

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

**TORNEAMENTO ASSISTIDO POR ULTRASSOM  
DE MATERIAIS CERÂMICOS EM VERDE E PRÉ-SINTERIZADOS**

MARCOS GONÇALVES JÚNIOR

BAURU – SP

2019



MARCOS GONÇALVES JÚNIOR

**TORNEAMENTO ASSISTIDO POR ULTRASSOM  
DE MATERIAIS CERÂMICOS EM VERDE E PRÉ-SINTERIZADOS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Câmpus de Bauru, para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Cesar Renato Foschini.

Co-orientador: Prof. Dr. Thiago Valle França.

BAURU – SP

FEVEREIRO DE 2019

Gonçalves Júnior, Marcos.

Torneamento assistido por ultrassom de  
materiais cerâmicos em verde e pré-sinterizados /  
Marcos Gonçalves Júnior, 2019  
82 f. : il.

Orientador: Cesar Renato Foschini  
Co-orientador: Thiago Valle França

Tese (Doutorado)-Universidade Estadual  
Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2019

1. Cerâmica avançada. 2. Usinagem em verde. 3.  
Usinagem pré-sinterizada. 4. Torneamento  
assistido por ultrassom. 5. Planejamento de  
experimentos. I. Universidade Estadual Paulista.  
Faculdade de Engenharia. II. Título.

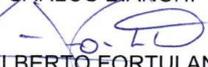
**ATA DA DEFESA PÚBLICA DA TESE DE DOUTORADO DE MARCOS GONÇALVES JÚNIOR, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.**

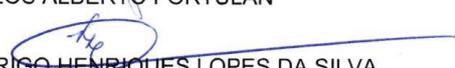
Aos 25 dias do mês de fevereiro do ano de 2019, às 14:00 horas, no(a) Anfiteatro do DTI / FEB, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. CESAR RENATO FOSCHINI - Orientador(a) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. LUIZ EDUARDO DE ANGELO SANCHEZ do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. EDUARDO CARLOS BIANCHI do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. CARLOS ALBERTO FORTULAN do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Escola de Engenharia de São Carlos - USP , Prof. Dr. RODRIGO HENRIQUES LOPES DA SILVA do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Universidade Tecnológica Federal do Paraná, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da TESE DE DOUTORADO de MARCOS GONÇALVES JÚNIOR, intitulada **TORNEAMENTO ASSISTIDO POR ULTRASSOM DE MATERIAIS CERÂMICOS A VERDE E PRÉ-SINTERIZADOS**. 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. LUIZ EDUARDO DE ANGELO SANCHEZ

  
Prof. Dr. EDUARDO CARLOS BIANCHI

  
Prof. Dr. CARLOS ALBERTO FORTULAN

  
Prof. Dr. RODRIGO HENRIQUES LOPES DA SILVA



**PROPOSTA DE ALTERAÇÃO DO TÍTULO**

A BANCA EXAMINADORA PROPÕE A ALTERAÇÃO DO TÍTULO DO TRABALHO DO ALUNO:  
**MARCOS GONÇALVES JÚNIOR**

DE: "TORNEAMENTO ASSISTIDO POR ULTRASSOM DE MATERIAIS CERÂMICOS <sup>EM</sup> VERDE E PRÉ-SINTERIZADOS"

PARA:

*Torneamento assistido por ultrassom de materiais cerâmicos em verde e pré-sinterizados.*

---

---

Bauru, 25 de fevereiro de 2019.

  
Prof. Dr. Cesar Renato Foschini  
orientador



## 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, Maria Isabel Cardoso Gonçalves e Marcos Gonçalves, pelo amor e dedicação, alicerce da vida e de todas as minhas conquistas.

Ao meu irmão, Matheus Gonçalves, pelo apoio e amizade.

À minha noiva, Gabriela Silva de Oliveira, pelo amor, incentivo, ajuda e companhia ao longo dessa etapa.

Ao meu orientador Cesar Renato Foschini e co-orientador Thiago Valle França, por suas orientações e contribuições ao longo de todo o desenvolvimento nesse trabalho. Obrigado pelos diálogos e incentivos.

Aos professores e técnicos do departamento de engenharia mecânica da UNESP - Bauru, que contribuíram para a melhora do trabalho com conhecimentos e opiniões, em especial ao professor Luiz Eduardo de Angelo Sanchez pelo fornecimento de equipamentos para o desenvolvimento do mesmo.

Ao professor Carlos Alberto Fortulan e ao técnico de laboratório Luiz Adalberto Penazzi, pelo fornecimento do laboratório, matérias e auxílio na elaboração dos corpos de prova e demais procedimentos, como também, na orientação para melhorias no trabalho.

Aos professores do departamento de engenharia mecânica da UTFPR – CP, pela ajuda, apoio no desenvolvimento de componentes necessários para a pesquisa, pelas dicas e sugestões para melhoria do mesmo, em especial aos professores Adailton Silva Borges, Rodrigo Henriques Lopes da Silva e Rogerio Akihide Ikegami.

Aos meus amigos e colegas de laboratório, pelo convívio, amizade e estudos, pelo auxílio e sugestões na elaboração da montagem da bancada de ensaios, sendo fundamental para execução deste trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudos concedida.

Enfim, a todos que de algum modo colaboraram para a realização desse 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 avançada nos estados verde e pré-sinterizado tem como objetivo minimizar a etapa de usinagem após a sinterização, na qual se visa reduzir o alto custo do processo. Tais métodos propiciam uma vantagem considerável na produção de componentes com geometria complexa em termos de acabamento superficial, eficiência econômica e flexibilidade, pois, possibilita obter dimensões próximas às finais (*near-net-shape*). No entanto, há facilidade de introduzir danos e/ou lascamentos decorrente da sua baixa resistência mecânica, principalmente, na utilização de parâmetros de corte inadequados. Para melhorar o desempenho da usinagem de materiais duros e frágeis, pode-se empregar a usinagem assistida por ultrassom. As aplicações dessa técnica demonstraram que o processo pode melhorar consideravelmente o desempenho da usinagem. Nesta tese, se investigou a aplicação do torneamento assistido por ultrassom (UAT) em materiais cerâmicos em verde e pré-sinterizados. Para isso, foram elaborados componentes para a montagem adequada da bancada de ensaio, tendo como ênfase o suporte *flexure hinge*. Para executar o processo, foi realizado o planejamento de experimentos (DOE) pelos modelos fatorial fracionário e de superfície de resposta e aplicou-se a análise de variância (ANOVA) em alguns dados obtidos. As forças de usinagem foram medidas por um dinamômetro e correlacionadas com os parâmetros de corte e com o acabamento superficial. Os resultados mostraram que o método UAT proporcionou melhores acabamentos superficiais e redução da rugosidade em relação ao torneamento convencional (CT), bem como minimizou a introdução de danos excessivos na superfície em algumas condições. Verificou-se que as forças de usinagem pouco se alteraram entre os métodos CT e UAT, quando empregado os mesmos parâmetros de corte. Na análise de desgaste da ferramenta, o método UAT propiciou uma redução do desgaste de flanco de 34% e 28,1% nas condições em verde e pré-sinterizada respectivamente, como também, reduziu a alteração da geometria original da ponta da ferramenta e, conseqüentemente, a redução nas forças geradas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Cerâmica avançada. Usinagem em verde. Usinagem pré-sinterizada. Torneamento assistido por ultrassom. Planejamento de experimentos.



## ABSTRACT

The advanced ceramic machining in green and pre-sintered states aims to minimize the machining step after sintering, in order to reduce the high cost of the process. Such methods provide a considerable advantage in the production of components with complex geometry in terms of surface finishing, economic efficiency and flexibility, as it allows obtaining near-net-shape dimensions. However, it is easy to introduce damages and/or chipping due to its low mechanical resistance, mainly, in the use of inadequate cutting parameters. In order to improve the machining performance of hard and brittle materials, ultrasonic assisted machining can be employed. Applications of this technique have demonstrated that the process can greatly improve the machining performance. In this thesis, we investigated the application of ultrasonic assisted turning (UAT) in green and pre-sintered ceramic materials. For this purpose, components have been developed for the appropriate assembly of the test bench, with emphasis the flexure hinge support. In order to carry out the process, design of experiments (DOE) with fractional factorial and response surface modeling were performed and analysis of variance (ANOVA) was applied in some obtained data. The machining forces were measured by a dynamometer and correlated with the cutting parameters and the surface finishing. The results showed that the UAT method provided better surface finishes and reduced roughness in relation to the conventional turning (CT), as well as minimized the introduction of excessive surface damage under some conditions. It was verified that, the machining forces did not change between the CT and UAT methods using the same cutting parameters. In the tool wear analysis, the UAT method provided a reduction of 34% and 28.1% flank wear in the green and pre-sintered condition respectively, as well as, reduced the change of the original tool tip geometry and, consequently, the reduction in the forces generated.

**KEY-WORDS:** Advanced ceramics. Green machining. Pre-sintered machining. Ultrasonic assisted turning. Design of experiments.



## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Propriedades mecânicas da alumina com 99,5% de pureza. ....	34
Tabela 3.1 - Cálculo do erro relativo. ....	73
Tabela 3.2 - Resumo dos itens utilizados para ferramenta de corte. ....	83
Tabela 3.3 - Fatores e níveis utilizados para o DOE fatorial fracionário. ....	85
Tabela 3.4 - Planejamento $2^{4-1}$ com a relação definida I=ABCD. ....	86
Tabela 4.1- Análise geral de algumas variáveis de usinagem de cerâmicas avançadas. ....	147



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Variação da densidade após a compactação. ....	36
Figura 2.2 - valores de Ra obtidos pelos métodos CG e UAG. ....	39
Figura 2.3 - Redução da distorção para diferentes volumes de material removidos. ....	41
Figura 2.4 - Acabamento gerado em função do raio de ponta da ferramenta. ....	42
Figura 2.5 - Desgaste de flanco em função da texturização da ferramenta de corte. ....	43
Figura 2.6 - Diagrama esquemático do processo de desgaste das ferramentas texturizadas. ....	44
Figura 2.7 - Densificação da alumina durante a sinterização. ....	45
Figura 2.8 - Resistência à flexão em função da temperatura de pré-sinterização. ....	46
Figura 2.9 - Danos e desgaste gerados em função da temperatura de pré-sinterização. ....	46
Figura 2.10 - Cavidade e ferramenta de corte após a usinagem. ....	47
Figura 2.11 - Ilustração esquemática do corte EVA. ....	50
Figura 2.12 - Simulação esquemática dos quatro estágios da UAT. ....	51
Figura 2.13 - Esquema do processo ultrassônico. ....	52
Figura 2.14 - Modelo teórico da geração de superfícies. ....	52
Figura 2.15 - Superfície texturizada. ....	53
Figura 2.16 - Modelo tridimensional do sistema UAT. ....	53
Figura 2.17 - Comparação do desgaste gerados na ferramenta. ....	54
Figura 2.18 - Comparação da superfície desgastada nas ferramentas. ....	55
Figura 2.19 - Rugosidade em função da $V_c$ . ....	55
Figura 2.20 - Perfil da superfície após a usinagem pelos métodos CT e UAT. ....	56
Figura 2.22 - Três tipos de flexure hinge tradicionalmente utilizados. ....	59
Figura 2.23 - Comparação dos resultados fornecidos pelos experimentos. ....	62
Figura 2.24 - Arranjos CCD. ....	63
Figura 3.1 - Fluxograma do processo. ....	66

Figura 3.2 - Molde para prensagem uniaxial dos compactos.....	67
Figura 3.3 - Temperatura x tempo do processo de pré-sinterização. ....	68
Figura 3.4 - Conjunto formado pela base e corpo de prova. ....	69
Figura 3.5 - Acelerômetro fixado na base do suporte do ultrassom. ....	71
Figura 3.6 - Osciloscópio conectado ao gerador de ultrassom. ....	71
Figura 3.7 - Comparativo entre os valores de frequência obtidos por ambos os sistemas.....	72
Figura 3.8 - Frequências mensuradas pelo osciloscópio.....	73
Figura 3.9 - Fresadora de três eixos e atuador ultrassônico. ....	74
Figura 3.10 - Montagem esquemática dos componentes projetados. ....	75
Figura 3.11 - Suporte <i>flexure hinge</i> . ....	77
Figura 3.12 - Montagem da bancada com os componentes usinados. ....	77
Figura 3.13 - Detalhe do suporte <i>flexure hinge</i> com a ferramenta fixada.....	78
Figura 3.14 - Conjunto do sistema para análise de vibração. ....	79
Figura 3.15 - Gráfico da aceleração em função do tempo. ....	80
Figura 3.16 - Amplitude em função da frequência. ....	80
Figura 3.17 - Montagem de todos dos equipamentos na máquina para o ensaio.....	83
Figura 4.1- Resumo do experimento fatorial fracionário.....	89
Figura 4.2 - Fluxograma do DOE fatorial fracionário. ....	90
Figura 4.3 - Efeitos principais para rugosidade. ....	91
Figura 4.4 - IC da influência dos fatores $V_c$ e $V_f$ na resposta $R_a$ . ....	92
Figura 4.5 - Acabamento superficial das condições executadas nos experimentos.....	93
Figura 4.6 - Comparação do acabamento superficial gerado pelo CT e UAT.....	95
Figura 4.7 - Representação do mecanismo de remoção de material na usinagem em verde...	96
Figura 4.8 - Representação esquemática do deslocamento da ferramenta de corte.....	97
Figura 4.10 - Efeitos principais para $F_c$ . ....	99
Figura 4.11 - IC da influência do fator $a_p$ na resposta $F_c$ . ....	100

Figura 4.12 - Efeitos principais para $F_f$ .	100
Figura 4.13 - IC da influência do fator $a_p$ na resposta $F_f$ .	101
Figura 4.14 - Efeitos principais para $F_p$ .	102
Figura 4.15 - IC da influência do fator frequência na resposta $F_p$ .	103
Figura 4.16 - Força de usinagem gerada em cada condição.	104
Figura 4.17 - Efeitos principais para rugosidade.	105
Figura 4.18 - IC da influência dos fatores $V_c$ e $V_f$ na resposta $R_a$ .	106
Figura 4.19 - Acabamento superficial das condições executadas nos experimentos.	107
Figura 4.20 - Danos críticos gerados pelo método CT.	108
Figura 4.21 - Condições que apresentaram danos críticos pelo método CT.	109
Figura 4.22 - Comparação da ferramenta de corte no momento da usinagem.	110
Figura 4.23 - Comparação do material removido durante a usinagem.	111
Figura 4.24 - Efeitos principais para $F_c$ .	112
Figura 4.25 - IC da influência do fator $a_p$ na resposta $F_c$ .	113
Figura 4.26 - Efeitos principais para $F_f$ .	113
Figura 4.27 - IC da influência do fator $a_p$ na resposta $F_f$ .	114
Figura 4.28 - Efeitos principais para $F_p$ .	115
Figura 4.29 - IC da influência do fator frequência na resposta $F_p$ .	116
Figura 4.30 - Comparação das forças de usinagem em cada condição.	117
Figura 4.31 - Ferramenta de corte após a usinagem dos experimentos fatoriais.	118
Figura 4.32 - Resumo do experimento central composto (CCD).	119
Figura 4.33 - Arranjo do experimento central composto com os parâmetros estabelecidos.	119
Figura 4.34 - Fluxograma do DOE superfície de resposta.	120
Figura 4.35 - Superfícies gerada após o torneamento no DOE superfície de resposta.	121
Figura 4.36 - Análise da rugosidade para a cerâmica em verde.	122
Figura 4.37 - Acabamentos obtidos com parâmetros de corte estabelecido pelo DOE.	123

Figura 4.38 - Superfícies geradas após o torneamento no DOE superfície de resposta. ....	125
Figura 4.39 - Análise da rugosidade para a cerâmica pré-sinterizada. ....	126
Figura 4.40 - Interação para as forças ( $F_c - F_f - F_p$ ) em função da $V_f$ e $V_c$ . ....	127
Figura 4.41 - Acabamentos obtidos com parâmetros de corte estabelecido pelo DOE. ....	128
Figura 4.42 - MEV do acabamento superficial gerado pelos métodos CT e UAT. ....	129
Figura 4.43 - Fluxograma da análise do desgaste da ferramenta de corte. ....	130
Figura 4.44 - Força de usinagem e desgaste da ferramenta em função dos passes. ....	131
Figura 4.45 - Ferramenta de corte após o 7º passe. ....	132
Figura 4.46 - Desgaste da ferramenta após todos os passes executados. ....	133
Figura 4.47 - Detalhe da geometria da ponta da ferramenta após os passes executados. ....	134
Figura 4.48 - MEV da ponta da ferramenta após os passes executados. ....	134
Figura 4.49 - Material removido em função do desgaste da ferramenta. ....	136
Figura 4.50 - Acabamento e rugosidade gerada em função do desgaste da ferramenta. ....	137
Figura 4.51 - Força de usinagem e desgaste da ferramenta em função dos passes. ....	138
Figura 4.52 - Ferramenta de corte após o 8º passe. ....	139
Figura 4.53 - Desgaste da ferramenta após todos os passes executados. ....	140
Figura 4.54 - Detalhe da geometria da ponta da ferramenta após os passes executados. ....	141
Figura 4.55 - MEV da ponta da ferramenta após os passes executados. ....	142
Figura 4.56 - Material removido em função do desgaste da ferramenta. ....	143
Figura 4.57 - Acabamento e rugosidade gerada em função do desgaste da ferramenta. ....	144
Figura 4.58 - Sistema adaptado para a operação de sangramento radial. ....	146
Figura 4.59 - Compactos após a usinagem. ....	146

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
ANOVA	<i>Analysis of variance</i>
CAD	<i>Computer-aided design</i>
CAM	<i>Computer-aided manufacturing</i>
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CCD	<i>Central Composite Design</i>
CDVA	<i>Cutting Directional Vibration-Assisted</i>
CEP	Controle Estatístico do Processo
CG	<i>Conventional Grinding</i>
CNC	Comando Numérico Computadorizado
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CT	<i>Conventional Turning</i>
DOE	<i>Design of Experiments</i>
DPA	Desvio padrão amostral
EDM	Usinagem por descarga elétrica
EDS	Espectroscopia por dispersão de energia de raios X
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
EVA	<i>Elliptic Vibration-Assisted</i>
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
I	Identidade
IC	Intervalo de Confiança
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LATUS	Laboratório de Tecnologia da Usinagem
LTC	Laboratório de Tribologia e Compósitos
MEC	Ministério da Educação
MEMS	Sistemas micro-eleto-mecânicos
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura

MSR	Metodologia de Superfície de Resposta
NDVA	<i>Normal Directional Vibration-Assisted</i>
PCD	Policristalino de diamante
PVAI	Poli (álcool vinílico)
RMS	<i>Root Mean Square</i>
RUVT	<i>Radial Ultrasonic Vibration-Assisted Turning</i>
R&R	Reprodutividade e Repetibilidade
UAG	<i>Ultrasonic Assisted Grinding</i>
UAT	<i>Ultrasonic Assisted Turning</i>
USM	Usinagem por Ultra-som
USP	Universidade de São Paulo
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
VAD	<i>Vibration Assisted Drilling</i>
VAM	<i>Vibration-Assisted Machining</i>
1D	Uma direção
2D	Dois direções
3D	Três direções
3DVT	Torneamento por vibração tridimensional

## LISTA DE SÍMBOLOS

$a$	Amplitude ( $\mu\text{m}$ )
Al	Alumínio
$\text{Al}_2\text{O}_3$	Óxido de alumínio
$a_p$	Profundidade de corte (mm)
$F_c$	Força de corte (N)
$F_f$	Força de avanço (N)
$F_p$	Força de profundidade (N)
$F_u$	Força de usinagem (N)
$H_0$	Hipótese nula verdadeira
$H_1$	Hipótese nula rejeitada
O	Oxigênio
$R_a$	Rugosidade média aritmética ( $\mu\text{m}$ )
RPM	Rotação por minuto (rot/min)
TG	Temperatura de transição vítrea ( $^{\circ}\text{C}$ )
$V_{B\text{max}}$	Desgaste de flanco máximo (mm)
$V_c$	Velocidade de corte (m/min)
$V_f$	Velocidade de avanço (mm/min)
Y-TZP	Zircônia tetragonal policristalina estabilizada com ítria
$\rho$	Densidade ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
$\emptyset$	Diâmetro (mm)



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>29</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivos do trabalho .....</b>	<b>31</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>33</b>
<b>2.1</b>	<b>Características, propriedades e aplicações das cerâmicas avançadas .....</b>	<b>33</b>
<b>2.2</b>	<b>Etapas de fabricação de peças cerâmicas avançadas .....</b>	<b>34</b>
<b>2.3</b>	<b>Usinagem de cerâmica .....</b>	<b>37</b>
2.3.1	<i>Usinagem pós-sinterização.....</i>	<i>37</i>
2.3.2	<i>Usinagem de cerâmica em verde .....</i>	<i>39</i>
2.3.3	<i>Usinagem de cerâmica pré-sinterizada .....</i>	<i>44</i>
<b>2.4</b>	<b>Usinagem assistida por ultrassom .....</b>	<b>48</b>
2.4.1	<i>Torneamento assistido por ultrassom.....</i>	<i>49</i>
<b>2.5</b>	<b>Flexure hinge .....</b>	<b>58</b>
<b>2.6</b>	<b>Planejamento de experimentos .....</b>	<b>59</b>
2.6.1	<i>Experimento fatorial.....</i>	<i>61</i>
2.6.2	<i>Experimento central composto .....</i>	<i>62</i>
2.6.3	<i>Análise de variância .....</i>	<i>64</i>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>65</b>
<b>3.1</b>	<b>Corpos de prova .....</b>	<b>66</b>
3.1.1	<i>Método de fixação do corpo de prova .....</i>	<i>69</i>
<b>3.2</b>	<b>Montagem e preparação da bancada de ensaio para a usinagem ultrassônica ....</b>	<b>69</b>
3.2.1	<i>Sistema ultrassônico .....</i>	<i>70</i>
3.2.2	<i>Projeto e usinagem dos componentes.....</i>	<i>74</i>
3.2.3	<i>Amplitude do sistema elaborado .....</i>	<i>78</i>
3.2.4	<i>Monitoramento das forças de corte .....</i>	<i>81</i>

3.2.5	<i>Ferramenta de corte</i> .....	82
3.2.6	<i>Montagem do banco de ensaio</i> .....	83
<b>3.3</b>	<b>Métodos de análise da ferramenta de corte e dos corpos de prova</b> .....	<b>84</b>
<b>3.4</b>	<b>Planejamento de experimentos</b> .....	<b>84</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>89</b>
<b>4.1</b>	<b>Análise dos resultados obtidos pelo DOE fatorial fracionário</b> .....	<b>89</b>
4.1.1	<i>Resultados para cerâmica em verde</i> .....	90
4.1.1.1	Análise do acabamento e rugosidade superficial .....	90
4.1.1.2	Análise das forças.....	99
4.1.2	<i>Resultados para cerâmica pré-sinterizada</i> .....	104
4.1.2.1	Análise do acabamento superficial.....	104
4.1.2.2	Análise das forças.....	111
<b>4.2</b>	<b>Análise dos resultados obtidos pelo DOE superfície de resposta</b> .....	<b>118</b>
4.2.1	<i>Resultados para cerâmica em verde</i> .....	120
4.2.2	<i>Resultados para cerâmica pré-sinterizada</i> .....	124
<b>4.3</b>	<b>Desgaste da ferramenta de corte</b> .....	<b>129</b>
4.3.1	<i>Resultados para cerâmica em verde</i> .....	130
4.3.2	<i>Resultados para cerâmica pré-sinterizada</i> .....	138
<b>4.4</b>	<b>Análise de precisão de usinagem de cerâmicas em verde e pré-sinterizadas</b> .....	<b>145</b>
<b>4.5</b>	<b>Análise geral das variáveis de usinagem de cerâmicas avançadas</b> .....	<b>147</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>149</b>
<b>6</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>151</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>153</b>
	<b>APÊNDICE A – Forças mensuradas em cada réplica dos ensaios fatorial fracionário</b> .....	<b>158</b>
	<b>APÊNDICE B – Análise de variância gerada no DOE fatorial fracionário para as variáveis (<math>R_a</math> - <math>F_c</math> - <math>F_f</math> - <math>F_p</math>)</b> .....	<b>160</b>

<b>APÊNDICE C – Desgaste gerado na ferramenta de corte em cada passe pelos métodos CT e UAT nos compactos em verde.....</b>	<b>161</b>
<b>APÊNDICE D – Desgaste gerado na ferramenta de corte em cada passe pelos métodos CT e UAT nos compactos pré-sinterizados.....</b>	<b>163</b>



## 1 INTRODUÇÃO

A demanda por componentes de precisão e alta precisão está cada vez maior em vários setores, como: engenharia biomédica, sistemas micro-eleto-mecânicos (MEMS), eletro-ótica, aeroespacial, dentre outros. Nesses componentes, além dos objetivos de alcançar tolerâncias estreitas e acabamentos de alta qualidade, várias aplicações exigem o uso de materiais frágeis, como vidros ópticos e cerâmicas avançadas que, devido às suas propriedades físicas, mecânicas, ópticas e eletrônicas, resultam em um aumento do interesse na utilização desses materiais (DEBNATH; SINGH; DVIVEDI, 2015; QIN et al., 2010; ZHANG et al., 2013). No entanto, o processamento e a fabricação de materiais duros e quebradiços por usinagem sempre foi um desafio para as indústrias, devido a sua alta dureza e a baixa tenacidade à fratura, que reduz sua usinabilidade (CHEN et al., 2018; SHARMA; PANDEY, 2016).

Uma das cerâmicas avançadas mais estudadas e tradicionalmente utilizadas como cerâmica estrutural é a alumina (óxido de alumínio -  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), devido à sua elevada dureza, alta resistência ao desgaste, estabilidade química, baixa densidade, alta temperatura de fusão, alta resistividade elétrica e baixo custo, além de oferta abundante (SENTHIL KUMAR; RAJA DURAI; SORNAKUMAR, 2004; WEFERS; MISRA, 1987). A Alumina apresenta várias aplicações, como: selos mecânicos, rolamentos, ferramentas de corte, isoladores elétricos, guias-fios, esferas para moagem, pistões para bombas, placas para fornos, substratos eletrônicos, componentes para máquinas industriais, dentre outros.

No entanto, devido à sua elevada dureza e baixa tenacidade, as cerâmicas avançadas apresentam dificuldades na usinagem se estiverem sinterizadas. Nesse sentido, a usinagem de cerâmica sinterizada deve ser minimizada principalmente devido à alta taxa de desgaste da ferramenta, que leva a limitações na remoção de materiais (LIU et al., 2017). Ressalta-se o elevado custo de fabricação, principalmente para componentes de geometrias complexas. (BESSHI; SATO; TSUTSUI, 1999; WESTERHEIDE et al., 1997).

Uma alternativa viável é realizar a usinagem da cerâmica no seu estado verde, é uma técnica amplamente utilizada na fabricação de componentes cerâmicos (LINDQVIST; CARLSTROM, 2002). A usinagem de cerâmica em verde representa um caminho alternativo a outros processos de fabricação, oferece um alto grau de flexibilidade e eficiência econômica para a usinagem de componentes cerâmicos (LIU et al., 2017). Além disso, esse processo é

favorável para alcançar uma forma complexa nos estágios iniciais do processamento da cerâmica (JANSSEN; SCHEPPOKAT; CLAUSSEN, 2008), sendo uma técnica estruturada na filosofia do *near-net-shape* (SALVENDY, 2001).

A usinagem de componentes cerâmicos em verde pode ser executada com quase todas as ferramentas convencionais e com as técnicas utilizadas para os metais (DESFONTAINES et al., 2005). Nesse caso, os processos convencionais de usinagem são possíveis devido a baixa resistência mecânica apresentada pelo estado verde, o que possibilita o uso de ferramentas de geometria definida e o emprego de altas taxas de remoção de material quando comparado com a usinagem de cerâmicas sinterizadas (JANSSEN; SCHEPPOKAT; CLAUSSEN, 2008; MAIER; MICHAELI, 1997; WESTERHEIDE et al., 1997).

Porém, devido à baixa resistência do compacto em verde, o processo pode resultar em baixa precisão de usinagem, o que dificulta, principalmente, a usinagem de componentes cerâmicos de geometria complexa, além da possibilidade de gerar micro danos nas bordas (LI et al., 2012), sendo a qualidade da superfície um dos quesitos mais importantes no processamento de cerâmica em verde (LIU et al., 2018).

Logo, outra possibilidade é optar pela usinagem de cerâmica pré-sinterizada, uma vez que a pré-sinterização (pré-queima) de materiais cerâmicos pode ser utilizada para aumentar a resistência do material e, conseqüentemente, melhorar a precisão da usinagem de componentes complexos. Porém, o desgaste da ferramenta de corte é maior quando comparado à usinagem no estado verde (LI et al., 2012), além de aumentar o custo de fabricação.

Para melhorar o desempenho da usinagem de materiais frágeis e de elevada dureza alguns métodos têm sido empregados, como por exemplo, a usinagem assistida por ultrassom. O qual é um método em que uma vibração de alta frequência e baixa amplitude é sobreposta no movimento da ferramenta ou na peça de trabalho para melhorar o processo de remoção do material. (CHEN et al., 2018). A aplicação dessa técnica a uma ampla gama de materiais mostra que ela pode melhorar consideravelmente o desempenho da usinagem (XU; ZHANG, 2015). Nesse sentido, os benefícios relatados incluem: redução nas forças de usinagem (WEREMCZUK; RUSINEK; WARMINSKI, 2015), melhoras no acabamento superficial e na precisão geométrica (AMINI et al., 2017), redução do desgaste da ferramenta e aumento da vida da ferramenta de corte (KHAJEHZADEH; RAZFAR, 2015).

Em relação à usinagem assistida por ultrassom em materiais cerâmicos, alguns estudos realizados em zircônia, alumina, nitreto de silício e cerâmicas ópticas mostraram que uma operação de usinagem de ultraprecisão poderia reduzir as fraturas frágeis pela aplicação de vibração ultrassônica nas ferramentas de corte. Porém, nenhum trabalho indicou que a usinagem no modo dúctil poderia ser alcançada (XU; ZHANG, 2015).

Cabe ressaltar que os estudos que relacionam a usinagem assistida por ultrassom em cerâmicas avançadas estão concentrados no processo de retificação, sendo realizados em cerâmicas sinterizadas. Assim, pesquisas que empregam o sistema de usinagem assistida por ultrassom em materiais cerâmicos em verde ou pré-sinterizados, principalmente as que se tratam do processo de torneamento, ainda são muito pouco exploradas e/ou divulgadas. Desse modo, no presente trabalho elaborou-se um sistema para o processo de torneamento assistido por ultrassom (*Ultrasonic Assisted Turning – UAT*), a fim de ser aplicado em materiais cerâmicos em verde e pré-sinterizados.

### 1.1 Objetivos do trabalho

O objetivo deste trabalho é aplicar o processo de torneamento assistido por ultrassom em materiais cerâmicos (alumina) em verde e pré-sinterizados, a fim de investigar os efeitos da vibração ultrassônica (sobreposta no movimento da ferramenta) no acabamento superficial, na rugosidade, nas forças de usinagem e no desgaste da ferramenta de corte. Para isso, foram desenvolvidos suportes para adaptar o atuador ultrassônico e a ferramenta de corte na máquina, tendo como ênfase o suporte *flexure hinge*. Para executar o processo, foi realizado o DOE pelos modelos fatorial fracionário ( $2^{k-1}$ ) e de superfície de resposta (central composto) e aplicou-se a ANOVA em alguns dados obtidos. Também, foram realizados testes para avaliar o comportamento e o acabamento dos compactos em verde e pré-sinterizados na operação de sangramento radial e foi efetuada uma análise geral das variáveis de usinagem de cerâmicas avançadas.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são abordados conceitos sobre as cerâmicas avançadas (tendo a alumina como ênfase), etapas de fabricação, usinagem de cerâmica avançada, torneamento assistido por ultrassom, planejamento de experimentos (fatorial e superfície de resposta) e análise de variância.

### 2.1 Características, propriedades e aplicações das cerâmicas avançadas

Materiais cerâmicos avançados têm propriedades excelentes como alta resistência mecânica, boa estabilidade química, alta rigidez, estabilidade a altas temperaturas, estabilidade química e baixa densidade (AGARWAL; RAO, 2008; LIU et al., 2014). Esses atributos são superiores aos polímeros ou metais, permitindo que as cerâmicas monolíticas sejam usadas em aplicações em diversas áreas, como: geração de energia, aeroespacial, militar, transporte, ciências biomédicas, eletrônica, dentre outros (CYGAN et al., 2017). 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 (SU; DHARA; WANG, 2008).

Apesar das suas ótimas propriedades, as cerâmicas avançadas são frágeis devido ao tipo de ligações químicas que as formam (ligações iônicas e covalentes), na qual apresenta como maior desvantagem a baixa tenacidade à fratura, o que muitas vezes limita sua aplicação. (AGARWAL; RAO, 2008). Para superar essa restrição, pesquisas recentes buscam melhorar a tenacidade das cerâmicas pela adaptação da microestrutura em micro/nanocompósitos ou pela adição de reforço, como também, ambos ao mesmo tempo (CYGAN et al., 2017).

Um dos materiais cerâmicos avançados mais utilizados é a alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), é o mais abundante de todos os óxidos de alumínio. Ela é empregada em muitos campos e tem sido usada em aplicações como: refratários, elétricos, máquinas-ferramentas, microondas, odontologia, isolamento, dentre outros (AZARMI; AMIRI, 2019). Isso é devido, principalmente, à sua excelente combinação de propriedades, na qual apresenta bom isolamento elétrico, estabilidade em altas temperaturas, elevada resistência ao desgaste e

resistência química, além de ser um material de baixo custo (PENIDE et al., 2015).

A alumina é extremamente dura e resistente a riscos (9 na escala de Mohs) e possui excelente resistência à corrosão em ambientes *in vivo*. As propriedades físicas da alumina, como resistência à fadiga e resistência à fratura, dependem do tamanho, da porosidade e da pureza do grão. Além disso, a alumina exibe alta molhabilidade superficial, o que resulta em um baixo coeficiente de atrito em ambiente úmido (RATNER; HOFFMAN; SCHOEN, 2012). Assim, para conseguir usufruir das características tecnologicamente importantes desse material, torna-se necessário o processamento mais adequado possível (FANTOZZI et al., 2001). A Tabela 2.1 expõe algumas propriedades mecânicas da alumina com 99,5% de pureza.

