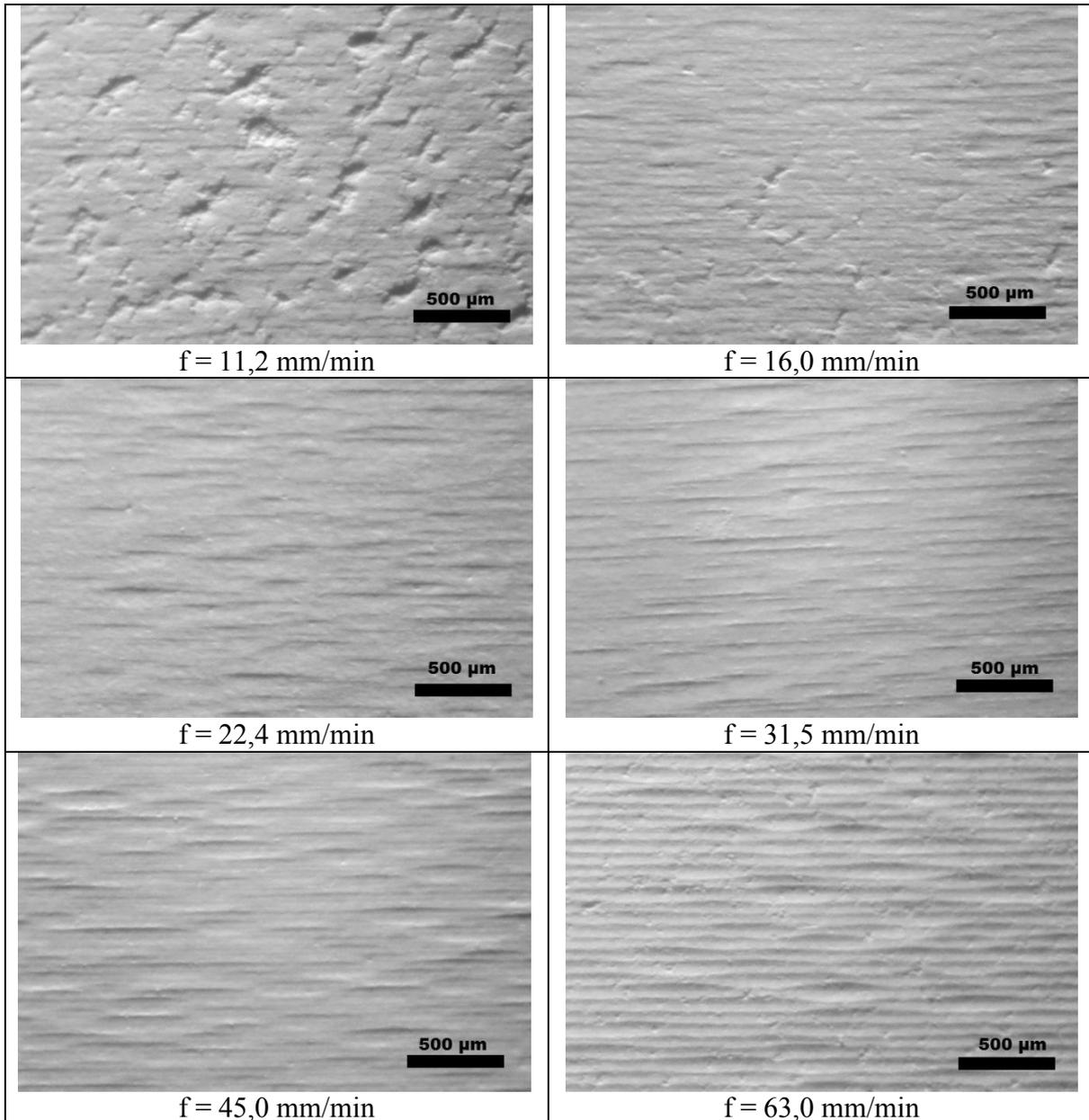


Figura 4.4 - Aspecto visual da condição de usinagem (r -ponta 0,2 mm) variando (f) e mantendo fixos (a_p) = 0,25mm e (n) = 1000 RPM.

Como pode ser observado, as melhores condições obtidas foram (f) = 22,4 e 31,5 mm/min, ou seja, os valores intermediários aos pré-estabelecidos. As demais condições apresentaram danos na superfície e em alguns casos lascamento na borda do compacto, gerado no decorrer dos passes executados.

Para continuidade da seleção foi utilizada a ferramenta de corte TPGB 11 03 01 TN60, tendo somente o raio da ponta (0,1 mm) diferente da testada, com intuito de avaliar inicialmente seu desempenho durante a usinagem. Foram estabelecidos alguns valores analisando os melhores acabamentos e menores danos introduzidos nas condições anteriores. Na tentativa de melhorar o acabamento em relação aos obtidos com 1000 RPM, foi reduzida a rotação para 710 RPM, mantendo a profundidade de corte de 0,25 mm e variando a velocidade de avanço em: 16,0 - 22,4 - 31,5 - 45,0 mm/min. A figura 4.5 ilustra o acabamento utilizando estas condições.

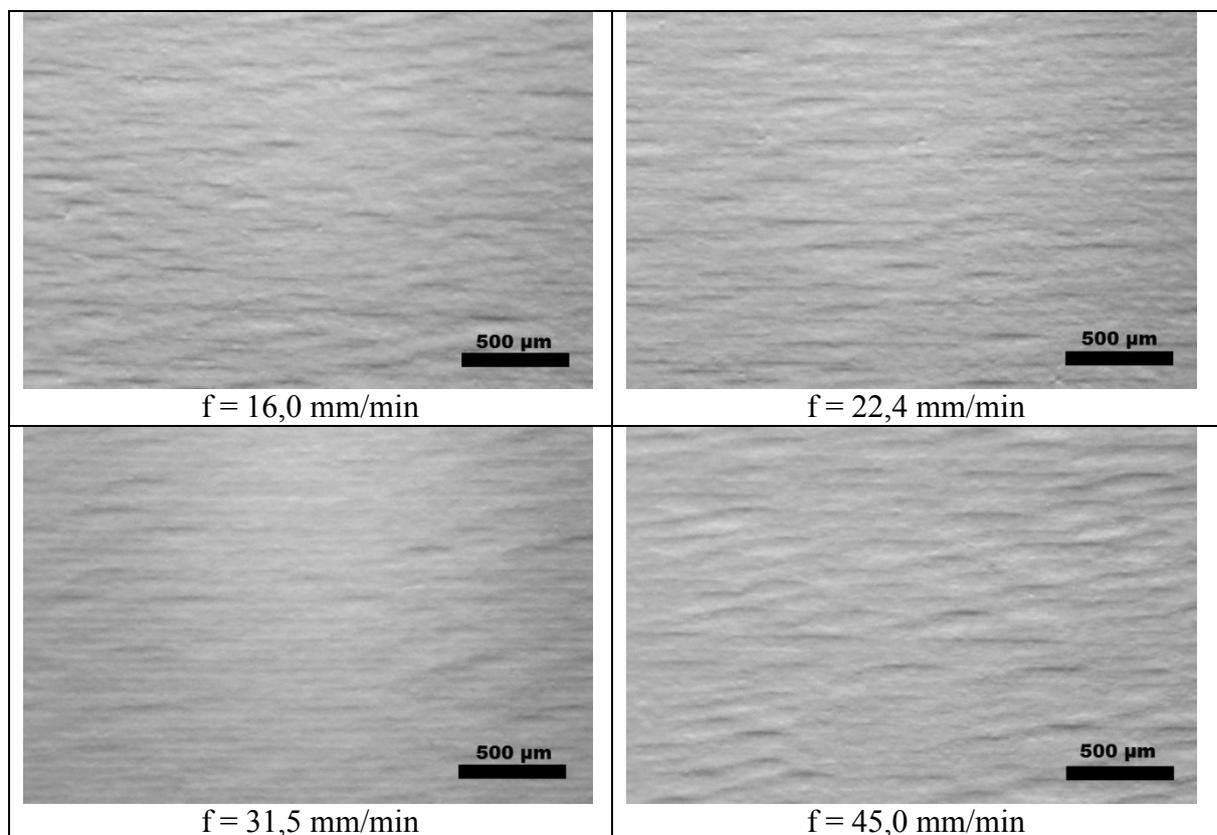


Figura 4.5 - Aspecto visual da condição de usinagem (r-ponta 0,1 mm) variando (f) e mantendo fixos (a) = 0,25mm e (n) = 710 RPM.

Entre os parâmetros utilizados foi possível verificar que ambos apresentaram um aspecto visual relativamente bom, mas as condições com velocidade de avanço de 16,0 e 22,4 mm/min foram as melhores, com poucos danos no compacto. As condições utilizando 31,5 e 45,0 mm/min apresentaram danos severos em determinados lugares. Entre os valores testados de rotação, o valor de 710 RPM apresentou melhor desempenho (figura 4.5) que a rotação de 1000 RPM (figura 4.4), sendo fixado para os demais testes.

Depois de testadas as ferramentas com r-ponta 0,2 e 0,1 mm, para o seguinte teste, usou-se o inserto TPGB 11 03 005, alterando somente o raio de ponta para 0,05 mm, com intuito de avaliar a superfície da peça utilizando tal ferramenta. Foram estabelecidos parâmetros iguais aos utilizados anteriormente, sendo fixados os valores de rotação (n) = 710 RPM e (a_p) = 0,25 mm, variando a velocidade de avanço ainda em quatro condições para verificar conceitos e selecionar a mais adequada, (f) = 16,0 - 22,4 - 31,5 - 45,0 mm/min. A figura 4.6 ilustra o acabamento superficial com os parâmetros estabelecidos.

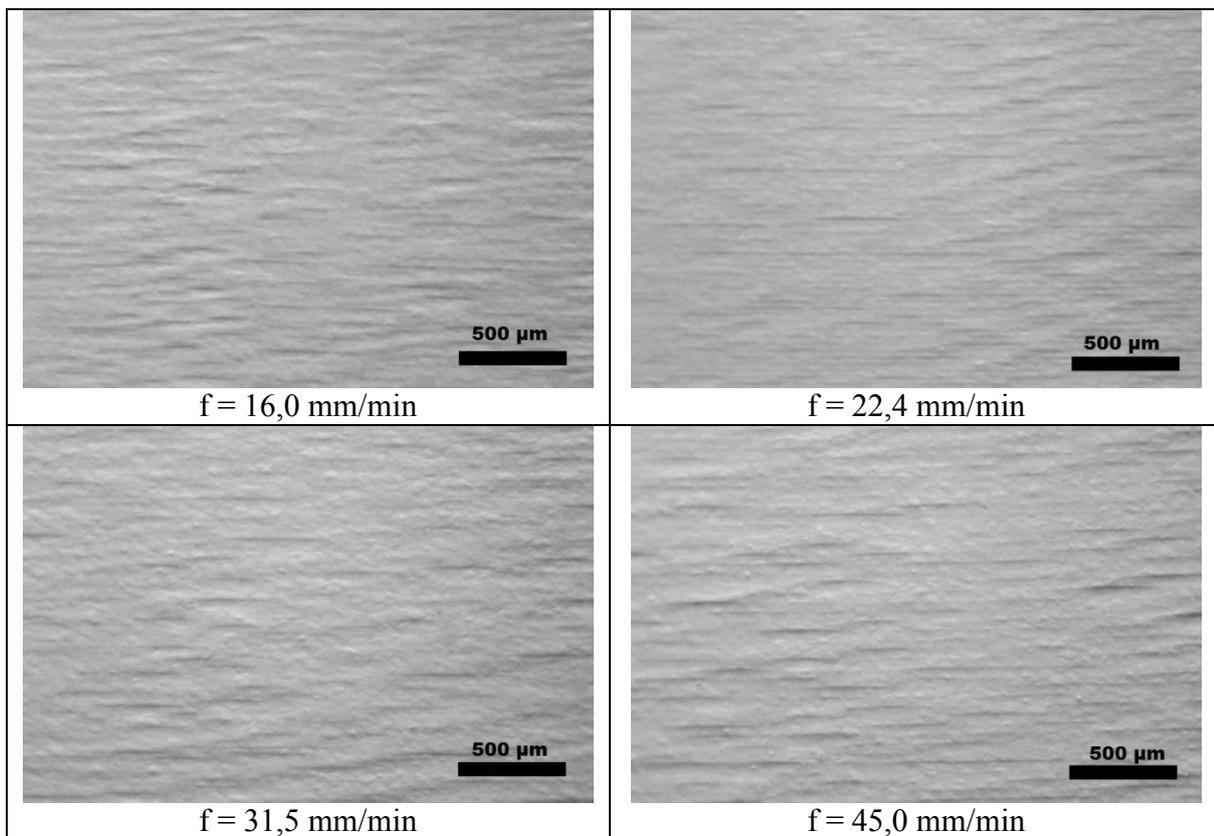


Figura 4.6 - Aspecto visual da condição de usinagem (r-ponta 0,05 mm) variando (f) e mantendo fixos (a_p) = 0,25mm e (n) = 710 RPM.

Foi verificado que as condições de velocidade de avanço de 16,0 e 22,4 mm/min apresentaram melhor acabamento superficial, mesmo resultado obtido no teste anterior. Assim, entre as duas velocidades de avanço, o valor de 22,4 mm/min apresentou aspecto visual melhor, sendo fixado para os testes.

A tabela 4.1 a seguir, exemplifica o resumo das condições testadas, colocadas em ordem e identificando cada parâmetro utilizado.

Tabela 4.1 - Condições testadas indicando cada parâmetro utilizado.

Inserto	ap	f	n
TPGB 11 03 02 TN60	1ª Seleção		
	0,5 mm	45,0 mm/min	355 RPM
	0,5 mm	45,0 mm/min	500 RPM
	0,5 mm	45,0 mm/min	710 RPM
	0,5 mm	45,0 mm/min	1000 RPM
	0,5 mm	45,0 mm/min	1400 RPM
	0,5 mm	45,0 mm/min	2000 RPM
	2ª Seleção		
	0,25mm	11,2 mm/min	1000 RPM
	0,25mm	16,0 mm/min	1000 RPM
	0,25mm	22,4 mm/min	1000 RPM
	0,25mm	31,5 mm/min	1000 RPM
	0,25mm	45,0 mm/min	1000 RPM
	0,25mm	63,0 mm/min	1000 RPM
TPGB 11 03 01 TN60	3ª Seleção		
	0,25mm	16,0 mm/min	710 RPM
	0,25mm	22,4 mm/min	710 RPM
	0,25mm	31,5 mm/min	710 RPM
TPGB 11 03 005 TN60	4ª seleção		
	0,25mm	16,0 mm/min	710 RPM
	0,25mm	22,4 mm/min	710 RPM
	0,25mm	31,5 mm/min	710 RPM
	0,25mm	45,0 mm/min	710 RPM

Sendo os símbolos utilizados:

1. ■ Condição adequada: acabamento bom e sem introdução de danos no compacto;
2. ▒ Condição intermediária: apresenta acabamento relativamente bom, mas com danos em algumas regiões do compacto;
3. □ Condição inadequada: acabamento ruim, com danos na superfície e na borda do compacto.

Em relação aos desgastes das ferramentas utilizadas, o inserto com r-ponta 0,2 mm usado na 1ª e 2ª seleção de parâmetros obteve fim de vida útil no quarto passe executado com ap de 0,5mm ou no terceiro passe com ap de 0,25 mm, independente da velocidade de corte e avanço. O desgaste se concentrou na ponta da ferramenta, causando um efeito de “lixamento” e destruindo a ponta de corte (raio de quina) rapidamente, o que levou ao fim da vida útil. As

ferramentas com r-ponta maiores em relação aos outros insertos possuem uma maior área de contato com a peça, gerando mais atrito e conseqüentemente maior desgaste. A figura 4.7 ilustra o desgaste da ferramenta após executar três passes com profundidade de corte de 0,25 mm, onde é possível verificar a destruição da ponta de corte.

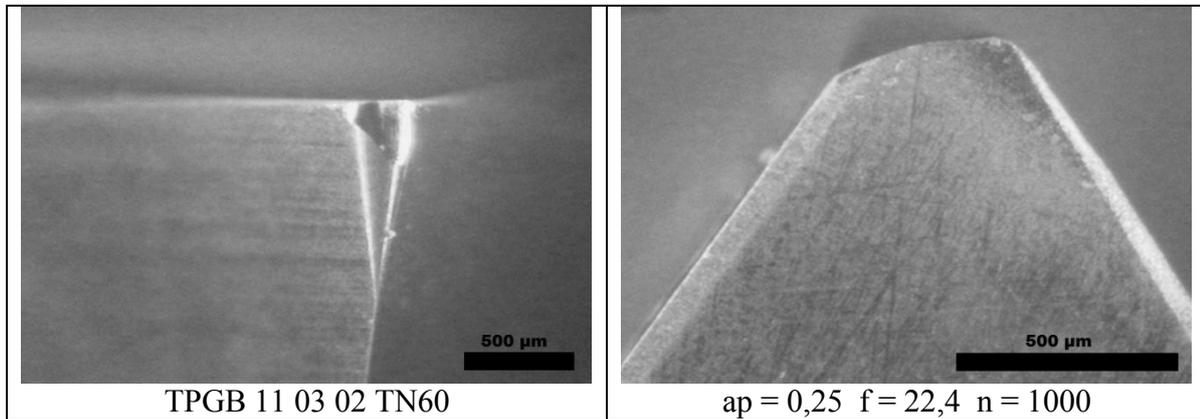


Figura 4.7 - Desgaste da ponta da ferramenta (r-ponta 0,2 mm) obtido após três passes com profundidade de corte de 0,25 mm.

Já nos testes realizados na 3ª seleção utilizando inserto de raio de ponta 0,1 mm, o desgaste da ferramenta não foi tão severo como o analisado (r-ponta 0,2 mm), mas um alto valor de desgaste, em quatro passes executados, sendo este o máximo de passes executados em cada compacto, a ferramenta apresentou um desgaste de flanco máximo de 0,36 mm (figura 4.8). Mas o principal desgaste ocorreu na ponta da ferramenta, como tendo um raio menor, o contato da ponta da ferramenta com a peça foi menor, conseqüentemente gerando menos desgaste e menor perda do raio de quina.