Tabela 2.1 - Propriedades mecânicas da alumina com 99,5% de pureza.

<b>Propriedades mecânicas da alumina (99,5%)</b>	
Densidade	3.97 g/cm <sup>3</sup>
Resistência à flexão	345 MPa
Módulo de elasticidade	300 GPa
Módulo de cisalhamento	124 GPa
Módulo de Bulk	172 GPa
Coefficiente de Poisson	0.21
Resistência à compressão	2100 MPa
Dureza	1000 kg/mm <sup>2</sup>
Tenacidade à fratura	3.5 MPa.m <sup>1/2</sup>

Fonte: Adaptado de (RATNER; HOFFMAN; SCHOEN, 2012).

## 2.2 Etapas de fabricação de peças cerâmicas avançadas

A fabricação de peças cerâmicas é em sua maioria obtida por meio de pó, ou seja, para produzir uma peça cerâmica, os materiais cerâmicos em seu estado natural passam por várias etapas sequenciais (BORGER et al., 2002). De forma resumida, os pós que as constituem são moídos e misturados, sendo posteriormente adicionados aditivos para melhorar o processo. A preparação da massa tem por objetivo proporcionar uma mistura homogênea das matérias-primas, pois influenciam no comportamento mecânico tanto dos grânulos como da peça conformada (ALBARO, 2000). Essa massa passa por um processo de secagem e, em seguida,

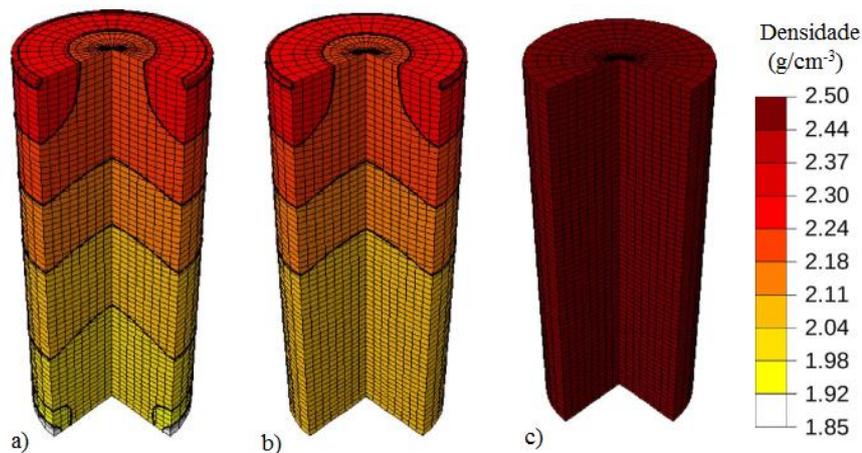
são prensados em moldes metálicos ou flexíveis para dar forma às peças compactadas (estado verde). Após a compactação, as peças são levadas ao aquecimento para a sinterização, para atingir a dureza e a densidade final desejada do compacto (SCHELLER, 1994).

Para a fabricação de componentes cerâmicos é necessário o uso de vários aditivos, como: lubrificantes, ligantes, plastificantes e defloculantes, (ALBARO, 2000). O ligante é adicionado durante o processamento de pós cerâmicos, que visa melhorar as propriedades mecânicas dos corpos em verde durante e depois da operação de conformação. A resistência mecânica deve ser alta o suficiente para manter a integridade do corpo em verde durante a ejeção do molde, manuseio subsequente e na usinagem posteriormente. Para tanto, o tipo e a quantidade de ligante variam dependendo da natureza do processo de fabricação (KUMAR et al., 2014).

Em relação à conformação, os diversos processos utilizados visam a maior produtividade a um menor custo e, cada processo, influencia de forma diferente o acabamento superficial da peça a ser usinada (RICHERSON, 1992). Os processos convencionais de moldagem para materiais cerâmicos podem ser: colagem, injeção em moldes, *gelcasting*, prensagem uniaxial (simple e dupla ação), prensagem isostática (técnica do molde seco e molde úmido) (ALBARO, 2001), conformação coloidal (colagem de barbotina, *slip casting*) e moldagem plástica (extrusão e moldagem por injeção) (BUKVIC, 2015).

A prensagem uniaxial (*closed-die*) e a prensagem isostática são técnicas amplamente utilizadas na indústria para a conformação de peças cerâmicas em verde. Esses processos são geralmente utilizados na indústria devido ao custo relativamente baixo, por proporcionarem alta velocidade de compactação e possibilitarem a produção de peças complexas (MELO et al., 2018). A Figura 2.1 ilustra uma simulação numérica do procedimento experimental da distribuição de densidade no compacto em verde após o processo de compactação, o compacto foi primeiramente prensado pelo método uniaxial (para dar forma ao compacto) e, posteriormente, prensado pelo método isostático duas vezes.

Figura 2.1 - Variação da densidade após a compactação.



Densidade obtida após a prensagem: a) Uniaxial, 75 MPa. b) Isostática, 25 MPa. c) Isostática, 200 MPa.

Fonte: Adaptado de: (MELO et al., 2018).

Observando a Figura 2.1, o atrito entre o pó de alumina e as paredes do molde conduz a um gradiente de densidade relevante na prensagem uniaxial (varia conforme o molde empregado). Após a primeira prensagem isostática, a densidade foi parcialmente homogeneizada na porção inferior do compacto, uma vez que a pressão aplicada não foi suficiente para compactar todas as regiões da amostra. No entanto, a segunda prensagem isostática a 200 MPa foi suficiente para resultar na distribuição homogênea da densidade.

Na prensagem uniaxial, ocorre intenso atrito entre as partículas adjacentes e com a parede do molde, o que acarreta em um preenchimento heterogêneo do pó na cavidade do molde, assim, a peça compactada apresenta vários gradientes de densidade. Já a prensagem isostática, resulta em um alto grau de empacotamento das partículas e de homogeneidade, devido à aplicação da pressão em todas as direções do compacto, o que propicia uma distribuição homogênea da pressão sobre a superfície, independente da geometria da peça (ALBARO, 2001).

A existência de gradientes de densidade distintos faz com que em cada região da peça tenha contração volumétrica de diferente intensidade na sinterização. Consequentemente, haverá valores de contrações diferentes, o que resulta em deformação da peça sinterizada (BUKVIC et al., 2012).

Sobre a sinterização, é o processo de união entre as partículas do pó cerâmico, o que leva a um grande aumento na resistência mecânica e na redução da porosidade e do volume (RICHERSON, 1992). O termo sinterização abrange quatro fenômenos (consolidação,

densificação, crescimento de grão e reações físico-químicas) que acontecem simultaneamente e muitas vezes competem entre si (BOCH; NIEPCE, 2007). A densificação e a nucleação do grão no processo de sinterização influenciam a microestrutura e as propriedades mecânicas.

Nesse processo, os compactos são submetidos a temperaturas elevadas que, para a maioria dos produtos, situa-se entre 800 °C a 1700 °C. Para o caso da alumina, o aquecimento ocorre na faixa de 0,5 a 0,75 da sua temperatura de fusão (RAHAMAN, 2003). Essa etapa pode ser realizada em fornos do tipo contínuo ou intermitente, 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. (NAMPI et al., 2011; RAHAMAN, 2003).

### 2.3 Usinagem de cerâmica

Devido às exigências do mercado, a usinagem tem sido amplamente empregada na manufatura de cerâmicas avançadas. Ela é utilizada para obter a precisão dimensional e forma dos componentes cerâmicos, pois, na maioria das vezes, somente são alcançadas pela usinagem, sendo inacessíveis pelos métodos comuns de conformação. Assim, a etapa de usinagem pode ser executada na condição em verde, pré sinterizada e após a sinterização.

#### 2.3.1 Usinagem pós-sinterização

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

Devido às propriedades da cerâmica no estado sinterizado, existem poucas técnicas de usinagem convencional desses materiais (WU; MCANANY, 1995), e desse modo, a usinagem por meio de retificação é o principal processo para alcançar as tolerâncias desejadas e integridade superficial. Logo, para maior eficiência no processo é essencial uma seleção criteriosa dos parâmetros operacionais, para maximizar a taxa de remoção e controlar a integridade superficial. No entanto, a retificação usando altas taxas de remoção de material é limitada, principalmente pelos danos na peça cerâmica, devido às trincas médias e laterais causadas durante a usinagem (AGARWAL; RAO, 2008).

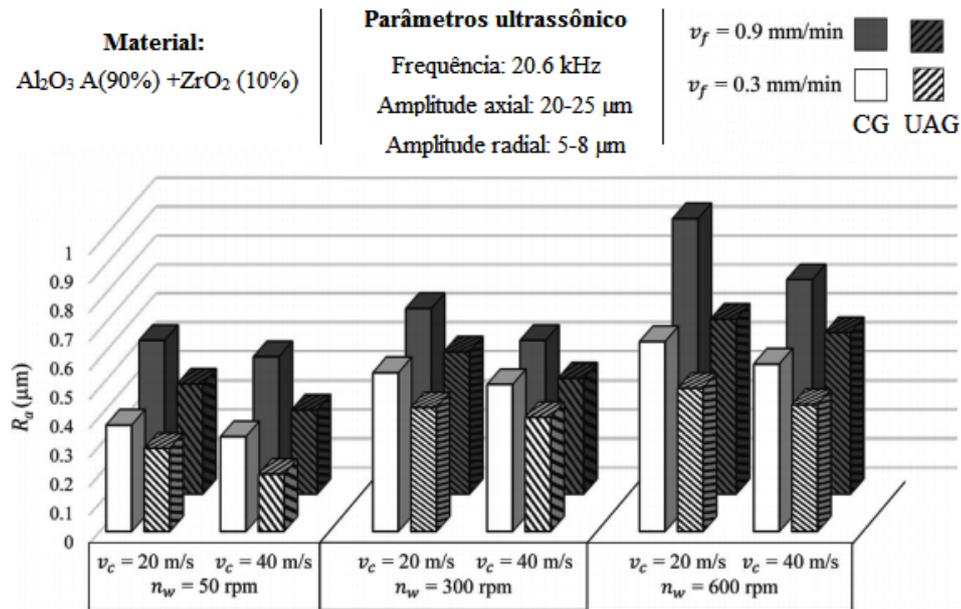
O processo de usinagem convencional assume uma posição importante em termos de economia e precisão, e, para obter um acabamento de alto nível (mínimos danos gerados) após a sinterização, é necessário utilizar equipamentos específicos, como ferramenta (rebolo) de diamante, o que torna a operação muito cara e pode representar até 80% dos custos da produção de um componente cerâmico (DESFONTAINES et al., 2005; FANTOZZI et al., 2001).

Na tentativa de melhorar a usinagem, processos não convencionais de usinagem podem ser empregados, como por exemplo, a retificação assistida por ultrassom (*Ultrasonic Assisted Grinding – UAG*). Esse é um método de usinagem ultrassônica na qual as ferramentas vibram ultrasonicamente e giram em alta velocidade durante o processo convencional de retificação (LI et al., 2017; YUQIN et al., 2019).

A usinagem assistida por ultrassom (apresentado no tópico 2.4) tem sido eficiente para o processamento de materiais duros e quebradiços, como por exemplo, as aplicações do método UAG que são encontradas em vidro óptico, cerâmicas avançadas, materiais compostos, dentre outros. Os benefícios apresentados, quando comparado com a retificação convencional (*Conventional Grinding - CG*), desde que adequadamente empregada, são: menores forças, redução da temperatura, melhor qualidade superficial e maior vida útil da ferramenta (ZHENG et al., 2018).

No trabalho de Zahedi et al. (2015), foi elaborada uma configuração sendo utilizadas vibrações ultrassônicas na retificação cilíndrica externa de um material cerâmico composto de alumina-zircônia, por meio de um rebolo diamantado. Como resultado, os autores concluíram que a energia de retificação pode ser reduzida em até 35% dependendo dos parâmetros utilizados no processo, além de propiciar menores valores de rugosidade. A Figura 2.2 exhibe os valores de rugosidade ( $R_a$ ) obtidos pelos métodos CG e UAG. É verificada uma redução da rugosidade em todas as condições pelo sistema ultrassônico.

Figura 2.2 - valores de Ra obtidos pelos métodos CG e UAG.



Fonte: Adaptado de: (ZAHEDI; TAWAKOLI; AKBARI, 2015).

No entanto, a eficácia do UAG relatada de diferentes fontes mostrou grande discrepância devido às diferenças de frequências, amplitudes e parâmetros de processamento empregados. Assim, torna-se cada vez mais importante a realização de estudos para a UAG (ZHENG et al., 2018).

### 2.3.2 Usinagem de cerâmica em verde

Devido às dificuldades na usinagem de cerâmica sinterizada e a necessidade de redução de custos, bem como reduzir os danos gerados, a usinagem de cerâmica em verde é um método utilizado para substituir a usinagem direta de cerâmica sinterizada. Em comparação com o estado sinterizado, esse método é capaz de proporcionar maiores taxas de remoção de material, menor potência e menor desgaste da ferramenta (LIU et al., 2018). Além disso, pode ser executado com quase todas as ferramentas convencionais e com técnicas utilizadas na usinagem dos metais (DEFONTAINES et al., 2005). No entanto, a taxa de remoção de material é limitada, devido à baixa resistência mecânica dos componentes no estado “não sinterizado”, que geralmente é inferior a 2,0 MPa (MARGARIDO et al., 2016).

Tal método permite uma excelente vantagem em relação à ferramenta de corte, além de não exigir ferramentas caras, as forças de corte aplicadas sobre elas são pequenas e a geração de calor durante o processo é baixa, o que reduz os custos das operações de acabamento final. Logo, a usinagem de uma peça cerâmica no estado verde pode ser até 1000 vezes mais rápida do que a usinagem convencional de cerâmicas sinterizadas (DESFONTAINES et al., 2005; ROBERT-PERRON et al., 2005). A Tabela 2.2 exhibe a comparação de algumas propriedades de uma coroa dentária fabricada de alumina em verde e sinterizada.

Tabela 2.2 - Propriedades mecânicas da alumina.

<b>Condição (estado)</b>	<b>Densidade % (valor teórico)</b>	<b>Resistência à flexão (MPa)</b>	<b>Dureza Vickers (GPa)</b>
Verde	62	10.2 ± 0.5	0.12 ± 0.20
Sinterizada	99	348.3 ± 27.8	20.89 ± 5

Fonte: Adaptado de: (MOHANTY et al., 2013)

No entanto, há várias questões e parâmetros que precisam ser analisados para obter resultados satisfatórios na fabricação de componentes cerâmicos pela usinagem no estado verde, tais como: formulação adequada do material, aditivos, gradientes de densidade (ROBERT-PERRON et al., 2005), resistência mecânica adequada para suportar a ação do corte (LIU et al., 2017), controle da retração causada durante a sinterização, suportes para fixação dos compactos em verde para a usinagem e seleção da ferramenta apropriada (material e geometria) para o processo (MOHANTY et al., 2013; SU; DHARA; WANG, 2008).

Portanto, os compactos em verde devem ser resistentes o suficiente para resistir às tensões induzidas em relação à fixação e ao processo de usinagem, devido à alta taxa de falhas por fratura (LIU et al., 2017). Assim, os parâmetros de usinagem devem ser cuidadosamente selecionados e controlados, para evitar tensões excessivas no material frágil, que pode resultar em trincas, quebras ou acabamento superficial ruim (NG; HULL; HENSHALL, 2006).

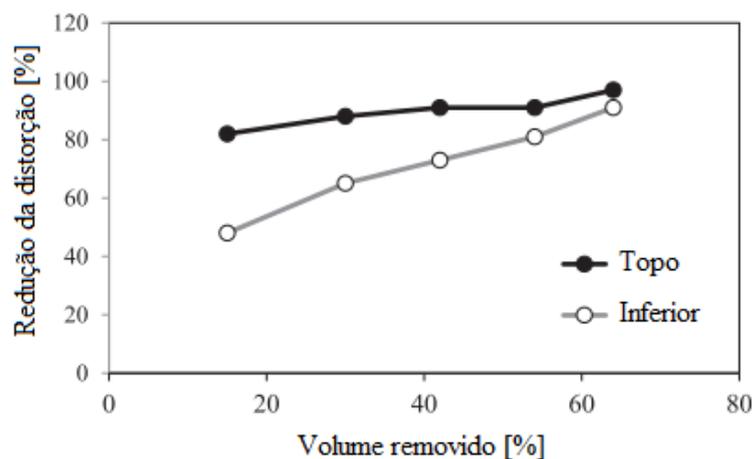
O processo de remoção de material da cerâmica no estado verde é diferente aos do que ocorre nos metais, principalmente, quando se refere aos metais dúcteis, ela é usinada através da fratura do material e não da deformação plástica. A aresta de corte esmaga a cerâmica que

entra em contato enquanto se move, formando pequenas partículas que resultam em um pó, ao contrário dos metais, que na sua maioria, apresentam características específicas (tipo e forma) para o cavaco (HERLINGER; SCHOETTNER; ZIMMER, 2006).

Em relação aos parâmetros de usinagem empregados no torneamento convencional, segundo Xu e Jahanmir (1996), a velocidade de corte ( $V_c$ ) pouco influencia no acabamento superficial da peça cerâmica em verde. Entretanto, devido à baixa resistência apresentada no material cerâmico em verde e aos esforços impostos pelo aumento da força centrífuga, a  $V_c$  é limitada em operações de torneamento. Já em relação ao avanço, o aumento do mesmo gera maiores valores de rugosidade. No estudo de Maier e Michaeli (1997), os autores verificaram de modo geral que o aumento do avanço produziu incremento significativo da rugosidade e nas forças geradas, e, o aumento da profundidade de corte causou leve redução da rugosidade, porém, gerou aumento da força resultante. Para Sheppard (1999), a força de corte aumenta linearmente com o aumento da  $V_c$ , e as forças totais de usinagem atingem até 25 N.

No trabalho de Sanchez et al. (2018) foram torneados compactos em verde de alumina prensados pelo método uniaxial por 120 MPa. Os autores verificaram que a usinagem foi benéfica para reduzir a distorção gerada no processo de sinterização, visto que a maior distorção ocorreu na peça que não foi usinada. A Figura 2.3 mostra o comportamento da distorção de peças de alumina sinterizadas para cada um dos cinco volumes de material removido (na parte do topo e inferior da peça). Os volumes de 15, 30, 42, 54 e 64% correspondem, respectivamente, ao sobrematerial removido de 1, 2, 3, 4 e 5 mm.

Figura 2.3 - Redução da distorção para diferentes volumes de material removidos.

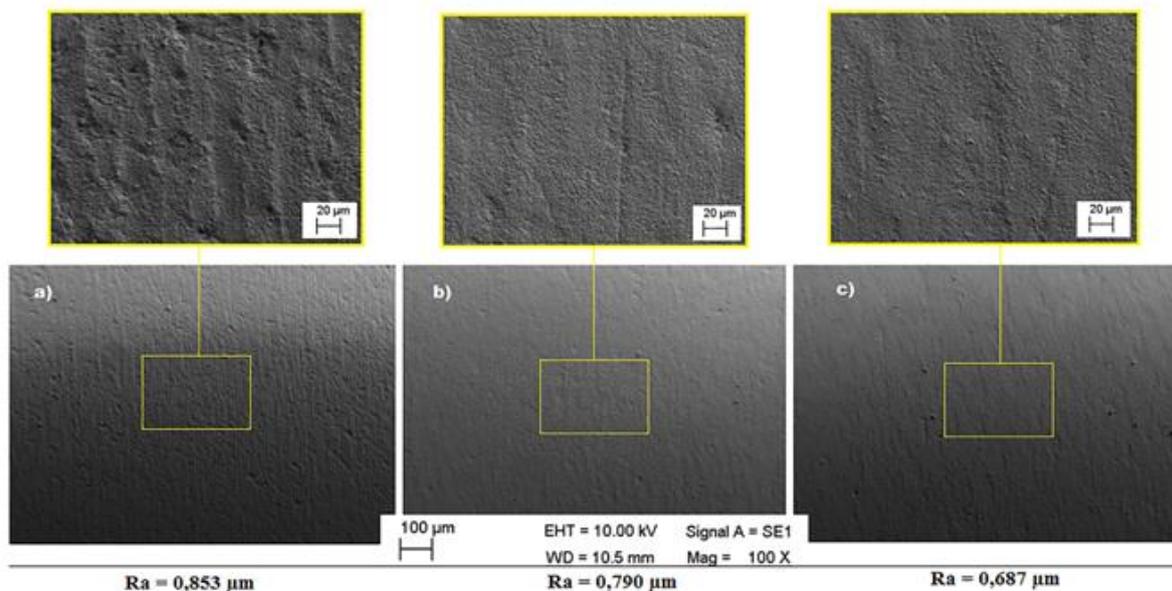


Fonte: (SANCHEZ et al., 2018).

Pela Figura 2.3, os autores verificaram que as peças apresentaram desvios de distorção diferentes em ambas as extremidades após a sinterização, fato devido aos gradientes de densidade. Como também, foi verificado que quanto maior o volume removido, menor a distorção gerada, assim, demonstra-se benéfico o processo de usinagem em verda para redução da distorção. Em relação às forças de corte, não ultrassou 1,8 N no decorrer de cinco passes executados.

No estudo de Gonçalves Júnior et al. (2015), verificou-se que a profundidade de corte não afetou consideravelmente a qualidade das superfícies. Isso se deve ao fato de que com profundidades de corte menores, aumenta-se o número de passes necessários para remoção do sobre material da peça, o que inevitavelmente leva ao maior desgaste da ferramenta, maior força de usinagem e pior acabamento superficial. Além disso, também foi verificado que o raio de ponta da ferramenta influencia o acabamento superficial e que os danos em verde são conduzidos após a sinterização. A Figura 2.4 exhibe os acabamentos sinterizados (realizado o torneamento em verde da alumina), é verificado melhor acabamento conforme o aumento do raio de ponta da ferramenta.

Figura 2.4 - Acabamento gerado em função do raio de ponta da ferramenta.



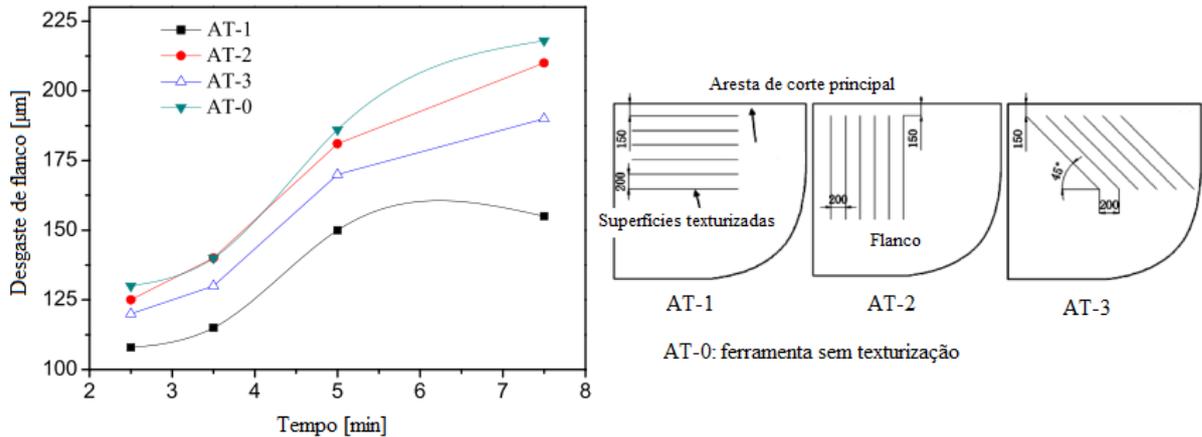
a) Raio de ponta 0,05 mm. b) Raio de ponta 0,1 mm. c) Raio de ponta 0,2 mm.

Fonte: Adaptado de: (GONÇALVES JÚNIOR, 2014).

Para reduzir o desgaste da ferramenta de corte, Liu et al. (2017) produziram diferentes tipos de texturas na face do flanco das ferramentas de metal duro. Posteriormente, foi

executado o torneamento da alumina em verde, cujos resultados são apresentados na Figura 2.5, sendo consideradas as diferentes texturizações empregadas nas ferramentas.

Figura 2.5 - Desgaste de flanco em função da texturização da ferramenta de corte.

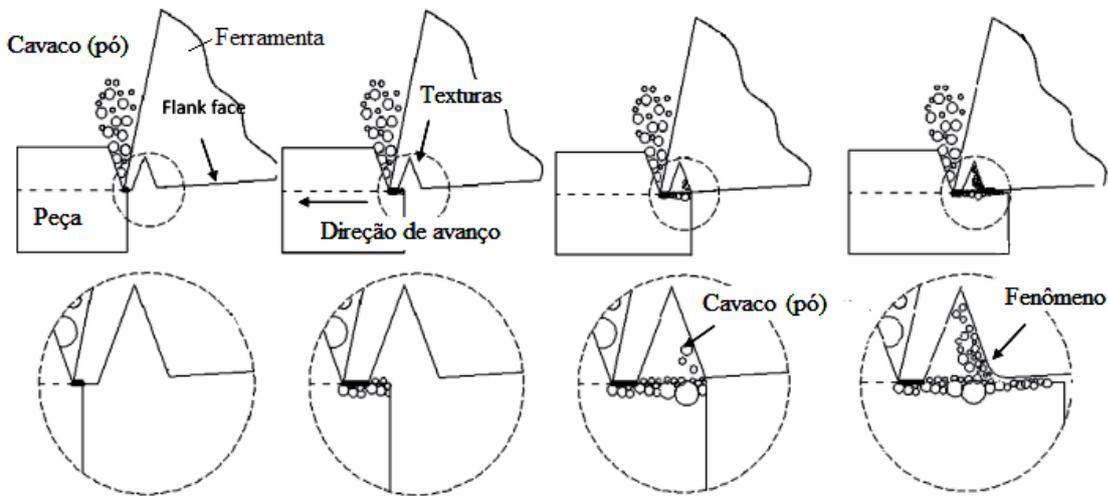


Fonte: Adaptado de: (LIU et al., 2017)

Foi indicado que as ferramentas de corte texturizadas apresentaram menor desgaste de flanco em comparação com a ferramenta não texturizada. A ferramenta AT-1 apresentou o menor desgaste entre as ferramentas de corte. Logo, as ferramentas texturizadas desempenharam um papel na melhoria da resistência ao desgaste dos flancos durante o torneamento de cerâmicas em verde.

Os autores verificaram que as texturas na face do flanco exibiam fenômeno de corte derivado durante o corte, que auxiliou na remoção de partículas duras entre a interface ferramenta-peça (Figura 2.6). As texturas nas faces dos flancos também poderiam ser usadas como armazenamento de cavacos em pó, pois podem proteger o sulco da textura do desgaste abrasivo. Vale ressaltar que as texturas na face do flanco das ferramentas de corte não tiveram efeito na rugosidade das superfícies usinadas.

Figura 2.6 - Diagrama esquemático do processo de desgaste das ferramentas texturizadas.



Ferramenta com face de flanco texturizada (AT-1).

Fonte: Adaptado de: (LIU et al., 2017)

### 2.3.3 Usinagem de cerâmica pré-sinterizada

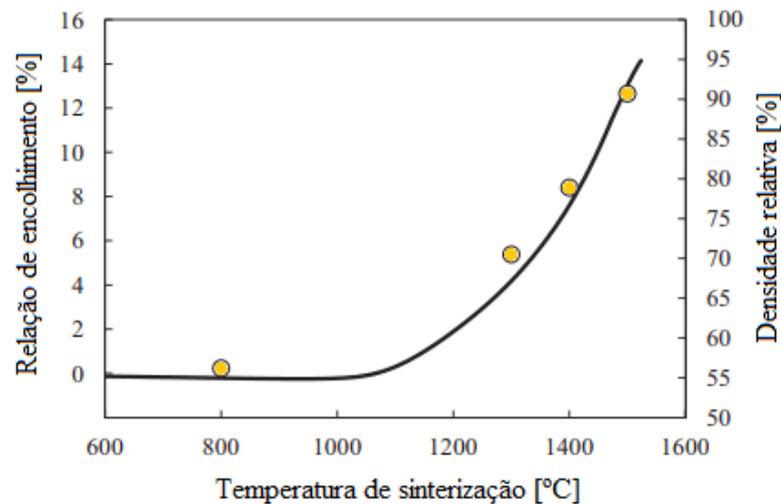
Para melhorar a precisão de usinagem, outra opção viável é realizar a usinagem da cerâmica pré-sinterizada, denominada também usinagem a branco (*White Machine*). Nesse estado (estágio), o compacto é parcialmente sinterizado, normalmente em torno de 70% da temperatura de sinterização.

A usinagem de compactos cerâmicos em verde pode resultar em baixa precisão de usinagem, principalmente na usinagem de componentes de geometria complexa, devido à baixa resistência apresentada nesse estado, além da facilidade de gerar micro danos nas bordas. Assim, a pré-sinterização de materiais cerâmicos pode ser usada para aumentar a resistência do material e, conseqüentemente, melhorar a precisão da usinagem e reduzir os danos nas bordas. Porém, o desgaste da ferramenta de corte e das forças geradas são maiores em relação à usinagem em verde (LI et al., 2012).

O compacto pode alcançar vários graus de tensão acima das tensões no estado verde, que depende da temperatura empregada durante o processo de sinterização parcial. Nesse estado, o compacto parcialmente aglomerado está livre de materiais orgânicos e com retração de até 2%, além de não gerar crescimento de grão (MARGARIDO, 2011). Para verificar o comportamento da retração e densidade relativa da alumina, a Figura 2.7 ilustra a densificação

de uma alumina após a sinterização em 1300, 1400 e 1500 °C. Observa-se que a queima do ligante ocorreu em torno de 800 °C e o encolhimento (retração) tem início após 1000 °C.

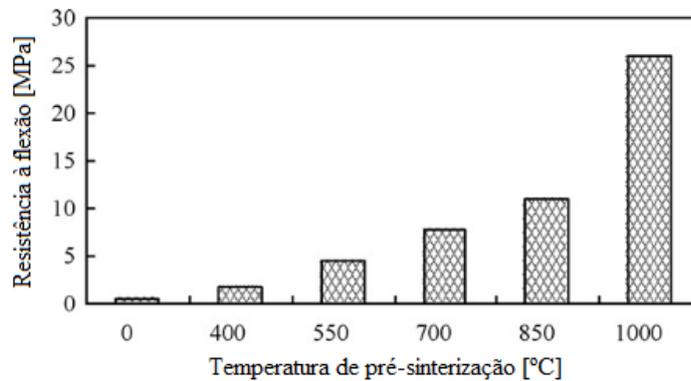
Figura 2.7 - Densificação da alumina durante a sinterização.



Fonte: adaptado de (HONDO et al., 2016).

O processo de pré-sinterização tem influência significativa na resistência à flexão do material cerâmico. No estudo de Li et al. (2012), os autores analisaram a resistência à flexão em função da temperatura de pré-sinterização em corpos de alumina com 99.99% de pureza (Figura 2.8). Concluíram que a resistência à flexão aumenta com a temperatura, e, quando a temperatura atinge 1000 °C, o compacto atinge uma resistência média de 26 MPa, na qual é mais que o dobro da amostra obtida a 850 °C. Porém, o encolhimento até 850 °C é inferior a 0,1%, ao contrário do que ocorre quando a temperatura atinge 1000 °C, em que há um aumento considerável da retração.

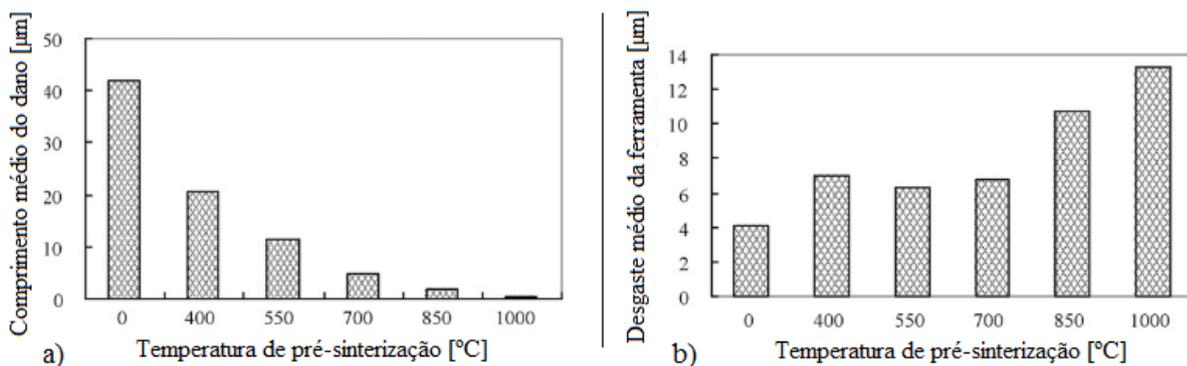
Figura 2.8 - Resistência à flexão em função da temperatura de pré-sinterização.



Fonte: adaptado de (LI et al., 2012).

Ainda sobre o estudo de Li et al. (2012), a pré-sinterização foi empregada para aumentar a resistência do material e melhorar a precisão da usinagem. Por conseguinte, foi realizada micro-usinagem em amostras obtidas por várias temperaturas de pré-sinterização, visou-se avaliar os danos gerados na micro-cavidade da peça e o desgaste das ferramentas de corte. A Figura 2.9 exibe os valores de danos e desgastes gerados em função da temperatura de pré-sinterização.

Figura 2.9 - Danos e desgaste gerados em função da temperatura de pré-sinterização.



a) Danos gerados na micro-cavidade da peça. b) Desgaste da ferramenta

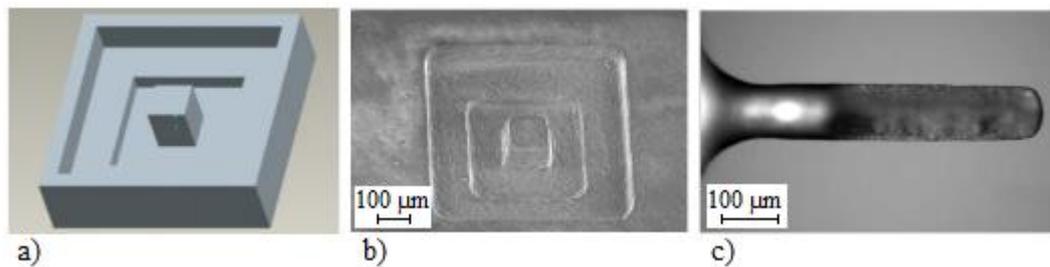
Fonte: adaptado de (LI et al., 2012).