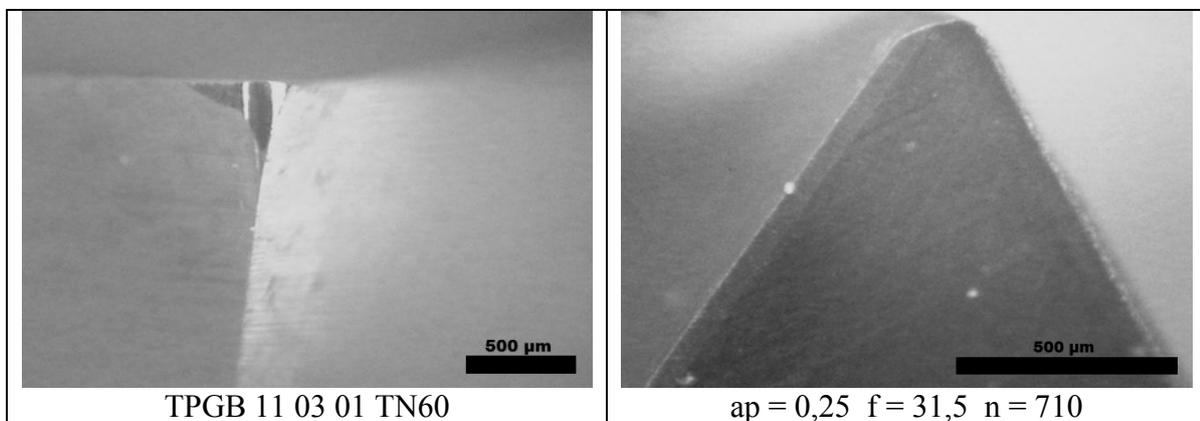


Figura 4.8 - Desgaste da ponta da ferramenta (r-ponta 0,1 mm) obtido após quatro passes com profundidade de corte de 0,25 mm.

Analisando o desgaste da ferramenta, r-ponta 0,05 mm, na quarta seleção testada, apresentou resultado semelhante ao realizado com a de raio 0,1 mm em relação ao desgaste de flanco máximo, apenas um pouco menor, com desgaste de 0,262 após quatro passes, também apresentou menor perda do raio de quina da ferramenta em relação às demais testadas (figura 4.9).

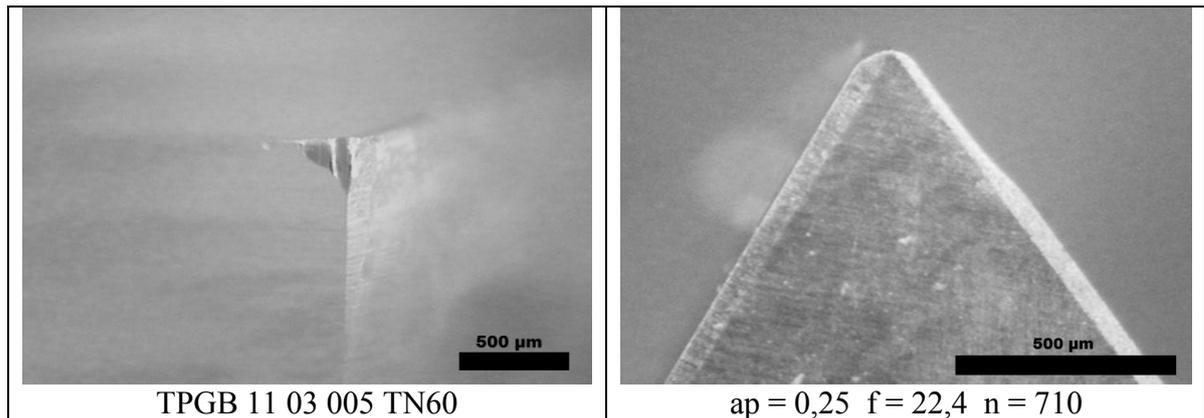


Figura 4.9 - Desgaste da ponta da ferramenta (r-ponta 0,05 mm) obtido após quatro passes com profundidade de corte de 0,25 mm.

Portanto, dos três insertos utilizados na seleção de parâmetros, a que obteve melhor resultado em relação ao desgaste foi com r-ponta 0,05 mm, mas somente com esses ensaios não é possível realmente definir qual possui menor desgaste, pois não foram avaliados com os mesmos parâmetros de usinagem. O ensaio referente a este assunto é apresentado em uma próxima seção.

Após analisado o acabamento superficial dos compactos utilizando várias combinações de parâmetros, sendo estabelecidos os valores de velocidade de avanço (f) = 22,4 mm/min e rotação (n) = 710 RPM. Foram realizados ensaios com o mesmo parâmetro para os três tipos de insertos utilizados, executando dois passes para cada condição e variando duas profundidades de cortes em 0,5 e 1,0 mm, a fim de investigar se a profundidade de corte influencia no acabamento superficial, demonstrados na figura 4.10.

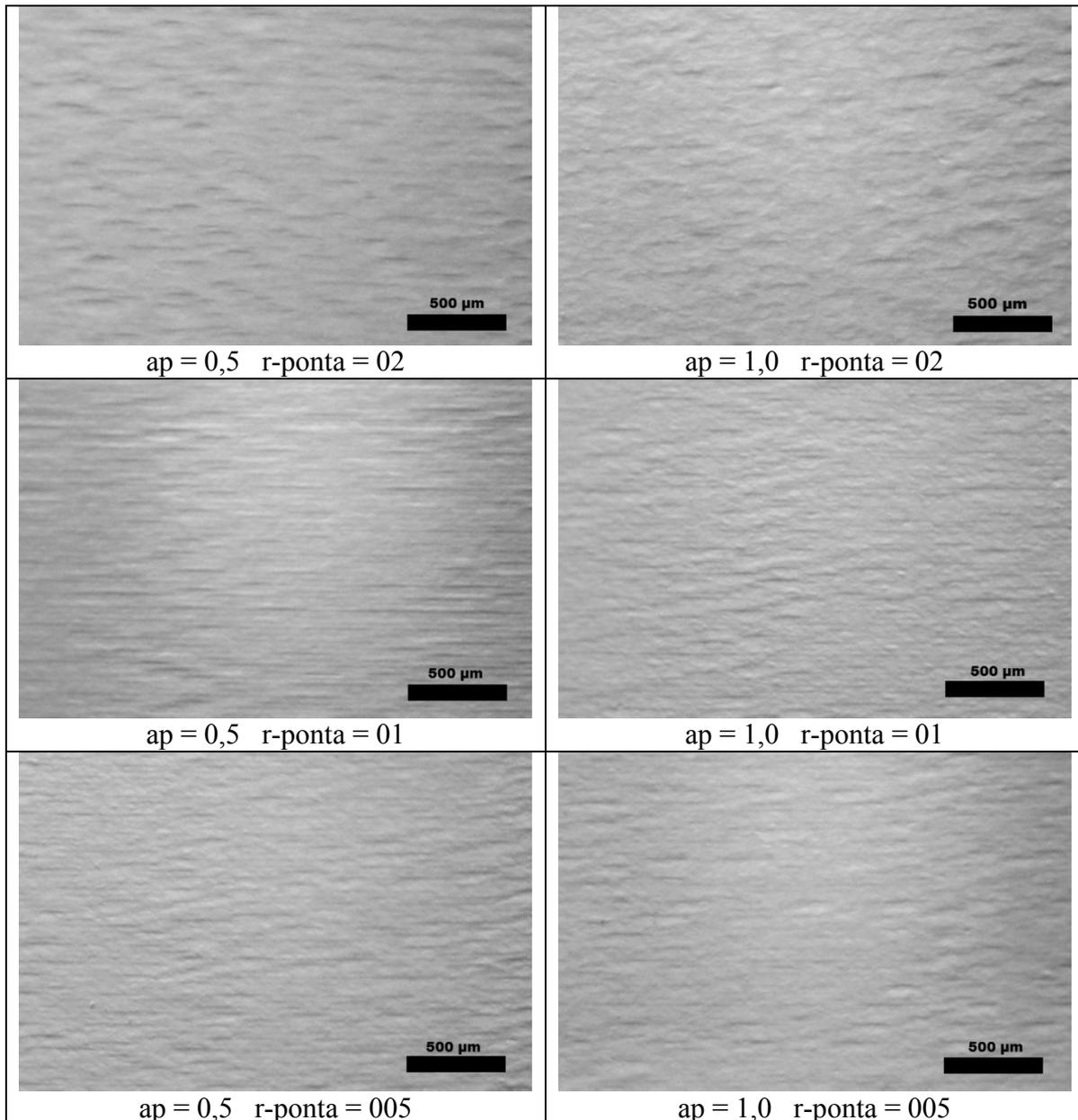


Figura 4.10 - Aspecto visual da condição de usinagem utilizando três tipos de inserto e mantendo fixos os valores: (f) = 22,4mm/min, (n) = 710 RPM, variando o (ap) de 0,5 e 1,0 mm.

Foi verificado que em ambas as condições o acabamento superficial foi semelhante, independente da profundidade de corte utilizada (0,5-1,0 mm). Em todas as condições testadas obtiveram o acabamento superficial foi satisfatório, como também não houve danos na borda do compacto no decorrer de dois passes executados. Dessa forma, a melhor superfície obtida na usinagem em relação à rotação (n), sendo esta variável responsável pela influência da alteração da velocidade de corte, foi de 710 RPM, e para velocidade de avanço, selecionou-se 22,4 mm/min. Em relação à profundidade de corte, com os resultados parcialmente obtidos,

quanto maior o ap estabelecido, menor foi a perda do raio de ponta da ferramenta, pois o desgaste ocorreu em maior parte no flanco da ferramenta, e também, conseqüentemente menor a quantidade de passes para chegar ao valor final estabelecido, aumentando a durabilidade da ferramenta e reduzindo o tempo de usinagem.

4.2 Seleção e Análise da Profundidade de Corte

Foram realizados ensaios com o inserto de raio de ponta da ferramenta de 0,05 mm, escolhido pelo fato da ferramenta de corte apresentar maior durabilidade em testes realizados anteriormente. Para cada condição, foi utilizada uma nova aresta de corte da ferramenta, ou até atingir o valor de desgaste máximo de flanco. O objetivo foi verificar o efeito da profundidade de corte na integridade superficial dos compactos e estabelecer a profundidade de corte adequada. A figura 4.11 ilustra o fluxograma do processo.

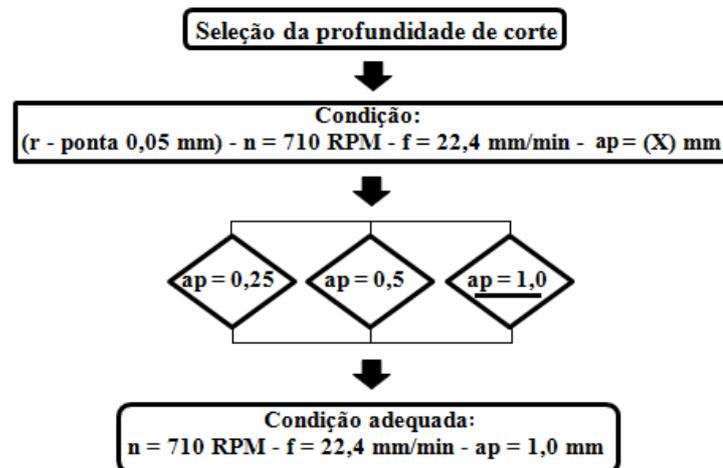


Figura 4.11 - Fluxograma.

Para executar o ensaio, foram estabelecidas três condições, alterando somente a profundidade de corte e, mantendo fixos os demais valores: $(f) = 22,4$ mm/min e $(n) = 710$ RPM. Os ensaios foram conduzidos segundo três valores diferentes de profundidade de corte (ap): 0,25 mm, 0,5 mm e 1,0 mm.

Para cada valor estabelecido determinou-se o número de passes necessários para obter o valor de remoção de material de 4 mm no diâmetro do compacto. Assim, para a primeira

condição foi estabelecido oito passes, quatro passes para a segunda e dois passes na terceira condição. Também, foi medida a temperatura ambiente e a temperatura durante o processo de usinagem através de termopares, com intuito de verificar se a temperatura influencia no processo, bem como no desgaste da ferramenta.

Durante os ensaios, na primeira condição, não foi possível realizar os oito passes estabelecidos, somente seis passes. Notou-se que o compacto verde apresentou quebras e lascamento ao redor da borda superior, sendo inviável continuar o processo. Na segunda condição após a usinagem, verificou-se que o compacto apresentou lascamento na borda em determinadas partes ao final dos quatro passes, para se obter uma remoção de 4 mm no diâmetro. Desta forma, a remoção de material com profundidade de corte de 0,25 e 0,50 mm foram consideradas inadequadas neste estudo.

Por outro lado, na terceira condição testada, com profundidade de corte de 1,00 mm, não se verificou danos na borda ao final dos passes realizados, obtendo-se uma remoção de 4 mm no diâmetro, sendo portanto adequada para uso. Dois dos maiores desafios na usinagem de materiais cerâmicos a verde está em evitar lascamento na borda de uma peça de trabalho e prevenir o desenvolvimento de trincas internas causadas por tensões de compressão (HERLINGER et al., 2006).

A figura 4.12 ilustra os compactos após a usinagem com cada profundidade de corte utilizado no processo, sendo possível verificar os danos gerados na borda do compacto (lascamento) nas condições utilizando 0,25 e 0,50 mm.

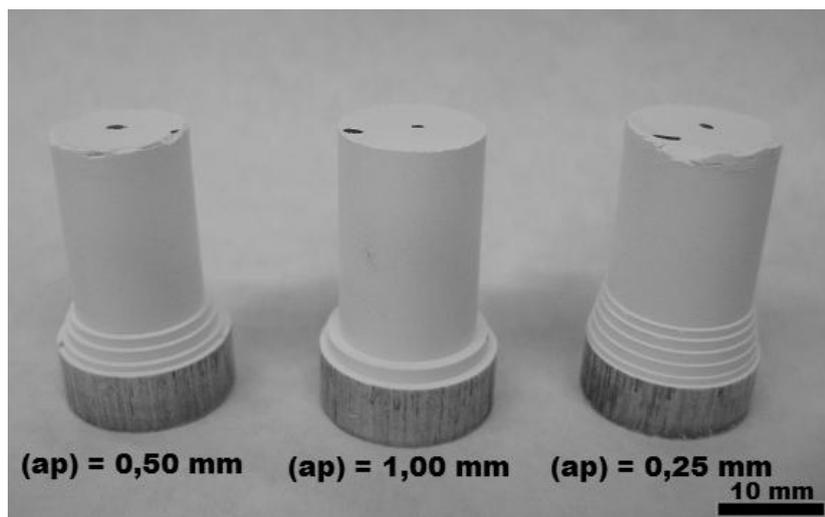


Figura 4.12 - Aspecto visual dos compactos utilizando três profundidades de corte diferentes mantendo a rotação e velocidade de avanço fixo.

Na figura 4.13 é ilustrada parte da borda (superior e inferior) do compacto verde em cada condição utilizada, sendo possível verificar os danos introduzidos na borda superior durante o processo de usinagem na primeira (a) e segunda (b) condições, já referente a borda inferior, foram introduzidos poucos danos, localizados principalmente na primeira condição (a), as demais condições (b - c) praticamente não houve danos na integridade da borda. Por outro lado, na figura 4.14, no acabamento superficial das respectivas condições, é observado que ambas apresentaram bom acabamento, independente da profundidade de corte utilizada.

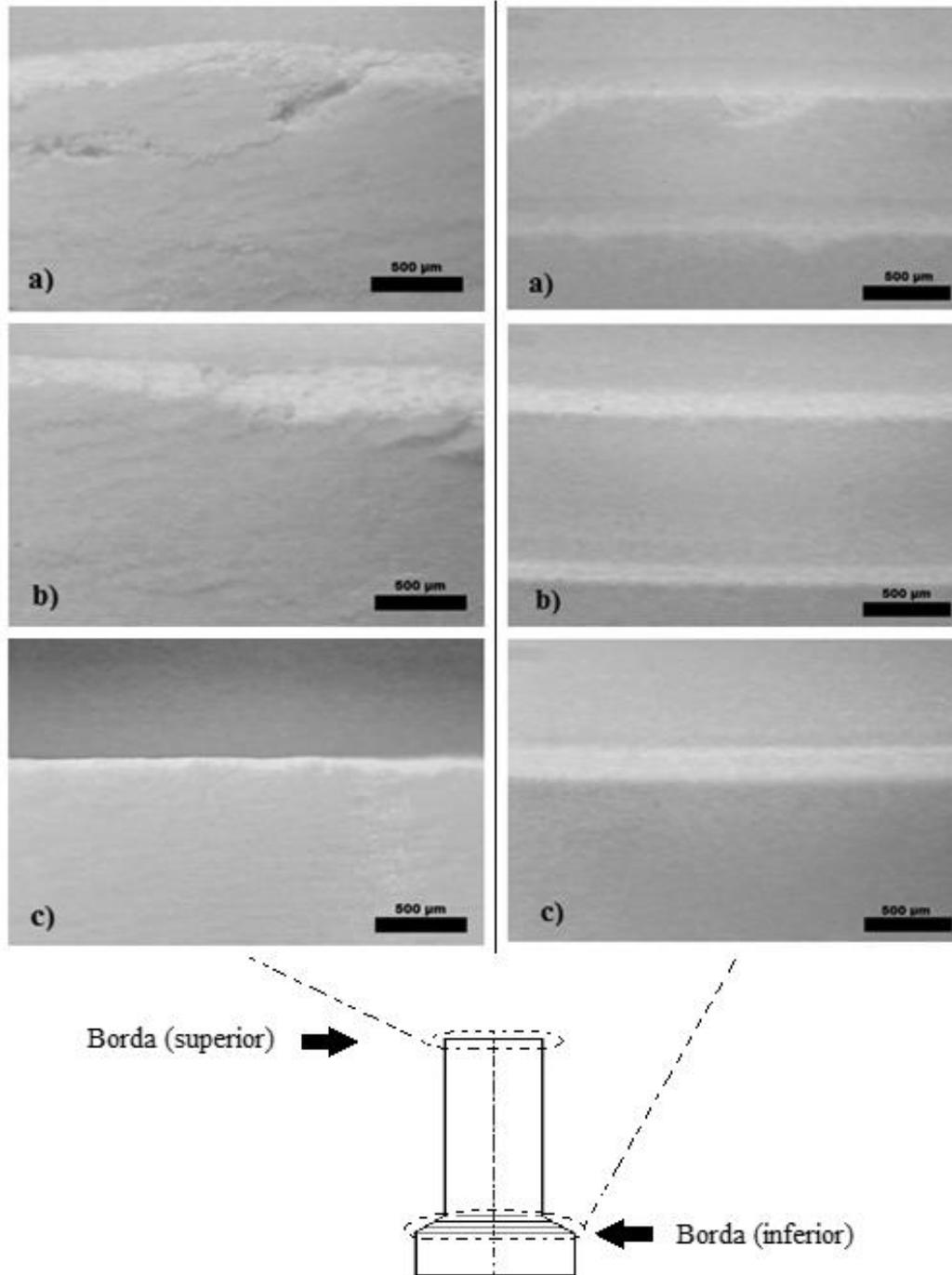


Figura 4.13 - Aspecto visual da borda (superior e inferior) do compacto em cada condição após os passes executados, variando a profundidade de corte, sendo: a) = 0,25 mm, b) = 0,50 mm e c) = 1,0 mm.