Pode-se observar na Figura 2.9 que o comprimento médio danificado diminui com o aumento da temperatura de pré-sinterização. Em relação ao desgaste da ferramenta, o comportamento é inverso quando comparado aos danos, o desgaste na usinagem de cerâmica compacta sem a pré-sinterização é muito menor do que com a pré-sinterização. Portanto, a

resistência mecânica de um compacto cerâmico aumenta com o incremento da temperatura de pré-sinterização. Logo, reduz o dano médio e eleva o desgaste da ferramenta. De fato, a temperatura de pré-sinterização influencia na qualidade de usinagem (DEMARBAIX et al., 2018).

A Figura 2.10 ilustra a cavidade usinada com velocidade de deslocamento de  $10 \mu\text{m/s}$  e a ferramenta após a usinagem da cerâmica pré-sinterizada a uma temperatura de  $850 \text{ }^\circ\text{C}$ . A micro-cavidade não exibe evidência de lascas ou fraturas superficiais perto das bordas.

Figura 2.10 - Cavidade e ferramenta de corte após a usinagem.



a) Micro-cavidade projetada. b) Micro-cavidade após usinagem. c) Micro-ferramenta após a usinagem

Fonte: adaptado de (LI et al., 2012).

A usinagem de cerâmica pré-sinterizada é largamente empregada para confecção de próteses odontológicas, sendo a zircônia Y-TZP um dos materiais mais empregados para esse fim. Normalmente, tais componentes são confeccionadas por usinagem no sistema CAD/CAM a partir de um bloco pré-sinterizado, que apresenta dureza suficiente para o manuseio e usinagem. Além disso, os blocos Y-TZP totalmente sinterizados são mais difíceis de usar, introduzem mais defeitos superficiais, diminuem a vida das ferramentas e aumentam o tempo e os custos envolvidos na fabricação (DEMARBAIX et al., 2018; ZUCUNI et al., 2017).

Outro exemplo, o *coping* (base cerâmica para implantes), apresenta geometria complexa e, se for usinado na forma pré-sinterizada, favorece a redução de custo de processo e ainda pode reduzir as distorções na forma final após a sinterização. A dureza imposta pela pré-sinterização é necessária para proporcionar estabilidade no manuseio, porém, se for muito duro, pode prejudicar a usinagem, uma vez que altas temperaturas de pré-sinterização podem afetar a rugosidade do material usinado além de promover desgaste excessivo das ferramentas. (KAVASHIMA et al., 2017)

## 2.4 Usinagem assistida por ultrassom

Ultimamente componentes de precisão e alta precisão estão cada vez mais em demanda para vários setores, como os de engenharia biomédica, sistemas micro-eleto-mecânicos (MEMS), eletro-óptica, aeroespacial dentre outros (QIN et al., 2010). Esses componentes, além dos objetivos de alcançar tolerâncias estreitas e acabamentos de alta qualidade, também são exigidos em muitas aplicações de materiais duros e quebradiços, como vidros ópticos e cerâmicas avançadas, devido às suas propriedades físicas, mecânicas, ópticas e eletrônicas superiores (DEBNATH; SINGH; DVIVEDI, 2015; ZHANG et al., 2013). No entanto, o processamento e a fabricação de materiais duros e quebradiços por usinagem sempre foi um desafio para as indústrias, devido à sua alta dureza e à baixa tenacidade à fratura, o que reduz a usinabilidade (apresentam desgaste excessivo da ferramenta e facilidade de gerar danos durante a usinagem). Outro fator importante é devido a alguns componentes apresentarem geometrias complexas, o que dificulta ainda mais a usinagem de alta precisão (CHEN et al., 2018; SHARMA; PANDEY, 2016).

Esses componentes, na maioria das vezes, se forem fabricados pelos métodos tradicionais de usinagem não atendem às exigências determinadas (acabamento de precisão). Além disso, métodos de usinagem não tradicionais, como: usinagem eletroquímica, usinagem por descarga elétrica, usinagem por feixe de laser, dentre outros, elevam os custos de fabricação devido ao alto consumo de energia, restrições na usinagem de certos materiais e distorção dimensional na superfície usinada. Portanto, para atender a essas necessidades (acabamento de precisão e redução elevada de custos), a combinação de métodos mais modernos de produção com os tradicionais são viáveis, como por exemplo, a usinagem tradicional com a vibração ultrassônica, sendo denominada usinagem assistida por ultrassom (SAJJADY et al., 2016).

Esse tipo de usinagem é um método no qual a vibração de alta frequência e baixa amplitude é sobreposta no movimento da ferramenta ou na peça de trabalho para melhorar o processo de remoção do material, pois, a mecânica de corte é alterada e pode melhorar o desempenho da usinagem (CHEN et al., 2018). Em síntese, a aplicação dessa técnica a uma ampla gama de materiais mostrou que o processo pode melhorar consideravelmente o desempenho da usinagem (XU; ZHANG, 2015).

Nesse método, a energia elétrica de alta frequência é convertida em vibrações mecânicas através de um atuador piezoelétrico ou atuador magnetostritivo. O sonotrodo (*booster e horn*) guiam as ondas acústicas e amplificam o movimento ultrassônico, isso faz com que a ferramenta vibre e produz um movimento harmônico ao longo da direção do impulso em alta frequência (geralmente opera na frequência entre 20 e 40 kHz) e baixa amplitude (situada entre 1 a 15  $\mu\text{m}$ ) (XU; ZHANG, 2015; XU; ZHANG; WU, 2014).

A usinagem ultrassônica tem sido empregada para o processamento de materiais duros e frágeis em vários processos de usinagem, como: torneamento (*ultrasonic assisted turning - UAT*), fresamento, retificação (*ultrasonic assisted grinding - UAG*) e furação (*vibrationassisted drilling - VAD*). Os benefícios relatados incluem o seguinte: redução nas forças de usinagem (WEREMCZUK; RUSINEK; WARMINSKI, 2015), melhor acabamento superficial, precisão de geometria (AMINI et al., 2017), redução do desgaste da ferramenta e aumento da vida da ferramenta de corte (KHAJEHZADEH; RAZFAR, 2015; XIAO et al., 2003).

#### 2.4.1 Torneamento assistido por ultrassom

Com base nas trajetórias das ferramentas, o método UAT pode ser dividido em dois grupos principais: o corte 1D, cuja ferramenta vibra na direção de corte (*Cutting Directional Vibration-Assisted - CDVA*), ou na direção da profundidade de corte (*Normal Directional Vibration-Assisted - NDVA*). Em relação ao corte 2D (duas direções), a ferramenta vibra simultaneamente nas direções de corte e de profundidade (*Elliptic Vibration-Assisted - EVA*), que forma uma trajetória elíptica (CHEN et al., 2018; XU; ZHANG, 2015).

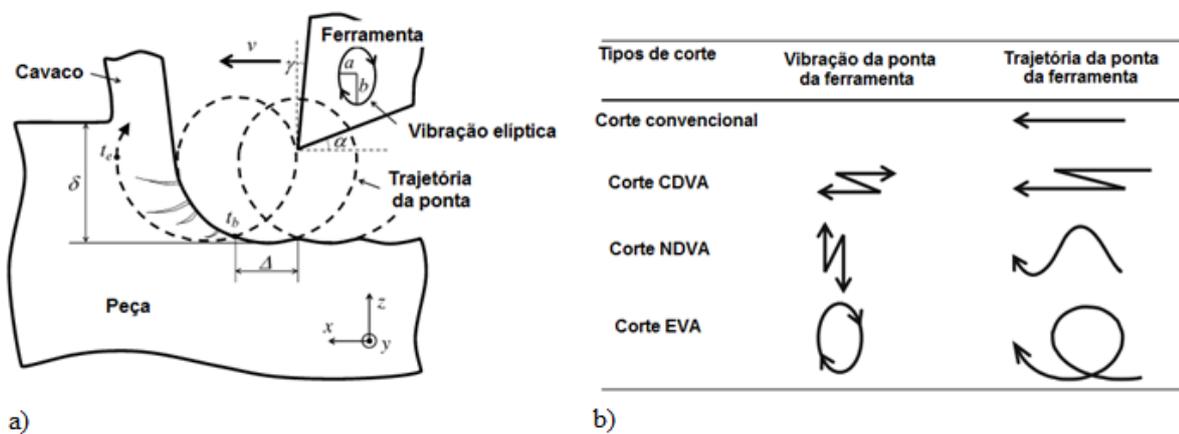
No entanto, não há uma norma a ser seguida, existem modelos apresentados por autores, na qual se encontra aplicações da vibração em qualquer direção (corte, avanço e profundidade) pelo corte 1D ou 2D e, recentemente, em 3D (torneamento por vibração tridimensional - 3DVT), empregado no estudo de Hosseinabadi et al. (2018) para gerar micro superfícies texturizadas.

Os sistemas 2D tendem a ser usados apenas em aplicações de usinagem de ultraprecisão, com profundidades de corte entre 1  $\mu\text{m}$  e 50  $\mu\text{m}$ . Já os sistemas 1D são comumente empregados em usinagem de precisão e também em aplicações de usinagem

tradicionais, na qual são executadas com profundidades de corte amplas, consideradas altas em relação a maioria dos sistemas 2D (BREHL; DOW, 2008).

O movimento da trajetória da ponta da ferramenta em um processo de corte EVA é ilustrado na Figura 2.11, como também, os tipos de corte e suas respectivas trajetórias impostas pela vibração da ponta da ferramenta. As coordenadas  $x$ ,  $y$  e  $z$  são respectivamente: direção de corte, direção de avanço e direção da profundidade de corte.

Figura 2.11 - Ilustração esquemática do corte EVA.

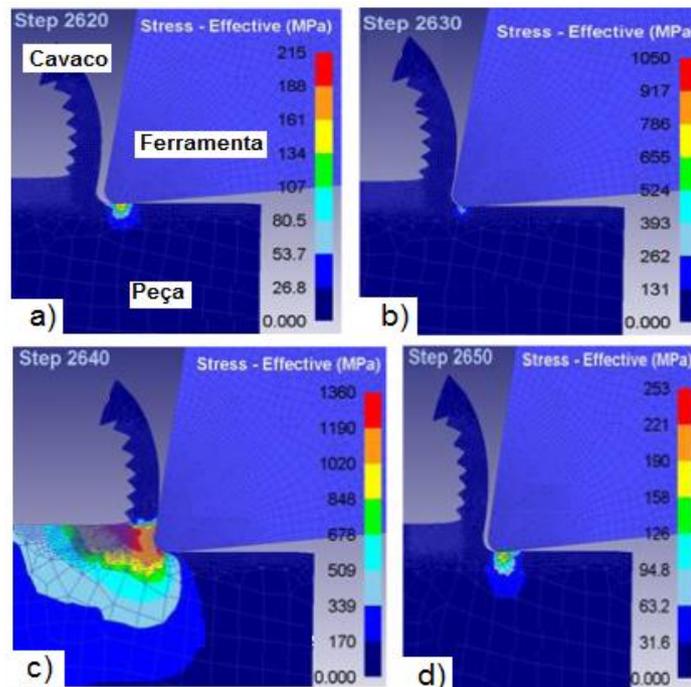


a) Trajetória da ferramenta. b) Características dos tipos de corte.

Fonte: adaptado de (XU; ZHANG, 2015).

O mecanismo do método UAT em usinagem de precisão pode ser dividido em quatro estágios durante um ciclo de vibração da ferramenta de corte. No estágio 1 a ferramenta de corte se aproxima do material. No estágio 2, a ferramenta de corte entra em contato com o material (cavaco). Já no estágio 3, a ferramenta está em contato total com o cavaco e começa a penetrar na peça de trabalho. Quando o nível mais alto de tensão é atingido, ele marca a profundidade máxima de penetração atingida pela ferramenta de corte. Essa etapa do método UAT é semelhante ao método CT, pois a ferramenta está em contato total com o cavaco. No último estágio (4), a direção da ferramenta de corte é invertida e ocorre um descarregamento da ferramenta da peça de trabalho e, nessa etapa, resulta em uma redução do nível de tensão atingido na peça de trabalho (CAKIR et al., 2015; SHARMA; PANDEY, 2016). O mecanismo da UAT nas etapas durante um ciclo de vibração da ferramenta de corte é ilustrado na Figura 2.12.

Figura 2.12 - Simulação esquemática dos quatro estágios da UAT.

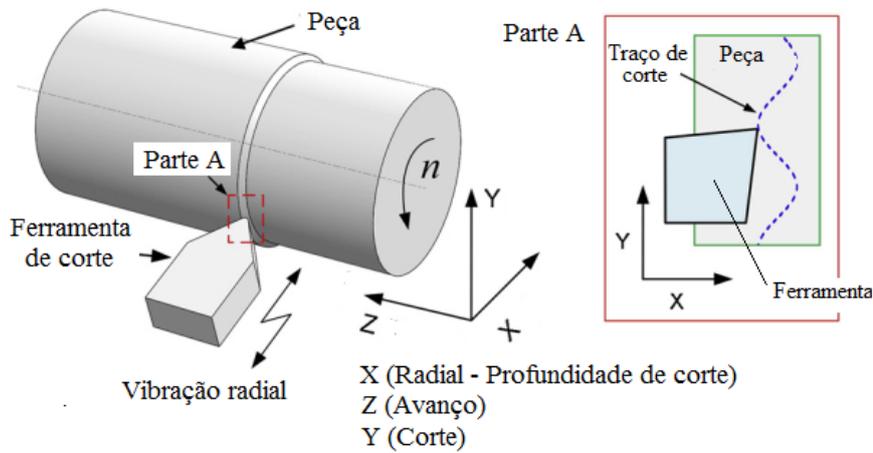


a) Aproximação. b) Contato com o cavaco. c) Penetração. d) Descarregamento.

Fonte: adaptado de (PATIL et al., 2014).

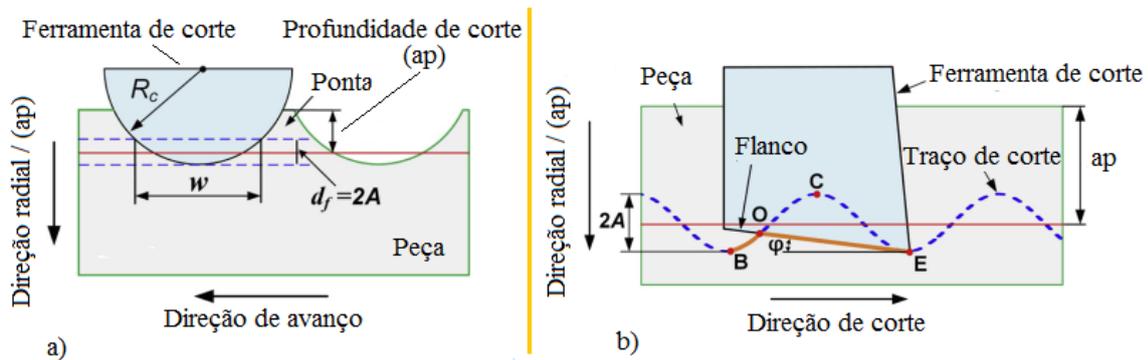
Em um estudo recente Liu et al. (2019), a vibração ultrassônica aplicada na direção da profundidade de corte foi denominada como torneamento assistido por vibração ultrassônica radial (*Radial Ultrasonic Vibration-Assisted Turning - RUVT*), visou-se texturizar a superfície da peça. Devido à aplicação da vibração na ferramenta de corte na direção radial durante o processo de torneamento, a trajetória reta da ferramenta altera para uma trajetória senoidal na direção de corte e, assim, micro-ondulações podem ser geradas na superfície durante o processo. Nesse modelo, a profundidade de corte é maior que a amplitude de vibração ultrassônica, logo, a ferramenta de corte não pode deixar a superfície cilíndrica e o material da peça de trabalho é cortado continuamente durante o processo. A Figura 2.13 mostra o esquema do processo e a trajetória da ferramenta de corte. Já a Figura 2.14, expõe o modelo teórico da geração de superfícies.

Figura 2.13 - Esquema do processo ultrassônico.



Fonte: Adaptado de: (LIU et al., 2019).

Figura 2.14 - Modelo teórico da geração de superfícies.



a) Perfil da seção transversal ao longo da direção de avanço. b) Ilustração da trajetória da ferramenta.

Fonte: adaptado de (LIU et al., 2019).

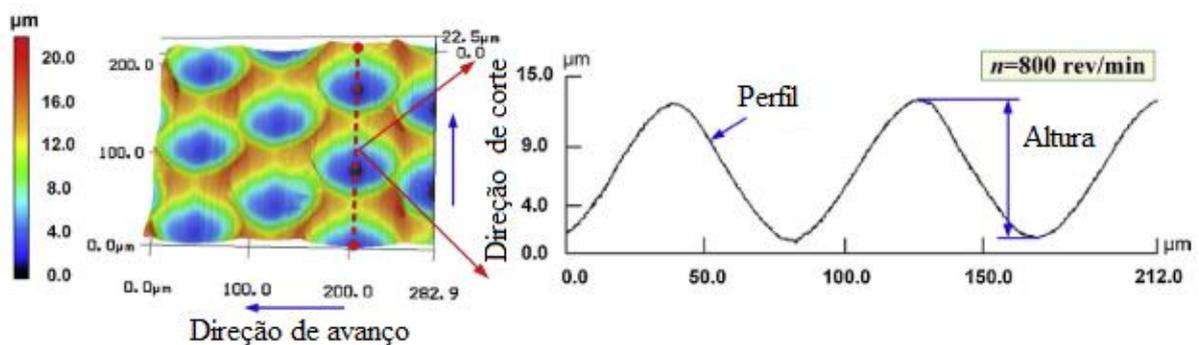
A largura e a profundidade da ondulação podem ser estabelecidas pelas Equações 2.1 e 2.2 respectivamente, sendo:  $w$  = largura da ondulação,  $R_c$  = raio de ponta,  $A$  = amplitude ultrassônica e  $d_f$  = profundidade da ondulação.

$$w = 2\sqrt{R_c^2 - (R_c - 2A)^2} \quad (2.1)$$

$$d_f = 2A \quad (2.2)$$

A texturização de superfície tornou-se uma maneira potencial de caracterizar o atrito ou molhabilidade adequada para diferentes superfícies de produtos mecânicos, pois a criação de micro-ondulações na superfície, leva ao aumento da área de superfície e melhora a molhabilidade das mesmas. Essas texturas de superfícies podem ser realizadas com profundidades variando de alguns micrometros até alguns nanômetros (HOSSEINABADI; SAJJADY; AMINI, 2018). A Figura 2.15 ilustra um exemplo de superfície texturizada.

Figura 2.15 - Superfície texturizada.

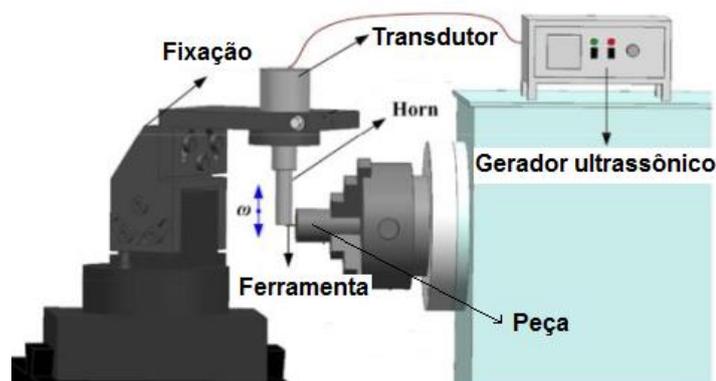


Amplitude = 3.9  $\mu\text{m}$ , profundidade de corte = 80  $\mu\text{m}$  e  $f=80 \mu\text{m}/\text{rev}$ .

Fonte: (LIU et al., 2019)

No trabalho realizado por Zou et al. (2017), utilizou-se um aço inoxidável amplamente utilizado na fabricação de moldes complexos e de precisão para realizar experimentos usando método UAT pelo tipo de corte NDVA, empregou-se ferramentas de diamante. A Figura 2.16 ilustra o modelo do sistema UAT.

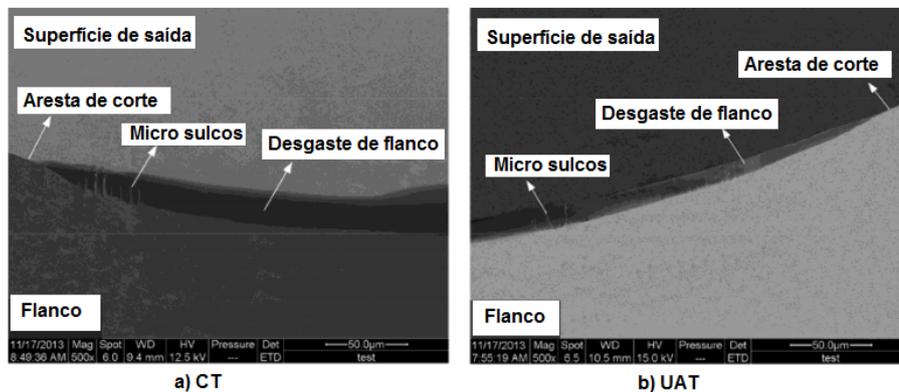
Figura 2.16 - Modelo tridimensional do sistema UAT.



Fonte: adaptado de (ZOU et al., 2017).

Para Zou et al (2017), os resultados analíticos dos mecanismos de função do método UAT indicaram que a força de atrito, entre a face de flanco da ferramenta e a superfície usinada, poderia ser efetivamente reduzida (em até 84%) no processo de torneamento ultrassônico. Os resultados experimentais indicaram que, comparado com o torneamento convencional, o desempenho de corte, em termos de vida da ferramenta, foi significativamente melhorada pela aplicação da vibração ultrassônica à ferramenta de corte. A Figura 2.17 exhibe a comparação do desgaste gerado pelos métodos CT e UAT.

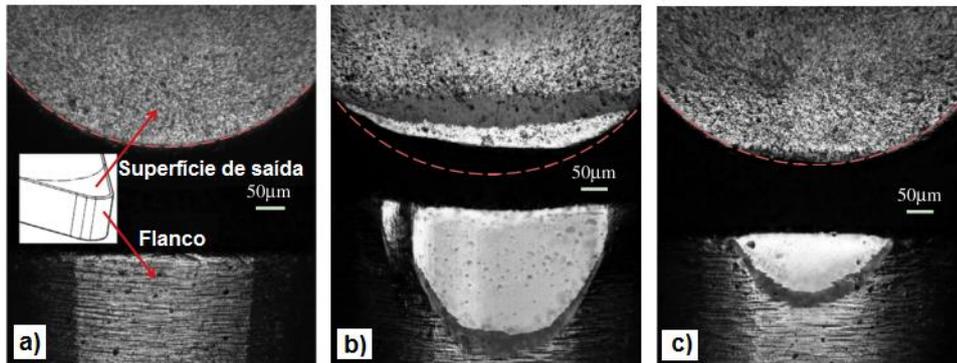
Figura 2.17 - Comparação do desgaste gerados na ferramenta.



Fonte: adaptado de (ZOU et al., 2017).

Xu et al. (2014), utilizam o método UAT pelo tipo de corte EVA para usinar compósitos de polímero reforçado com fibra (FRP), usinados por ferramenta de metal duro. Verificou-se que a aplicação da vibração pode diminuir significativamente as forças de corte e reduzir os danos na subsuperfície de uma peça de trabalho, bem como proporcionar uma integridade de superfície melhorada e uma vida da ferramenta prolongada. A Figura 2.18 apresenta a comparação dos desgastes gerados pela ferramenta.

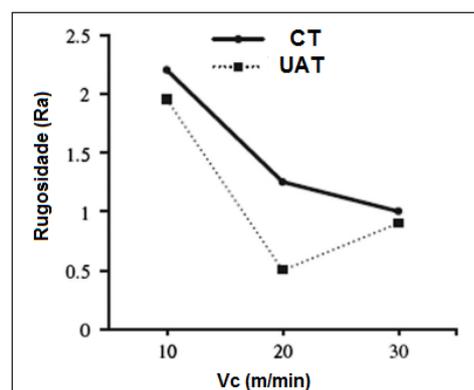
Figura 2.18 - Comparação da superfície desgastada nas ferramentas.



a) Ferramenta sem uso. b) Desgaste (CT). c) Desgaste (UAT).

Fonte: adaptado de: (XU; ZHANG; WU, 2014).

Patil et al. (2014) relacionaram a melhora na rugosidade na usinagem de ligas de titânio pelo método UAT, o processo gerou uma melhora de 40% no acabamento da superfície com  $V_c$  de 20 m/min. Segundo os autores, o método UAT apresenta uma relação reduzida de contato entre a peça-ferramenta, contribuindo para uma geração de forças de corte mais baixas, redução de calor e atrito, desse modo, resultou em melhores superfícies usinadas em comparação ao método CT. A Figura 2.19 expõe a rugosidade gerada em função da  $V_c$  utilizada.

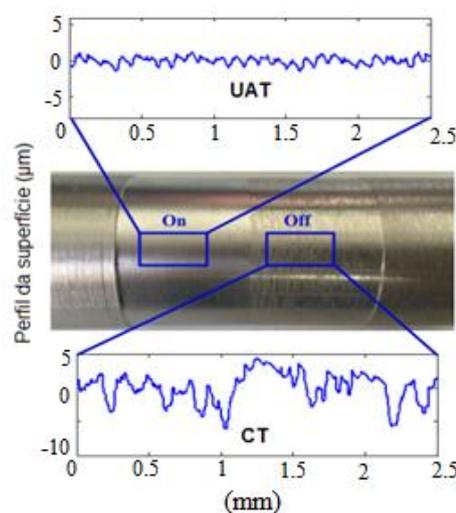
Figura 2.19 - Rugosidade em função da  $V_c$ .

Fonte: (PATIL et al., 2014).

Gao et al. (2015), fizeram uma comparação entre os métodos CT e UAT na usinagem de uma barra cilíndrica AISI 1045, visou-se avaliar o acabamento superficial. Os parâmetros empregados foram: velocidade do fuso (500 RPM), avanço (0,1 mm/rot), profundidade de

corte (0,5 mm), frequência (25 kHz) e amplitude (10  $\mu\text{m}$ ). Após a usinagem, uma análise de rugosidade da superfície foi realizada por um perfilômetro do tipo eletrônico, com *cutoff* de 2,5 mm. Como resultado, concluíram que a superfície usinada pelo método UAT apresentou mais uniformidade em comparação com o método CT, sob as mesmas condições de corte, o que reflete a melhoria da estabilidade de corte. A Figura 2.20 ilustra o perfil da superfície após a usinagem pelos métodos CT e UAT.

Figura 2.20 - Perfil da superfície após a usinagem pelos métodos CT e UAT.



Fonte: adaptado de (GAO; SUN; LEOPOLD, 2015).

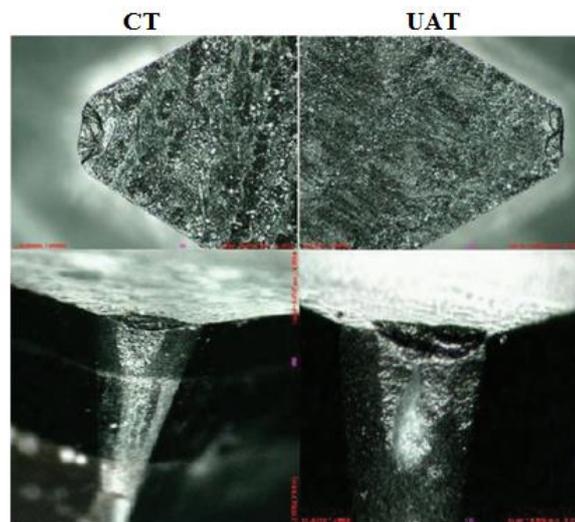
Em relação à usinagem assistida por ultrassom em materiais cerâmicos sinterizados, estudos em zircônia, alumina, nitreto de silício e cerâmicas óticas mostraram que uma operação de usinagem de ultraprecisão poderia reduzir as fraturas frágeis pela aplicação de vibração ultrassônica nas ferramentas de corte. Porém, nenhum trabalho indicou que a usinagem no modo dúctil poderia ser alcançada. (XU; ZHANG, 2015). Entretanto, é importante salientar que, a maioria das pesquisas foi realizada no processo de retificação.

Um dos trabalhos pioneiros que trata da usinagem assistida por ultrassom em materiais cerâmicos, pelo processo de torneamento, foi realizado por Weber et al. (1984). Os autores realizaram ensaios em vitrocerâmica com frequência ultrassônica em torno de 20 kHz nas direções da  $V_c$  e  $a_p$ , usinados por ferramenta de metal duro. Verificou-se que, por meio de análise acústica, a vibração da ferramenta promoveu a remoção de material por fraturas nas camadas próximas à superfície do material, que pode resultar em um aumento na vida útil das

ferramentas de metal duro, pois o corte do material apresentou menor resistência pelo método UAT em comparação com o método CT (WEBER; HERBERGER; PILZ, 1984).

Pesquisas sobre o método UAT em materiais cerâmicos ainda são raros. Em um deles realizado por Amini et al. (2014), os autores investigaram a usinabilidade da alumina sinterizada, em termos da qualidade da superfície, forças de corte e desgaste da ferramenta. Os corpos de prova foram usinados por ferramenta de diamante PCD e a vibração ultrassônica foi empregada na direção de corte. Os resultados mostraram que, no método UAT, as forças de corte foram reduzidas e a qualidade superficial foi melhor, quando comparado ao método CT. No entanto, o desgaste da ferramenta foi maior no método UAT (Figura 2.21). Para os autores, embora a força de corte fosse significativamente reduzida, as forças instantâneas de impacto devido à vibração da ferramenta foram tão altas que o desgaste da ferramenta PCD foi acelerado. Portanto, é necessário o estudo dos parâmetros ultrassônicos (frequência, amplitude e trajetória da ferramenta) para obter o melhor desempenho no método UAT.

Figura 2.21 - Desgaste de flanco após a usinagem.



Fonte: Adaptado de (AMINI et al., 2014).

Em relação às pesquisas que empregam o sistema de usinagem assistida por ultrassom em cerâmicas em verde ou pré-sinterizadas, principalmente, quando se trata do processo de torneamento, ainda são muito pouco exploradas e/ou divulgadas. Foram realizadas buscas em base de dados como *Scopus*, *ScienceDirect* e no portal de periódicos CAPES/MEC, porém, não foram encontrados estudos que aplicaram o método UAT nesses estados da cerâmica avançada.

## 2.5 Flexure hinge

As dobradiças de flexão (*flexure hinge*) são uma solução de engenharia inovadora para propiciar movimento relativo entre dois membros rígidos adjacentes pela deformação elástica de uma ligação flexível de formato arbitrário (FRIEDRICH; LAMMERING, 2015).

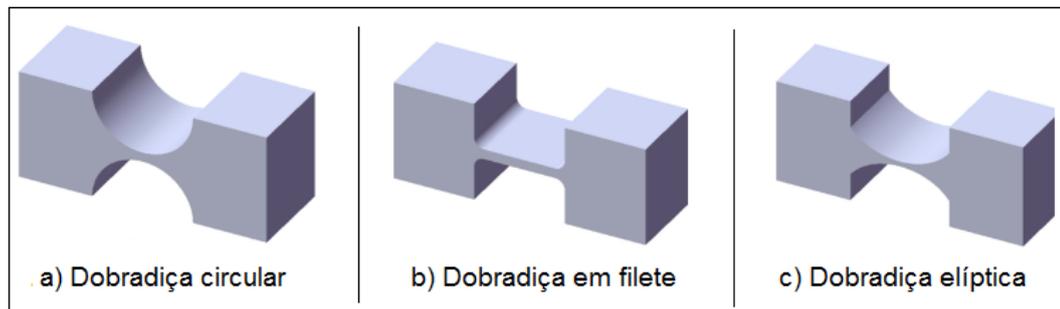
Para realizar um movimento qualquer, de um mecanismo articulado, é necessário que as articulações possibilitem graus de liberdade apropriados entre as ligações conectadas, como exemplo de mecanismos comumente usados temos: conexões de rolamento, dobradiças, juntas universais e juntas de bola e soquete. Contudo, essas juntas sofrem desgaste e folga, resultando em baixa precisão e repetibilidade, logo, não podem ser usadas em mecanismos precisão (KANG; GWEON, 2013).

Para solucionar esses problemas, as juntas baseadas nos mecanismos de flexão (com base deformação elástica) superam as deficiências dos mecanismos convencionais, como: folga desprezível, atrito e desgaste por aderência. Os *flexure hinge* exibem uma relação de deslocamento quase linear entre entrada e saída, deslocamento contínuo e uma resolução inerentemente infinita. Além disso, não necessitam de lubrificação (KANG; GWEON, 2013; TIAN; SHIRINZADEH; ZHANG, 2010).

Atualmente, vários tipos de *flexure hinge* foram desenvolvidos para construir os mecanismos flexíveis em aplicações micro/nano escala, como: instrumentos, manipuladores, estágios de deslocamento e posicionamento (para ampliar o pequeno deslocamento do atuador) e sistema de micro usinagem, na qual alta precisão de posicionamento e resolução (resposta) são os requisitos necessários para cumprir as tarefas especificadas (TIAN; SHIRINZADEH; ZHANG, 2010; WANG et al., 2015).

No entanto, esses sistemas apresentam movimento limitado, devido aos limites elásticos dos materiais de flexão, o que restringe suas áreas de aplicação ao controle de movimento fino, exigindo alta precisão dentro de uma pequena faixa de deslocamento (KANG; GWEON, 2013). A fim de alcançar mecanismos compatíveis eficientes em determinadas aplicações, é importante escolher corretamente os parâmetros geométricos para prever o desempenho do *flexure hinge* (TIAN; SHIRINZADEH; ZHANG, 2010). A Figura 2.22 ilustra três tipos de *flexure hinge* tradicionalmente utilizados, conquanto, existem vários tipos possíveis para aplicação em mecanismos flexíveis.

Figura 2.22 - Três tipos de flexure hinge tradicionalmente utilizados.



Fonte: adaptado de TIAN et al., 2010.

## 2.6 Planejamento de experimentos

No ramo industrial cada vez mais se tem se aplicado ferramentas estatísticas para a otimização de processos devido aos bons resultados que essas ferramentas proporcionam para o desenvolvimento tecnológico industrial. A “estatística” não é simplesmente um conjunto de técnicas a serem usadas somente nos projetos. Esses métodos estatísticos são necessários para o trabalho do dia-dia e, uma vez entendidos e aplicados, proporcionam habilidades e o entendimento que viabilizam melhores análises, comunicação e tomada de decisões (BALESTRACCI, 2006). Tais fatos também são válidos e são até mais importantes quando se trata de pesquisa científica, em que se deve buscar confiabilidade para os resultados, caso contrário, há o risco de invalidar todo estudo.

Algumas ferramentas estatísticas importantes empregadas no campo científico e nas indústrias para coleta, análise e interpretação dos dados são: (Seis Sigma, Planejamento de Experimentos, Análise de Variância - ANOVA, Controle Estatístico do Processo - CEP, Metodologia de Superfície de Resposta – MSR e Reprodutividade & Repetibilidade - R&R), que contribuem na melhoria contínua dos produtos ou processos de fabricação (GALDÁMEZ, 2002). A metodologia de análise estatística depende da maneira como os dados foram obtidos. Assim, o planejamento e a análise estatística de experimentos estão extremamente associados.

O planejamento de experimentos (DOE – *design of experiments*) representa um conjunto de ensaios estabelecido com critérios científicos e estatísticos, com o objetivo de determinar a influência de diversas variáveis nos resultados de um dado sistema ou processo. O DOE é uma ferramenta essencial no desenvolvimento de novos processos e no aprimoramento de processos em utilização. Um planejamento adequado permite, além do

aprimoramento de processos, a redução da variabilidade de resultados, a redução de tempos de análise e dos custos envolvidos (ANTONIO; DUARTE; MEOLA, 2007). Essa ferramenta ajuda a investigar os efeitos de variáveis de entrada (fatores) em variáveis de saída (respostas) ao mesmo tempo. Assim, os experimentos consistem em uma série de testes, nos quais são feitas alterações deliberadas nas variáveis de entrada, sendo coletados dados após cada situação, a fim de identificar as condições do processo que afetam a variável de resposta em análise.

A escolha de um planejamento experimental depende dos objetivos do experimento e do número de fatores a serem investigados. De acordo com o objetivo experimental os tipos de planejamentos podem ser (NIST/SEMATECH, 2012):

- Objetivo comparativo: apresenta um ou vários fatores sob investigação, mas o objetivo principal do experimento é fazer uma conclusão sobre um fator importante (apesar da existência do outro fator ou fatores importantes), que visa identificar se esse fator é ou não "significativo";
- Experimentos exploratórios: são experimentos em que muitos fatores são considerados, com a finalidade de se identificar aqueles fatores que possuem efeitos elevados. Geralmente são realizados nos estágios iniciais de um projeto, quando é provável que muitos dos fatores considerados tenham pouco ou nenhum efeito na resposta;
- Metodologia de superfície de resposta: é um conjunto de técnicas avançadas de DOE que ajudam a entender e otimizar melhor a resposta. A metodologia do experimento de superfície de resposta é usada, frequentemente, para refinar modelos após a determinação dos fatores importantes por meio de filtragem de experimentos ou experimentos fatoriais. Esse tipo de experimento permite modelar curvatura na resposta, para mapear uma região de uma superfície de resposta, com objetivo de verificar como as mudanças nas variáveis afetam uma resposta de interesse. Existem dois tipos principais de experimentos de superfície de resposta: os experimentos centrais compostos e os experimentos de *Plackett-Burman*.

### 2.6.1 Experimento fatorial

Um experimento fatorial é um tipo de experimento planejado que permite observar os efeitos que vários fatores podem ter sobre uma resposta. Ao conduzir uma experiência, variando os níveis de todos os fatores, ao mesmo tempo, em vez de um de cada vez permite o estudo das interações entre os fatores. Os experimentos fatoriais podem ser aplicados por dois métodos (MINITAB, 2017):

- Fatorial completo: é um experimento no qual são mensuradas respostas em todas as combinações dos níveis de fatores. Um projeto experimental comum é aquele com todos os fatores de entrada definidos em dois níveis cada, estes níveis são chamados de 'alto' e 'baixo' (qualitativo) ou '+1' e '-1'(quantitativo) respectivamente. Um projeto com todas as possíveis combinações alta / baixa de todos os fatores de entrada é chamado de planejamento fatorial completo em dois níveis. Como também, podem ser realizados experimentos fatoriais gerais completos que contêm fatores com mais de dois níveis;
- Fatorial fracionário: é um experimento no qual apenas um subconjunto selecionado ou uma "fração" dos ensaios no experimento fatorial completo são realizados. Estes são experimentos em que muitos fatores são considerados, com a finalidade de se identificar aqueles fatores que possuem grandes efeitos. Os fatoriais fracionários têm um uso importante nos experimentos exploratórios e são uma boa opção quando os recursos são limitados ou o número de fatores no experimento é grande, pois realizam menos ensaios do que os experimentos fatoriais completos.

Muitas vezes é difícil definir nos experimentos fatoriais qual é realmente o fator de controle que produz uma diferença significativa nas respostas e na maioria das vezes é necessário empregar os gráficos lineares (que representam os efeitos principais e de interação). Nessa fase do procedimento experimental podem ser utilizados diferentes *softwares* para construir os gráficos (Excel, Statistica, Minitab). Para se concluir sobre os efeitos principais e de interação dos fatores é necessário aplicar técnicas de análise de variância (GALDÁMEZ, 2002).

Para visualizar a comparação de um experimento fatorial completo e um fatorial fracionário, no trabalho de Santanna-Greco e Fabbri (2003), foi feito um estudo comparativo entre os métodos na aplicação a um caso de infra-estrutura de transportes. Na Figura 2.23 são apresentados os resultados fornecidos pelo experimento completo e fracionário, como também, os efeitos principais e de interação entre os fatores. É verificado que os mesmos resultados foram obtidos por ambos os métodos, na qual somente os fatores A e B foram considerados significativos, além de apresentar os valores ( $F_{0,01}$ ) muito próximos. Desse modo, demonstra-se a eficiência do DOE fracionário para obter a mesma conclusão.

Figura 2.23 - Comparação dos resultados fornecidos pelos experimentos.

Fatores e interações	experimento fatorial completo				experimento fracionado em 1/2			
	efeito	$F_0$	$F_{0,01}$ ( $\alpha = 0,01$ )	significante?	efeito	$F_0$	$F_{0,01}$	significante?
A	7,19	15,51	4,24	sim	4,86	10,88	4,72	sim
B	23,61	42,25	5,10	sim	23,75	27,36	5,61	sim
X5	4,03	3,16	7,22	não	6,05	4,56	7,82	não
X6	-4,01	3,14	7,22	não	-2,69	0,90	7,82	não
A B	-0,96	2,11	3,22	não	-4,91	1,89	3,67	não
A X5	4,98	0,69	4,24	não	6,44	1,45	4,72	não
A X6	4,01	1,26	4,24	não	2,76	1,58	4,72	não
B X5	2,25	0,41	5,10	não	5,52	1,32	5,61	não
B X6	-2,08	0,35	5,10	não	-0,15	0,27	5,61	não
X5 X6	-1,03	0,21	7,22	não	-2,63	0,86	7,82	não
A B X5	2,18	0,07	3,22	não	0,83	1,06	3,67	não
A B X6	5,40	0,35	3,22	não	18,92	1,96	3,67	não
A X5 X6	-1,25	0,12	4,24	não	0,73	1,63	4,72	não
B X5 X6	-0,35	0,01	5,10	não	-4,36	0,62	5,61	não

Fonte: Adaptado de (SANTANNA-GRECO; FABBRI, 2003).

### 2.6.2 Experimento central composto

Modelos de superfície de resposta podem ser explorados para determinar condições ótimas (adequadas) para se trabalhar ou a sensibilidade da variável resposta a mudanças dos níveis dos fatores analisados.

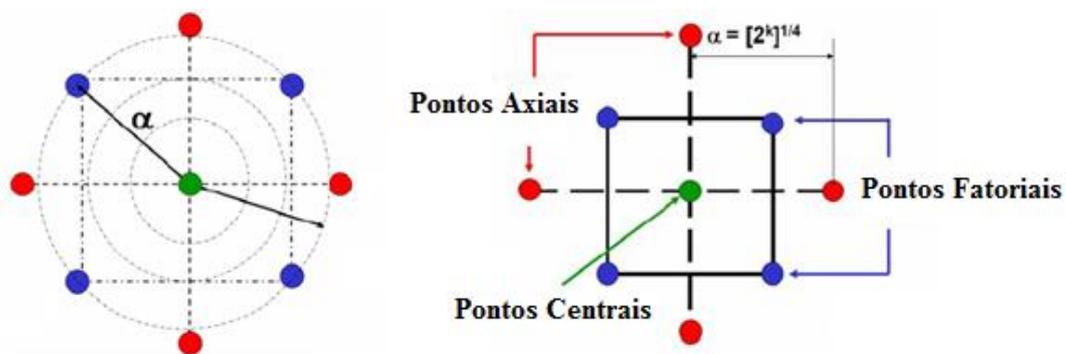
Um experimento central composto (*Central Composite Design* – CCD) é o experimento de superfície de resposta mais comumente empregado. Normalmente, utiliza-se um experimento central composto depois da realização de um experimento fatorial ou fatorial fracionado. Experimentos centrais compostos são experimentos fatoriais completos ou

fracionados com pontos centrais, ampliados com um grupo de pontos axiais (também chamados pontos estrela) que permitem estimar curvas. Para o experimento são atribuídos um nível baixo e um alto nível de cada fator contínuo, sendo requeridos cinco níveis para cada fator. Estes níveis de fator definem o "cubo" em torno do qual o experimento é criado (MINITAB, 2017).

Se a distância do centro do espaço do modelo a um ponto fatorial for  $\pm 1$  unidade para cada fator, a distância do centro do espaço do modelo até um ponto axial será  $|\alpha| > 1$ . Os pontos da estrela estão a alguma distância alfa do centro com base nas propriedades desejadas para o projeto e o número de fatores. Da mesma forma, o número de execuções de ponto central que o modelo deve conter também depende de determinadas propriedades necessárias para o *design* (E-HANDBOOK OF STATISTICAL METHODS, 2012).

O valor de  $\alpha$ , juntamente com o número de pontos centrais, determina se um experimento está disposto ortogonalmente em blocos e se é rotativo. Se o experimento for um fatorial completo,  $\alpha = [2^k]^{1/4}$ . A Figura 2.24 ilustra o arranjo CCD

Figura 2.24 - Arranjos CCD



Fonte: Adaptado de (AFSMONDIM, 2014).

Para a fase de otimização, é importante ressaltar que a visualização gráfica da superfície de resposta é possível quando temos até dois fatores. Portanto, para uma situação com mais fatores essa visualização não é possível, sendo necessário utilizar técnicas numéricas.

### 2.6.3 Análise de variância

A análise de variância (ANOVA) é um processo de análise baseado na decomposição da variação total existente entre uma série de observações. Esta variabilidade pode ser decomposta em causas conhecidas (tratamentos e blocos) e em outra parte devido a causas desconhecidas (erro experimental e resíduos) (LIMA, 2010). A ANOVA pode ser usada para testar a significância dos termos da regressão múltipla ou das variáveis experimentadas no planejamento de experimentos.

Alguns conceitos utilizados em planejamento de experimentos e na ANOVA são extremamente importantes, tais como: tratamento, unidade experimental, réplica, variável resposta, delineamento experimental, modelo e análise de variância (GALDÁMEZ, 2002; MONTGOMERY et al., 2013).

Para determinar se a associação entre a resposta e cada termo no modelo é estatisticamente significativa, é necessário comparar o valor-p para o termo com o seu nível de significância a fim de avaliar a hipótese nula. Logo, um nível de significância ( $\alpha$  ou alfa) deve ser adotado (LIMA, 2010). Assim, relacionando o valor - p com o nível de significância:

- Valor-p  $\leq \alpha$ : a associação é estatisticamente significativa, é possível concluir que há uma associação estatisticamente significativa entre a variável de resposta e o termo;
- Valor-p  $> \alpha$ : a associação não é estatisticamente significativa, não é possível concluir que há uma associação estatisticamente significativa entre a variável de resposta e o termo.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

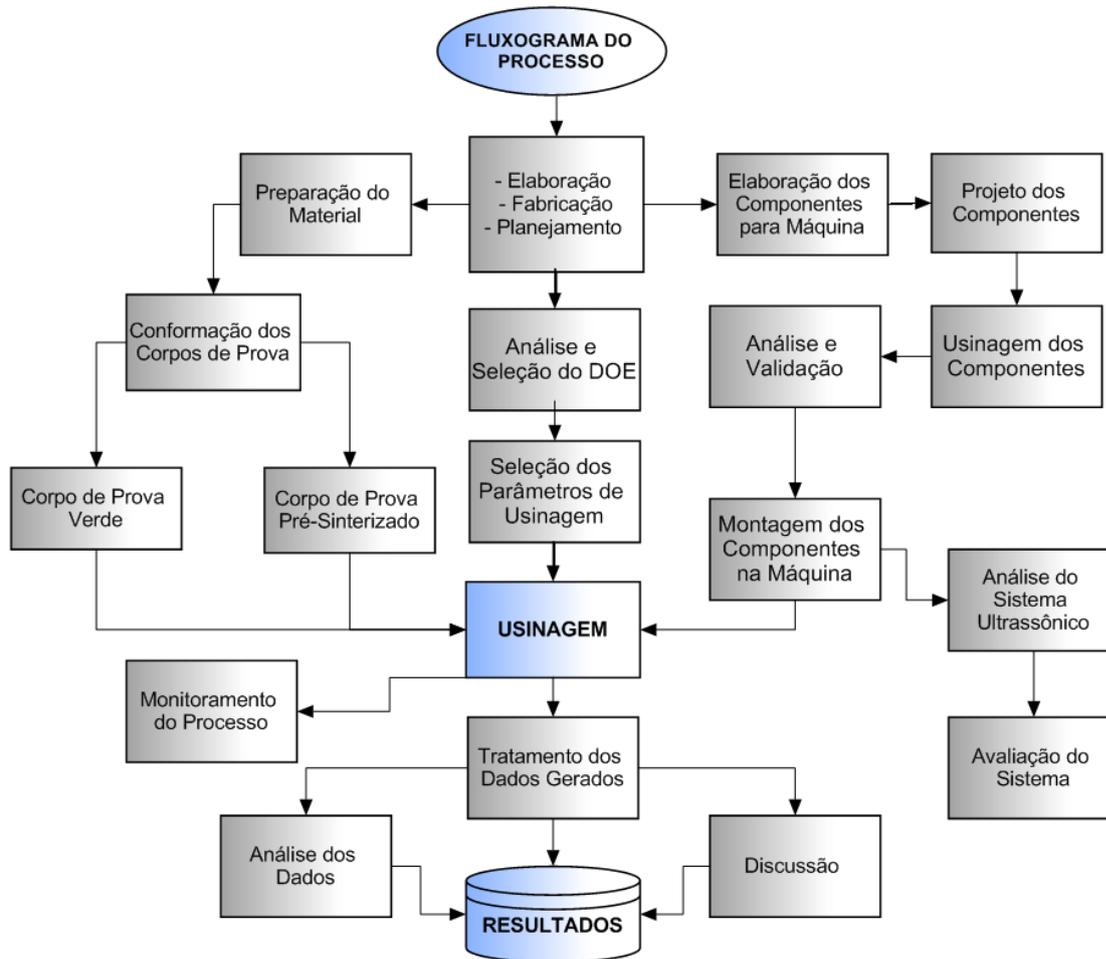
A fim de investigar os efeitos do método UAT em compactos cerâmicos de alumina (estados verde e pré-sinterizado), foram executados experimentos utilizando uma fresadora adaptada para o torneamento, com o monitoramento das forças de corte através de um dinamômetro de três coordenadas, bem como o controle da frequência ultrassônica por meio de um osciloscópio. Foram desenvolvidos suportes para adaptar o atuador ultrassônico e a ferramenta de corte à máquina, tendo como ênfase o suporte *flexure hinge*.

Para tal proposta, foi realizado o DOE pelos modelos fatorial fracionário ( $2^{k-1}$ ) e de superfície de resposta (central composto) e aplicou-se a ANOVA em alguns dados obtidos. Posteriormente, foi realizada a análise de desgaste da ferramenta de corte. Por fim, foram realizados testes para avaliar o comportamento e acabamento dos compactos em verde e pré-sinterizados na operação de sangramento radial e, também, efetuada uma análise geral das variáveis de usinagem de cerâmicas avançadas.

As amostras utilizadas foram cilíndricas e obtidas por prensagem isostática via “*wet bag*” com pressão de 200 MPa. Para a análise dos dados obtidos no processo, foram utilizados microscópios e programas computacionais. Todos os experimentos foram conduzidos no Laboratório de Tecnologia da Usinagem (LATUS) da UNESP Câmpus de Bauru.

Neste capítulo são apresentadas todas as etapas do desenvolvimento para a execução do estudo proposto, sendo: conformação dos corpos de prova; análise, montagem e preparação da bancada de ensaio para a usinagem ultrassônica; monitoramento dos dados; planejamento dos experimentos; métodos de análise dos dados. A Figura 3.1 ilustra o fluxograma resumido de todo o processo, sendo detalhada cada etapa nos tópicos subsequentes.

Figura 3.1 - Fluxograma do processo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.1 Corpos de prova

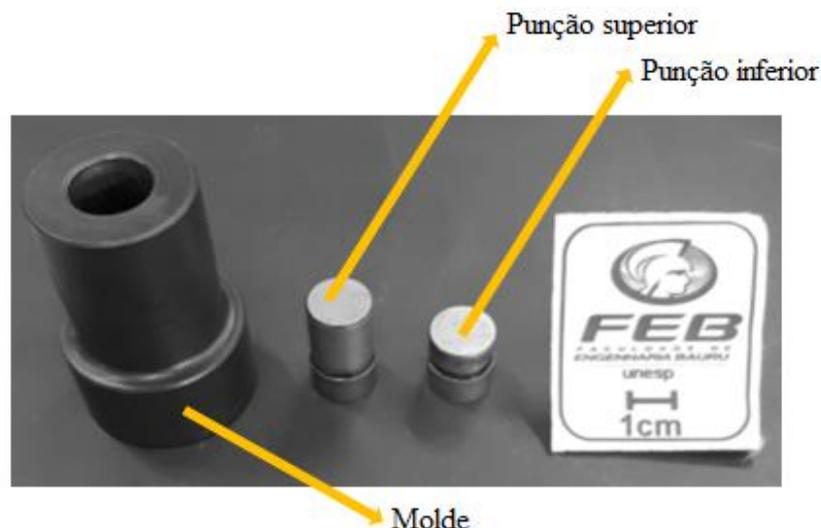
Para confecção dos corpos de prova, utilizou-se uma mistura de pós de Alumina Calcinada A1000-SG (Almatis, Inc., 99,8% de pureza, com área superficial de 7,7 mm<sup>2</sup>/g e  $\rho_{\text{real}} = 3,99 \text{ g/cm}^3$ ) com auxiliares de processo.

A mistura foi realizada em moinho de bolas com elementos cilíndricos de zircônia ( $\emptyset$  12,0 mm x 12,0 mm). Uma suspensão com 30 % em volume de alumina em pó foi dispersa num volume de 68 % de água destilada e deionizada e foram acrescentados 1 % em volume de PVAI (álcool polivinílico - Vetec Química Fina Ltda - MW 22,000) como ligante e 1 % em volume de poliacrilato de amônia (Dispersal 130 da Lubrizol) como defloculante. Usou-se defloculante associado à mistura mecânica, a fim de garantir uma dispersão mais homogênea

da mistura. Posteriormente, a mistura foi seca pela técnica de secagem de *Spray-Dryer*, resultando em aglomerados esféricos de partículas de alumina, tendo a fluidez necessária para o preenchimento eficiente dos moldes.

Todo o processo de conformação foi realizado no Laboratório de Tribologia e Compósitos da Escola de Engenharia de São Carlos – USP (LTC-EESC-USP). Os corpos de prova utilizados são de formatos cilíndricos com dimensões de  $\varnothing$  15,0 mm x 20,0 mm. 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 (100 MPa) e posteriormente prensados pelo método isostático (200 MPa). Na Figura 3.2 é ilustrado o molde com o punção superior e inferior utilizado para dar formato ao corpo de prova na prensagem uniaxial.

Figura 3.2 - Molde para prensagem uniaxial dos compactos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

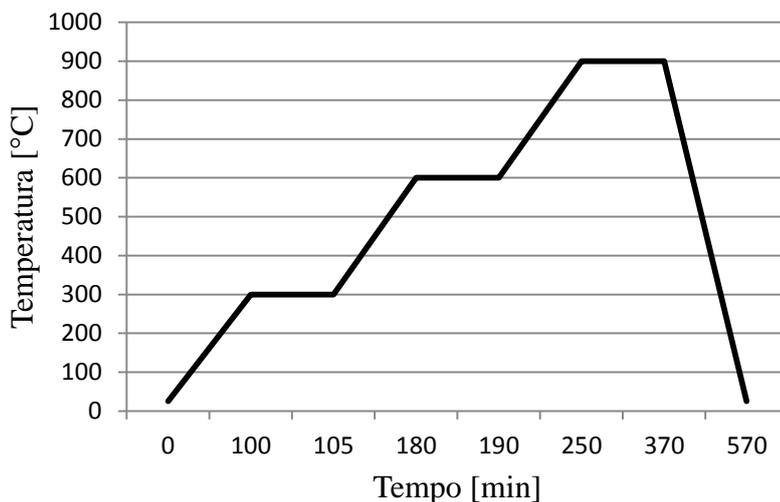
Em relação aos corpos de prova em verde, um procedimento realizado antes da usinagem foi tratar as amostras em estufa esterilizadora a 100 °C durante 8 horas, acima da temperatura de transição vítrea do PVAI (TG ~85 °C). O tratamento térmico além de remover a umidade residual (água absorvida no polímero) ainda é útil para homogeneizar e aliviar as tensões provenientes da prensagem (MARGARIDO et al., 2016).

Para obter os corpos de prova pré-sinterizados, inicialmente foi realizado o mesmo processo de obtenção dos corpos no estado verde e, posteriormente, as amostras foram colocadas em um forno para o processo de pré-queima (pré-sinterização), a temperatura estabelecida foi de 900 °C. A temperatura selecionada foi similar aos estudos de: Hondo et al. (2016), Kavashima et al. (2017) e Li et al. (2012).

O processo de pré-sinterização iniciou-se em temperatura ambiente (em torno de 25 °C) com rampa de aquecimento de 3 °C/min até 300 °C e patamar de 5 minutos, posteriormente até chegar na temperatura de 600 °C foi utilizada rampa de 4 °C/min com patamar de 10 minutos. Por fim, foi empregada uma rampa de 5 °C/min até chegar na temperatura desejada de 900 °C com patamar de 120 minutos.

Ao final do tempo determinado, os corpos de prova pré-sinterizados foram resfriados lentamente com média de 4.4 °C/min até a temperatura ambiente, totalizando o tempo total do processo de 570 minutos. Vale ressaltar que nesse estágio não há crescimento de grão. A Figura 3.3 demonstra as rampas de aquecimento, patamares e rampa de resfriamento do processo de pré-sinterização dos corpos de prova.

Figura 3.3 - Temperatura x tempo do processo de pré-sinterização.



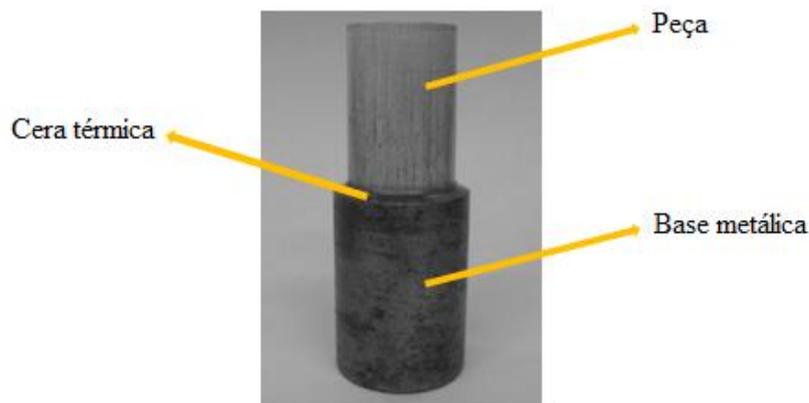
Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.1.1 Método de fixação do corpo de prova

Segundo Herlinger et al. (2006), as trincas internas na cerâmica em verde geralmente podem ser prevenidas evitando pressões excessivas no momento da fixação. Logo, um procedimento na tentativa de evitar danos na peça em sua região de fixação foi confeccionar uma base de aço com uma cavidade cilíndrica com diâmetro próximo ao do corpo de prova, para não fixá-la diretamente no cabeçote da máquina. Assim, o suporte foi elaborado com tolerância dimensional estreita para garantir a coaxialidade entre o suporte metálico e o compacto. Sendo confeccionados seis suportes para cada estado (verde e pré-sinterizado) do compacto.

Confeccionados os suportes, os corpos de provas foram fixados por adesão com cera térmica para posteriormente serem fixados no cabeçote vertical da máquina. Dessa forma, garantiu-se uma rígida fixação e propiciou uma remoção da peça pelo aquecimento a 100 °C, sendo possível reutilizar a base metálica. A Figura 3.4 demonstra o conjunto formado pela base e corpo de prova.

Figura 3.4 - Conjunto formado pela base e corpo de prova.



Fonte: Elaborado pelo autor.

## 3.2 Montagem e preparação da bancada de ensaio para a usinagem ultrassônica

Para a usinagem dos corpos de prova, foi utilizada uma fresadora de três eixos comandada por meio do *software* EMC2 (denominado Linux CNC) adaptado para o

torneamento. A escolha da fresadora para os ensaios deveu-se à sua facilidade de configuração de forma a atender ao processo. Para tal método, foi necessário elaborar suportes metálicos para adequar a montagem do dinamômetro e do atuador ultrassônico à máquina. Logo, as modificações efetuadas permitiram a realização dos ensaios com monitoramento das forças de corte, bem como o monitoramento da frequência imposta pelo sistema ultrassônico durante a usinagem.

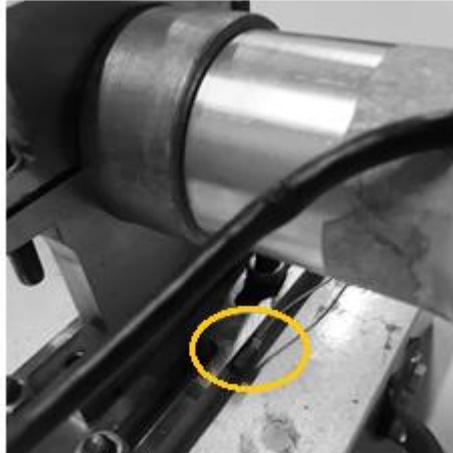
### 3.2.1 *Sistema ultrassônico*

Para gerar a vibração em frequências ultrassônicas foi utilizado o gerador de ultrassom da marca Viking 350. Devido à falta de um visor integrado no equipamento, a primeira instância não foi possível determinar a frequência que o mesmo gerava. Desse modo, a fim de monitorar as características da vibração na qual a ferramenta é submetida, foi necessário o desenvolvimento, adaptação e aplicação de métodos para obter as variáveis de interesse para que fosse possível esse monitoramento.

Com o intuito de se determinar as faixas de frequência de trabalho, suas respectivas acelerações geradas e a amplitude do sistema proposto, foram realizadas análises experimentais no laboratório de vibração da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, do Câmpus Cornélio Procópio (UTFPR – CP). Para a análise, foi utilizado o acelerômetro ICP<sup>®</sup> modelo 352C22 e o módulo de aquisição QUATTRO, juntamente com o *software* compatível com o mesmo (SignalCalc Ace).

O acelerômetro foi fixado na base do suporte do ultrassom (Figura 3.5), pois devido à transferência de vibração pela estrutura, a frequência deveria manter-se idêntica ou muito próxima à da ponta (atuador ultrassônico), na qual poderia variar o deslocamento e a fase da frequência de vibração. Desse modo, foi possível ajustar as frequências de 16 kHz e 19 kHz. Pelas características operacionais do sistema de aquisição, frequências superiores poderiam danificar o equipamento de aquisição (acelerômetro) e/ou não serem precisas.

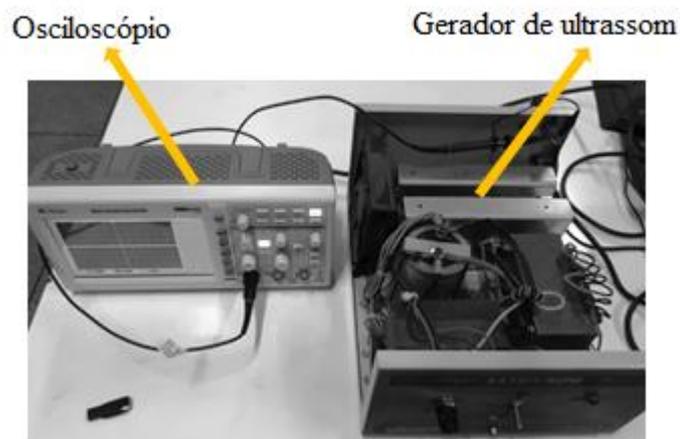
Figura 3.5 - Acelerômetro fixado na base do suporte do ultrassom.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir da observação que o gerador ultrapassa a frequência de 20 kHz, seria de interesse determinar até qual frequência o mesmo seria capaz de emitir, para posteriormente determinar a faixa de operação. A solução encontrada foi a de utilizar um osciloscópio digital (MINIPA series MVBDSO) conectado em paralelo na saída do sinal que chega ao transdutor, pois o sinal deveria possuir a mesma frequência. O osciloscópio conectado ao ultrassom está ilustrado na Figura 3.6.

Figura 3.6 - Osciloscópio conectado ao gerador de ultrassom.

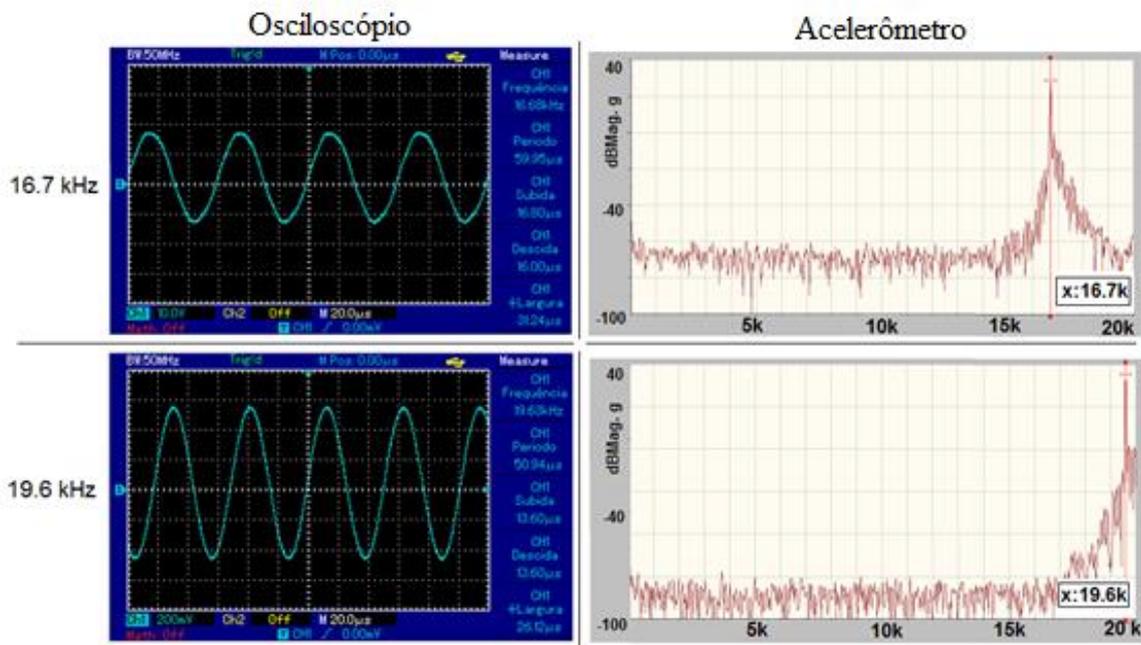


Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a validação da utilização do osciloscópio no circuito como aferidor de frequência, foi realizado um comparativo com o sistema de aquisição baseado no acelerômetro. Assim,

foi feito o ajuste do gerador ultrassônico para que a frequência captada pelo acelerômetro estivesse em torno de 16 kHz e 19 kHz. Os valores para comparação foram escolhidos com base na capacidade máxima do sistema de aquisição de dados. Na Figura 3.7 é possível observar um comparativo entre os valores de frequência obtidos por ambos os sistemas (osciloscópio e acelerômetro), para as frequências de 16,7 kHz e 19,6 kHz.

Figura 3.7 - Comparativo entre os valores de frequência obtidos por ambos os sistemas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para os valores indicados, foi feito um cálculo do erro relativo entre os mesmos tomando como base o valor medido pelo sistema de aquisição Quattro, na qual os dados de frequência e o respectivo erro podem ser verificados na Tabela 3.1. Sendo verificado um erro relativo pouco significativo. Por conseguinte, a partir da definição do método para mensurar a frequência, foi possível determinar a faixa de frequência que o equipamento ultrassônico pode gerar, na faixa de 16 kHz a 28 kHz.

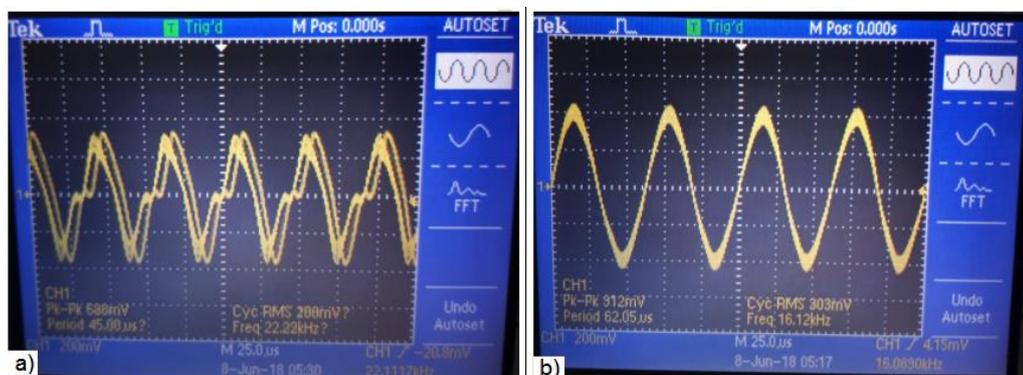
Tabela 3.1 - Cálculo do erro relativo.