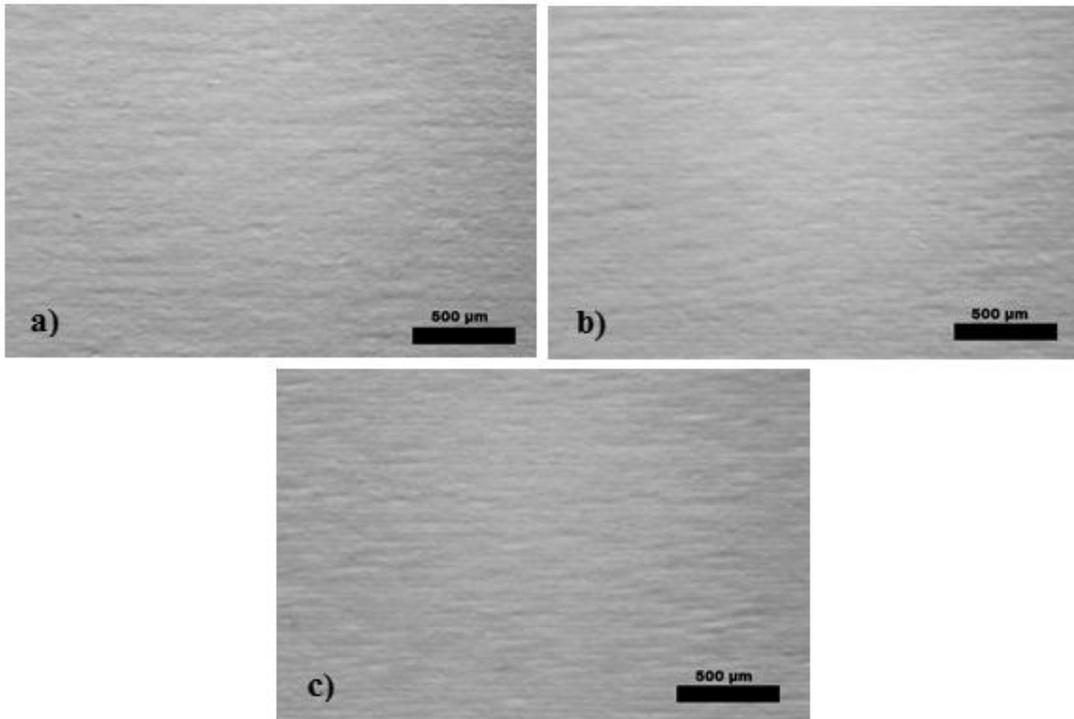


Figura 4.14 - Aspecto visual da superfície do compacto em cada condição após os passes executados, variando a profundidade de corte, sendo: a) = 0,25 mm, b) = 0,50 mm e c) = 1,0 mm.

Portanto, foi verificado um bom acabamento superficial nas três condições de usinagem, mesmo tendo apresentado em duas condições danos severos na borda dos compactos. Assim, a profundidade de corte não teve efeito sobre a qualidade da superfície, sendo a velocidade de avanço e de corte que influenciaram o acabamento superficial das peças usinadas, como visto na seleção de parâmetros. O ideal é que a superfície final deve ser alcançada com a menor quantidade de passes possíveis (SHEPPARD, 1999).

A rugosidade superficial foi mensurada para uma melhor avaliação do acabamento superficial, sendo medidos o R_a (μm) e R_q (μm) dos três compactos usinados, conforme os resultados apresentados na tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Rugosidade mensurada dos compactos a verde variando a profundidade de corte.

Condição	a_p (mm)	Passes (mm)	R_a (μm)	R_q (μm)
A	0,25	6	0,705	0,898
B	0,50	4	0,499	0,623
C	1,00	2	0,564	0,754

A menor rugosidade obtida foi utilizando ap de 0,5 mm, sendo que a condição adequada de ap 1,00 mm ficou intermediária, porém com valores próximos. A profundidade de corte de 0,25 mm apresentou a maior rugosidade. Uma explicação para a condição (A) apresentar maior rugosidade superficial é devido ao elevado valor de desgaste da ponta da ferramenta (figura 4.16), levando a perda parcial do raio de ponta da ferramenta de corte, sendo esta a condição que executou maior quantidade de passes. Pois de acordo com o aumento do desgaste da ferramenta, há uma possibilidade maior de introduzir danos superficiais no compacto.

Em relação aos esforços, na figura 4.15 são identificadas as forças para cada condição estabelecida, onde: F_z = força de avanço (F_f), F_x = força de corte (F_c) e F_y = força de profundidade (F_p).

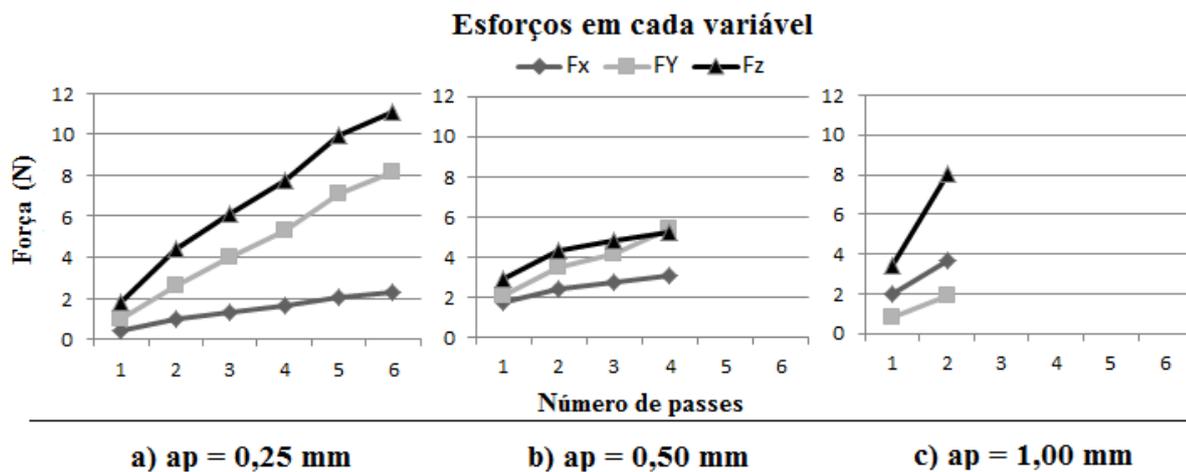


Figura 4.15 - Média dos esforços mensurados em cada condição utilizando r-ponta 0,05 mm e variando a profundidade de corte.

Foi verificado que, a cada passe executado no compacto verde, os esforços aumentam, ou seja, sempre no passe seguinte houve maiores valores em todas as direções mensuradas (F_x , F_y e F_z). O motivo que levou ao incremento nos esforços é o desgaste constante da ferramenta de corte.

Na primeira e segunda condições, verificou-se a mesma ordem de cada variável (F_x - F_y - F_z), sendo os maiores esforços na força de avanço (F_z), força de profundidade (F_y) e força de corte (F_x) respectivamente. Já para a terceira condição a variável que com maiores esforços medidos, também foi a força de avanço (F_z), mas as outras duas forças seguintes

ficaram invertidas, sendo a força de profundidade (F_y) com menores incrementos e a força de corte (F_x) intermediária.

Foi possível observar que quanto maior a profundidade de corte utilizada, maiores foram os incrementos de força de corte, devido ao maior contato (atrato) da ferramenta de corte com a peça durante a usinagem. A condição com menor valor de profundidade de corte (0,25 mm), no primeiro passe, apresenta esforços iniciais menores em relação às outras condições, com uma profundidade de corte maior, mas no decorrer dos passes, os esforços aumentam progressivamente, até chegar o valor de remoção final, sendo maior do que a condições com profundidade de corte de 1,00 mm.

Uma possível explicação para a força de avanço (F_z) ter sido maior em todas as condições, é que devido ao esforço de compressão exercida sobre a ferramenta na direção axial ser maior do que à força tangencial, ou seja, gerando maiores incrementos de força de avanço do que em relação à força de corte, sendo a força de corte baixa durante o processo, pois a resistência da peça a verde é extremamente baixa, podendo ser de 2 até 8 MPa.

O desgaste de flanco máximo da ferramenta de corte em cada condição pode ser verificado na figura 4.16, na qual a cada passe teve um aumento progressivo de desgaste, uma relação quase linear entre desgaste e número de passes.

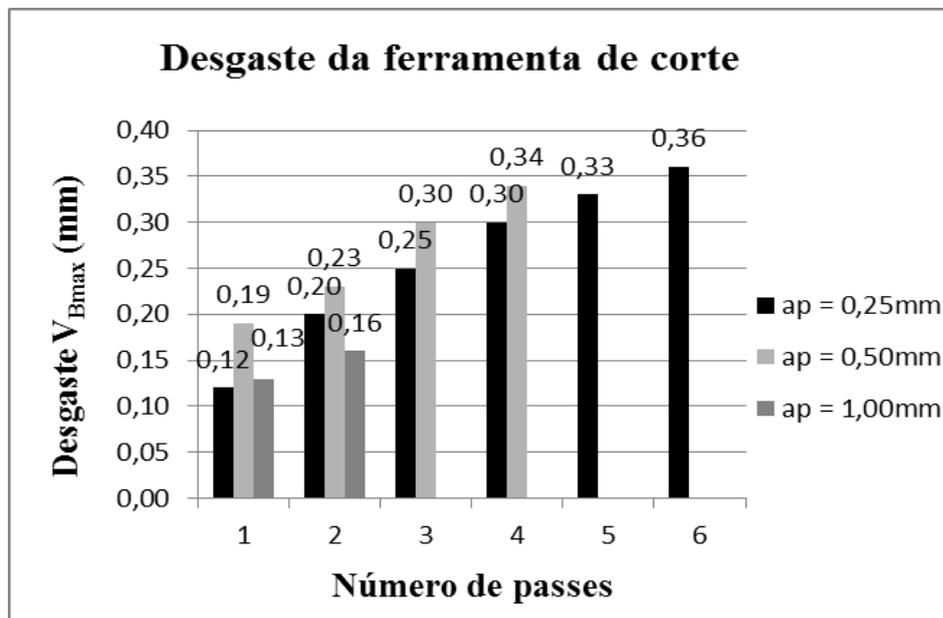


Figura 4.16 - Desgaste de flanco VB max da ferramenta de corte em função dos números de passes executados, utilizando três profundidades de corte diferentes.

Foi verificado que a maior profundidade de corte apresentou o menor desgaste em relação às demais, para se alcançar a remoção estabelecida. A primeira condição teve desgaste inicial menor, mas no decorrer dos passes teve aumento de forma rápida, o desgaste se concentrou na ponta da ferramenta utilizando a profundidade de corte de 0,25 mm e 0,5 mm, o que levou a um desgaste excessivo. Quanto maior a profundidade de corte utilizada, menor a concentração de desgaste na ponta da ferramenta, aumentando a durabilidade da ferramenta no decorrer de seu uso, como ocorreu na condição utilizando ap de 1,0 mm. Além disso, a duração do contato entre a peça e a ferramenta durante a usinagem também influenciaram no desgaste.

A figura 4.17 demonstra a ferramenta de corte após o processo de usinagem, sendo verificado maior desgaste de ponta de ferramenta em valores de profundidade de corte menores.

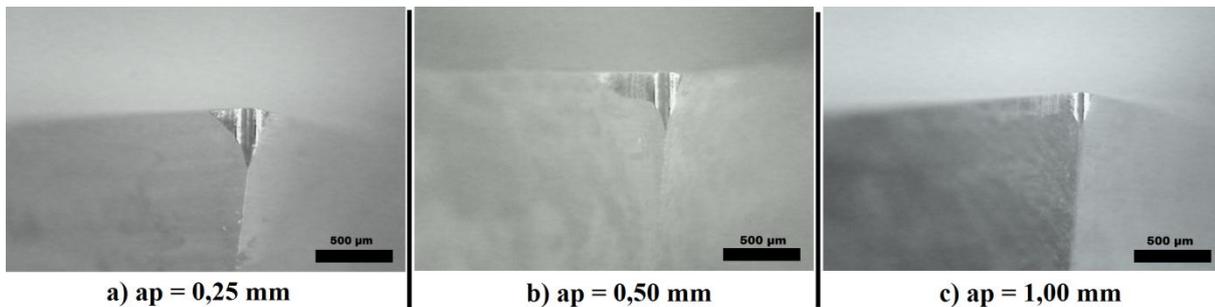


Figura 4.17 - Desgaste gerado na ferramenta após os passes executados.

Assim, devido ao aumento do desgaste da ferramenta promover incremento nos esforços, foi verificado que é benéfico a menor quantidade de passes para chegar às dimensões desejadas, pois reduz o desgaste. O desgaste da ferramenta foi causado pela natureza abrasiva das partículas da cerâmica. O cavaco produzido pelo torneamento foi predominantemente no formato de pó e em pequenos aglomerados de partículas com formatos aleatórios (figura 4.18).

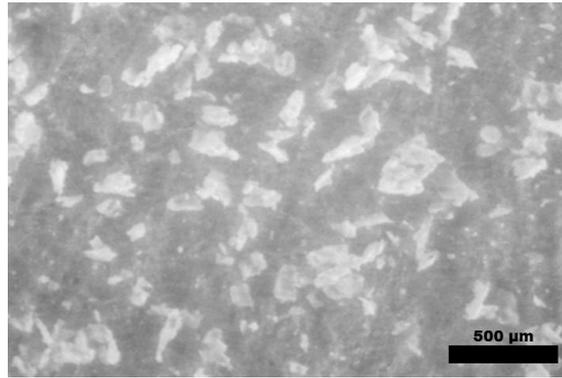


Figura 4.18 - Cavaco produzido durante a usinagem.

Em relação à temperatura, a figura 4.19 mostra as temperaturas médias, máximas e mínimas registradas durante o processo de usinagem nas diferentes condições em cada passe, onde é observado que a temperatura máxima não ultrapassou os 34,5 °C, sendo que a cada passe executado, registrou-se um aumento na temperatura.

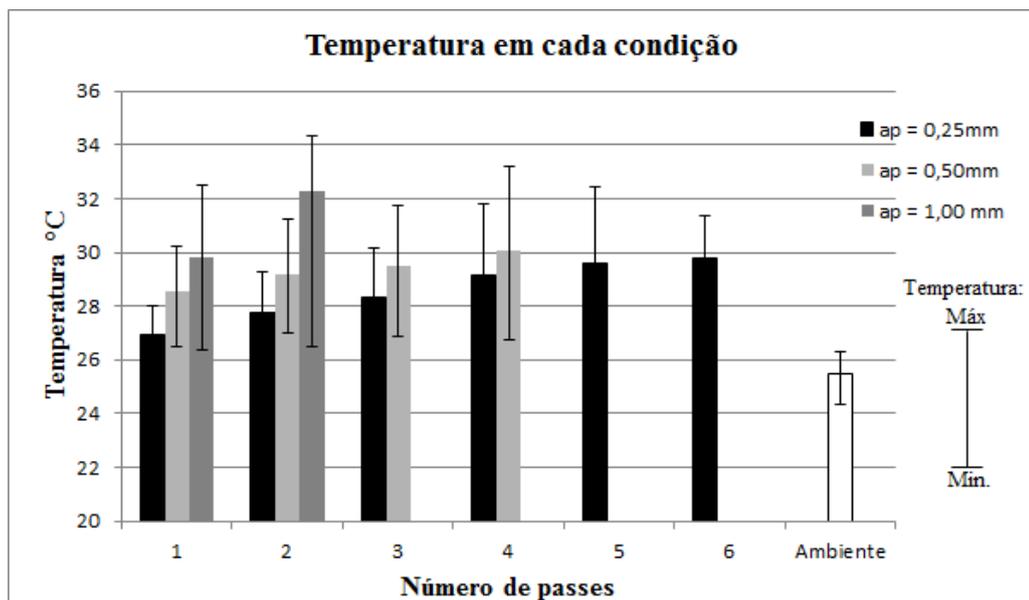


Figura 4.19 - Temperaturas mensuradas em cada condição.

Ambas as condições tiveram resultados parecidos, a temperatura média registrada na ferramenta de corte em todos os ensaios foi de 29,2 °C, pouco em relação à temperatura ambiente (25,4 °C), tendo máximo de variações de até 36%, ou seja, o processo de usinagem não influenciou no incremento da temperatura, independente dos parâmetros utilizados.

Quanto maior a profundidade de corte utilizado, maior foi a temperatura registrada, mas com valores semelhantes.

Assim, depois de realizados os ensaios e verificado o desgaste da ferramenta de corte em função da profundidade de corte, analisado a integridade da borda superior e inferior do compacto, o melhor acabamento do compacto, foi obtido com a profundidade de corte de 1,00 mm, esta profundidade de corte foi portanto selecionada para os demais ensaios.