Quattro [kHz]	Osciloscópio [kHz]	Erro[%]
16,70	16,68	0,119
19,60	19,63	0,153

Fonte: Elaborado pelo autor.

O fato do controle da frequência ter sido feito por um dispositivo eletromecânico, pode trazer interferência em algumas frequências, onde o mesmo pode observar uma sobreposição de sinais com mais de uma frequência diferente, resultando em um sinal com “ruído”. Caso isso aconteça, este sinal não é adequado, pois a sobreposição dificulta as conclusões futuras quando comparadas com sinais simples. Assim, optou-se por trabalhar somente com sinais de onda “sem ruído”. A identificação do ruído foi realizada de forma qualitativa, pela observação do formato da senoide apresentada no osciloscópio. Para exemplificar, na Figura 3.8 é ilustrado um sinal com ruído e outro sem ruído. Nela, nota-se a existência de mais de uma frequência no sinal com ruído.

Figura 3.8 - Frequências mensuradas pelo osciloscópio.



a) Sinal com ruído. b) Sinal sem ruído.

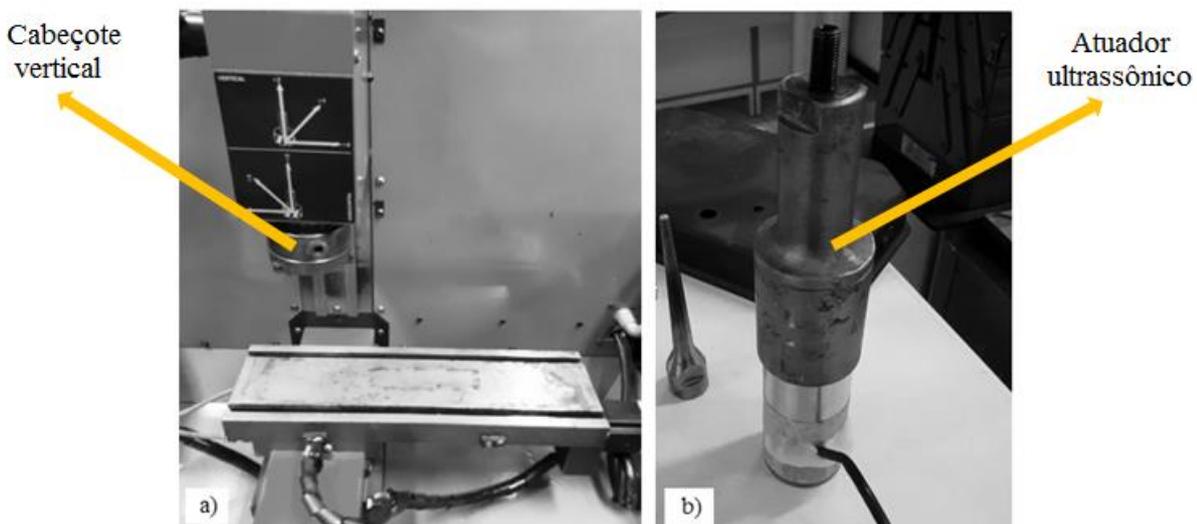
Fonte: Elaborado pelo autor.

Portanto, a utilização do osciloscópio como instrumento para indicação da frequência de operação do sistema apresentou resultados compatíveis quando comparados ao obtido no *software* de aquisição de dados QUATTRO em conjunto com o acelerômetro. De acordo com os resultados apresentados, pode-se afirmar que o método proposto demonstrou plena capacidade de indicar a frequência em que o equipamento estará sujeito durante todo o experimento de usinagem.

### 3.2.2 Projeto e usinagem dos componentes

Para a pesquisa proposta foi necessário avaliar o atuador ultrassônico e a máquina para ser utilizada no processo de usinagem, para posteriormente ser elaborado um projeto de montagem de bancada do ensaio. A Figura 3.9 ilustra a máquina fresadora de três eixos e o atuador ultrassônico.

Figura 3.9 - Fresadora de três eixos e atuador ultrassônico.



a) Máquina utilizada para o processo de usinagem. b) Atuador ultrassônico.

Fonte: Elaborado pelo autor.

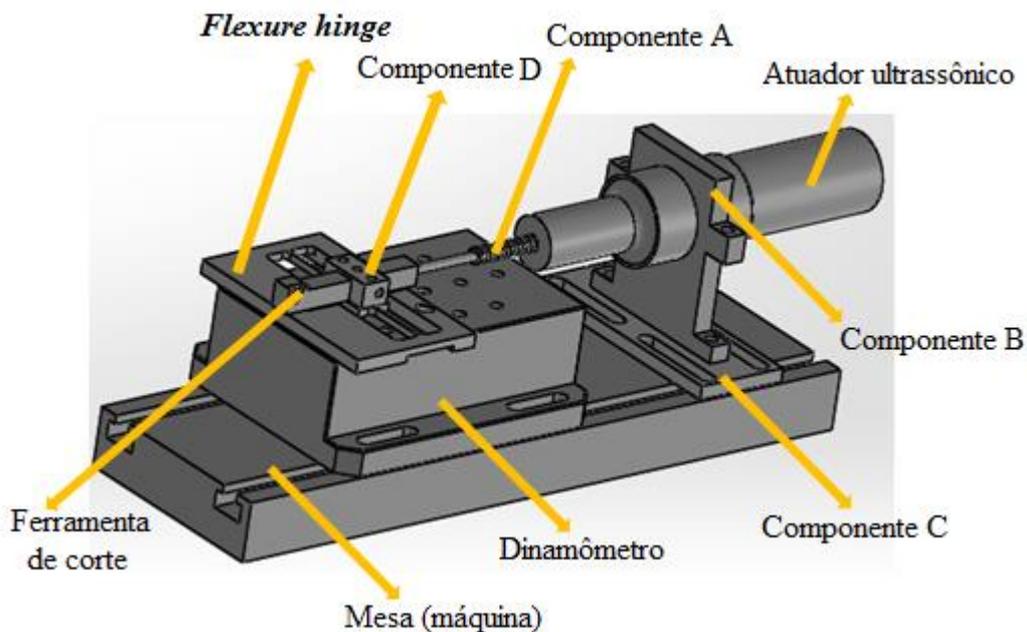
Como o objetivo era propor um sistema que possibilitasse a vibração da ferramenta apenas na direção normal à direção de corte denominada: “*normal-directional vibration-assisted*” (NDVA), e que ao mesmo tempo fosse possível captar as forças nas três direções (corte, avanço e profundidade) pelo dinamômetro, foram projetados os seguintes componentes para a montagem do banco de ensaio:

- Componente A: Haste com rosca nas extremidades para conexão da ferramenta de corte ao atuador ultrassônico;
- Componente B: Suporte para fixar o atuador ultrassônico, sendo composto de duas partes para propiciar a melhor fixação do atuador, tendo controle de regulagem por parafuso;

- Componente C: Base para fixar o suporte do item B na mesa da fresadora, apresentando uma regulagem de fixação para concentricidade dos componentes durante a montagem;
- *Flexure hinge*: Suporte para propiciar a vibração no centro do elemento (local de fixação da ferramenta de corte) na direção determinada através da flexão das hastes e, ao mesmo tempo, apresentar rigidez para fixação do suporte sobre o dinamômetro;
- Componente E: Suporte para fixar a ferramenta de corte no centro do *flexure hinge*, com finalidade de garantir a concentricidade da ferramenta de corte e rigidez necessária para a usinagem. Foi elaborado com a menor massa possível, para reduzir a inércia e oferecer menor resistência ao movimento da ferramenta.

A Figura 3.10 ilustra a montagem esquemática em 3D com os componentes projetados citados anteriormente.

Figura 3.10 - Montagem esquemática dos componentes projetados.



Fonte: Elaborado pelo autor.

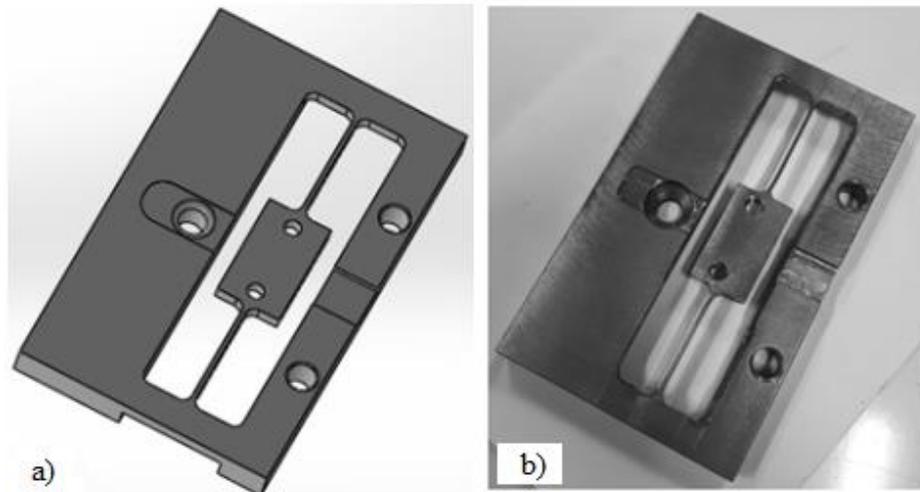
O *flexure hinge* é o principal suporte para o sistema proposto, pois é responsável pela transmissão da vibração ultrassônica para a ferramenta de corte e, ao mesmo tempo, possibilita mensurar as forças de corte pelo dinamômetro. Caso seja elaborado de modo

inadequado, as hastes do suporte (comprimento, largura e altura) impossibilitam o deslocamento adequado da ferramenta de corte, devido à flexão de forma insatisfatória. Desse modo, as dimensões das hastes do suporte foram projetadas por análises de simulação nos programas *SolidWorks*<sup>®</sup> e *Ansys*<sup>®</sup>, como também, pela característica do material utilizado e das limitações no processo de fabricação (hastes com espessuras muito finas propiciam risco de quebra ou fratura durante a confecção).

Para o projeto proposto foi utilizado o tipo de *flexure hinge* em filete, com altura da haste de 4,5 mm e espessura de 1,4 mm. Pelas dimensões definidas, o deslocamento total do sistema estaria entre 2 a 3  $\mu\text{m}$ . Optou-se por baixa amplitude devido à alta fragilidade do material, pois amplitudes elevadas poderiam propiciar a fratura do material, principalmente no estado verde.

Após serem projetados e simulados, a usinagem foi realizada em aço ABNT 1020 no centro de usinagem da (UTFPR – CP). Para usinagem de todos os componentes, foram utilizados: um torno CNC convencional, uma fresadora convencional, uma fresadora CNC e uma retificadora para dar acabamento nas peças usinadas.

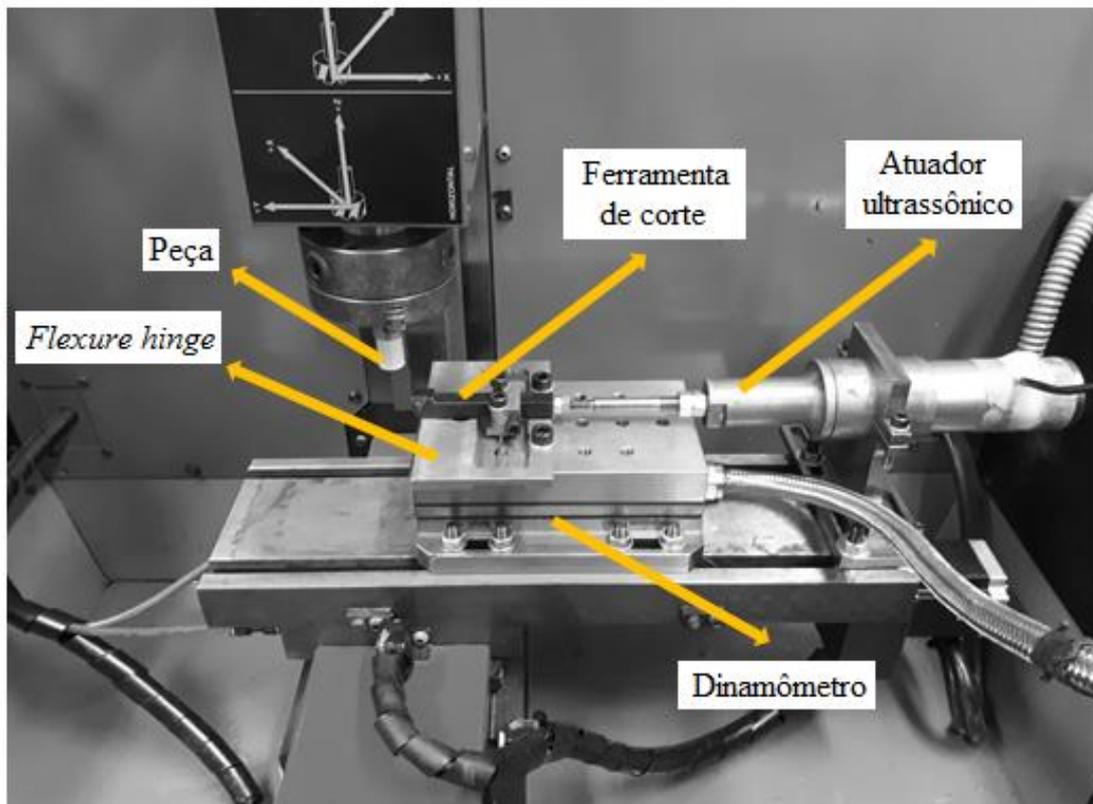
Um fato importante no projeto do *flexure hinge* foi limitar o contato da ferramenta de corte na base, para reduzir o atrito. Para tanto, foi feito um rebaixo de 0,5 mm no local de posição da ferramenta, deixou-se apenas o local de fixação da ferramenta e a região próxima da ponta da ferramenta sem esse rebaixo, pois a ferramenta deve estar em contato na base rígida para ser possível captar os esforços pelo dinamômetro. A Figura 3.11 ilustra o suporte *flexure hinge*, já a montagem da bancada com os componentes usinados é apresentada na Figura 3.12.

Figura 3.11 - Suporte *flexure hinge*.

a) Desenho 3D. b) Suporte usinado.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 3.12 - Montagem da bancada com os componentes usinados.

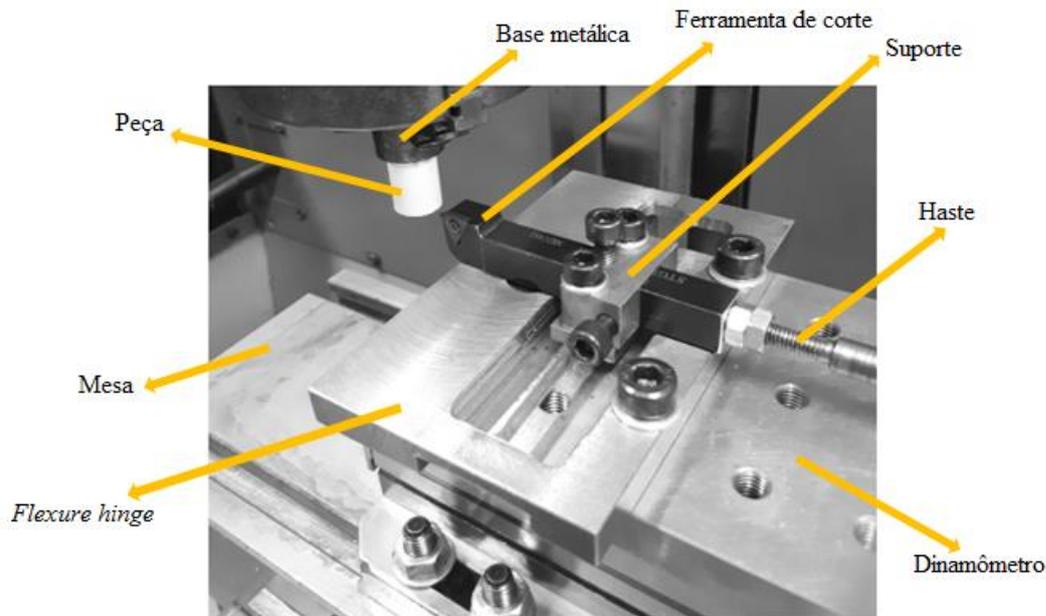


Fonte: Elaborado pelo autor.

O corpo de prova foi fixado no cabeçote vertical da máquina, executando o movimento de rotação, sendo o cabeçote responsável também por executar o avanço de usinagem (movimento vertical). Já a mesa da máquina, foi responsável por executar a profundidade de corte (movimento horizontal).

Após a montagem, foi constatado que as hastes do suporte *flexure hinge* suporte a princípio estavam adequadas para o processo, pois, com o sistema configurado, a ferramenta apresentava vibração na direção axial com o atuador ultrassônico. A Figura 3.13 demonstra o detalhe suporte *flexure hinge* com a ferramenta fixada.

Figura 3.13 - Detalhe do suporte *flexure hinge* com a ferramenta fixada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.2.3 Amplitude do sistema elaborado

Posteriormente a análise com o osciloscópio e a fabricação dos componentes para a bancada de ensaios, foi elaborado um suporte para a montagem dos componentes no laboratório de vibração (sistema sem a fresadora e o dinamômetro), para realizar uma análise de vibração com o acelerômetro na ponta da ferramenta (Figura 3.14).

Figura 3.14 - Conjunto do sistema para análise de vibração.



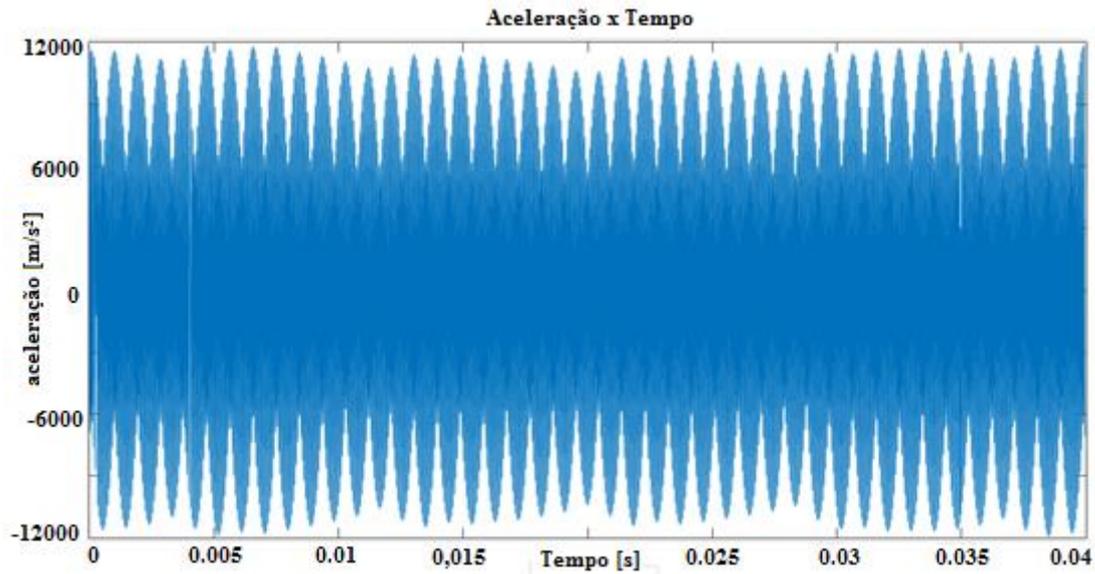
Fonte: Elaborado pelo autor.

Foi verificado que a tensão máxima gerada não ultrapassou os 10 V, sendo possível mensurar a frequência gerada, como também, determinar o deslocamento exercido através da aceleração produzida. Dessa forma, foi confirmada que a frequência captada na ponta da ferramenta era a mesma apresentada pelo osciloscópio. Foi utilizada a frequência de 19 kHz para determinar a amplitude na ferramenta, pois frequências superiores poderiam conter um desvio do valor real devido à proximidade com o limite de operação do acelerômetro.

Os dados fornecidos pelo sistema de aquisição foram tratados no *MATLAB*<sup>®</sup>, com o intuito de gerar os gráficos de aceleração nos domínios de tempo e frequência. A partir da aceleração, por um conceito fundamental de vibração, é possível encontrar a amplitude ( $a$ ) do deslocamento, sendo que a aceleração é a derivada segunda da velocidade. Em posse dos diferentes dados em ambos os domínios mencionados, foi escolhido o da frequência para estudo.

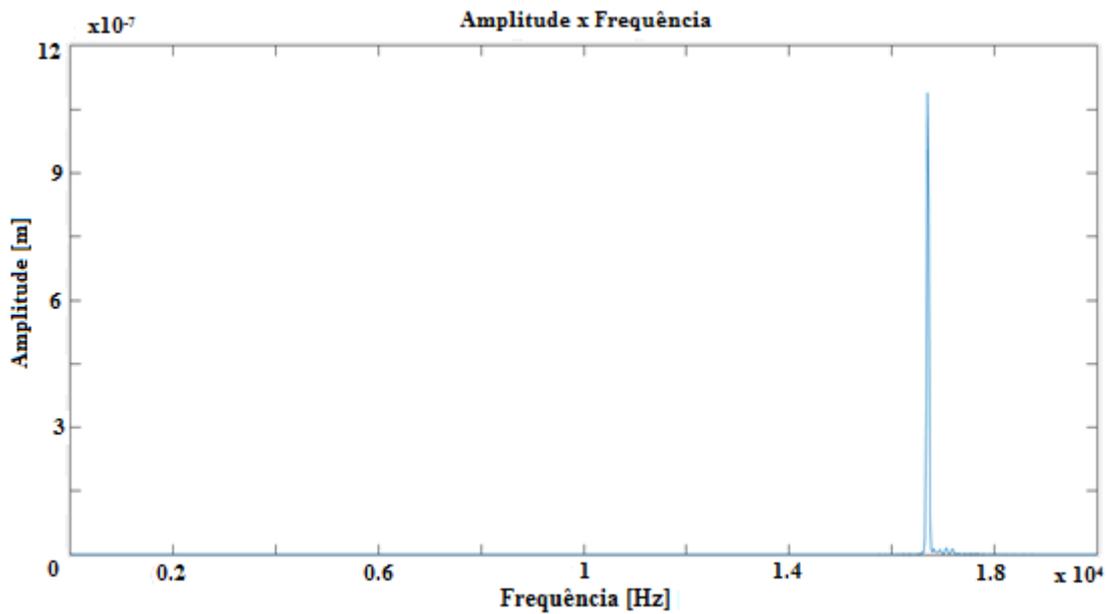
O gráfico do deslocamento é gerado partindo do princípio que sua amplitude é o valor respectivo da aceleração dividido pelo quadrado da velocidade angular. Utilizando o *MATLAB*<sup>®</sup>, um código pôde ser implementado para que a teoria mencionada fosse aplicada, obteve no final o gráfico do deslocamento para identificar a amplitude do mesmo. Na Figura 3.15 é ilustrado o gráfico da aceleração ( $m/s^2$ ) em função do tempo. Já na Figura 3.16, o gráfico da amplitude em função da frequência obtida pelo sistema de aquisição de dados.

Figura 3.15 - Gráfico da aceleração em função do tempo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 3.16 - Amplitude em função da frequência.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A amplitude ( $a$ ) encontrada na ponta da ferramenta na direção axial foi de aproximadamente 1,15  $\mu\text{m}$ . Esse valor é a metade do deslocamento total efetuada pela ferramenta, em torno de 2,3  $\mu\text{m}$ .

Para comparação, foi analisada a amplitude na ligação flexível do *flexure hinge*, sendo verificado o mesmo valor gerado na ponta da ferramenta. Também, foi medido o deslocamento no sentido transversal da ferramenta, na qual os resultados demonstraram que o deslocamento no sentido transversal poderia ser considerado como desprezível. Os dados obtidos demonstraram que o sistema de *flexure hinge* elaborado atuou como previsto, apresentou somente um grau de liberdade, ou seja, deslocamento somente direção na axial.

Outra análise feita teve por objetivo determinar as frequências naturais (ressonantes). Cada frequência natural está associada a uma determinada forma, chamada de forma modal, que o modelo tende a assumir ao vibrar nessa frequência. Assim, foram verificadas as frequências naturais até 29 kHz, visou-se não oscilar o sistema com maior amplitude em frequências específicas. Portanto, o sistema elaborado para a montagem e preparação do dispositivo para a usinagem ultrassônica foi planejado, executado e validado, tornando-o adequado para realização dos ensaios proposto neste estudo.

#### 3.2.4 *Monitoramento das forças de corte*

Para monitorar e registrar as forças durante o processo de usinagem foi empregado um dinamômetro de três coordenadas da Kistler - 9257BA conectado a unidade de controle 5233A1 e condicionamento de sinal, que possui um filtro passa baixo de 200 Hz. 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 200 Hz. Com o dinamômetro, foi possível mensurar a força de corte ( $F_c$ ), força de avanço ( $F_f$ ) e a força de profundidade de corte ( $F_p$ ), que são representadas no dinamômetro por FX, FZ e FY respectivamente.

Um programa em ambiente *LabView*® foi utilizado para atuar como interface da conexão e gravação dos dados captados pelo chassi à um *notebook*. Os esforços de corte registrados durante os ensaios foram salvos em arquivos binários e então analisados por rotinas desenvolvidas nos programas *MATLAB*® e Excel.

### 3.2.5 *Ferramenta de corte*

Seguindo a orientação de Herlinger et al. (2006), o desgaste na usinagem de cerâmica em verde é causado pela natureza abrasiva das partículas de cerâmica, em vez do fator temperatura ou parâmetros de corte do material. Esse desgaste pode ser significativamente reduzido utilizando ferramenta de diamante, na qual pode durar muito mais tempo em relação às demais (10 até 50 vezes), além de apresentar coeficiente de atrito mais baixo do que as ferramentas de metal duro.

Desse modo, o inserto utilizado para executar os experimentos propostos (fatorial fracionário e superfície de resposta) foi de super micro-grãos de diamante policristalino (PCD) modelo TPGB 110302SE KPD001 da Kyocera, indicada para metais não ferrosos, não metais, como também, para várias aplicações que requerem corte preciso e vida útil elevada devido à extrema dureza. Logo, o inserto proporciona desgastes extremamente baixos, sendo requisitos exigidos nesses ensaios, visando a “não” influência do desgaste da ferramenta no acabamento superficial e nas forças geradas. A escolha por um inserto sem quebra-cavacos foi definida devido ao processo de remoção do material cerâmico ser diferente dos metais (resultam de pequenas partículas e/ou aglomerados) e, também, para melhor análise de desgaste.

Com o objetivo de economia e para poupar recursos, para a análise do desgaste da ferramenta de corte, utilizou-se um inserto de metal duro modelo MD TPGB 110302 KW10 da Kyocera, sem quebra-cavacos. Esse tipo de inserto, devido às características de seu material, está sujeito a maiores taxas de desgaste durante a usinagem das cerâmicas em verde e pré-sinterizadas. Assim sendo, considerou-se que esse material seria o ideal para a etapa em questão.

Vale ressaltar que, ambos os insertos utilizados apresentam as mesmas dimensões e geometrias, alterando apenas o material de sua composição, condição necessária para uma melhor análise e discussão dos dados obtidos. Dessa forma, também utilizam o mesmo porta-ferramentas. Outro fato importante, o raio de ponta da ferramenta utilizada foi de 0,2 mm, devido aos melhores resultados observados no trabalho anteriormente realizado por Gonçalves Júnior (2014). A Tabela 3.2 apresenta resumidamente os itens (insertos e porta-ferramentas) empregados neste estudo.

Tabela 3.2 - Resumo dos itens utilizados para ferramenta de corte.

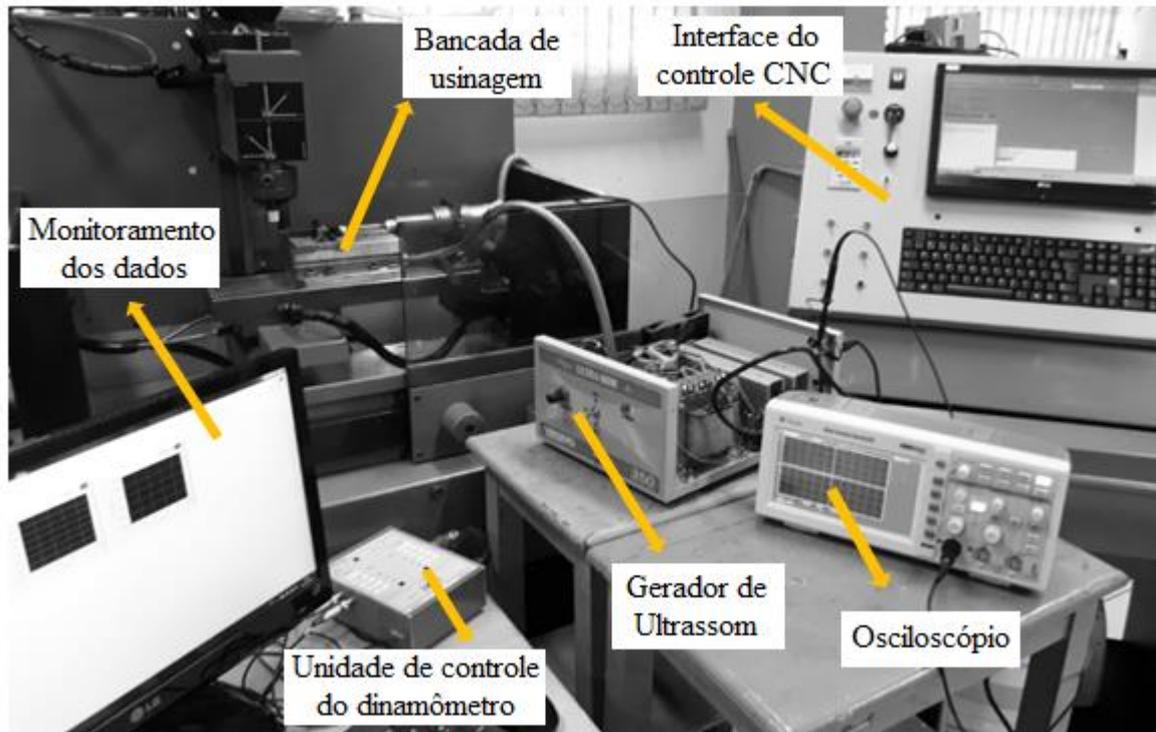
Nomenclatura	Modelo	Quantidades	Valor R\$ (unitário)
Porta-ferramentas	STGPL 1212-H-11	1	252,41
Inserto	TPGB 110302SE KPD001	3	185,40
	MD TPGB 110302 KW10	3	41,50

Inserto KPD001 (1 aresta de corte); inserto KW10 (3 arestas de corte)  
 Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.2.6 Montagem do banco de ensaio

A Figura 3.17 traz a montagem de todos os componentes e equipamentos para o monitoramento das forças (dinamômetro) e da frequência (osciloscópio), como também, demais dispositivos para aquisição dos dados durante os ensaios conduzidos.

Figura 3.17 - Montagem de todos dos equipamentos na máquina para o ensaio.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em relação à máquina, foi utilizada uma proteção (suporte) de plástico transparente em torno do cabeçote e de demais componentes devido à natureza altamente abrasiva dos resíduos e partículas geradas durante a usinagem, sendo em forma de “pó”. A proteção facilita

na limpeza da máquina, bem como ajuda a evitar a dispersão do pó no ambiente de trabalho e nos equipamentos.

### 3.3 Métodos de análise da ferramenta de corte e dos corpos de prova

O desgaste de flanco máximo ( $V_{Bmax}$ ) que determina o final de vida da ferramenta e a forma de análise da mesma foi avaliado em conformidade com a Norma ISO 3685 - *Tool life testing with single-point turning tools*. As imagens para acompanhar o desgaste da ferramenta de corte foram obtidas por meio de um microscópio óptico OLYMPUS BX51 com programa integrado para acompanhar as medidas de desgaste com precisão, como também, contou-se com o auxílio do programa computacional *AutoCad*<sup>®</sup>. Ademais, o microscópio óptico foi utilizado para visualizar os cavacos e alguns danos gerados nos compactos durante os ensaios realizados.

Para avaliar a ferramenta de corte após os ensaios, foram utilizadas técnicas de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e de espectroscopia por energia dispersiva (EDS). Com essas análises, foi possível verificar se houve aderência de material na ferramenta e identificar os elementos químicos apresentados na ferramenta.

Em se tratando da rugosidade  $R_a$  (Rugosidade Média Aritmética), ela foi mensurada na direção axial dos compactos, por meio de um microscópio Confocal LEICA DCM3D. O uso desse equipamento foi fundamental, já que não necessitou de contato, que poderia alterar a superfície (devido a fragilidade do material, medição por contato poderia induzir danos), como também, permitiu avaliar a área mensurada em duas e três dimensões. Em cada área varrida, mediu-se a rugosidade em três posições diferentes na superfície, empregou-se *cutoff* de 1,27 mm, condição estabelecida para gerar média e desvio padrão nas superfícies avaliadas.

### 3.4 Planejamento de experimentos

A fim de investigar os efeitos do torneamento assistido por ultrassom (UAT) sobre as forças (corte, avanço e profundidade), na rugosidade e no acabamento superficial dos

compactos em verde e pré-sinterizados de alumina e, posteriormente, fazer uma análise comparativa entre os métodos de torneamento (CT e UAT) e os estados (verde e pré-sinterizado) dos compactos, foram realizados experimentos planejados seguindo a técnica DOE.

O primeiro experimento teve como objetivo averiguar os fatores principais de influência nas respostas (variáveis), portanto, utilizou-se o DOE fatorial fracionário. As variáveis de resposta averiguadas foram: força de corte ( $F_c$ ), força de avanço ( $F_f$ ), força de profundidade ( $F_p$ ) e Rugosidade ( $R_a$ ). Já os fatores analisados foram: frequência (kHz), velocidade de avanço ( $V_f$ ), velocidade de corte ( $V_c$ ) e profundidade de corte ( $a_p$ ). Optou-se por trabalhar com  $V_f$  devido ao controle preciso do CNC e para estabelecer um percurso de usinagem padrão (15 mm).

Os níveis mínimos e máximos dos fatores selecionados foram baseados no estudo anteriormente realizado por Gonçalves Júnior (2014), sendo visto a facilidade de introduzir danos em condições extremas. Desse modo, limitou-se principalmente  $V_c$  e  $V_f$  extremamente altas, pois a  $V_c$  não pode ser aumentada de modo extremo em operações de torneamento, devido ao aumento das forças centrífugas.