4.3 Análise da Influência do Raio de Ponta da Ferramenta de Corte

Neste ensaio foram estabelecidos os mesmo parâmetros utilizados anteriormente para realizar a usinagem, sendo rotação de 710 RPM, vel. de avanço de 22,4 mm/min e profundidade de corte de 1,0 mm. O objetivo deste ensaio foi verificar a influencia dos esforços de usinagem e da integridade superficial do compacto, variando três raios de pontas diferentes da ferramenta de corte (0,2 - 0,1 - 0,05 mm). Analisando se os esforços e o acabamento se alteram conforme a modificação no raio, como também, análise do desgaste da ferramenta, e da temperatura da ferramenta captada pelo microtermopar. Foram estabelecidos três passes para obter o diâmetro final do compacto de 9 mm, sendo o diâmetro inicial de 15 mm. A figura 4.20 ilustra o fluxograma do ensaio.

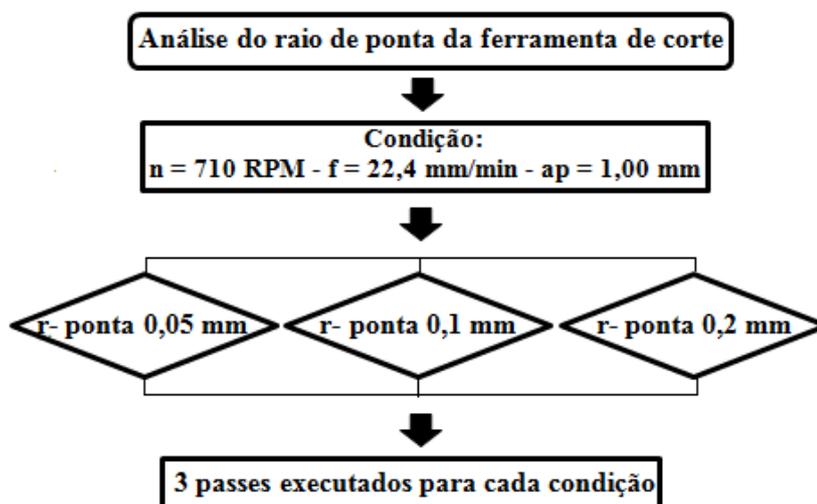


Figura 4.20 - Fluxograma

Todos os passes foram realizados, porém o compacto se tornou frágil devido ao fato de ter diminuído consideravelmente o diâmetro da peça para a força aplicada pela ferramenta de corte. A geração de danos e consequentemente a quebra do compacto ocorreu na terceira condição, no final dos passes estabelecidos, e mesmo com a repetição do ensaio o fato tornou a ocorrer.

A figura 4.21 ilustra os esforços médios em testes feitos devido à quebra do compacto na condição utilizando o raio de ponta 0,2 mm, sendo possível verificar que os esforços seguem o mesmo padrão.

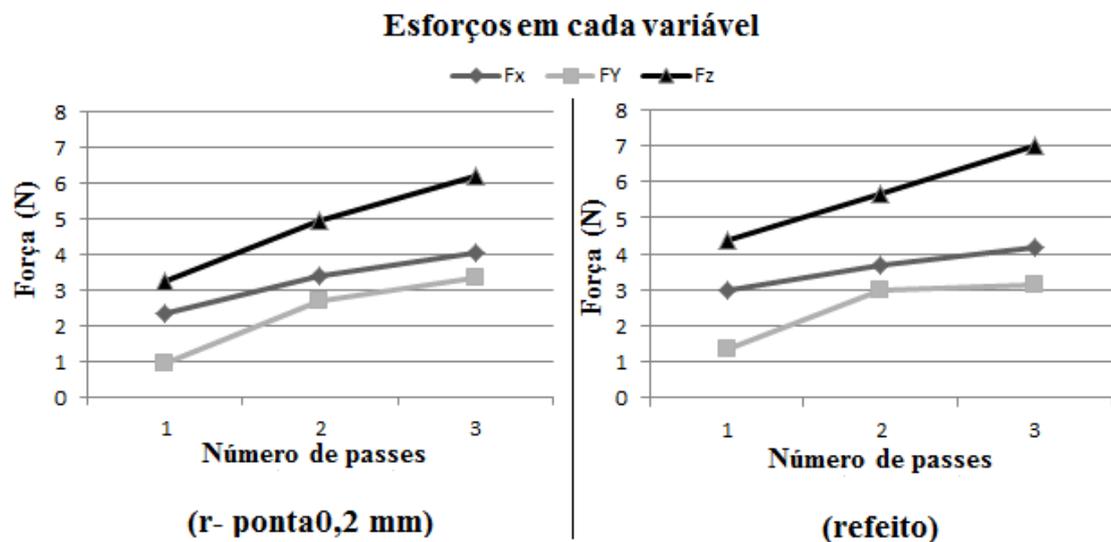


Figura 4.21 - Comparação dos esforços mensurados utilizando os mesmos parâmetros ($n = 710$ RPM, $f = 22,4$ mm/min e $a_p = 1,0$ mm).

Os dois testes realizados com as mesmas condições, apresentaram valores próximos nos três passes executados, sendo que o primeiro passe apresentou valores maiores de variação nas três variáveis (Fx, Fy e Fz) e no terceiro passe a menor variação de valores. Assim, pode ser verificado que os esforços captados pelo dinamômetro mantêm um padrão, ou seja, apresentam valores semelhantes se forem executados ensaios com as mesmas condições de usinagem.

Para verificar cada condição, a figura 4.22 ilustra os esforços médios obtidos das três condições testadas e na figura 4.23 os esforços médios de cada passe separados por variável, para melhor análise.

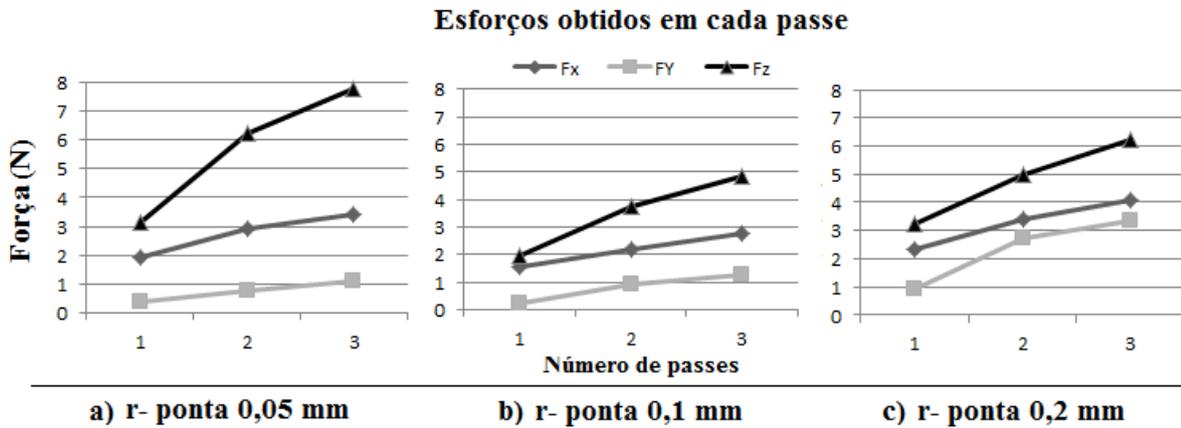


Figura 4.22 - Esforços mensurados em cada condição variando o raio de ponta da ferramenta (0,2 - 0,1 - 0,05 mm).

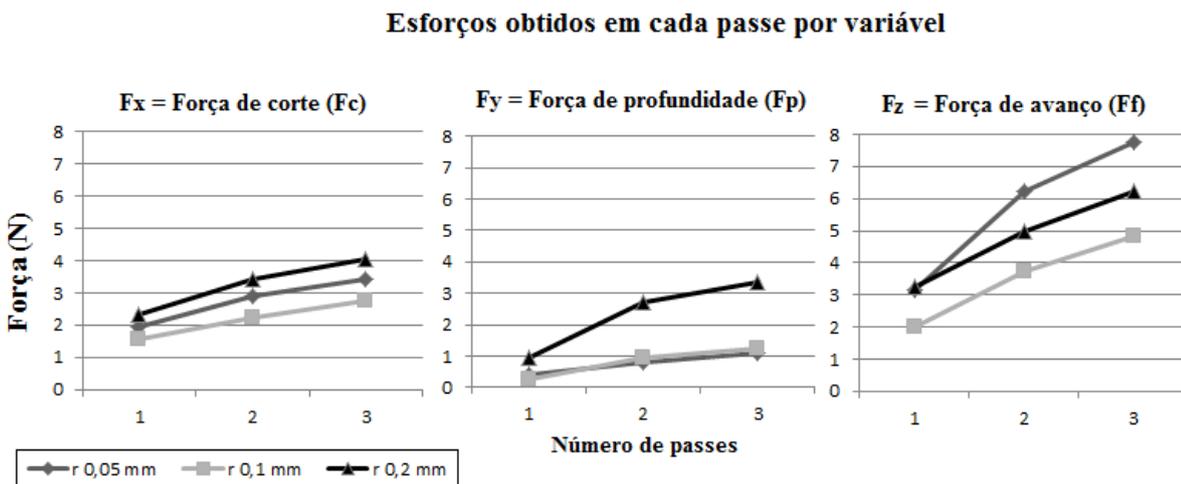


Figura 4.23 - Esforços mensurados em cada condição por variável (Fx-Fy-Fz).

Analisando as três condições, ambas apresentaram o mesmo padrão de esforços de usinagem, sendo de ordem crescente: (Fy) = força de profundidade, (Fx) = força de corte e (Fz) = força de avanço, claramente vistos no gráfico separado por variável, dados também obtidos no ensaio preliminar. A força de avanço foi maior na primeira condição, já a força de corte e de profundidade foram maiores na terceira condição testada. Se forem comparadas às três variáveis mensuradas, a segunda condição apresentou menores esforços.

Para verificar os esforços totais durante os três passes e também, se a segunda condição apresenta menores esforços, foi feito o cálculo da força resultante. A magnitude da força de corte principal (Fc) contribui diretamente para momento torçor constante aplicado

pelo eixo árvore da máquina e conseqüentemente para a potência necessária para o processo de corte. A figura 4.24 ilustra a força resultante (F) calculada para cada passe de cada condição.

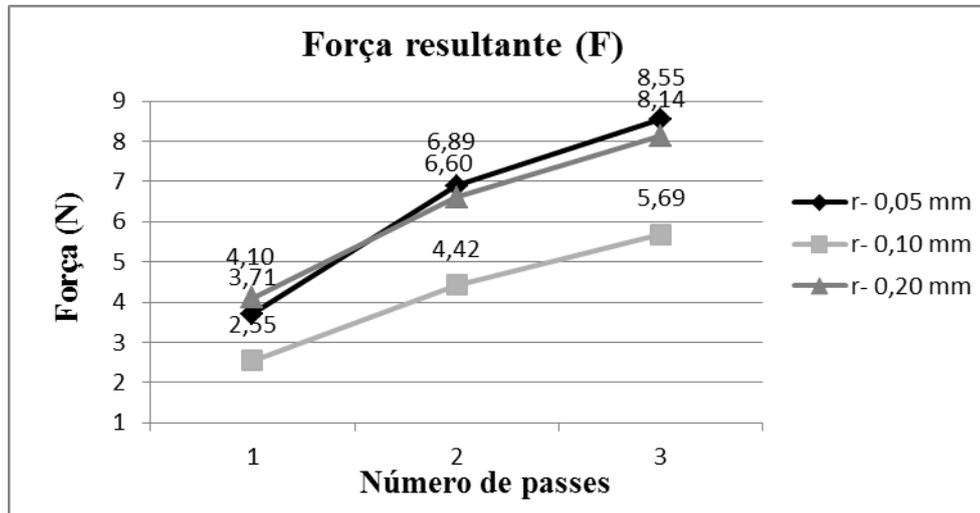


Figura 4.24 - Força resultante obtida em cada condição variando o raio de ponta da ferramenta de corte.

Como pode ser observada, a ferramenta de corte com raio de ponta 0,1 mm foi a que apresentou a menor força resultante (F) nos passes executados, já as outras duas ferramentas testadas mostraram resultados parecidos, com valores próximos. A ferramenta com r-ponta de 0,05 mm inicialmente teve força resultante menor do que a r-ponta 0,2 mm, mas no decorrer do ensaio e até o término dos passes, apresentou valor maior referente à mesma. Assim, a ferramenta com raio de ponta 0,1 mm, sendo intermediária dentre as testadas, apresentou melhor desempenho em relação aos esforços, mas tendo variação relativamente baixa. Como foi discutido anteriormente, quanto maior as forças envolvidas, maior a probabilidade de introduzir danos no compacto verde.

De acordo com Yen et al. (2004), as forças de usinagem aumentam com o aumento do raio da ponta devido ao aumento da área de contato. O aumento da degradação da ferramenta de corte resulta no aumento das forças de corte e na exacerbação da qualidade superficial. A destruição da ponta do inserto aumenta a área de contato, assim, maiores forças de usinagem são necessárias para conseguir promover a remoção do material a ser usinado.

O desgaste da ferramenta de corte é verificado na figura 4.25, mensurado o valor de flanco V_{Bmax} dos três passes realizados nas três condições testadas. Pode-se observar que a

condição que gerou menor força resultante (figura 4.24), também apresentou menor desgaste ao longo dos passes executados.

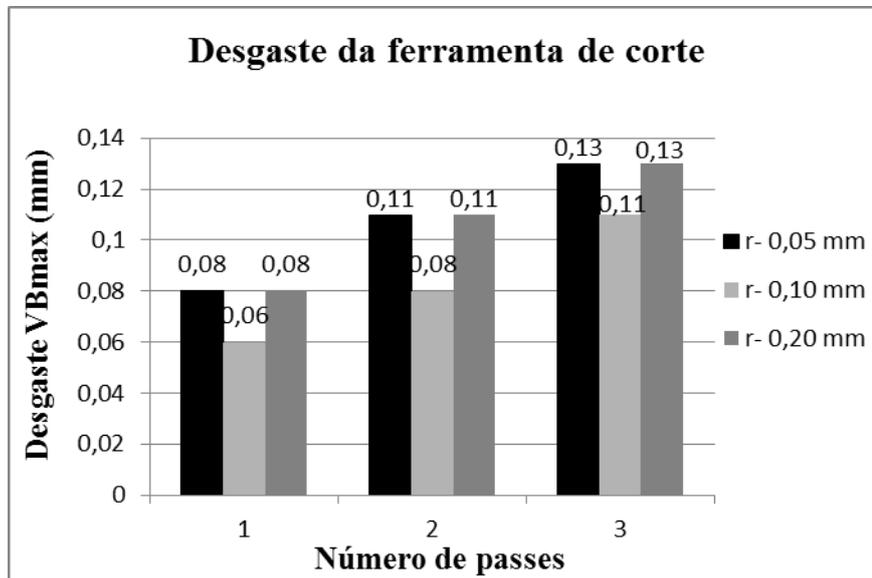


Figura 4.25 - Desgaste de flanco $V_{B_{max}}$ da ferramenta de corte em função dos números de passes executados, variado três raios de pontas (0,05 - 0,1 - 0,2 mm).

A ferramenta com r- ponta 0,1 mm apresentou menor desgaste da ferramenta em relação às demais testadas, mas com pouca variação de valores nos três passes executados, sendo que a ferramenta com r- ponta 0,05 e r-ponta 0,2 mm apresentaram os mesmos valores de desgaste. Assim, a condição com menor desgaste da ferramenta (r-ponta 0,1 mm) apresentou menor força resultante, e as condições com maiores desgaste da ferramenta, também apresentaram uma força resultante semelhante e maiores.

Pode-se concluir que o raio de ponta teve pouca influência nos esforços, apresentaram baixa variação entre os utilizados, tendo máxima variação de 2,86 N ($1 \text{ kgf} \approx 9,80665 \text{ N} / 1 \text{ N} \approx 0,10197 \text{ kgf}$), sendo o fator que prevaleceu para o incremento nos esforços foi a diferença de valores de desgaste gerado na ferramenta.

Na figura 4.26, é ilustrado o acabamento superficial dos compactos e a rugosidade medida após dois passes executados com cada raio de ponta (0,2 - 0,1 - 0,05 mm), a condição com o menor raio de ponta apresentou o pior acabamento superficial e maior rugosidade em relação às demais condições.

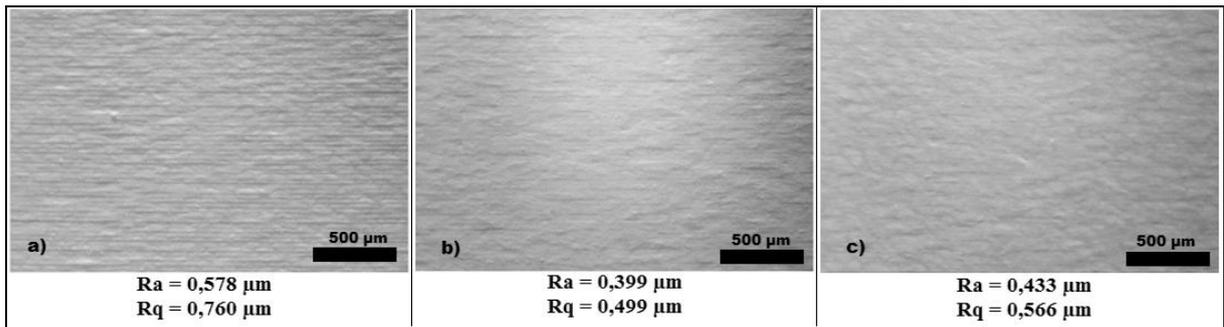


Figura 4.26 - Acabamento superficial e rugosidade mensurada em cada condição, sendo: a) r - ponta 0,05 mm, b) r - ponta 0,1 mm e c) r - ponta 0,2 mm.

Se for relacionado o acabamento e a rugosidade com o desgaste da ferramenta (figura 4.25), a condição (b), com menor rugosidade e melhor acabamento, apresentou menor desgaste, e a condição (a), que apresentou o pior acabamento superficial, apresentou maior desgaste da ferramenta de corte. Assim, foi verificado forte influência do desgaste da ferramenta não só no incremento dos esforços, mas também no acabamento superficial do compacto.