Em relação à profundidade de corte, utilizou-se  $a_p$  elevadas visando mensurar maiores incrementos nas forças geradas, pois as forças geradas na usinagem principalmente no estado verde são extremamente baixas. Além do fato que, um dos objetivos principais da usinagem antes da sinterização é a possibilidade de remover maior volume de material com menores quantidades de passes. Os fatores e seus respectivos níveis são apresentados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Fatores e níveis utilizados para o DOE fatorial fracionário.

DOE fatorial		Nível	
Fatores	Nomenclatura	(-)	(+)
A	Frequência [kHz]	0	28
B	$V_f$ [mm/min]	7,5	37,25
C	$V_c$ [m/min]	20	46,8
D	$a_p$ [mm]	1,5	2,5

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para um DOE fatorial completo apresentando 4 fatores e 2 níveis, seriam necessários 16 ensaios para executar todas as combinações possíveis ( $2^4$ ), sem contar todas as réplicas necessárias. Assim, foi executado um DOE fatorial fracionário. Cujo objetivo é descobrir os

fatores com maiores efeitos. O experimento fatorial selecionado foi  $2^{4-1}$ , ou seja, uma meia-fração de um  $2^4$ . Esse planejamento possui 8 corridas, em contraste com as 16 do planejamento original. Nesse ensaio fracionário foram realizadas 3 réplicas para cada condição utilizada, que totalizou 24 amostras para cada estado (verde e pré-sinterizado). A Tabela 3.4 demonstra o DOE fatorial fracionário elaborado.

Tabela 3.4 - Planejamento  $2^{4-1}$  com a relação definida I=ABCD.

Corrida (Condição)	Fatores			
	A (Freq.)	B ( $V_f$ )	C ( $V_c$ )	D ( $a_p$ )
1	0	7.5	20	1.5
2	28	37.25	20	1.5
3	28	7.5	46.8	1.5
4	0	37.25	46.8	1.5
5	28	7.5	20	2.5
6	0	37.25	20	2.5
7	0	7.5	46.8	2.5
8	28	37.25	46.8	2.5

Fonte: Elaborado pelo autor.

Após o DOE fatorial fracionário, aplicou-se o experimento de superfície de resposta, empregando o experimento central composto para a fase de otimização. Logo, a variável de resposta em questão foi a rugosidade superficial ( $R_a$ ). Esse modelo de superfície de resposta foi utilizado para determinar uma condição adequada, ou seja, parâmetros de corte que proporcionam menores valores de rugosidade e, em decorrência, melhores acabamentos superficiais. Nesse DOE foi utilizada uma nova ferramenta de diamante policristalino.

Cabe ressaltar que todos os ensaios foram realizados de forma aleatória (um dos pilares de todo experimento planejado), ou seja, a sequência de ensaios seguiu lógica arbitrária. Nesse sentido, a aleatorização é realizada para balancear os efeitos produzidos pelos fatores não controláveis nas respostas analisadas, deste modo, as variáveis externas ao experimento influenciam de maneira similar. Como também, isso ajuda a garantir que o modelo atenda a certas suposições estatísticas.

Após determinar as condições adequadas de corte para cada estado do compacto (verde e pré-sinterizado), foi realizada a análise de desgaste da ferramenta de corte, que visou avaliar a influência do sistema ultrassônico. Para tanto, foram realizados passes até a ferramenta de corte apresentar um desgaste considerável e/ou a peça apresentar danos severos

e/ou críticos. Foram executados 4 ensaios distintos (cada estado do compacto pelos métodos CT e UAT).

Em cada ensaio foi utilizado uma nova aresta de corte, como também, após cada passe executado, foi analisado e medido o desgaste gerado na ferramenta, circunstância adotada em todos os ensaios. O critério adotado para término do ensaio em cada condição foi até o compacto apresentar um acabamento superficial com danos severos (que levariam a peça ao descarte) ou a ferramenta de corte apresentar um desgaste considerável para a análise. Ressalta-se que foram estabelecidos até 4 passes para cada compacto em verde e até 6 passes para o compacto pré-sinterizado. Essas condições foram impostas devido à redução considerável no diâmetro do compacto no decorrer dos passes executados, que devido à fragilidade do compacto, principalmente no estado verde, poderia provocar trincas e/ou quebras.

Por fim, foram realizados testes para avaliar o comportamento e o acabamento dos compactos em verde e pré-sinterizados na operação de sangramento radial. Como também, foi efetuada uma análise geral das variáveis de usinagem de cerâmicas avançadas, sendo possível fazer uma comparação de alguns pontos importantes para o processo de usinagem desses materiais.

Vale ressaltar que os parâmetros ultrassônicos selecionados para o método UAT em todos os experimentos nesse estudo foram:  $a = 1,15 \mu\text{m}$  e frequência = 28 kHz.



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste tópico são apresentados e discutidos os resultados dos experimentos descritos na seção anterior. Será analisado o experimento fatorial fracionário, o experimento de superfície de resposta, o desgaste da ferramenta de corte e, por fim, as considerações gerais dos resultados apresentados. Salienta-se que os experimentos foram realizados nos compactos em verde e pré-sinterizados.

### 4.1 Análise dos resultados obtidos pelo DOE fatorial fracionário

Os tratamentos dos dados coletados durante os ensaios foram realizados em programas, na qual foram aplicadas análises estatísticas dos dados, como a ANOVA, que gera tabelas e gráficos para análise dos efeitos dos diversos fatores sobre as variáveis investigadas. As forças médias ( $F_c - F_f - F_p$ ) mensuradas em cada condição estabelecida são apresentadas no **Apêndice A**. Já no **Apêndice B**, é demonstrada a análise de variância para as variáveis em questão.

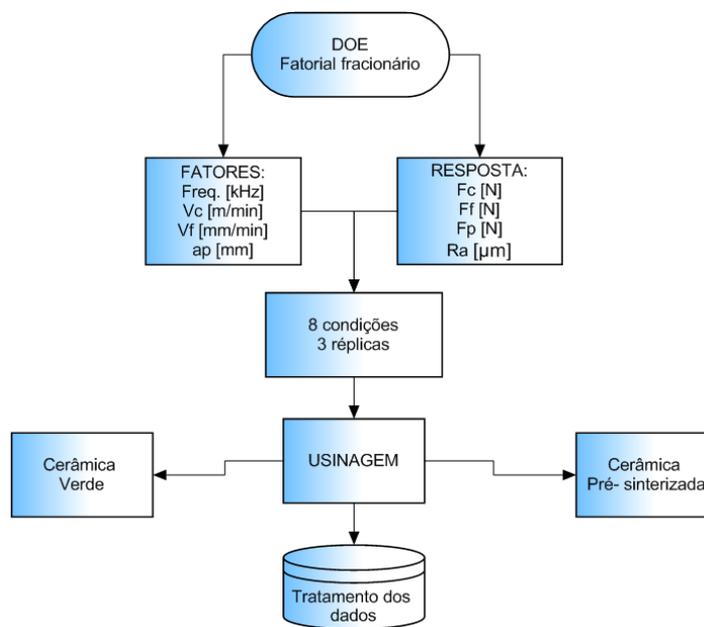
Tradicionalmente, o valor de corte para rejeitar a hipótese nula é de “p” menor ou igual a 0,05, assume-se, como margem de segurança, 5% de chances de erro, ou 95% de confiança para os resultados. Assim, foi adotado um “ $\alpha$ ” = **0,05**. A Figura 4.1 ilustra o resumo do experimento e a estrutura de aliases.

Figura 4.1- Resumo do experimento fatorial fracionário.

Resumo do experimento		Estrutura de aliases	
Fatores: 4	Experimento Base: 4; 8	Resolução: IV	I + ABCD
Ensaios: 24	Réplicas: 3	Fração: 1/2	A + BCD
Blocos: 1	Pts centrais (total): 0		B + ACD
			C + ABD
	Geradores de experimento: D = ABC		D + ABC
	Definir Relação: I = ABCD		AB + CD
			AC + BD
			AD + BC
<b>Método</b>			
Hipótese nula	Todas as médias são iguais		
Hipótese alternativa	Nem todas as médias são iguais		
Nível de significância	$\alpha = 0,05$		

A ANOVA transmite informações importantes sobre o comportamento das variações das médias dentro das amostras coletadas, destaca-se o “valor-p”, pois esse dado indica se, entre os níveis dos fatores aplicados, houve ou não alguma variação significativa. Nos resultados gerados, as análises utilizam médias, que são úteis para avaliar diferenças de resposta devido a mudanças nos níveis de fator. A Figura 4.2 demonstra o fluxograma do DOE fatorial fracionário de modo resumido.

Figura 4.2 - Fluxograma do DOE fatorial fracionário.



Fonte: elaborado pelo autor.

#### 4.1.1 Resultados para cerâmica em verde

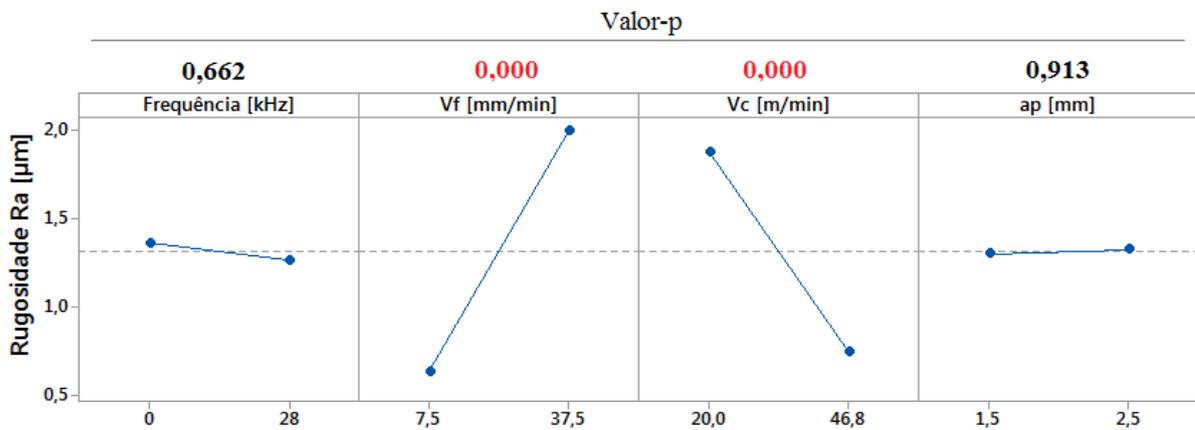
##### 4.1.1.1 Análise do acabamento e rugosidade superficial

Para início da análise, optou-se por investigar o acabamento e a rugosidade superficial, a fim de correlacionar, posteriormente, com os resultados das forças geradas ( $F_c - F_f - F_p$ ). Para avaliar o acabamento superficial, foi mensurada a rugosidade média superficial ( $R_a$ ) após o processo de usinagem, com finalidade de verificar as variáveis que apresentaram maiores

influências, além de verificar o perfil do acabamento mensurado pelo microscópio confocal para identificar os danos gerados.

A Figura 4.3 demonstra os efeitos principais para a rugosidade e os valores obtidos pela ANOVA, com o intuito de avaliar os efeitos das variações dos níveis dos fatores determinados e quais propiciaram um melhor acabamento (menor rugosidade). As análises incluem termos do modelo de primeira ordem, ressalta-se que os fatores estatisticamente significativos apresentam valor- $p \leq 0,05$ .

Figura 4.3 - Efeitos principais para rugosidade.



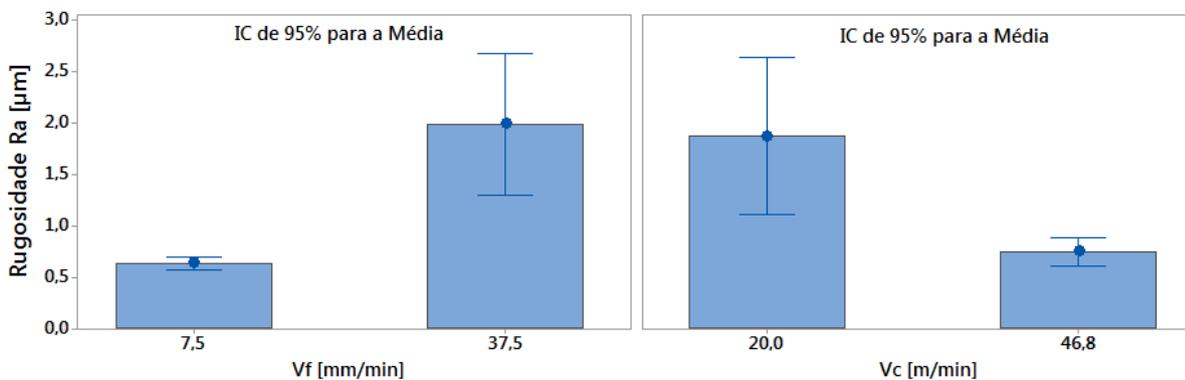
Fonte: elaborado pelo autor.

Observando a Figura 4.3 verifica-se que os fatores  $V_f$  e  $V_c$ , com os níveis estabelecidos, tiveram influência significativa na rugosidade gerada. É verificado que o aumento da  $V_f$  provocou um aumento significativo na rugosidade mensurada e a piora no acabamento superficial, já em relação à  $V_c$ , o aumento do seu nível proporcionou uma redução na rugosidade, ocasionando uma melhora considerável no acabamento superficial. O que contradiz o resultado de Xu e Jahanmir (1996), segundo esses autores, a  $V_c$  tem pouca influência no acabamento superficial da peça cerâmica em verde. Porém, foi confirmado que há influência significativa da  $V_c$  no acabamento gerado.

Já os fatores frequência e  $a_p$  não apresentaram variação significativa pelos dados estatísticos. Esse resultado, em relação a  $a_p$ , denota a possibilidade de utilizar elevadas profundidades de cortes sem ocasionar alteração significativa no acabamento.

A Figura 4.4 apresenta o intervalo de confiança (IC) de 95 % dos fatores ( $V_f$  e  $V_c$ ) de influência significativas na variável de respostas ( $R_a$ ), ou seja, 95% de chance do intervalo conter o verdadeiro valor da média dos fatores para variável de resposta, baseado nos dados amostrais. O IC pode ser usado para descrever o quanto os resultados de uma pesquisa são confiáveis, é determinado calculando-se uma estimativa de ponto e, depois, determina-se sua margem de erro. Os desvios padrões individuais são utilizados para calcular os intervalos.

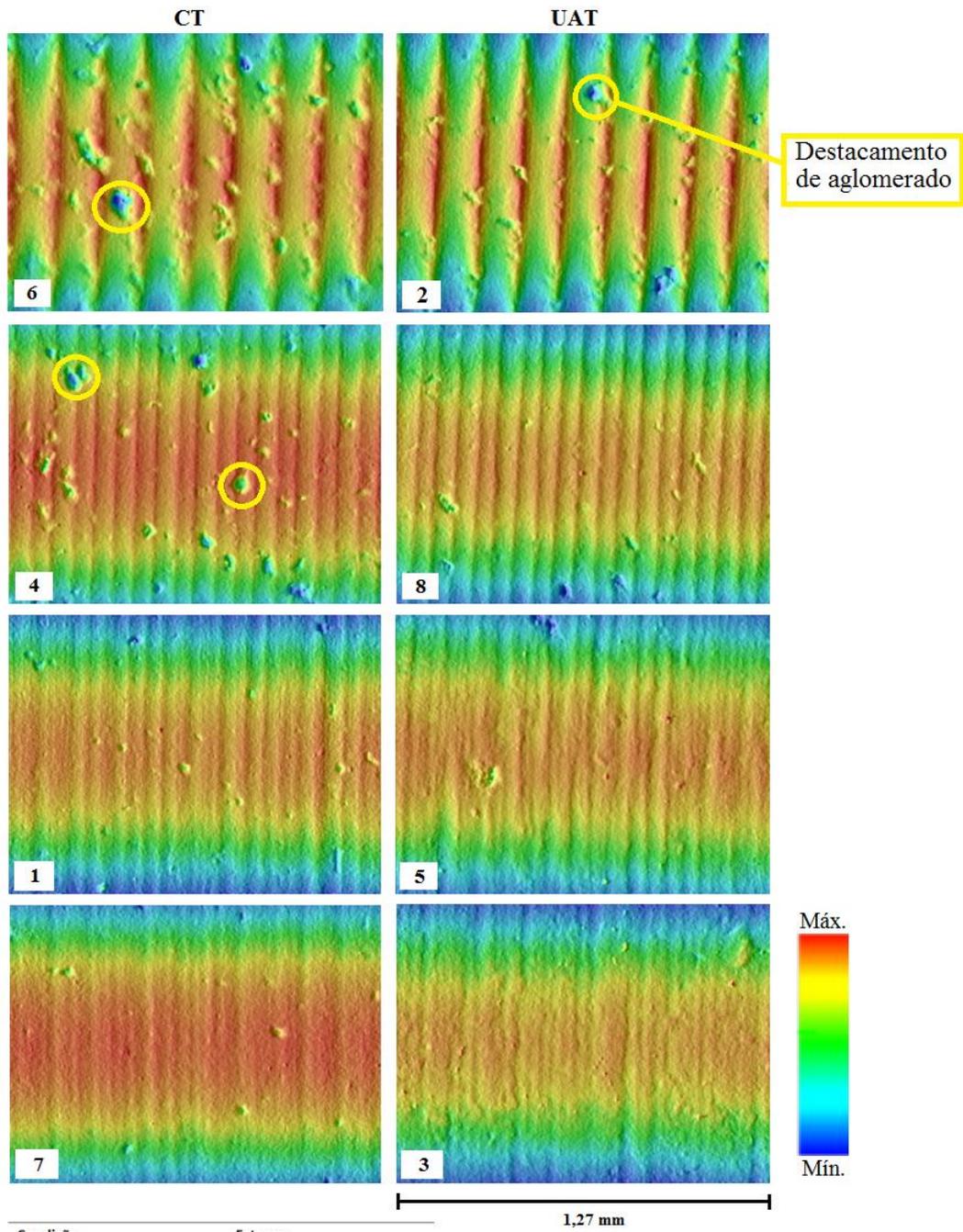
Figura 4.4 - IC da influência dos fatores  $V_c$  e  $V_f$  na resposta  $R_a$ .



Fonte: elaborado pelo autor.

Visando investigar melhor os dados gerados sobre os efeitos principais para a rugosidade e a influência do método UAT no processo, foi avaliada a área mensurada pelo confocal (Figura 4.5) das 8 condições definidas pelo planejamento experimental. Assim, foi possível fazer uma comparação entre os métodos CT e UAT devido ao fato de que a  $a_p$  praticamente não interfere no acabamento gerado. O método CT gerou maiores danos na superfície, ressalta-se, principalmente, o aparecimento de pequenos vazios caracterizados como destacamentos (arrancamentos) de aglomerados de grãos do material (identificados alguns exemplos na figura), os mesmos mostram-se característicos de remoção de modo intergranular. Já no UAT, demonstrou-se mais caracterizado por remoção intragranular.

Figura 4.5 - Acabamento superficial das condições executadas nos experimentos.



Condição	Fatores			
	Freq. [kHz]	Vf [mm/min]	Vc [m/min]	ap [mm]
1	0	7.5	20	1.5
2	28	37.25	20	1.5
3	28	7.5	46.8	1.5
4	0	37.25	46.8	1.5
5	28	7.5	20	2.5
6	0	37.25	20	2.5
7	0	7.5	46.8	2.5
8	28	37.25	46.8	2.5

Fonte: elaborado pelo autor.

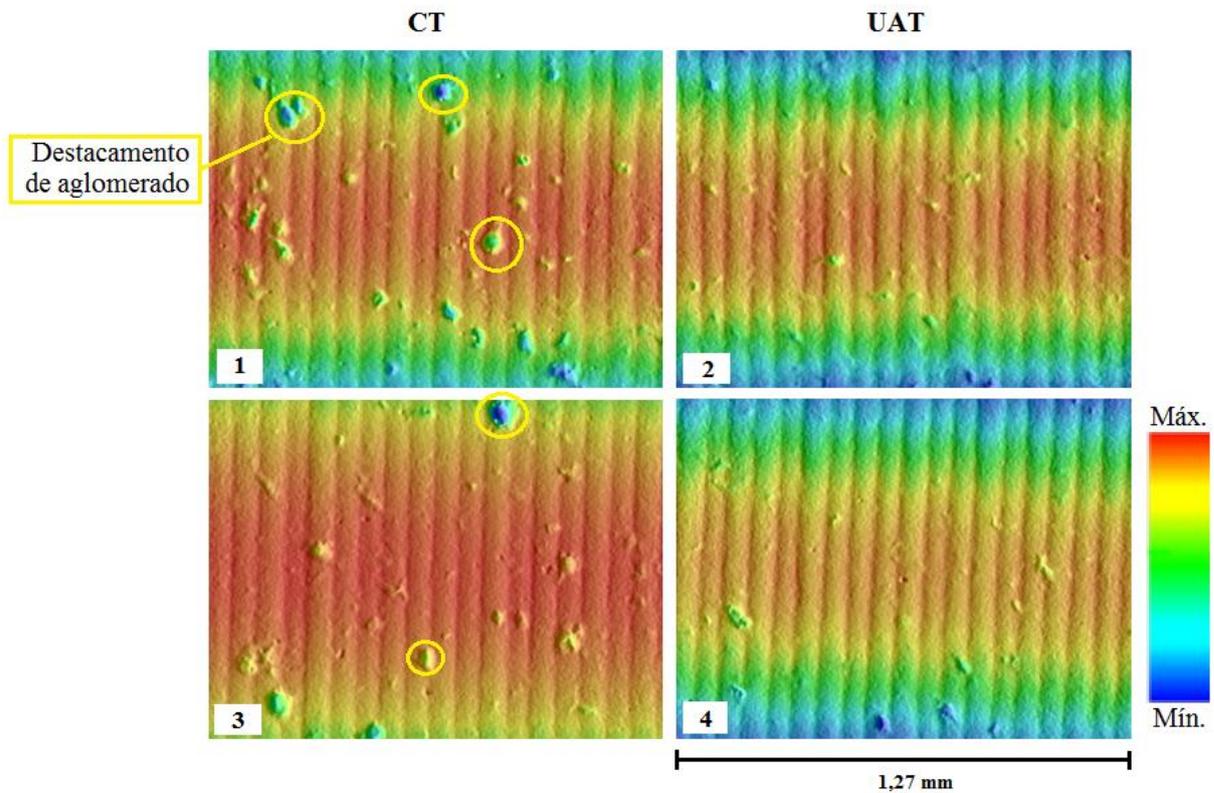
Pela figura, observa-se que as melhores condições ocorreram quando utilizadas baixa  $V_f$  e alta  $V_c$ , como foi averiguada na Figura 4.3. Ao se utilizar baixa  $V_f$  proporcionou uma redução da rugosidade superficial medida. Entretanto, essa melhora sucede até um determinado limite, pois avanços muito baixos acarretam um fluxo maior de material removido na superfície de saída da ferramenta. Ressalta-se que, durante esses ensaios, notou-se uma grande quantidade de pó depositada sobre a ferramenta, o que pode prejudicar consideravelmente o acabamento superficial da peça em trabalho e conseqüentemente a rugosidade.

Em relação à  $V_c$ , o acabamento melhora consideravelmente com o aumento da mesma. Porém, valores muito elevados são capazes de promover uma piora na qualidade superficial, pois podem propiciar uma remoção severa de material e promover arrancamento de aglomerados, além da resposta que a máquina apresentará em função do aumento da vibração.

Apesar de não ter ocorrido diferença significativa na rugosidade média avaliada, é possível observar que o método UAT proporcionou, em geral, melhores acabamentos superficiais em relação ao método CT. Este fato é observado principalmente ao relacionar as condições 4 e 8 da Figura 4.5, na qual o método UAT reduziu, consideravelmente, os danos concentrados.

Visando verificar se o método UAT melhora o acabamento com relevância, principalmente em condições com alto  $V_c$  e  $V_f$ , a Figura 4.6 ilustra a comparação do acabamento superficial gerado pelos métodos CT e UAT empregando  $V_c = 46,8$  m/min e  $V_f = 37,25$  mm/min.

Figura 4.6 - Comparação do acabamento superficial gerado pelo CT e UAT.



Condição	Fatores				
	Freq. [kHz]	Vf [mm/min]	Vc [m/min]	ap [mm]	Ra (D.P.A) [μm]
1	0	37.25	46.8	1.5	1,192 (0,10)
2	28	37.25	46.8	1.5	0,879 (0,07)
3	0	37.25	46.8	2.5	1,097 (0,09)
4	28	37.25	46.8	2.5	0,847 (0,10)

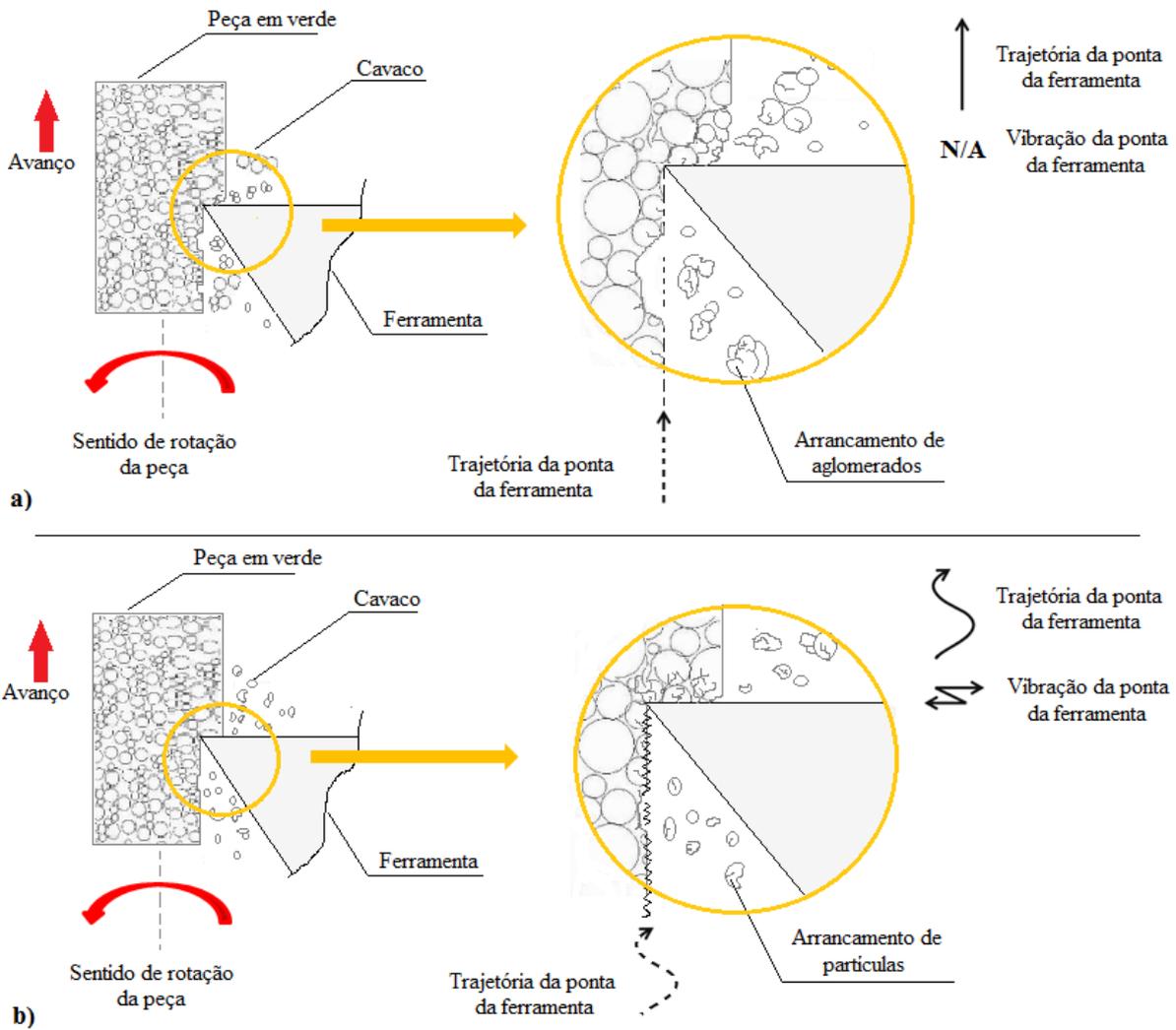
Fonte: elaborado pelo autor.

Ao avaliar a Figura 4.6, nota-se uma redução dos danos concentrados com a utilização do sistema ultrassônico. Assim, para uma produção de lotes de componentes cerâmicos, em que se visa minimizar os custos pela redução de tempo na produção, ao empregar o sistema ultrassônico há a possibilidade de utilizar maiores  $V_c$  e  $V_f$ , o que reduz a probabilidade de introduzir danos, principalmente, em operações de desbaste.

A alteração do corte devido ao sistema ultrassônico induz uma trajetória da ferramenta diferente ao do CT, sendo este o possível fator para a melhora no processo. No método UAT a vibração ultrassônica com baixa amplitude propicia a fratura dos aglomerados cerâmicos, portanto, resulta-se em arrancamentos de partículas menores, e, conseqüentemente, reduz a probabilidade de destacamento de aglomerados, além de facilitar a retirada do material removido na interface peça-ferramenta, assim, é minimizado a pressão constante de corte. A

Figura 4.7 demonstra o mecanismo de remoção de material no torneamento de cerâmica em verde pelo método CT e UAT. Já na Figura 4.8, a representação esquemática do deslocamento da ferramenta de corte no método UAT.

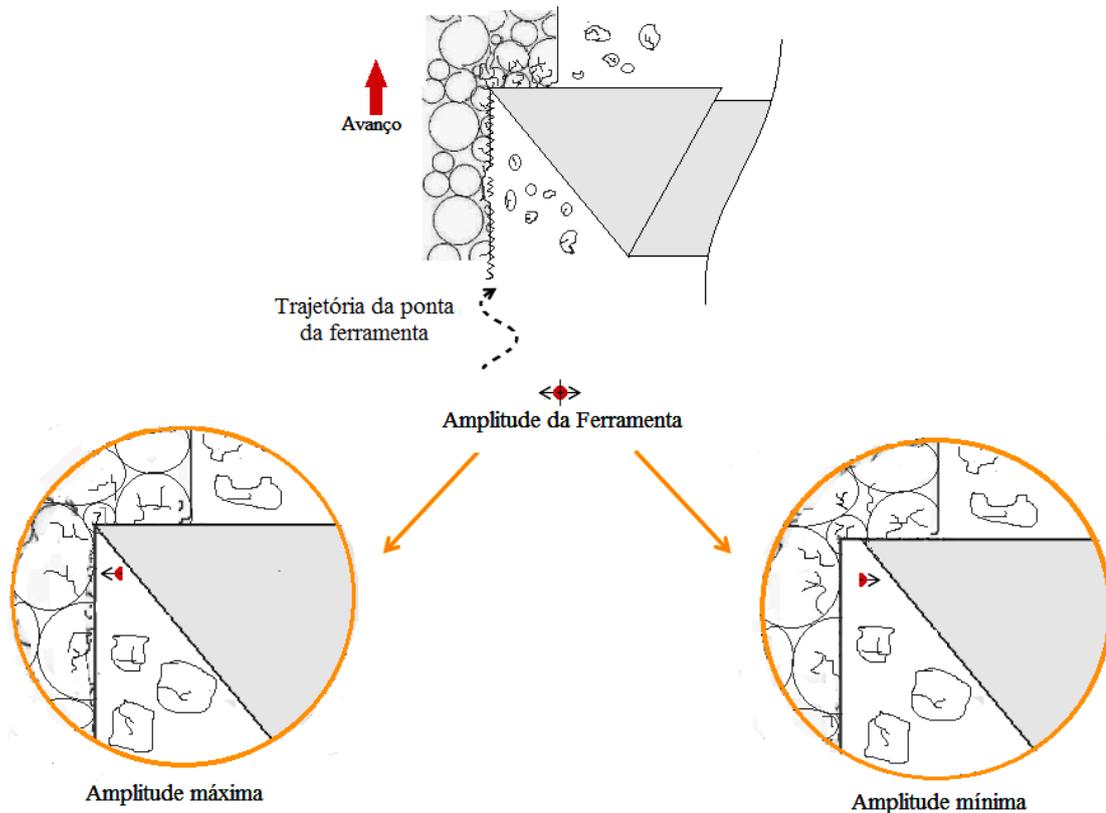
Figura 4.7 - Representação do mecanismo de remoção de material na usinagem em verde.



a) Torneamento convencional. b) Torneamento assistido por ultrassom.

Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 4.8 - Representação esquemática do deslocamento da ferramenta de corte.



Fonte: elaborado pelo autor.