Na figura 4.27, é ilustrada parte da superfície do compacto em 3D obtido pelo microscópio confocal, nas mesmas peças e regiões mensuradas na figura anterior, com isso, pode-se observar que o menor raio introduziu alguns danos severos na superfície do compacto, e de acordo com o aumento do raio (0,1 e 0,2 mm), os danos foram diminuindo.

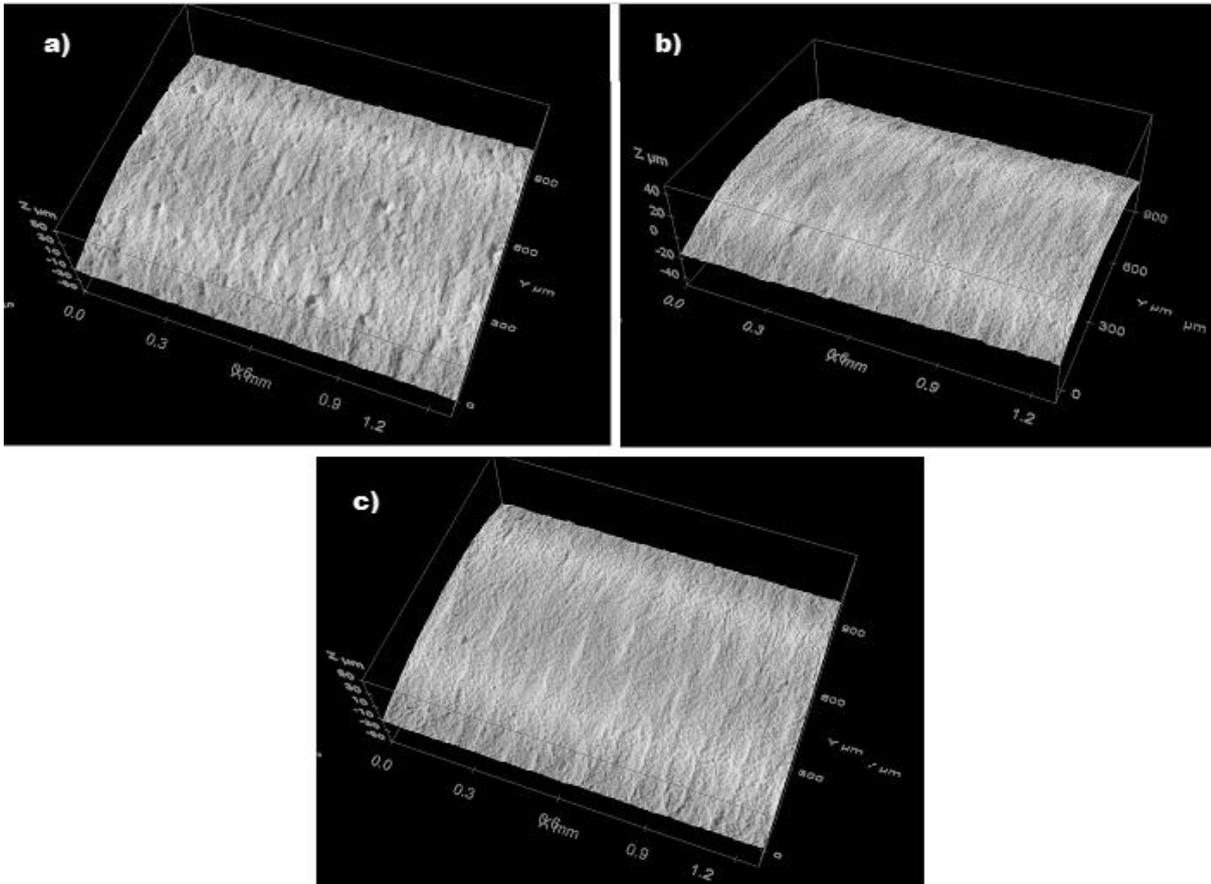


Figura 4.27 - Superfícies do compacto em 3D mantendo os mesmos parâmetros de corte alterando somente o raio de ponta, sendo: a) 0,05 mm - b) 0,1 mm - c) 0,2 mm.

Uma possível explicação para os danos severos introduzidos, é que, quando utilizado o menor raio de ponta, este pode gerar uma maior concentração de tensão, aumentando a pressão no corte, promovendo arrancamento de aglomerados. Segundo NEO, KUMAR e RAHMAN (2012), o arredondamento da ponta de corte diminui a concentração de tensões e produz um campo de tensão relativamente uniforme. A condição intermediária (r- ponta 0,1 mm) apresentou a menor rugosidade, mas com pouca diferença em relação ao maior raio de ponta, portanto, a diferença entre estas duas condições não é significativa, e o aspecto visual das mesmas são semelhantes.

A figura 4.28, demonstra a ilustração esquemática do estado de tensão em transição frágil-dúctil com o efeito do raio de ponta.

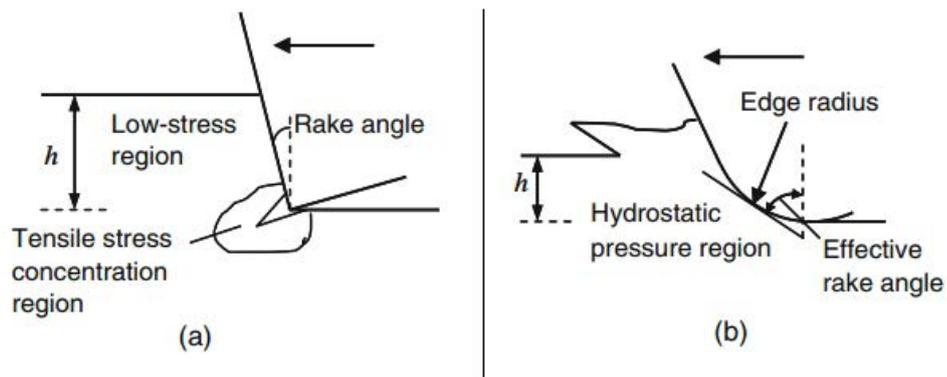


Figura 4.28 - Ilustração esquemática do estado de tensão com efeito do raio de ponta (NEO et al., 2012).

Depois de feito a análise superficial do compacto no seu estado verde, as amostras analisadas na figura 4.26 foram sinterizadas, para verificar a influência do acabamento a verde no corpo cerâmico sinterizado. A figura 4.29, ilustra o acabamento superficial dos compactos e a rugosidade obtida após a sinterização, sendo possível verificar maiores danos na condição (a) como foi visto no acabamento antes da sinterização.

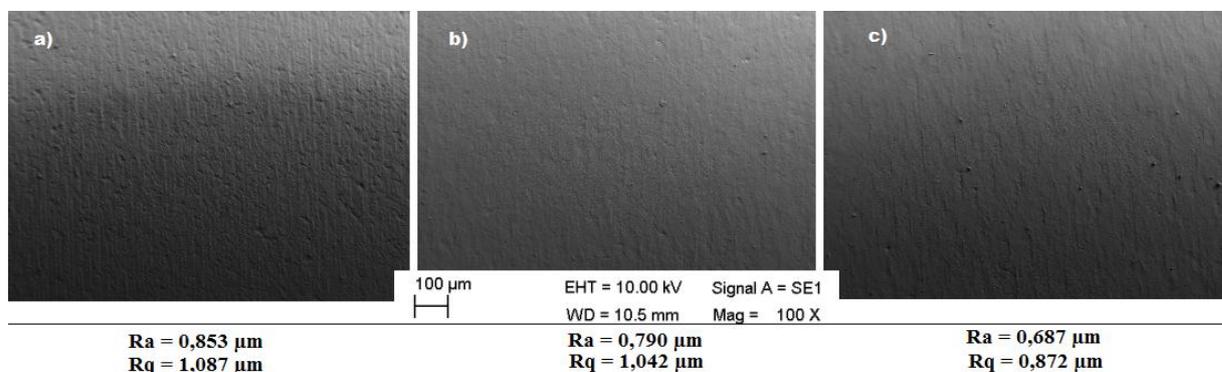


Figura 4.29 - Acabamento superficial e rugosidade mensurada em cada condição após a sinterização, sendo: a) r - ponta 0,05 mm, b) r - ponta 0,1 mm e c) r - ponta 0,2 mm.

Foi observado que o acabamento superficial da peça a verde tem influência direta na peça sinterizada, sendo que os danos gerados na peça são conduzidos após a sinterização, pois a condição que obteve maiores danos em verde, também obteve maiores danos após a sinterização e consequentemente, maiores valores de rugosidade. Também, foi analisado que com o aumento do raio de ponta, houve um melhora no acabamento, e a rugosidade foi menor

utilizando o maior raio de ponta da ferramenta. Assim, é verificado que o raio de ponta teve influência no acabamento superficial do compacto no estado verde e sinterizado.

Foi visto que a rugosidade após a sinterização teve um maior valor em ambas as condições, um fato para tal motivo é que no estado verde, a superfície pode ficar mais homogênea devido ao plastificante presente, deixando-a mais uniforme após a usinagem. Já após a sinterização, como não contém mais plastificante e ocorre à ligação das partículas gerando “pescoço” e conseqüentemente contorno de grãos, o compacto por esse motivo pode apresentar maiores valores de rugosidade superficial do que no seu estado verde.

Em se tratando da temperatura, para a análise em cada r-ponta utilizado, na figura 4.30 é ilustrado a temperatura média, máxima e mínima mensurada durante o ensaio, como também, a temperatura ambiente do local.

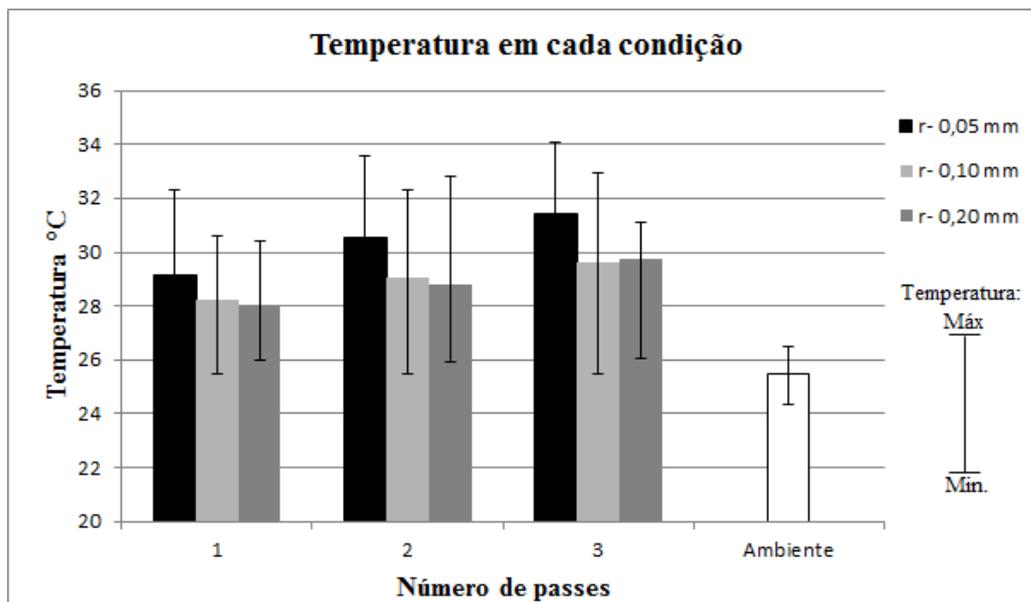


Figura 4.30 - Temperatura mensurada em função dos números de passes executados em cada condição, variado três raios de pontas (0,05 - 0,1 - 0,2 mm).

Analisando a figura 4.30, a temperatura tende a subir de acordo com o aumento de número de passes executados, como foi visto nos ensaios anteriores. A condição utilizando a ferramenta de raio de ponta 0,05 apresentou maiores valores de temperatura, por ser o menor raio utilizado, a temperatura se concentra na ponta da ferramenta, por ter menor área de contato, tendo menor dissipação de calor e conseqüentemente maiores valores registrados pelo microtermopar. Verificando a temperatura por r-ponta, a média registrada utilizando raio

de 0,05 mm foi de 30,3 °C, para o raio 0,1 mm foi de 28,9 °C e para o raio 0,2 mm obteve 28,8 °C, quanto menor o raio maior a temperatura, mas com pouca variação.

A temperatura média durante todo o processo foi de 29,4 °C, a máxima alcançada foi de 34,1 °C e a mínima de 25,4 °C, sendo o valor mínimo a média obtida da temperatura ambiente, que obteve máxima de 26,4 °C e mínima de 24,3 °C. Como visto anteriormente, a temperatura não teve influência significativa durante o processo, tendo máxima variação, em relação à temperatura ambiente, de até 34%.

4.4 Análise da influência da Rotação e Velocidade de Avanço nos Esforços

Foram realizados ensaios com parâmetros de corte distintos para verificar a influência da alteração da velocidade de corte e de avanço nos esforços gerados. Para isso, foi selecionado a condição adequada ($n = 710$ RPM, $f = 22,4$ mm/min e $ap = 1,0$ mm), utilizando o inserto de raio de ponta 0,1 mm, sendo o que apresentou menores esforços, no ensaio executado anteriormente. A figura 4.31 ilustra o fluxograma do ensaio.

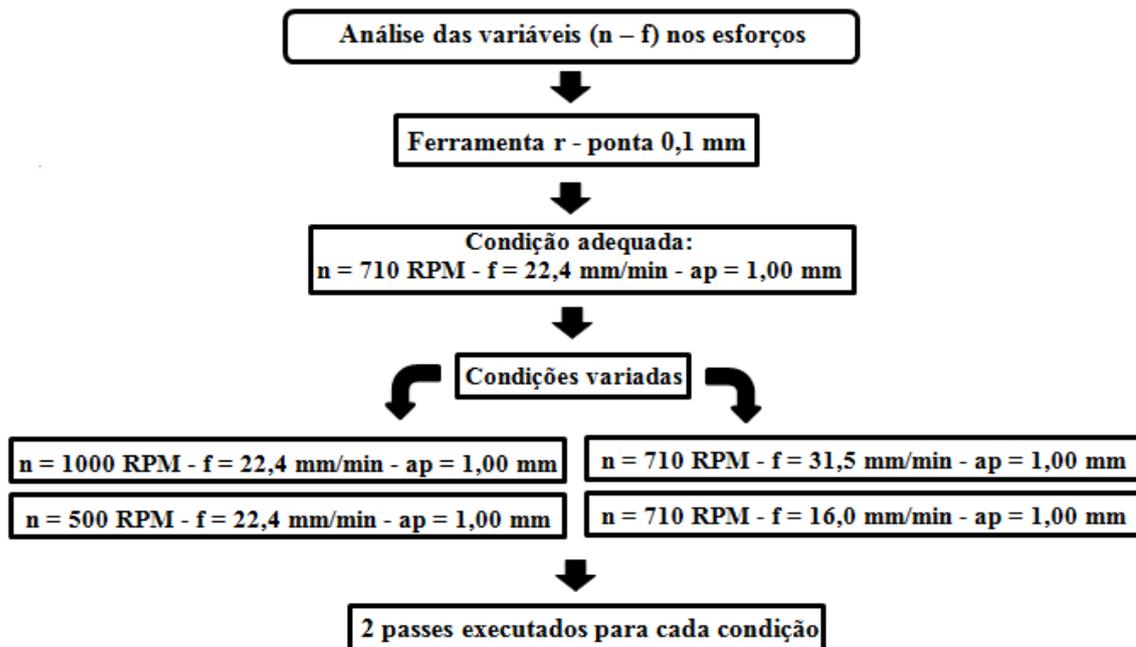


Figura 4.31 - Fluxograma.

Foram selecionadas quatro condições diferentes da adequada, duas condições variando somente a rotação e outras duas variando somente a velocidade de avanço, ambas as condições com profundidade de corte de 1,0 mm e dois passes executados, pois no terceiro passe há grande possibilidade de ocorrer a quebra do compacto devido ao aumento da força tangencial, como ocorreu anteriormente. A tabela 4.3 demonstra as condições testadas, sendo a condição (A) adequada e as demais condições, variações da mesma.

Tabela 4.3 - Condições utilizadas mantendo a profundidade de corte fixa e variando velocidade de avanço e rotação.

Condição	(f) mm/min	(n) RPM	(ap) mm
A	22,4	710	1,0
B	22,4	1000	1,0
C	22,4	500	1,0
D	31,5	710	1,0
E	16,0	710	1,0

Os parâmetros foram selecionados com um valor superior e outro inferior da velocidade de avanço adequada (31,5 - 16,0 mm/min), como também, da rotação (1000 - 500 RPM). A figura 4.32 demonstra os esforços médios de cada condição obtido nos dois passes, e na figura 4.33, os esforços médios separados por variável (F_x - F_y - F_z).

Esforços de Usinagem

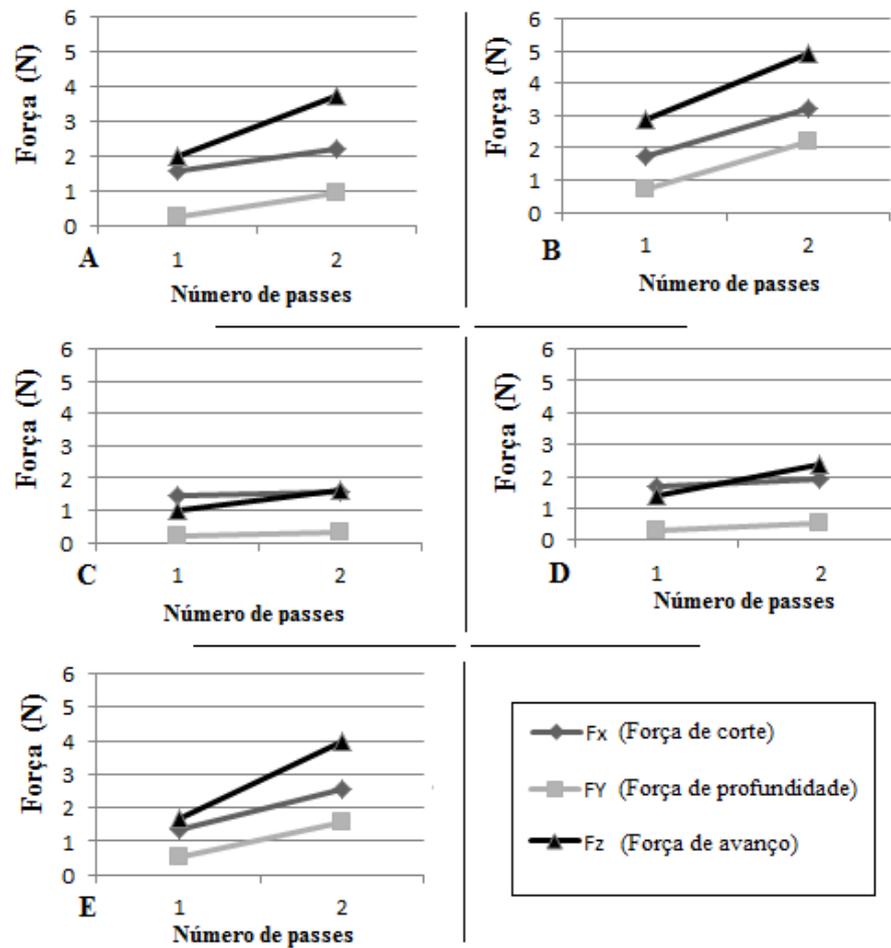


Figura 4.32 - Esforços mensurados em cada condição variando os parâmetros de corte e mantendo fixa a ferramenta de raio de ponta 0,1 mm.

Esforços obtidos em cada passe por variável

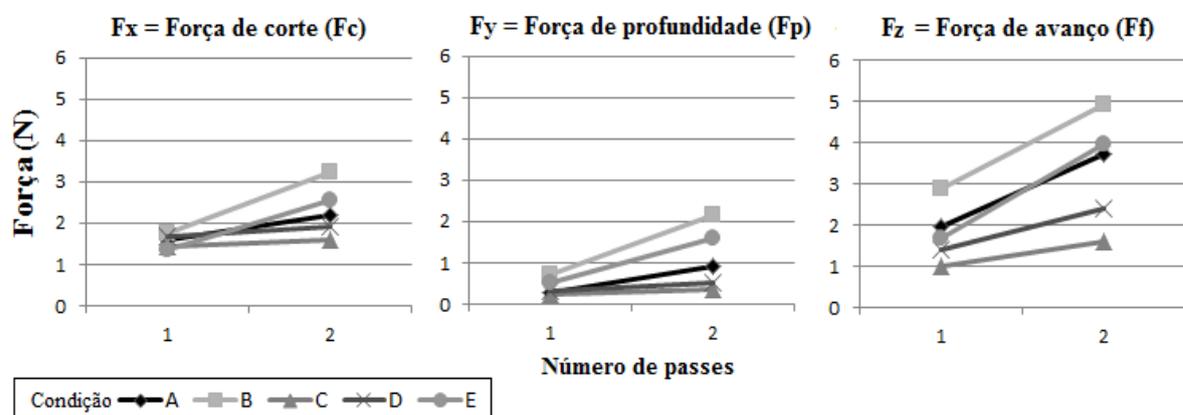


Figura 4.33 - Esforços mensurados nas condições (A- B - C- D - E) separados por variável.

Analisando os esforços em cada variável, é visto que a condição (C) apresentou os menores valores e a condição (B) os maiores valores. É possível verificar que cada condição testada gerou a mesma ordem de esforços nas três variáveis, em ordem crescente foram: (C - D - A - E - B). Em ambas as condições que apresentaram os menores e maiores valores, foram obtidos pela variação de rotação, sendo responsável pela velocidade de corte. Já na figura 4.34, ilustra a força resultante de cada condição.

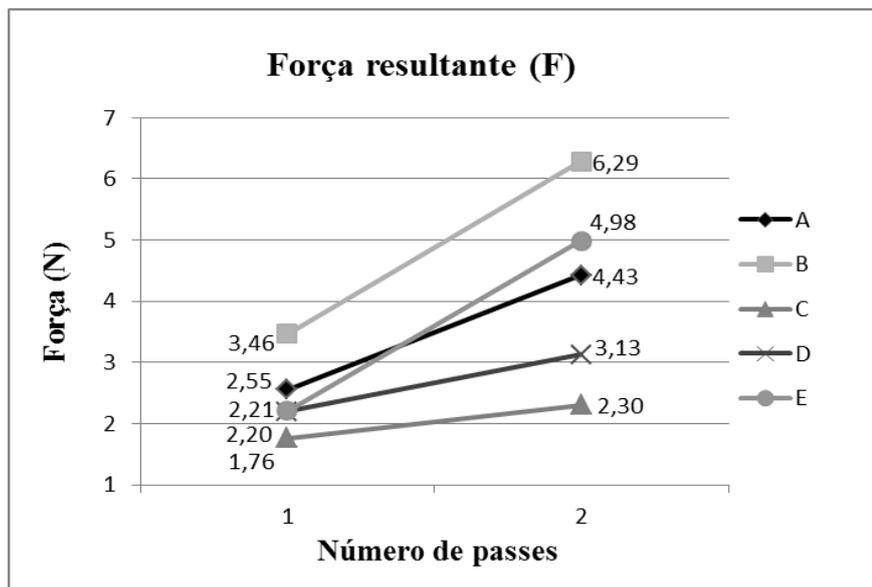


Figura 4.34 - Força resultante obtida em cinco condições de usinagem diferentes.

Em relação ao comportamento da força resultante, são verificados as mesmas condições de maiores e menores esforços, como visto nas condições por variável. Foi constatado que a condição (B) apresentou maiores esforços que as demais, o compacto usinado nesta condição apresentou trincas devido aos esforços excessivos gerados pelo aumento da força tangencial, sendo que a força tangencial pode levar a trincas médias, levando a ruptura do material. Na figura 4.35 é verificada a trinca gerada no compacto verde após a usinagem.

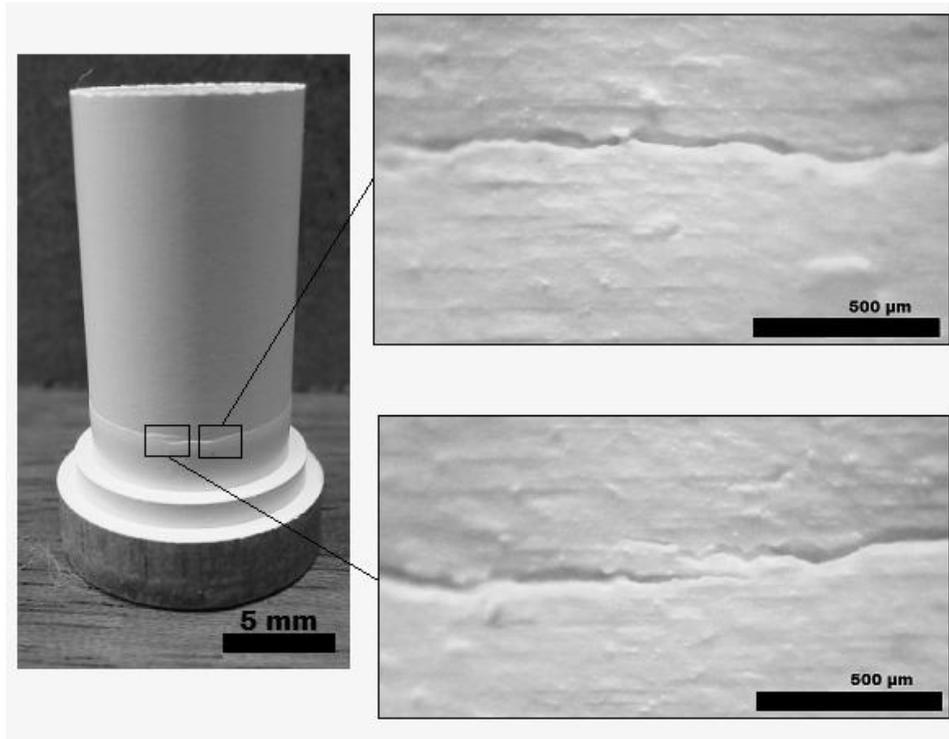


Figura 4.35 - Trinca introduzida durante a usinagem com parâmetros inadequados.

Também, foi verificado que o aumento da velocidade de avanço diminui os esforços, foi possível observar que utilizando $(f) = 31,5 \text{ mm/min}$ (D) mediu-se esforços menores do que aos comparados com velocidades de avanço de $22,4 \text{ mm/min}$ (A) e $16,0 \text{ mm/min}$ (E). Assim, quanto maior o valor da velocidade de avanço utilizado, menores os esforços gerados. Já analisando a influência da rotação (n) , os esforços aumentaram com o aumento da velocidade de rotação. Assim, a condição (C) utilizando a rotação de 500 RPM , apresentou menores esforços em relação às demais condições de 710 RPM (A) e 1000 RPM (B), ou seja, quanto menor a velocidade de rotação utilizada, menores esforços medidos.

Portando, de modo geral, os maiores incrementos de esforços foram registrados quando foram utilizados altos valores de rotação e baixos valores de velocidade de avanço, sendo a velocidade de corte o principal fator de incrementos de esforços na usinagem de cerâmica verde. Assim, entre os limites possíveis de parâmetros de corte, pode-se estabelecer que:

- $\uparrow (f) \downarrow (n) = \downarrow \text{esforços}$;
- $\downarrow (f) \uparrow (n) = \uparrow \text{esforços}$.

Em se tratando do desgaste da ferramenta de corte, a figura 4.36 demonstra o desgaste máximo de flanco gerado após dois passes realizados nas condições utilizadas.

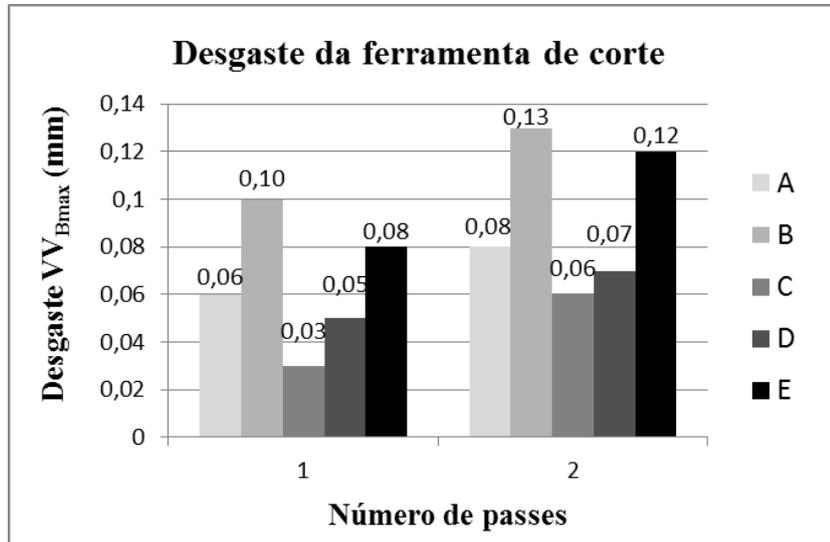


Figura 4.36 - Desgaste de flanco máximo obtido em dois passes com cinco parâmetros diferentes.

Analisando os desgastes, foi possível verificar que as condições que registraram as maiores forças de usinagem também apresentaram maiores valores de desgaste da ferramenta. Em ordem crescente de esforços foram: (C - D - A - E - B), esta mesma ordem também foi observada em relação ao desgaste. Foi possível notar que o incremento dos esforços progride de acordo com o desgaste da ferramenta, ou seja, quanto maiores foram os desgastes gerados na ferramenta, maiores foram os esforços de usinagem.

Uma vez que a aresta principal de corte se desgasta, a área de contato na superfície principal de folga também aumenta como resultado do desgaste de flanco, conseqüentemente a força na ferramenta aumenta invariavelmente. O aumento da força na ferramenta pode ser usado para monitorar o desgaste da ferramenta, garantindo, de forma indireta, o acabamento da peça a ser usinada bem como suas tolerâncias. (MATA et al., 2009; THIELE e MELKOTE, 1999).

Portanto, a rotação tem maior influência nos mecanismos de desgaste da ferramenta de corte do que a velocidade de avanço, e a força segue a mesma tendência, pois é diretamente influenciada pelo desgaste.

4.5 Análise do Desgaste e Avarias dos Insertos Utilizados

Foram realizados ensaios para verificar qual inserto entre os três utilizados teria uma maior vida útil e melhor desempenho, tendo sido alterado somente o raio de ponta. Foram executados passes com profundidade de corte de 1,0 mm, em cada peça foi estimado três passes e para o passe seguinte foi utilizado uma nova peça, e assim sucessivamente para todos os insertos utilizados no ensaio. A figura 4.37 ilustra o fluxograma do processo.

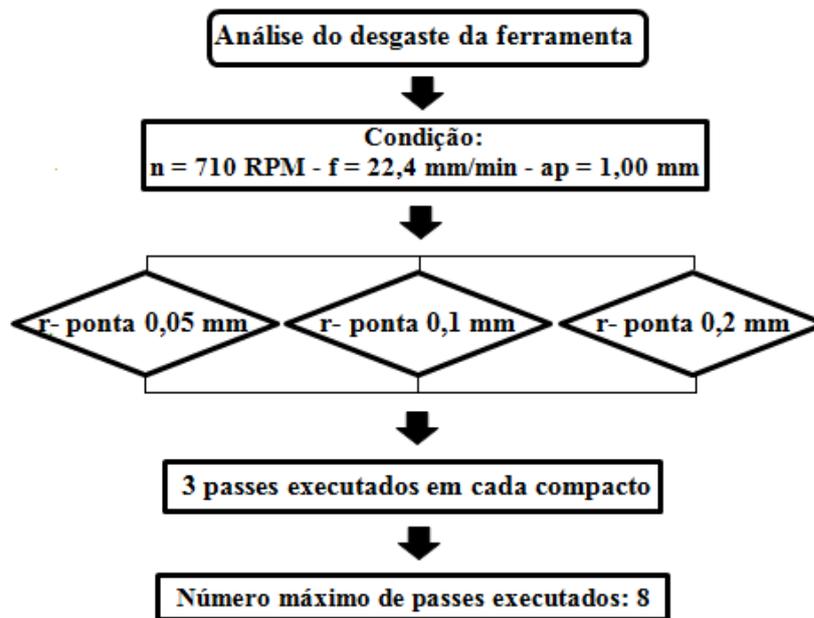


Figura 4.37 - Fluxograma.

A figura 4.38 demonstra o desgaste de flanco máximo obtidos no decorrer dos passes, sendo verificado que o inserto de r-ponta 0,2 mm executou somente seis passes.

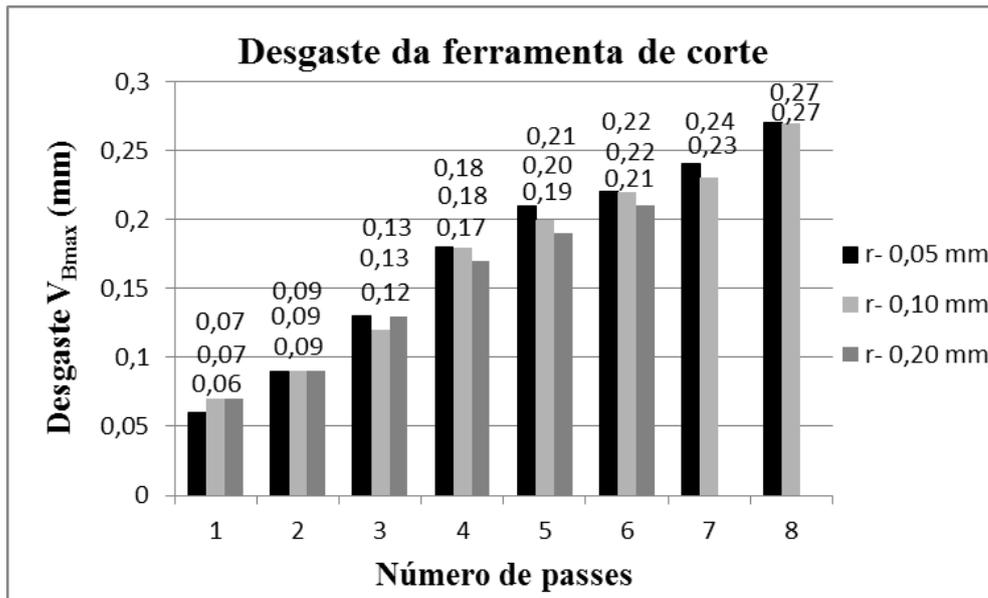


Figura 4.38 - Desgaste de flanco máximo obtido variando o raio de ponta da ferramenta (0,05 - 0,1 - 0,2 mm) mantendo os mesmos parâmetros.

O desgaste de flanco, obtido nos três insertos utilizados, apresentou valores próximos em cada passe executado, sem diferença significativa entre os raios de ponta. Sendo assim, o desgaste gerado no flanco segue o mesmo padrão independente do raio de ponta da ferramenta utilizado. Porém, o desgaste gerado na ponta da ferramenta influenciou no acabamento superficial da peça, na qual no início do sexto passe utilizando o raio de ponta 0,2 mm gerou lascamento na borda e no decorrer do passe a quebra do compacto devido à péssima condição da ferramenta, não sendo possível executar oito passes com a devida ferramenta, por este motivo, executou apenas seis passes.

Utilizando-se um inserto com raio de ponta de 0,1 mm, foi possível realizar todos os passes, porém observou-se um grande desgaste na ponta da ferramenta, e também, um péssimo acabamento superficial, devido à perda relativa da ponta de corte. Já com o inserto de raio 0,05 mm, obteve-se um bom acabamento superficial no último passe executado, sendo possível ainda sua utilização para mais passes, apresentando menor perda da ponta de corte. A aresta e a ponta de corte dos insertos utilizados nestes ensaios são ilustradas na figura 4.39.