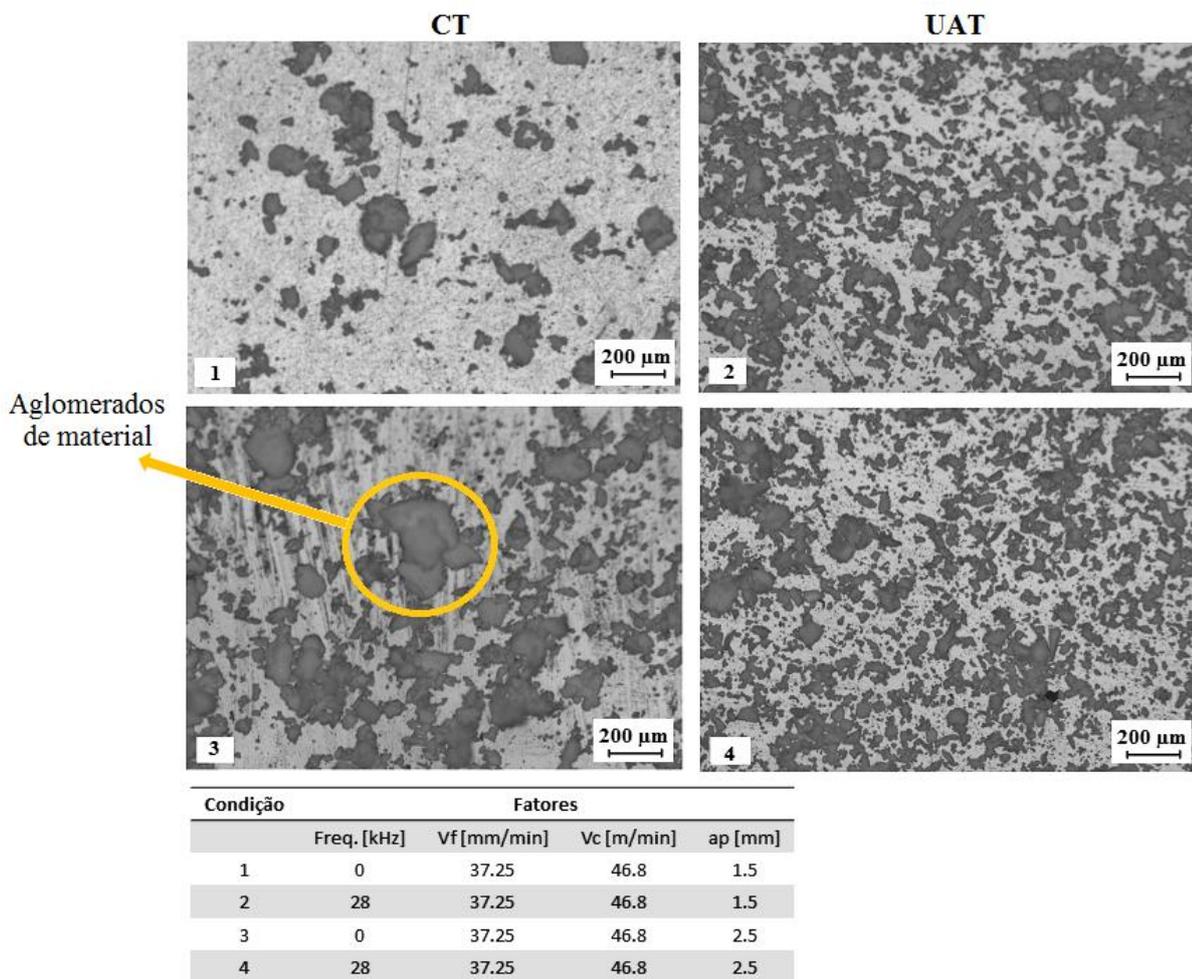
O mecanismo exibido foi baseado no modelo teórico apresentado no estudo recente de Liu et al. (2019). Nele, a aplicação da vibração na ferramenta de corte na direção radial ( $a_p$ ) foi empregada para texturizar a superfície da peça. Segundo os autores, a trajetória reta da ferramenta altera para uma trajetória senoidal na direção de corte e, assim, micro-ondulações são geradas na superfície.

No presente estudo, a largura e a profundidade da ondulação teriam, respectivamente,  $60,5 \mu\text{m}$  e  $2,3 \mu\text{m}$  (vide Figura 2.14 da página 52). A profundidade e a largura de ondulação empregada foram suficientes para promover benefícios no acabamento, sem modificar com significância a texturização da superfície, pois, micro-ondulações com grande largura poderiam modificar o acabamento e aumentar a rugosidade. Como também, o emprego de elevadas profundidades de ondulações poderia induzir trincas com facilidade no material, devido à fragilidade do compacto.

Outra forma de análise que corrobora com a alteração do corte devido ao sistema ultrassônico é avaliação do material removido durante a usinagem. Os cavacos gerados das

condições apresentadas na Figura 4.6 (tiveram variações significativas no acabamento ao empregar o sistema ultrassônico) foram analisados. A Figura 4.9 mostra uma porção desses materiais removidos durante a usinagem, sendo observadas partículas menores, na maior parte, pelo sistema ultrassônico. O método UAT facilitou a fratura dos aglomerados cerâmicos. Já no método CT, há maior probabilidade de arrancamento de aglomerados e de acúmulo de material na interface peça-ferramenta, devido à facilidade de aderência de material na ferramenta, pode-se originar aglomerados maiores resultantes do acúmulo (união) de material. Fato minimizado no método UAT devido à vibração ultrassônica imposta à ferramenta.

Figura 4.9 - Material removido (cavaco) nos métodos CT e UAT.



Fonte: elaborado pelo autor.

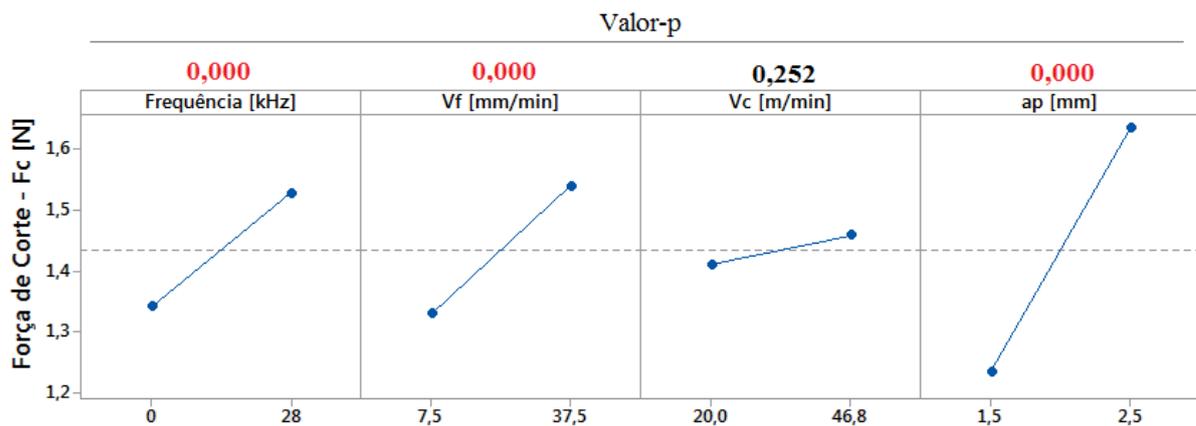
O compacto em verde está coeso somente pelos aditivos (ligante, plastificante, etc...) utilizados na compactação e apresenta facilidade de desprendimento de aglomerados durante a usinagem. Ressalta-se que, o método UAT pode ter reduzido as tensões desenvolvidas durante

o corte, em função da alteração da mecânica do corte decorrente do sistema ultrassônico. Uma vez que altas tensões geradas durante a usinagem causam desprendimento das partículas compactadas, em razão da baixa resistência mecânica apresentada pelo compacto no seu estado verde.

#### 4.1.1.2 Análise das forças

O fator de resposta selecionado inicialmente foi  $F_c$  e a análise incluiu termos do modelo de primeira ordem. A Figura 4.10 demonstra os efeitos principais para  $F_c$  e os valores obtidos pela ANOVA.

Figura 4.10 - Efeitos principais para  $F_c$ .



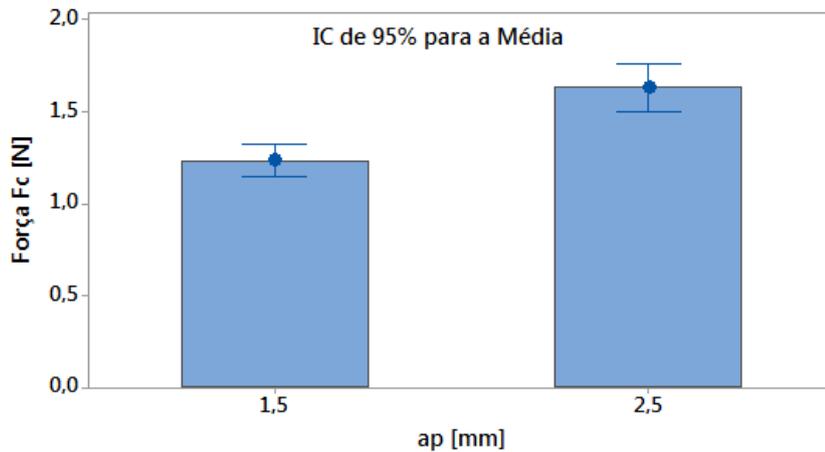
Fonte: elaborado pelo autor.

Ao observar o valor-p e o gráfico, é nítido que os fatores: frequência,  $V_f$  e  $a_p$  geraram variação significativa no processo. Já a  $V_c$  não teve variação significativa entre os níveis analisados. Uma provável causa para tal fato é devido à baixa resistência mecânica do compacto em verde, o que torna fácil o corte do material, e não apresenta influência na variação dos níveis utilizados.

Ao se utilizar o sistema ultrassônico no processo há aumento na  $F_c$ , provavelmente devido às forças instantâneas geradas no momento da máxima amplitude da ferramenta associado com a  $V_c$ . Em relação à  $V_f$ , o aumento do mesmo ocasiona uma remoção mais severa do material em um menor tempo de corte, o que induz o aumento dos esforços na  $F_c$ . Já

a variável ( $a_p$ ) gerou variação significativa na  $F_c$ , devido a ampliação da área de contato entre ferramenta e peça com o aumento da  $a_p$ , logo, apresenta maior atrito e provoca o incremento da força. A Figura 4.11 exibe o IC de 95% do fator de maior variação significativa ( $a_p$ ) na variável de resposta  $F_c$ .

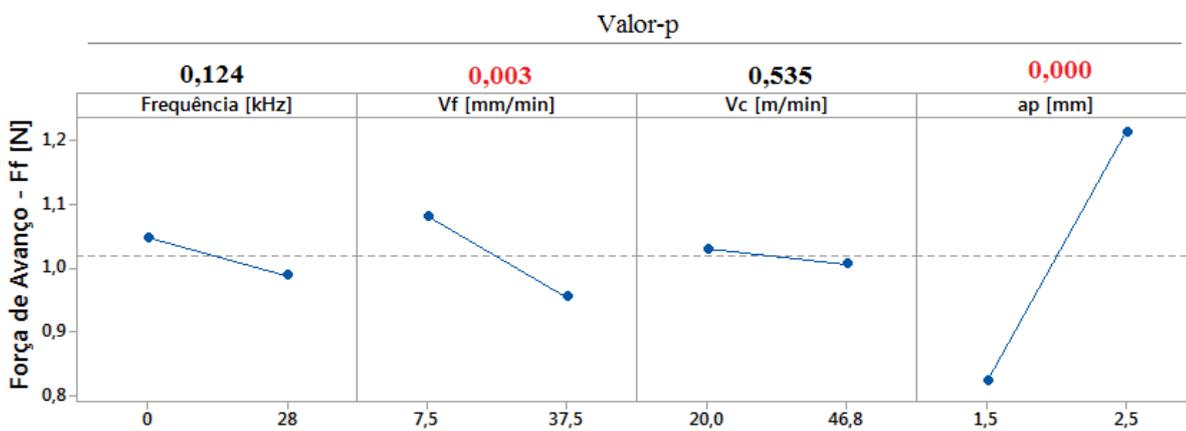
Figura 4.11 - IC da influência do fator  $a_p$  na resposta  $F_c$ .



Fonte: elaborado pelo autor.

Ao tratar-se da força de avanço ( $F_f$ ), na Figura 4.12 são apresentados os resultados de efeitos principais. Observa-se que os fatores que apresentaram influência significativa na força de avanço foram a  $V_f$  e a  $a_p$ . Já os demais fatores (frequência e  $V_c$ ), não apresentaram uma variação estatisticamente significativa entre os níveis avaliados.

Figura 4.12 - Efeitos principais para  $F_f$ .



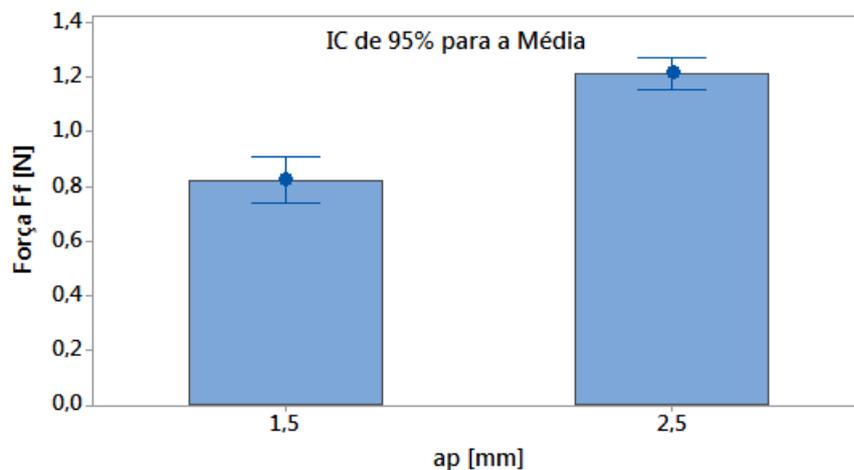
Fonte: elaborado pelo autor.

O aumento da  $V_f$  propiciou uma redução na  $F_f$ , mas baixa variação, provavelmente devido a maior facilidade de remoção do fluxo de material sobre a superfície de saída da ferramenta, pois avanços muito baixos apresentam maior facilidade de material aderir à ferramenta, além do fato da baixa resistência do material representar baixa resistência ao avanço. Já a  $a_p$  teve a maior influência na  $F_f$ , pois a ampliação da área de contato da ferramenta com a peça aumenta a área de contato, e, conseqüentemente aumenta a resistência do corte na direção axial, o que leva ao incremento das forças.

Observa-se que, não houve variação significativa no intervalo avaliado utilizando a frequência. Portanto, a vibração ultrassônica não provocou efeitos sobre  $F_f$ . Ressalta-se que a resposta à  $V_c$  permaneceu praticamente constante, como ocorreu na  $F_c$ , devido ao fato da facilidade do corte do material não apresentar alteração relevante.

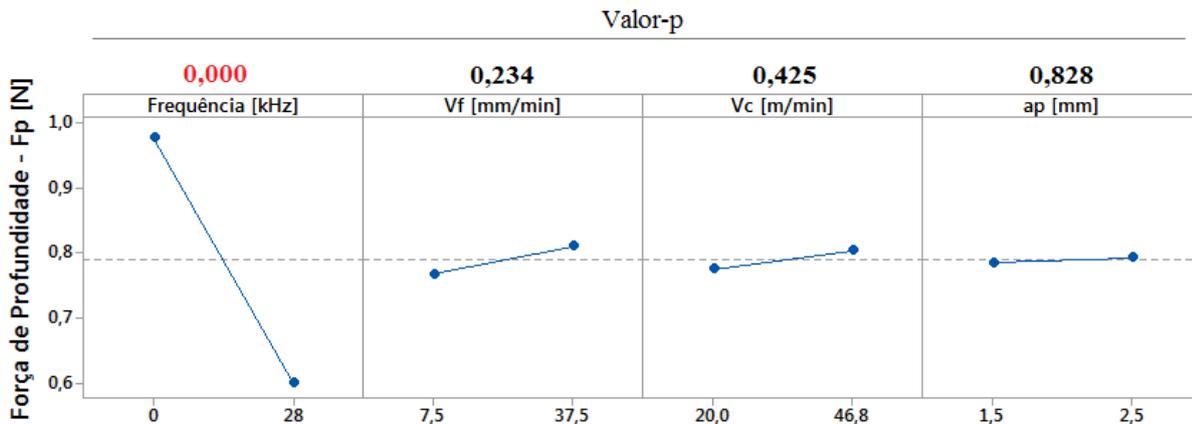
A Figura 4.13 apresenta o IC de 95 % do fator de maior variação ( $a_p$ ) na variável de resposta  $F_f$ . É verificado que a faixa do intervalo da média dos níveis do fator são pequenos, o que indica maior precisão na resposta.

Figura 4.13 - IC da influência do fator  $a_p$  na resposta  $F_f$ .



Fonte: elaborado pelo autor.

Ao analisar a força de profundidade ( $F_p$ ), a Figura 4.14 demonstra os efeitos principais para  $F_p$ , nas quais os fatores que apresentaram uma significância no processo apresentam valor- $p \leq 0,05$ . Também é visto que a  $F_p$  é a força que apresentou as menores magnitudes na usinagem, a mesma não gerou valores superiores a 1N.

Figura 4.14 - Efeitos principais para  $F_p$ .

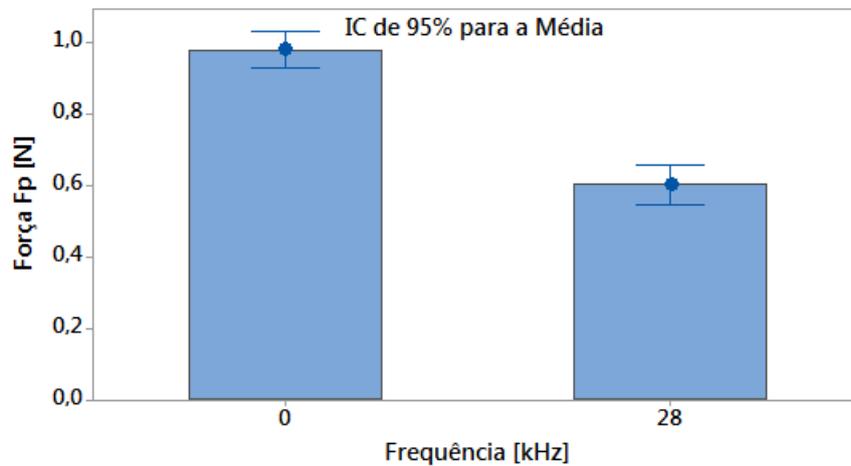
Fonte: elaborado pelo autor.

Desta análise, denota-se que o único fator que apresentou influência (variação) significativa na  $F_p$  foi a frequência. Demais fatores ( $V_f$  -  $V_c$  -  $a_p$ ) não apresentaram variações estatisticamente significativas pelos níveis utilizados.

Observa-se que o método UAT foi benéfico ao processo, o mesmo propicia um decréscimo acentuado da força de  $F_p$ . Uma das prováveis causas para tal comportamento se deve às características do material relacionado com a mecânica do corte (que é alterada devido à alta frequência e baixa amplitude aplicada na ferramenta), o que modifica o comportamento das forças.

A direção da amplitude da ferramenta aplicada no sistema ultrassônico é na direção da  $a_p$ , assim, pode-se facilitar a fratura do material e conseqüentemente o corte, o que reduz as forças nessa direção. Essa observação pode ser relacionada com a representação esquemática do deslocamento da ferramenta de corte no UAT apresentada na Figura 4.7, corroborando com essa hipótese.

Tendo em vista que somente o fator frequência apresentou influência, foi gerado um de IC de 95% para a média da variável de resposta  $F_p$  em função da frequência (Figura 4.15), para identificar o intervalo de confiança baseado nos dados amostrais.

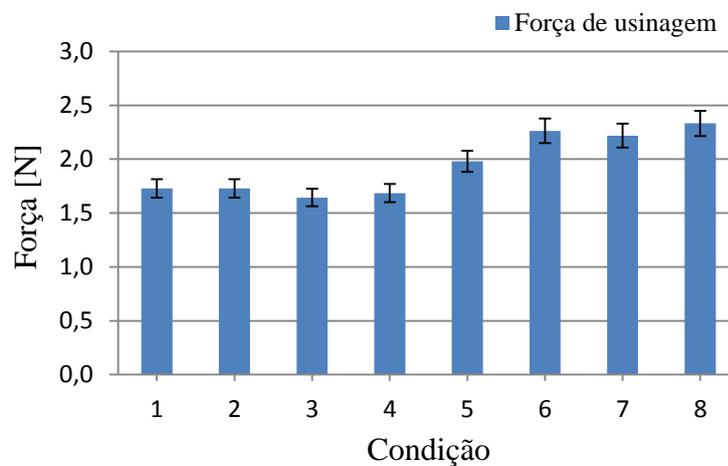
Figura 4.15 - IC da influência do fator frequência na resposta  $F_p$ .

Fonte: elaborado pelo autor.

Em geral, as forças de usinagem não ultrapassaram 2,4 N de intensidade no decorrer de um passe estabelecido, mesmo sendo utilizada  $a_p$  elevada (2,5mm). Logo, mesmo com grande quantidade de volume de material removido, as forças geradas foram baixas (máximo de 1,96 N na  $F_c$  da condição 8). No estudo realizado por Sanchez et al. (2018), é executado o torneamento de compactos em verde de alumina obtidos pela prensagem uniaxial por 120 MPa. Foram executados 5 passes com  $a_p$  de 1 mm, e ao final dos passes, a força mensurada não chegou a 2 N no último passe. Assim, observa-se que as forças atingidas no torneamento de cerâmica em verde são baixas.

No presente estudo as forças foram maiores devido à pressão utilizada (200 MPa), o que aumenta o grau de empacotamento das partículas. A Figura 4.16 apresenta a força de usinagem média gerada nas 8 condições estabelecidas no DOE fracionário (apresentada na Tabela 3.4). É observado que o aumento da profundidade de corte (de 1,5 mm para 2,5 mm nas condições 5, 6, 7 e 8) foi responsável pelo incremento das forças.

Figura 4.16 - Força de usinagem gerada em cada condição.



Fonte: elaborado pelo autor.

Pode-se concluir que, as forças geradas na usinagem de cerâmica em verde se alteram pouco com a variação dos parâmetros de corte, o fator que exercer influência no incremento das forças de usinagem com significância é o desgaste significativo da ferramenta de corte. Pois nesse ensaio fracionário, a ferramenta de diamante gerou desgaste de flanco máximo extremamente baixo, expondo  $VB_{B_{\max}} = 15 \mu\text{m}$  ao final de todos os passes executados.

A afirmação é possível devido ao trabalho anteriormente realizado por Gonçalves Júnior (2014), foram mensuradas as forças de usinagem em cada passe no torneamento de cerâmica em verde executado por ferramentas de cermet. Nos resultados, verificou-se o aumento progressivo das forças ( $F_c$ ,  $F_f$  e  $F_p$ ) em cada passe realizado e, ao final de três passes executados, teve condição em que a ferramenta de corte apresentou um desgaste de flanco máximo de  $VB_{B_{\max}} = 130 \mu\text{m}$ , na qual apresentou força de usinagem superior a 8 N.

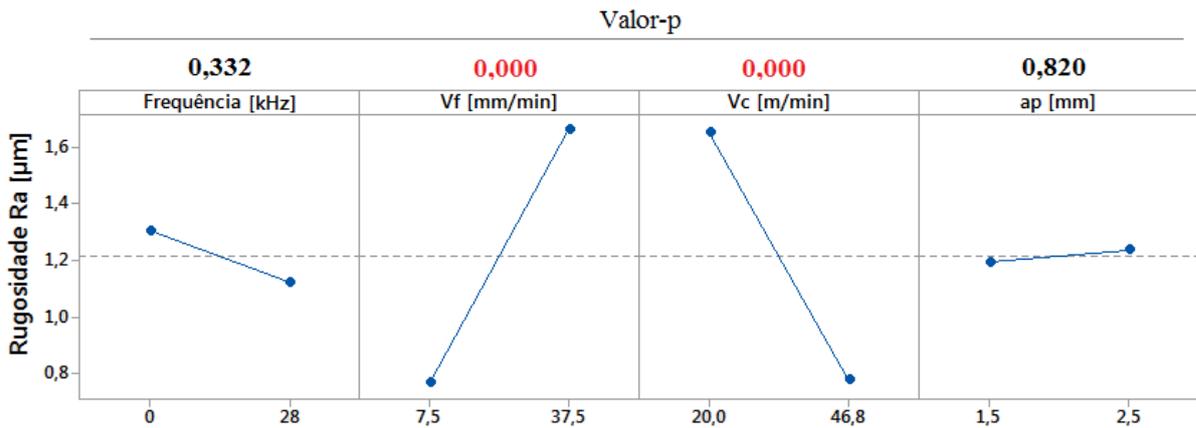
#### 4.1.2 Resultados para cerâmica pré-sinterizada

##### 4.1.2.1 Análise do acabamento superficial

Todo o processo de usinagem foi realizado sem nenhuma quebra e/ou falha catastrófica dos compactos pré-sinterizados. As mesmas formas de análise empregadas para a condição em verde foram utilizadas para a condição pré-sinterizada. Primeiramente,

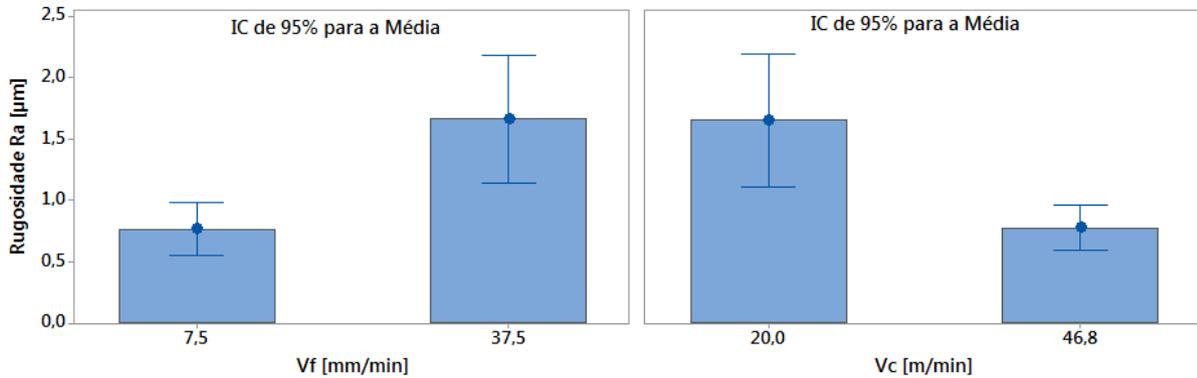
investigou-se a rugosidade e o acabamento superficial, a fim de correlacionar posteriormente com os resultados das forças geradas ( $F_c - F_f - F_p$ ). Com intuito de verificar as variáveis que apresentaram maiores influências, a Figura 4.17 demonstra os efeitos principais para a rugosidade, os fatores que são estatisticamente significativos apresentam valor- $p \leq 0,05$ .

Figura 4.17 - Efeitos principais para rugosidade.



Fonte: elaborado pelo autor.

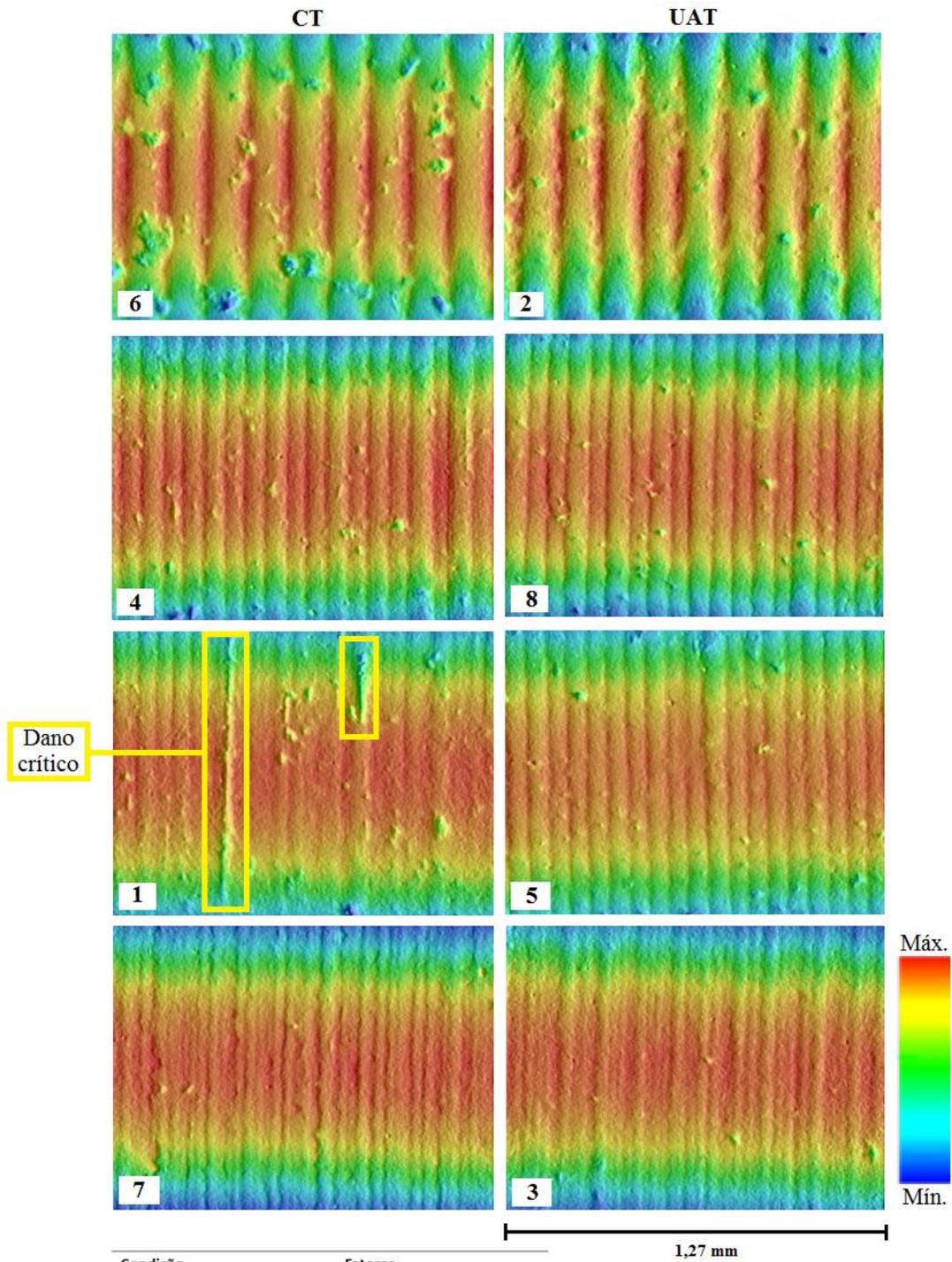
Por meio da Figura 4.17 pode ser constatado que os fatores  $V_f$  e  $V_c$  com os níveis estabelecidos tiveram influência significativa na rugosidade gerada, como também, os fatores frequência e  $a_p$  não apresentaram variação significativa na faixa de frequência e profundidade de corte avaliadas. Nesse sentido, é preciso rememorar que tal fato foi verificado na condição em verde, é indicado que ambos os compactos (em verde e pré-sinterizados) apresentaram semelhança de comportamento nos níveis dos fatores analisados em relação à rugosidade mensurada. No entanto, a condição pré-sinterizada gerou menores valores de  $R_a$  do que a condição em verde. A Figura 4.18 apresenta o IC de 95 % dos fatores ( $V_f$  e  $V_c$ ) de influência significativas na variável de respostas ( $R_a$ ).

Figura 4.18 - IC da influência dos fatores  $V_c$  e  $V_f$  na resposta  $R_a$ .

Fonte: elaborado pelo autor.

Com finalidade de avaliar os acabamentos gerados e a influência do método UAT no processo, a Figura 4.19 demonstra a área medida pelo confocal das 8 condições definidas pelo planejamento experimental. As imagens foram dispostas de forma comparativa entre os métodos CT e UAT, sendo verificados que ambos os métodos apresentaram acabamentos superficiais semelhantes. No entanto, foi observada uma condição superficial crítica no método CT, sendo danos extremamente severos. Esses danos foram advindos da aderência momentânea do cavaco na interface peça-ferramenta, o que acarretou danos contínuos (na forma de cavidade) na direção da  $V_c$ .

Figura 4.19 - Acabamento superficial das condições executadas nos experimentos.

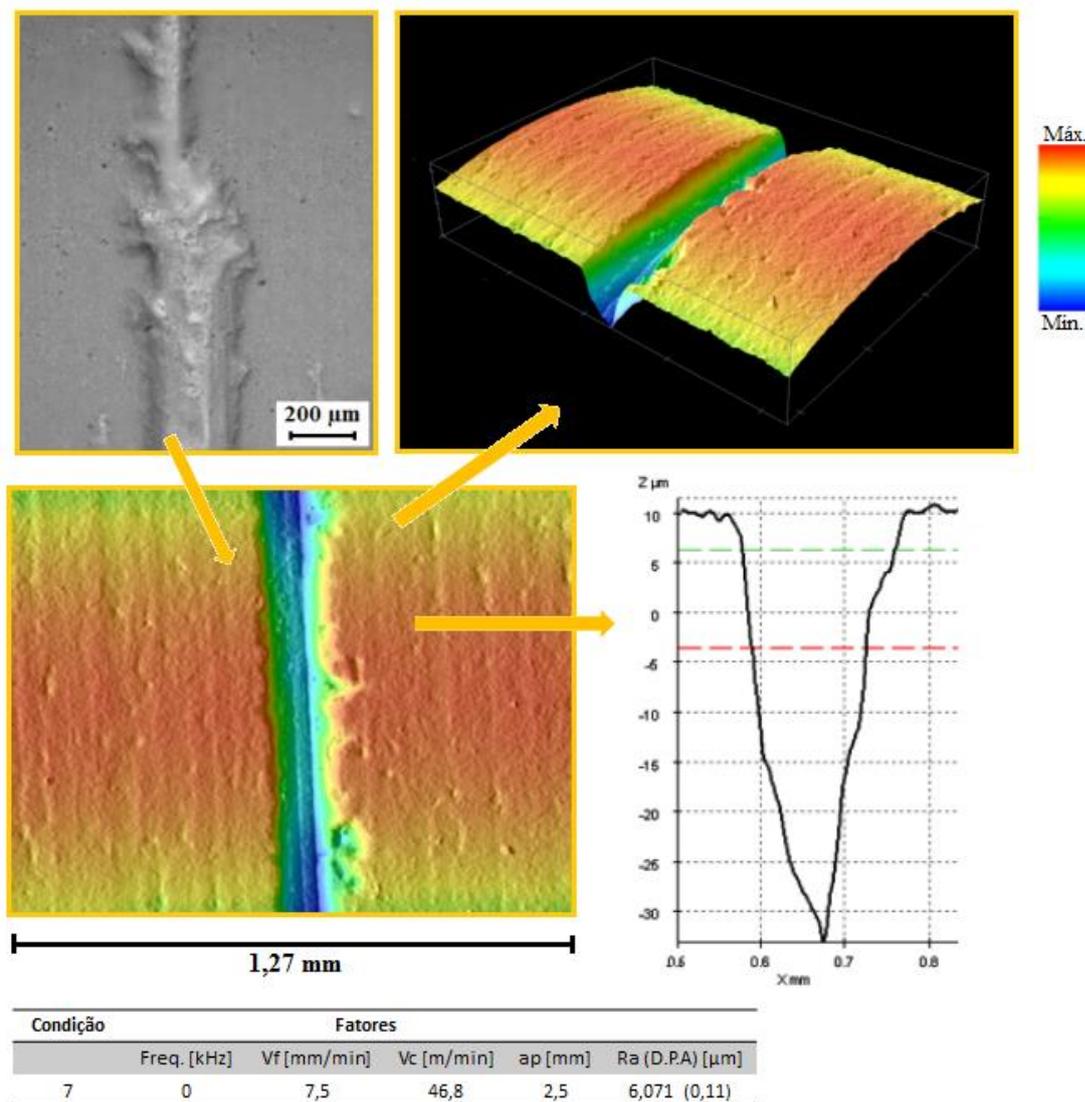


Condição	Fatores			
	Freq. [kHz]	Vf [mm/min]	Vc [m/min]	ap [mm]
1	0	7.5	20	1.5
2	28	37.25	20	1.5
3	28	7.5	46.8	1.5
4	0	37.25	46.8	1.5
5	28	7.5	20	2.5
6	0	37.25	20	2.5
7	0	7.5	46.8	2.5
8	28	37.25	46.8	2.5

Fonte: elaborado pelo autor.