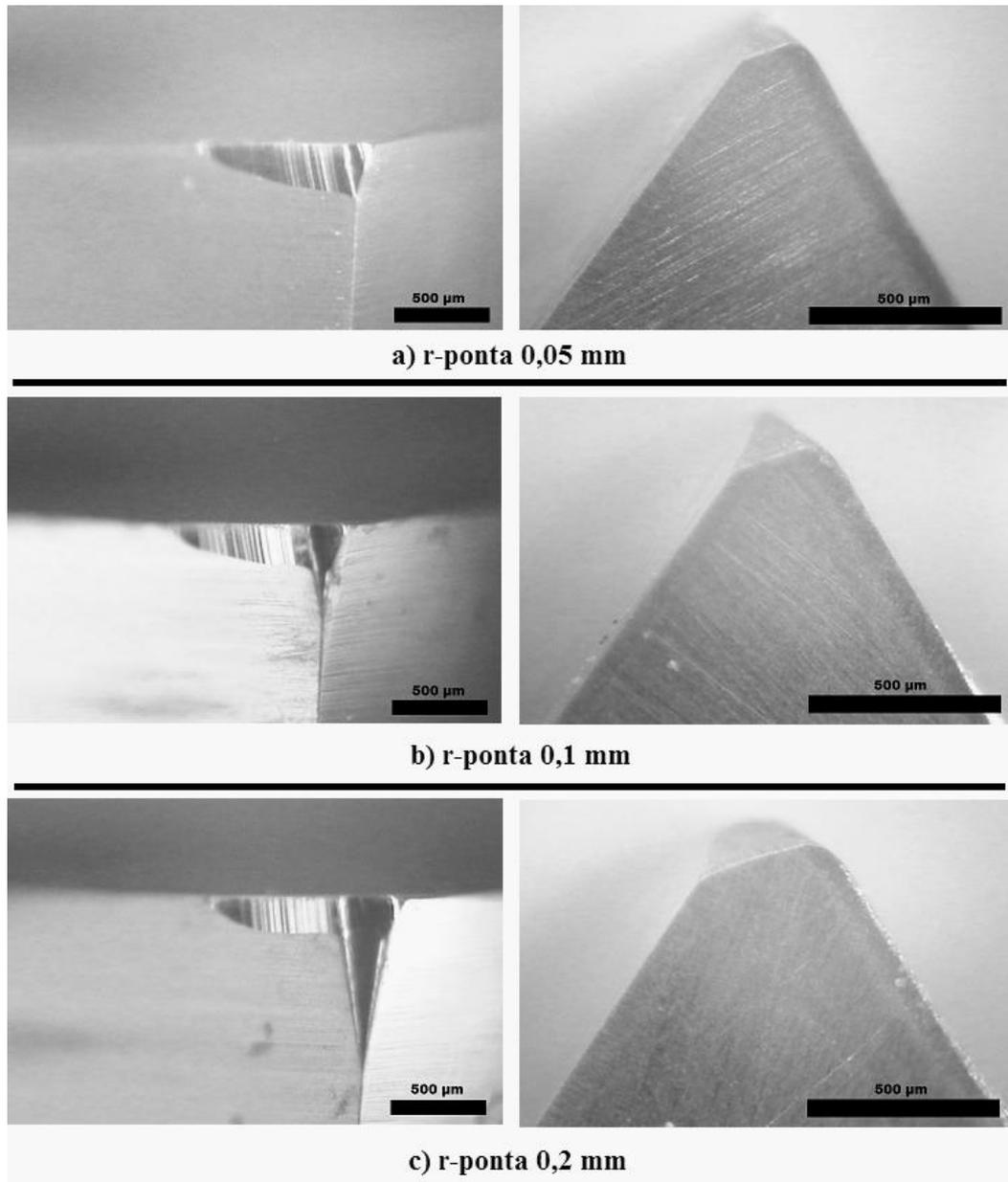


Figura 4.39 - Desgaste gerado no flanco e na ponta do inserto após os passes executados mantendo os mesmo parâmetros.

Foi verificado que o desgaste gerado na ponta da ferramenta progrediu de forma mais rápida quando foi utilizado o inserto de maior raio de ponta, devido a maior área de contato e consequentemente maior atrito entre a ferramenta e o compacto, levando a perda da ponta e da aresta de corte da ferramenta rapidamente. E o menor desgaste gerado, foi utilizando o inserto de menor raio de ponta. A figura 4.40 ilustra o MEV feito com as mesmas ferramentas, alterando o ângulo de visualização da ponta, com ampliações de 100x e 200x, sendo verificada na condição com o maior raio de ponta (c), apresentou maior perda da

geometria de corte da ferramenta devido ao desgaste, podendo acarretar grandes níveis de atrito e elevadas tensões durante a usinagem.

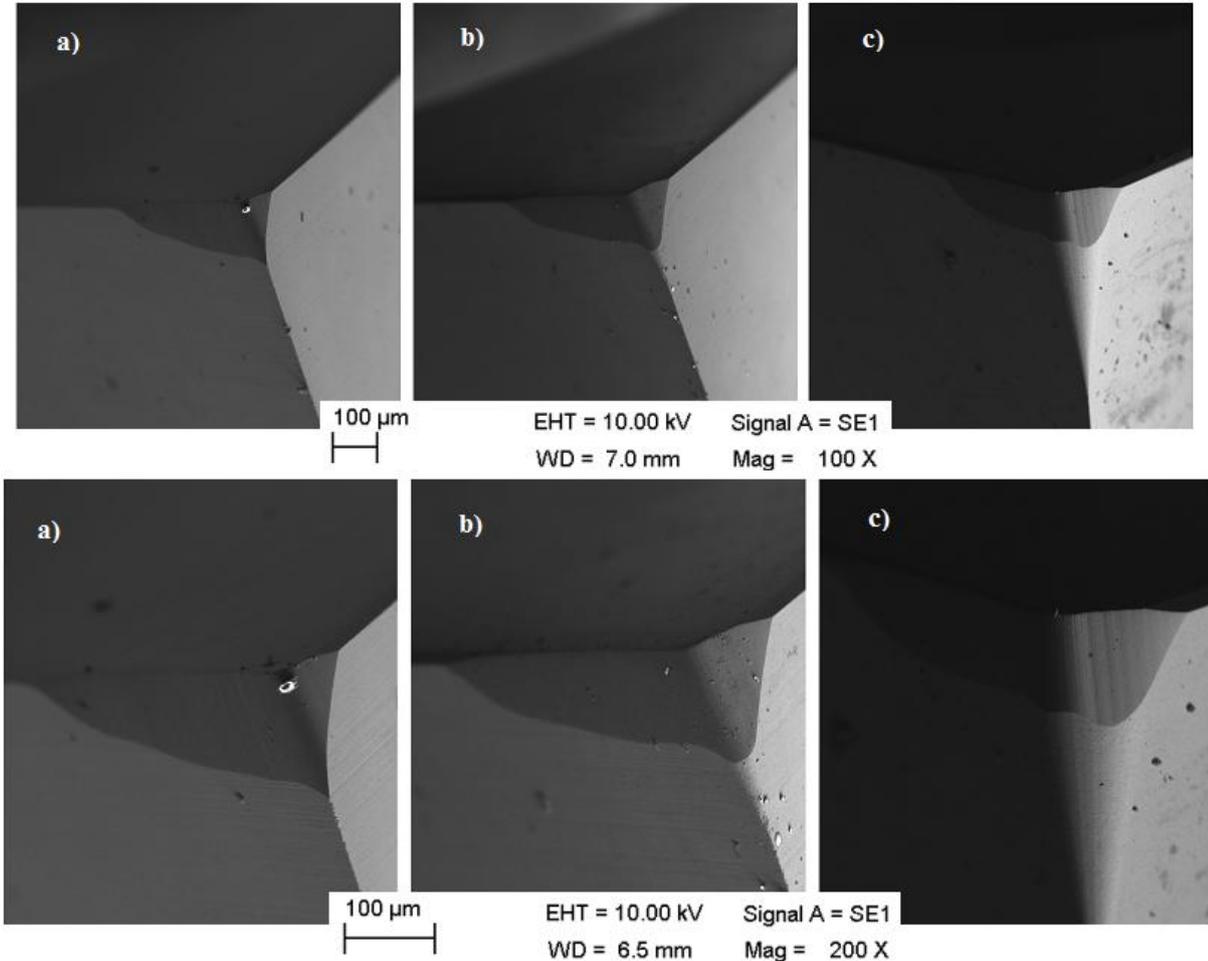


Figura 4.40 - MEV da ponta da ferramenta após a usinagem com ampliação de 100x e 200x, sendo: a) r - ponta 0,05mm, b) r - ponta 0,1mm e c) r - ponta 0,2mm.

A avaliação da ferramenta de corte durante os ensaios mostrou que, o melhor inserto com relação ao desgaste da ferramenta, foi o de raio de ponta 0,05 mm, pois quanto menor o raio utilizado, menor foi a destruição da ponta da ferramenta e, conseqüentemente maior sua vida útil. O motivo pela ausência de avarias físicas e de adesão de material sobre a ferramenta pode ser atribuído às baixas forças de corte como também pela baixa temperatura no processo.

Foi verificado que a ferramenta de corte de cermet utilizada no trabalho, mesmo apresentando elevada dureza Vickers, em torno de 1800 HV em temperatura ambiente, apresentou grande desgaste, principalmente na ponta da ferramenta e em condições utilizando

o raio de ponta (0,2 mm). Assim, mesmo o compacto verde tendo baixa resistência mecânica (2 - 8 MPa), proporcionou um alto desgaste na ferramenta de corte.

4.6 Análise da Superfície Usinada com Diferentes Valores de Remoção de Material

A fim de verificar a influência de diferentes valores de remoção de material no acabamento superficial, os ensaios foram realizados com os parâmetros de corte adequados estabelecidos anteriormente ($n = 710$ RPM - $f = 22,4$ mm/min - $a_p = 1,0$ mm), utilizando a ferramenta com raio de ponta intermediário neste estudo (0,1 mm). Foram utilizados quatro amostras, uma sem usinar e as demais estabelecidos passes diferentes. Na figura 4.41 é ilustrado o fluxograma do processo.

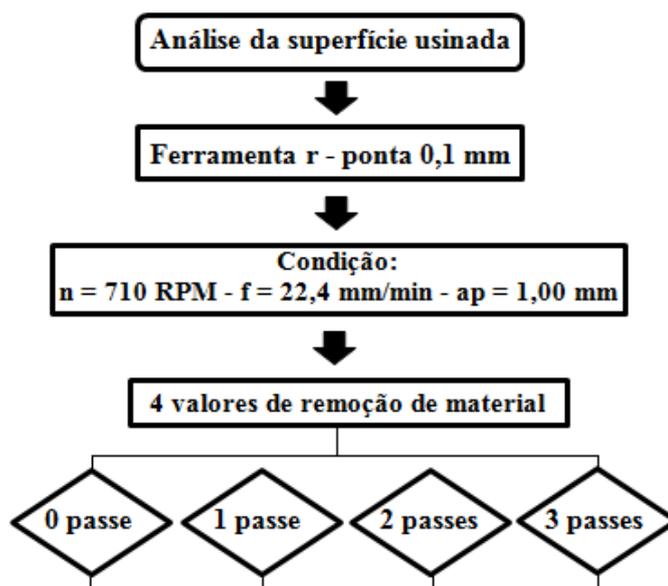


Figura 4.41 - Fluxograma.

A figura 4.42, ilustra a superfície dos compactos a verde mensurada em 3D obtida por diferentes valores de remoção de material, sendo possível visualizar o pior acabamento nas condições (a) e (b).

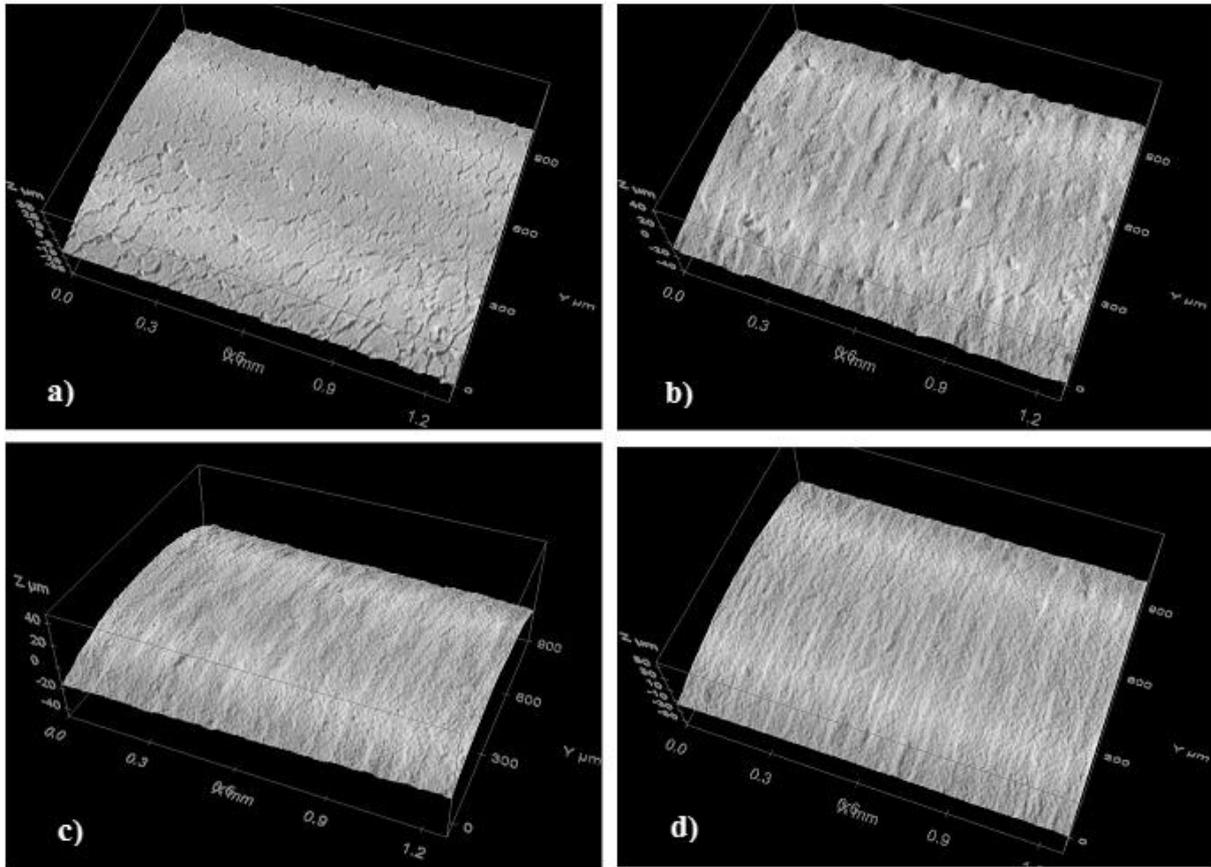


Figura 4.42 - Acabamento superficial a verde obtido após a usinagem executados por passes distintos ($a_p = 1,0$ mm), sendo: a) sem usinar, b) 1 passe, c) 2 passes e d) 3 passes.

Observando os acabamentos ilustrados na figura, foi verificado que a remoção de material proporcionou um melhor acabamento superficial, a condição final (d), sendo executados três passes, promoveu um aspecto visual semelhante à condição (c), e melhor em relação às condições (a) e (b). Na figura 4.43, é mostrada a rugosidade R_a e R_q dos corpos de prova ilustrado na figura 4.42, sendo verificado que maiores remoções de material proporcionaram uma menor rugosidade.

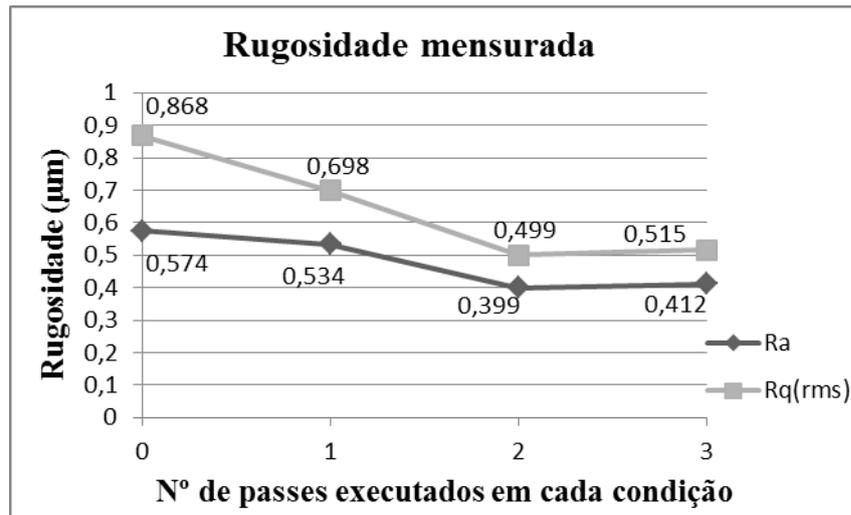


Figura 4.43 - Rugosidade Ra e Rq mensurada em cada condição.

Depois de feito uma análise dos compactos no estado verde, foi verificado o acabamento após a sinterização, na figura 4.44 são ilustrados os compactos após a sinterização em 3D, com as mesmas áreas mensuradas no estado verde.

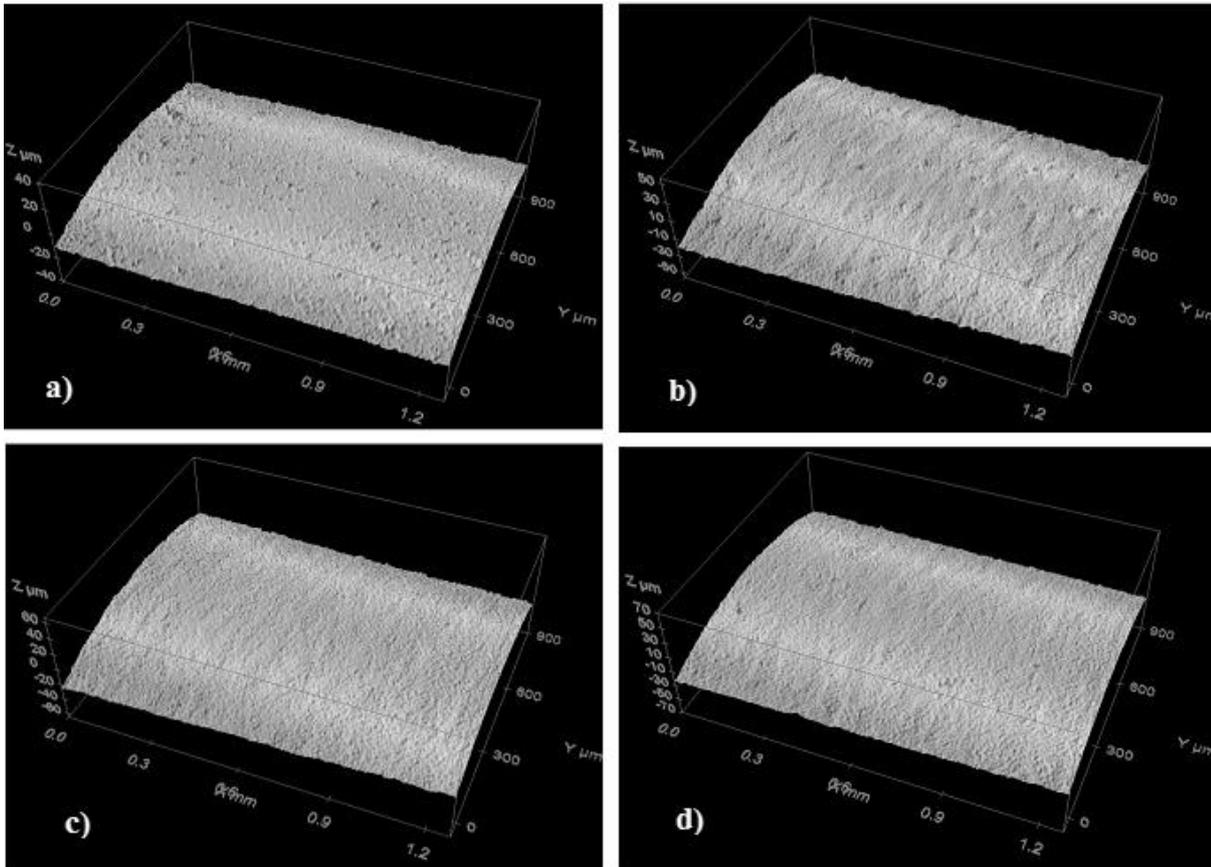


Figura 4.44 - Acabamento superficial após a sinterização obtido por passes distintos ($ap = 1,0 \text{ mm}$) executados no estado verde, sendo: a) sem usar, b) 1 passe, c) 2 passes e d) 3 passes.

Foi observado que os melhores aspectos visuais obtidos foram as condições (c) e (d), e nas condições (a) e (b) os piores acabamentos, os mesmos resultados obtidos no acabamento a verde. A figura 4.45 ilustra o acabamento superficial após a sinterização obtido pelo MEV, para uma melhor visualização do acabamento superficial gerado por diferentes valores de remoção de material.

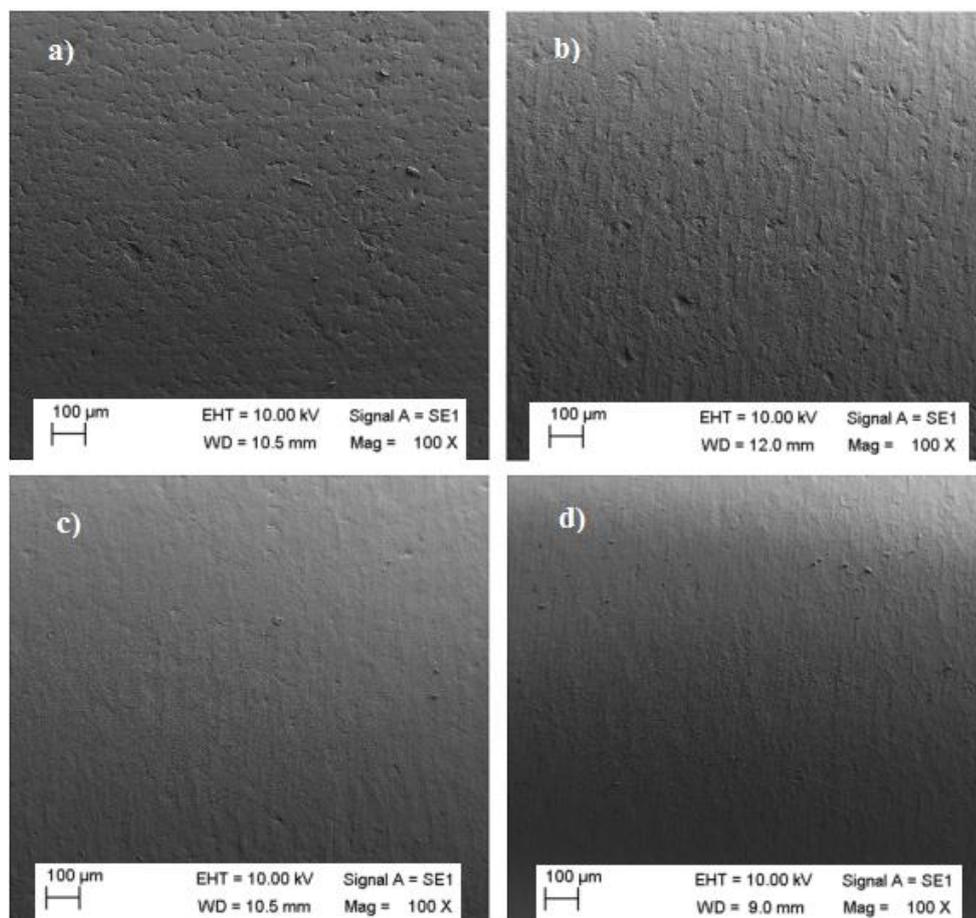


Figura 4.45 - MEV do Acabamento superficial após a sinterização obtido por passes distintos ($ap = 1,0$ mm) executados no estado verde, sendo: a) sem usinar, b) 1 passe, c) 2 passes e d) 3 passes.

Portanto, neste ensaio, foi verificado que a remoção de material influenciou no acabamento superficial da peça a verde e sinterizada, melhorando de acordo com os passes executados, assim, o acabamento superficial da peça a verde tem influência direta na peça sinterizada, como visto nos ensaios realizados.

5. CONCLUSÕES

Em função dos resultados obtidos no presente trabalho, pode-se concluir que:

- Neste estudo, os parâmetros de usinagem e as forças de corte tiveram forte influência no acabamento superficial do corpo cerâmico de alumina;
- A condição adequada de parâmetros de corte, que apresentou um melhor acabamento superficial e a menor probabilidade de introduzir danos na borda do compacto, foi utilizando: $n = 710$ RPM, $f = 22,4$ mm/min e $a_p = 1,0$ mm;
- Entre as forças monitoradas durante a usinagem (corte, avanço e profundidade), a variável que apresentou maiores esforços foi a força de avanço (F_f), e a variável que apresentou menores incrementos de esforços foi a força de profundidade de corte (F_p). Também, foi verificado forte influência do desgaste da ferramenta no incremento dos esforços;
- Entre os limites possíveis de parâmetros de corte (rotação e velocidade de avanço), os maiores incrementos de esforços foram obtidos quando foram utilizados altos valores de rotação (n) e baixos valores de velocidade de avanço (f);
- A profundidade de corte não teve efeito considerável sobre a qualidade da superfície, sendo a velocidade de corte e a velocidade de avanço, as variáveis que influenciaram no acabamento superficial;
- Foi verificado que o raio de ponta da ferramenta teve influência no processo de usinagem. Em relação à vida útil, utilizando o menor raio (0,05 mm), maior foi o tempo em que a ferramenta trabalhou efetivamente sem perder o corte. Em relação ao acabamento superficial, quanto maior o raio utilizado, melhor o aspecto visual e menor a probabilidade de introduzir danos;
- A temperatura registrada pelo microtermopar obteve a máxima de $34,1$ °C durante os ensaios, sendo a média de $29,3$ °C em todo o processo, pouca variação em relação à temperatura média ambiente, de $25,4$ °C. Portanto, o processo de usinagem não influenciou no incremento da temperatura, tendo variações máximas em relação à temperatura ambiente de até 36%, independente dos parâmetros utilizados;
- Foi verificado que a ferramenta de corte de cermet utilizada nos ensaios, mesmo tendo elevada dureza Vickers (1800 HV) em temperatura ambiente, apresentou elevado desgaste, principalmente na ponta da ferramenta;

- Analisando os diferentes valores de remoção de material utilizados no ensaio, foi verificado que maiores remoções de material proporcionaram um melhor acabamento superficial. Também, foi visto que o acabamento superficial da peça verde teve influência direta na peça sinterizada, sendo que os danos gerados na peça foram conduzidos após a sinterização, assim, a melhora do acabamento a verde, promoveu um melhor acabamento após a sinterização.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Análise das forças de corte e do acabamento superficial na usinagem de corpos de prova prensados pelo mesmo método com diferentes pressões de compactação;
- Análise das forças de corte e do acabamento superficial na usinagem de corpos de prova prensados e pré-sinterizados (usinagem de cerâmica branca);
- Análise do acabamento e integridade superficial na usinagem de corpos de prova de geometria complexa;
- Análise de diferentes materiais para ferramenta de corte no processo de usinagem;
- Reaproveitamento do pó para a conformação de novos compactos, analisando o desempenho no processo de usinagem.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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 die - pressed ceramic green compacts: comparison of a finite element modelling with experiment.** Journal of the European Ceramic Society, 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, 2008.

BESSHI, T.; SATO, T.; TSUTUI, I. **Machining of alumina green bodies and their dewaxing.** Journal of Materials Processing Technology, v. 95, p. 133-138, 1999.

BUCVIK, G.; SANCHEZ, L. E. A.; FORTULAN, C. A.; FIOCCHI A. A.; MARINESCU, L. D. **Green machining oriented to diminish density gradient for minimization of distortion in advanced ceramics.** Machining Science and Technology: An International Journal, p. 228-246, 2012.

CALLISTER JUNIOR, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução.** Editora LTC, 7ª Edição. Rio de Janeiro, 2008.

CONSTANT, K. P. **Ceramic Material.** Iowa State University, Ames, IA, Elsevier Ltd, p. 165-173, 2005.

DAGUANO, K. M. F.; SANTOS, F. A.; PALMEIRA, A. A.; SANTOS, C.; SILVA, O. M. M.; **Efeito da pressão de compactação na sinterização de cerâmicas dentárias à base de α -Al₂O₃.** Centro Técnico Aeroespacial - Divisão de Materiais, 2009.

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

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

FANTOZZI, G.; ROUBY, D.; CHEVALIER, J.; REYNAUD, P. **Advanced ceramic materials: summary of possible applications**. Materials: Science and Engineering, 2001.

GOLDEMBERG, J. **Energia nuclear, sim ou não?** Editora S.A. Rio de Janeiro, 1987.

HERLINGER, J.; SCHOETTNER, G.; ZIMMER, J. **Optimizing Green Machining**. Ceramic Industry, v. 156, ed. 2, p. 22-25, 2006.

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

JANASOVITS, U.; GROTHE, A.; POHLMANN, H. J.; LANG, G. **Improvement of green machining process of Si₃N₄**. Ber. Deutsche Keramische Gesellschaft, v. 76(5), p. 24-28, 1999.

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.

KLOCKE, E.; GERENT, O.; SCHIPPERS, C. **Machining of advanced ceramics in the green state**. Ceram. Forum Int., v. 74(6), p. 288-290, 1997.

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

KUMAR, A. S.; DURAI, A. R.; SORNAKUMAR, T. **Development of alumina–ceria ceramic composite cutting tool**. International Journal of Refractory Metals e Hard Materials, v. 22, p. 17-20, 2004.

KUMAR, A.; MOHANTA, K.; KUMAR, D.; PARKASH, O. **Green properties of dry-pressed alumina compacts fabricated using sucrose as binder.** Ceramics International, v. 40, p. 6271-6277, 2013.

KYOCERA, Fabricante de Ferramentas de Corte. Disponível em: www.kyocera.com.br. Acesso em: 2014.

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.

LIU, K.; SHI, Y.; LI, C.; HAO, L.; LIU, J.; WEI, Q. **Indirect selective laser sintering of epoxy resin-Al₂O₃ ceramic powders combined with cold isostatic pressing.** Ceramics International, v. 40, p. 7099-7106, 2014.

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[6], p. 1393-98, 2000.

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

MARGARIDO, A. **Estudo da influência da força de corte da usinagem a verde nas propriedades mecânicas de cerâmicas sinterizadas.** Dissertação de mestrado, UPS - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

MARINESCU, I. D. **Handbook of advanced ceramics machining.** Taylor & Francis Group, LLC. New York, 2006.

MASTERS, K. **Applying spray drying to ceramics.** American Ceramic Society Bulletin, v. 73, n. 1, p. 63-72, 1994.

MATA, F.; GAITONDE, V. N.; KARNIK, S. R.; DAVIM, J. P. **Influence of cutting conditions on machinability aspects PEEK, PEEK CF 30 and PEEK GF 30 composites using PCD tools.** Journal of Materials Processing Technology, v. 209, p. 1980-1987, 2009.

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.

MIYAHARA, K.; SHIGEGAKI, Y.; SASA, T. **High-temperature, high-strength ceramics**. Handbook of advanced ceramics. London, England. Elsevier, 2003.

MOHANTY, S.; RAMESHBABU, A. P.; DHARA, S. **Net shape forming of green alumina via CNC machining using diamond embedded tool**. Ceramics International, v. 39, p. 8985-8993, 2013.

MUNZ, D.; FETT, T. **Ceramics: Mechanical properties, failure behaviour, materials selection**. Handbook of Advanced Ceramics. London, England. Elsevier, 1999.

MUTSUDDY, B. C.; FORD, R. **Ceramic injection molding**. London, Chapman Hall, 1995.

NAMPI, P. P.; KUME, S.; HOTTA, Y.; WATARI, K. **Effect of surface roughness on grain growth and sintering of alumina**. Mater. Sci., v. 34, n°. 4, p. 799-804. Indian Academy of Sciences, 2011.

NEO, W. K.; KUMAR, A. S.; RAHMAN, M. **A review on the current research trends in ductile regime machining**. Journal of Advanced Manufacturing Techno, v. 63, p. 465-480, 2012.

NGOI, B. K. A.; SREEJITH, P. S. **Ductile Regime Finish Machining - A Review**. Journal of Advanced Manufacturing Technol, p. 547-550, 2000.

PANDOLFELLI, V. C.; BALDO, J. B.; CASARINI, J. R. **Influencia dos aditivos na obtenção de aluminas com alta densidade a verde**. Cerâmica, v. 27, n. 127, p. 403-410, 1981.

PERRON, E. R.; THOMAS, Y.; PELLETIER, S.; DIONNE, M. **An integrated approach to the characterization of powder metallurgy components performance during green machining**. Materials Science and Engineering A 402, p. 325-334, 2005.

PFEIFFER, W.; HOLLSTEIN, T. **Influence of grinding parameters on strength-dominating near-Surface characteristics of silicon nitride ceramics**. Journal of European Ceramic Society, v. 17, p. 487-494, 1997.

POTOCZEK, M.; HENECZKOWSKI, M.; OLEKSY, M. **A new polyurethane binder providing high green strength of dry-pressed alumina**. Ceramics International, v. 29, 259-264, 2003.

RAHAMAN, M. N. **Ceramic processing and sintering**. Segund edition, Editora CRC Press, New York, 2003.

REED, J. S. **Principles of ceramics processing**. John Wiley: Segund edition. New York, 1995.

REZENDE, D. T. **Influencia da adiçao de zircônia na tenacidade à fratura do nitreto de silício obtido via sinterização normal**. Dissertação de mestrado, PUC - RJ, 1997.

RICHERSON, D. W. **Modern Ceramic Engineering: Properties, processing, and use in design**. Segund edition. New York, 1992.

RODRIGUES, J. R. P; RODRIGUES, J. R. P; SANTOS, J. C. S; SORDI, A. **Componentes da força de usinagem no torneamento de ligas não ferrosas e aços ABNT 1020 e 1045**. UNICAMP, Campinas - SP, 2007.

RÖDEL, J.; KOUNGA, A. B. N.; EIBL, M. W.; KOCH, D.; BIERWISCH, A.; ROSSNER, W.; HOFFMANN, M. J.; DANZER, R.; SCHNEIDER, G. **Development of a roadmap for advanced ceramics: 2010-2025**. Journal of the European Ceramic Society, v. 29, p. 1549-1560, 2009.

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.

SHELLER, 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**. Ceram. Ind. 65-76, 1999.

SCHROETER, R. B.; BASTOS, C. M.; CRICHIGNO FILHO, J. M. **Simulation of the main cutting force in Crankshaft turn broaching**. International Journal of Machine Tools e Manufacture, v. 47 1884-1892, 2007.

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.** In. Journal of the European Ceramic Society, v. 28, p. 2109-2115, 2008.

THIELE, J. D.; MELKOTE, S. N. **Effect of cutting edge geometry and workpiece hardness on surface generation in the finish hard turning of AISI 52100 steel.** Journal of Materials Processing Technology, v. 94, p. 216-226, 1999.

VAN VLACK, L. H. **Princípios de ciência dos materiais.** Editora Edgard Blücher LTDA, 13ª reimpressão, São Paulo, 2000.

WEFERS, K.; MISRA, C. **Oxides and hydroxides of aluminum.** Alcoa Laboratories: Alcoa Technical, paper nº. 19, 1987.

WESTERHEIDE, R.; DRÜSEDAU, K. A.; HOLLSTEIN, T.; SCHWICKERT, T.; ZIPSE, H. **Advances in characterisation of machined green compacts.** Journal of the European Ceramic Society, v. 17, p. 467-472, 1996.

WU, K.; MCANANY, W. J. **Acrylic binders for green machining.** American Ceramic Society Bulletin, v. 75, p. 61-64, 1995.

XU, H. H. K.; JAHANMIR, S. **Transitions in the mechanism of material removal in abrasive wear of alumina.** Wear, v. 62, p. 393-396, 1996.

YEN, Y.; JAIN, A.; ALTAN, T. **A finite element analysis of orthogonal machining using different tool edge geometries.** Journal of Materials Processing Technology, v. 146, p. 72-81, 2004.

ZANOTTO, E. D.; MIGLIORE, A. R. **Propriedades mecânicas de materiais cerâmicos: Uma introdução.** V. 37, nº. 237, 1991.