Os danos críticos gerados na superfície da condição 1 (Figura 4.19) foram observados em outras réplicas. A Figura 4.20 ilustra o dano crítico mais severo gerado no processo, que ocorreu em uma réplica da condição 7. É verificada a profundidade e a largura máxima do dano em torno de 45  $\mu\text{m}$  e 200  $\mu\text{m}$  respectivamente.

Figura 4.20 - Danos críticos gerados pelo método CT.

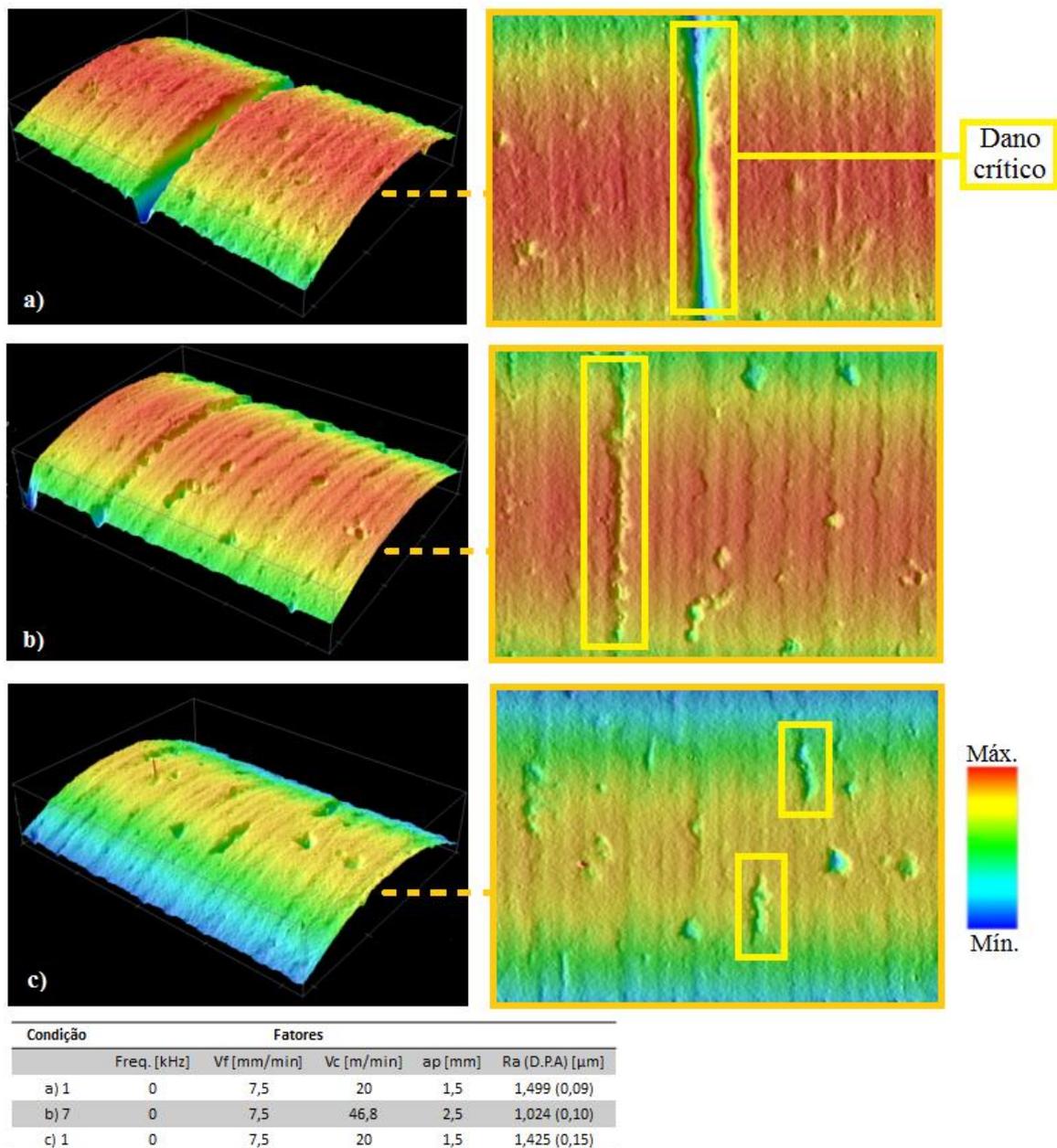


Fonte: elaborado pelo autor.

Observou-se que, as condições que apresentaram esses danos críticos, foram somente nas condições sem a utilização do sistema ultrassônico. Foram realizados 12 ensaios pelo método CT, na qual 4 ensaios apresentaram essa forma de dano, ou seja, 1/3 dos ensaios. Essa quantidade de danos no universo de amostras avaliadas é relevante para o processo, já que

danos dessa magnitude podem inviabilizar a sua aplicação, levando-as ao descarte. A Figura 4.21 ilustra o acabamento superficial das peças que apresentaram danos críticos pelo método CT. Portanto, o método UAT foi capaz de reduzir as chances de introduzir danos críticos na superfície dos materiais pré-sinterizados.

Figura 4.21 - Condições que apresentaram danos críticos pelo método CT.

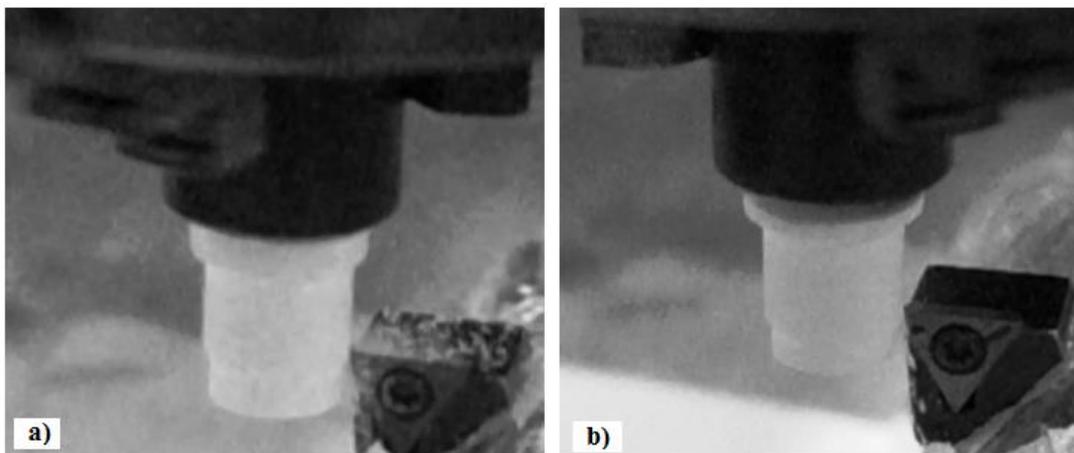


Fonte: elaborado pelo autor.

Todas as condições apresentadas que geraram danos críticos foi com  $V_f = 7,5$  mm/min, logo, indica-se que baixos avanços apresentaram maior probabilidade de gerarem esses tipos de danos. No entanto, avanços mais baixos (até certo limite) são benéficos para um melhor acabamento e redução da  $R_a$ . Nenhuma condição com  $V_f = 7,5$  mm/min empregando a vibração ultrassônica apresentou esses danos, desse modo, o sistema ultrassônico foi benéfico. Esse fato é devido à vibração ultrassônica proporcionar uma remoção (dispersão) mais rápida do material removido da ferramenta, o que minimiza a chance do cavaco aderir na ferramenta durante a usinagem, além de proporcionar uma ferramenta limpa no método UAT.

Tal fato foi observado através de vídeos em “*slow motion*” com 60 frames por segundo (fps) utilizados durante a usinagem. A própria vibração da ferramenta deve funcionar como uma “peneira vibratória”, pois à medida que a ferramenta vibra, o material não consegue se manter na superfície da mesma. A Figura 4.22 apresenta imagens instantâneas obtidas a partir do vídeo do momento da usinagem pelos métodos CT e UAT apresentando os mesmos parâmetros de usinagem. Observa-se o acúmulo de material na ferramenta de corte no método CT.

Figura 4.22 - Comparação da ferramenta de corte no momento da usinagem.



a) Método CT. b) Método UAT.

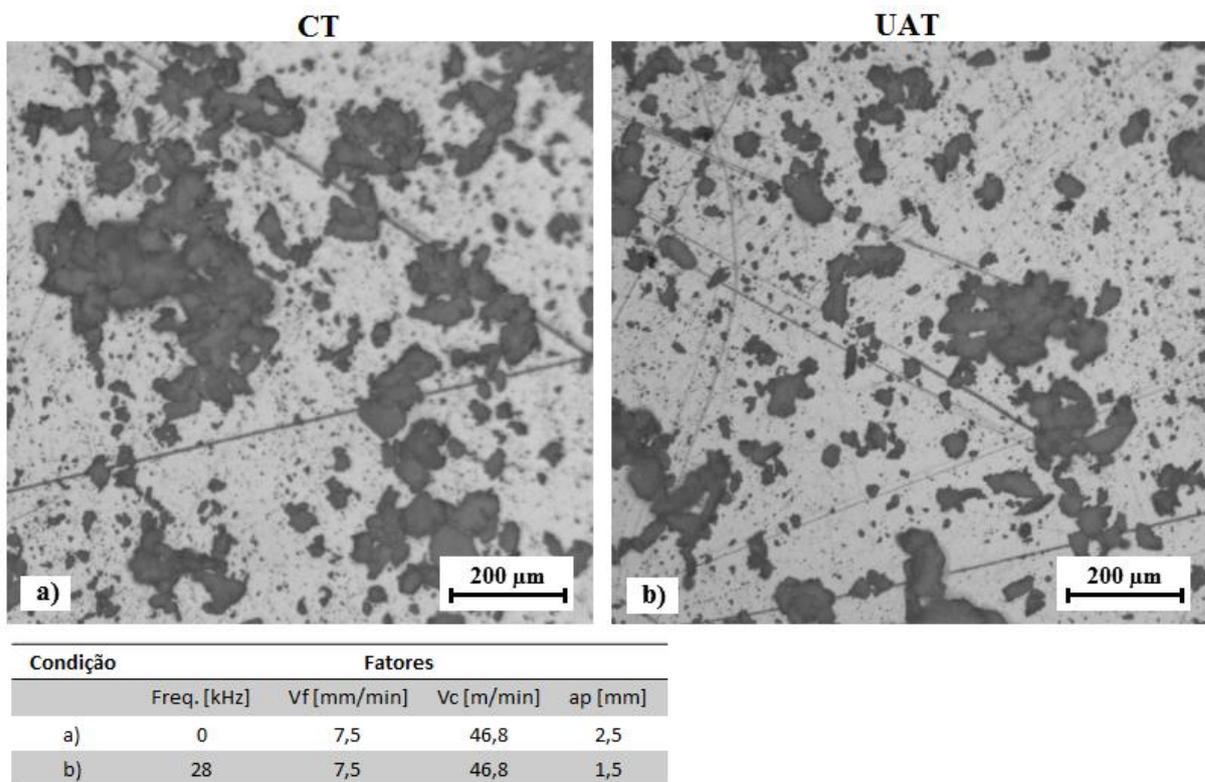
Fonte: elaborado pelo autor.

A representação esquemática do deslocamento da ferramenta de corte no método UAT (vide Figura 4.8 da página 97) apresentado na condição em verde, pode ser utilizado para auxiliar no entendimento. Por fim, o método UAT propiciou leve redução da  $R_a$  em comparação ao CT, mas sem relevância estatística. O ponto positivo da aplicação do sistema

ultrassônico foi a redução da probabilidade de danos críticos gerados, pois nenhum ensaio com esta técnica apresentou tais danos.

Os cavacos gerados nas condições executadas da Figura 4.19 foram semelhantes, não foi observada uma diferença visível na forma e dimensão do cavaco ao relacionar todas as condições empregadas. A Figura 4.23 apresenta a forma do cavaco gerado na condição pré-sinterizada.

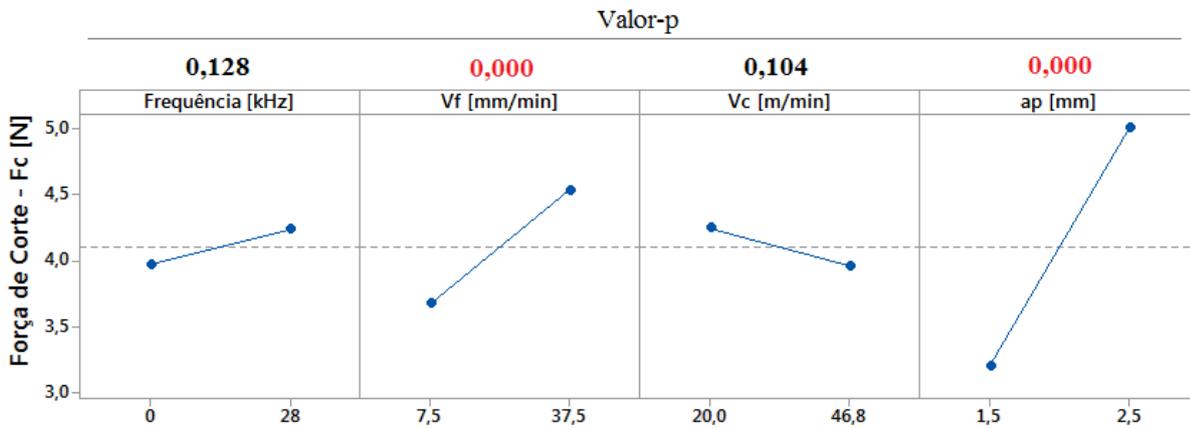
Figura 4.23 - Comparação do material removido durante a usinagem.



Fonte: elaborado pelo autor.

#### 4.1.2.2 Análise das forças

As análises das forças ( $F_c - F_f - F_p$ ) são apresentadas seguindo a mesma ordem dos resultados para a condição em verde. Primeiramente, ao analisar o fator  $F_c$ , a Figura 4.24 exhibe os efeitos principais para  $F_c$  e os valores obtidos pela ANOVA (valores significativos: Valor-p < 0,05).

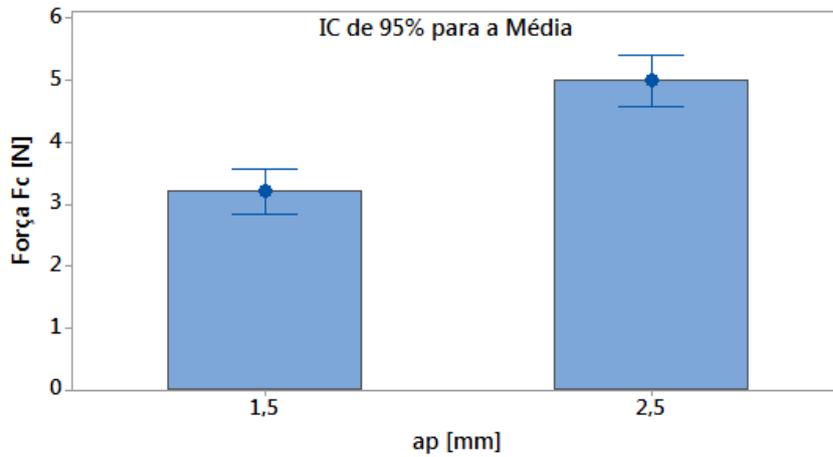
Figura 4.24 - Efeitos principais para  $F_c$ .

Fonte: elaborado pelo autor.

Os fatores  $V_f$  e  $a_p$  tiveram variação significativa na variável  $F_c$ , pelo “valor-p”. Já a frequência e a  $V_c$  não tiveram variações significativas no processo, logo, a velocidade nessa faixa testada não tem influência sobre a força de corte. Os dois fatores com significância apresentaram o mesmo comportamento dos níveis da condição em verde e, conseqüentemente, pelos mesmos motivos. O aumento da  $V_f$  ocasiona uma remoção mais severa do material em um menor tempo de corte, então acarreta o aumento dos esforços na  $F_c$ . Já para a  $a_p$ , o aumento do mesmo leva ao incremento da força e maior atrito devido à ampliação da área de contato entre ferramenta e peça.

A Figura 4.25 apresenta o IC de 95 % do fator de maior variação significativa ( $a_p$ ) na variável de resposta  $F_c$ . Foi observado que a  $a_p$  de 2,5 mm provoca um aumento da força de até 5,5 N, em contraste com a condição em verde, que gerou aumento máxima de 1,8 N.

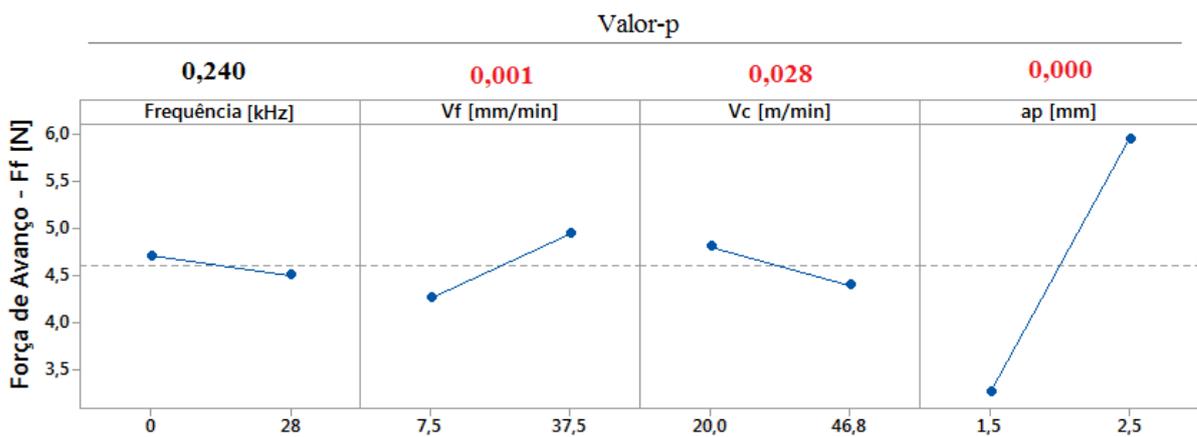
Figura 4.25 - IC da influência do fator  $a_p$  na resposta  $F_c$ .



Fonte: elaborado pelo autor.

Após a Análise dos resultados para  $F_f$ , a Figura 4.26 apresenta os efeitos principais. Os fatores que apresentaram influência significativa na força de avanço foram:  $V_f$ ,  $V_c$  e  $a_p$ . Salienta-se que somente o fator frequência não apresentou uma variação estatisticamente significativa entre a variável de resposta ( $F_f$ ), portanto, a vibração ultrassônica não provocou efeitos sobre  $F_f$ , esse fato é verificado no estado verde.

Figura 4.26 - Efeitos principais para  $F_f$ .



Fonte: elaborado pelo autor.

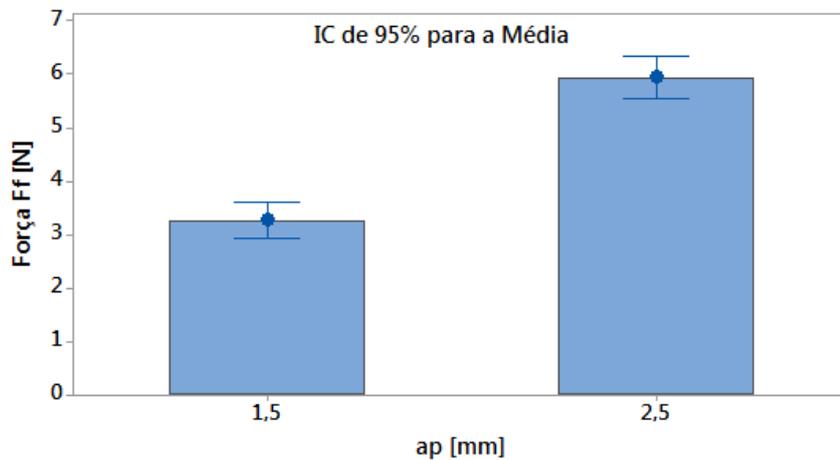
O fator  $V_f$  com o aumento no nível apresentou um incremento na força  $F_f$ . Tal ocorrido é devido a maior resistência apresentada pelo compacto pré-sinterizado que,

subsequentemente, ocasiona aumento da força devido ao maior volume de material removido na mesma unidade de tempo.

O fator  $V_c$  gerou redução da força quando empregado  $V_c = 46,8$  m/min, provavelmente valores elevados propiciam uma melhor remoção de grãos (esmagamento, fratura e arrancamento de material) até certo limite, pois  $V_c$  extremamente elevadas podem acarretar a fratura do material, devido a sua fragilidade.

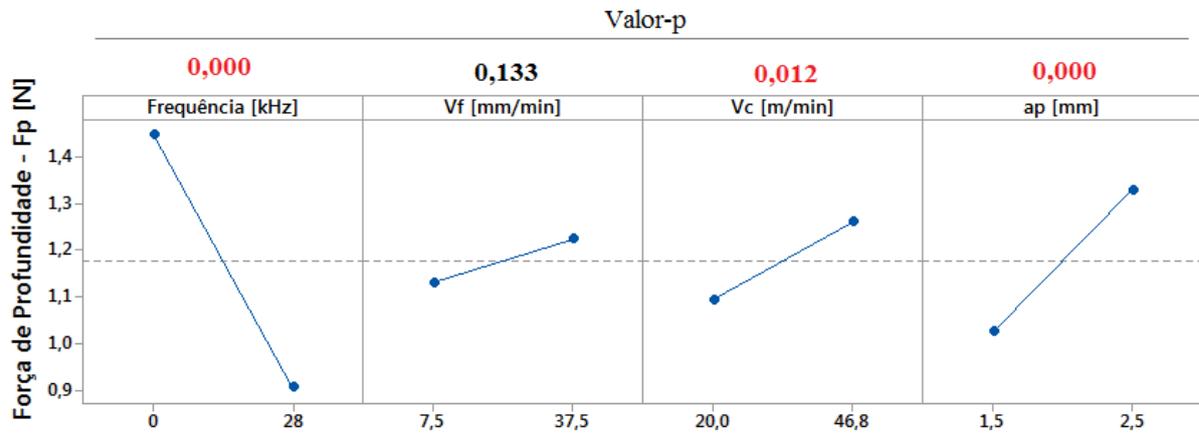
O fator  $a_p$  teve a maior influência na  $F_f$ , com o aumento da  $a_p$  há uma ampliação da área de contato da ferramenta com a peça, assim, induz um aumento na força devido à resistência do corte na direção axial, como visto no estado verde. Na Figura 4.27 é apresentado o IC de 95% do fator de maior variação significativa ( $a_p$ ) na variável de resposta  $F_f$ . Observa-se que a força de avanço atingiu valores de até 6,5 N com  $a_p$  de 2,5 mm, já no estado verde gerou uma força máxima de 1,3 N. Assim, denota-se forte influência da pré-sinterização no aumento das forças quando utilizadas as mesmas condições de corte.

Figura 4.27 - IC da influência do fator  $a_p$  na resposta  $F_f$ .



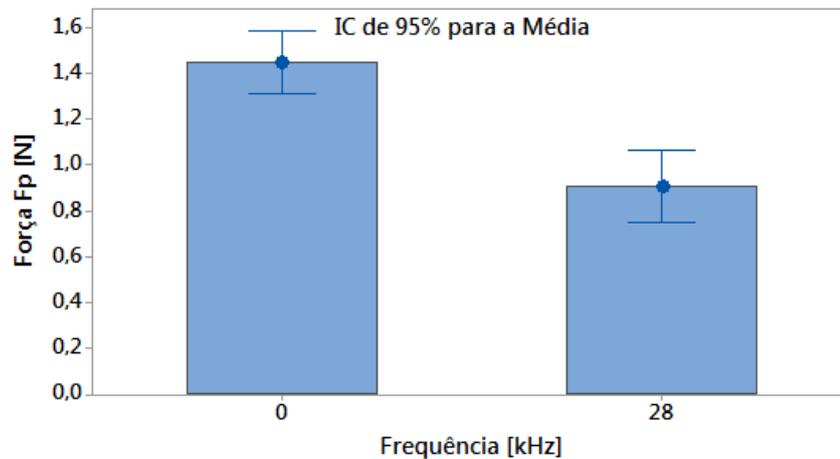
Fonte: elaborado pelo autor.

Ao tratar-se da  $F_p$ , a Figura 4.28 demonstra os efeitos principais para  $F_p$ . Foi verificado que o único fator que não apresentou variação significativa entre os níveis foi a  $V_f$ , logo, a  $V_f$  não influencia a  $F_p$ .

Figura 4.28 - Efeitos principais para  $F_p$ .

Fonte: elaborado pelo autor.

O fator que apresentou maior variação significativa na  $F_p$  pela Figura 4.28, ocorreu quando foi empregado o sistema ultrassônico (maior valor  $F$ , apresentado no apêndice B), a vibração ultrassônica reduziu as forças nessa direção. Esse resultado teve o mesmo comportamento na condição em verde, pois a direção da amplitude da ferramenta aplicada no sistema ultrassônico é na direção da  $a_p$ , o que modifica o corte e, conseqüentemente, o comportamento da força, sobretudo nessa direção. O aumento dos níveis dos fatores  $V_c$  e  $a_p$  provocam incremento na  $F_p$  com significância, devido a maior interação (atrito) da ferramenta com a peça durante a usinagem. A Figura 4.29 demonstra o IC de 95% da variação dos níveis do fator frequência para variável de resposta  $F_p$ .

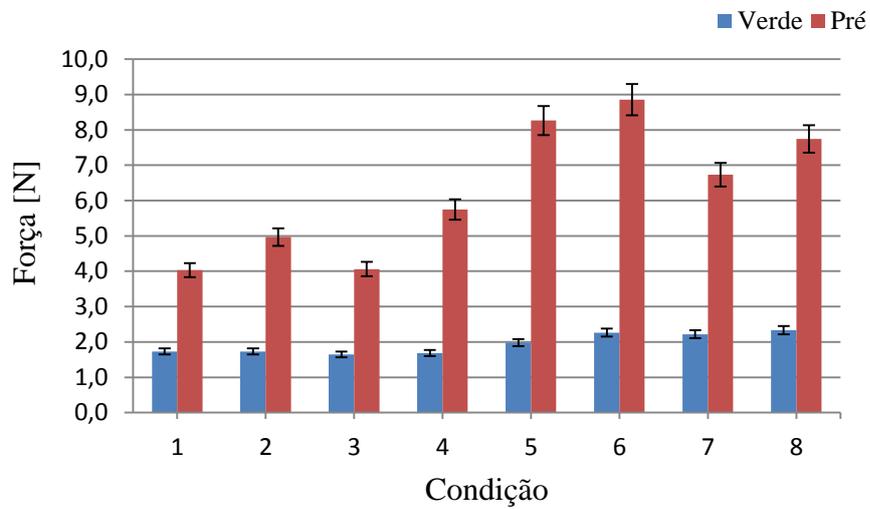
Figura 4.29 - IC da influência do fator frequência na resposta  $F_p$ .

Fonte: elaborado pelo autor.

Nesse ensaio com os compactos pré-sinterizados, as maiores forças mensuradas foram em torno de 6,6 N, quando utilizado  $a_p$  de 2,5 mm. O estágio de pré-sinterização propiciou a redução dos danos concentrados observados na condição em verde. Porém, em algumas condições pré-sinterizadas pelo método CT com velocidade de avanço de 7,5 mm/min, gerou-se danos críticos na peça, fato que não ocorreu quando utilizado o sistema ultrassônico. Provou-se então que o método UAT é benéfico não somente para reduzir danos críticos, como também, para melhorar o acabamento superficial.

Ao ser analisado os dois estados dos compactos, foi registrado que, na condição pré-sinterizada, as forças medidas foram superiores, as mesmas atingiram força máxima de usinagem de quase 9 N, já na condição em verde, a força máxima sequer chegou a 2,5 N. Isso se deve a maior resistência dos compactos que foram submetidos ao processo de pré-sinterização, o que resultou em maiores forças no processo de usinagem. A Figura 4.30 apresenta a comparação da força de usinagem ( $F_u$ ) em cada condição estabelecida no DOE fracionário (vide Tabela 3.4 na página 86) para os dois estados dos compactos.

Figura 4.30 - Comparação das forças de usinagem em cada condição.

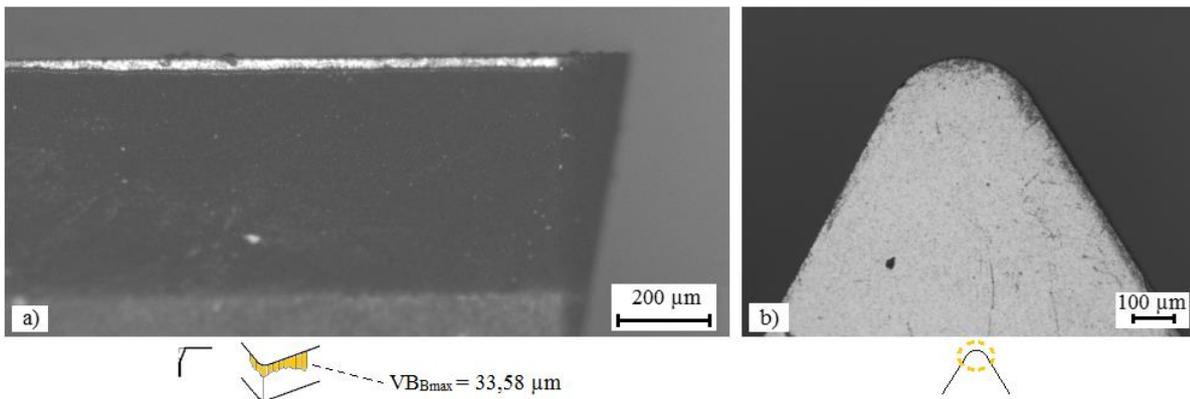


Fonte: elaborado pelo autor.

Ao final dos ensaios realizados nos DOE fracionários, a ferramenta de corte foi avaliada para verificar os tipos de desgaste em que a mesma foi sujeita. Os resultados demonstraram um desgaste de flanco extremamente baixo, logo, o mesmo não influenciou nos resultados. Fato observado e abordado após a Figura 4.16 da página 104. Portanto, a ferramenta de diamante se demonstrou eficiente no processo de torneamento ao propiciar elevada durabilidade.

O desgaste decorreu devido à abrasão, causada por constituintes duros e abrasivos no material da peça. A Figura 4.31 ilustra imagens obtidas por microscópio óptico, sendo nítida a marca de desgaste no flanco devido às oxidações geradas, como também, é observado que não houve alteração do gume da ferramenta.

Figura 4.31 - Ferramenta de corte após a usinagem dos experimentos fatoriais.



a) Vista da aresta principal de corte. b) Vista superior do raio de ponta da ferramenta.

Fonte: elaborado pelo autor.

#### 4.2 Análise dos resultados obtidos pelo DOE superfície de resposta

Após verificar os fatores ( $V_c$  e  $V_f$ ) de influência significativa no acabamento e rugosidade superficial no ensaio fatorial fracionário, foi elaborado o DOE superfície de resposta (experimento central composto) para a fase de otimização. Esse modelo de superfície de resposta foi utilizado para determinar os parâmetros de corte adequados, ou seja, menores valores de rugosidade, pois, a rugosidade é um indicativo para avaliar os danos gerados no acabamento pelo processo de usinagem. Vale ressaltar que nesta análise foi utilizada uma nova ferramenta de diamante policristalino (PCD).

Em relação aos parâmetros de corte, foi mantida fixa a profundidade de corte de 1,5 mm e sem emprego do atuador ultrassônico, sendo posteriormente realizada uma análise da condição ótima de parâmetros de corte com a aplicação do atuador ultrassônico e compará-la com o método convencional. Salienta-se que a visualização da superfície de resposta é possível ao se utilizar até dois fatores, o que se adapta ao experimento proposto. A Figura 4.32 apresenta o resumo do experimento.

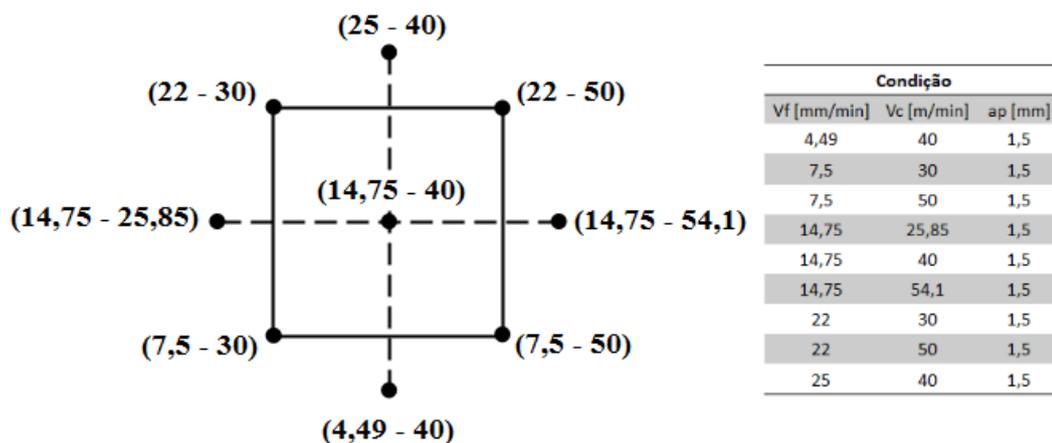
Figura 4.32 - Resumo do experimento central composto (CCD).

Resumo do experiento		Tipos de ponto			
Fatores:	2	Réplicas:	1	Pontos do cubo:	4
Ensaio base:	13	Total de ensaios:	13	Pontos centrais no cubo:	5
Blocos Base:	1	Total de blocos:	1	Pontos Axiais:	4
				Pontos centrais em axial:	0
$\alpha = 1,41421$					
Fatorial com dois níveis: Fatorial completo					

Fonte: elaborado pelo autor.

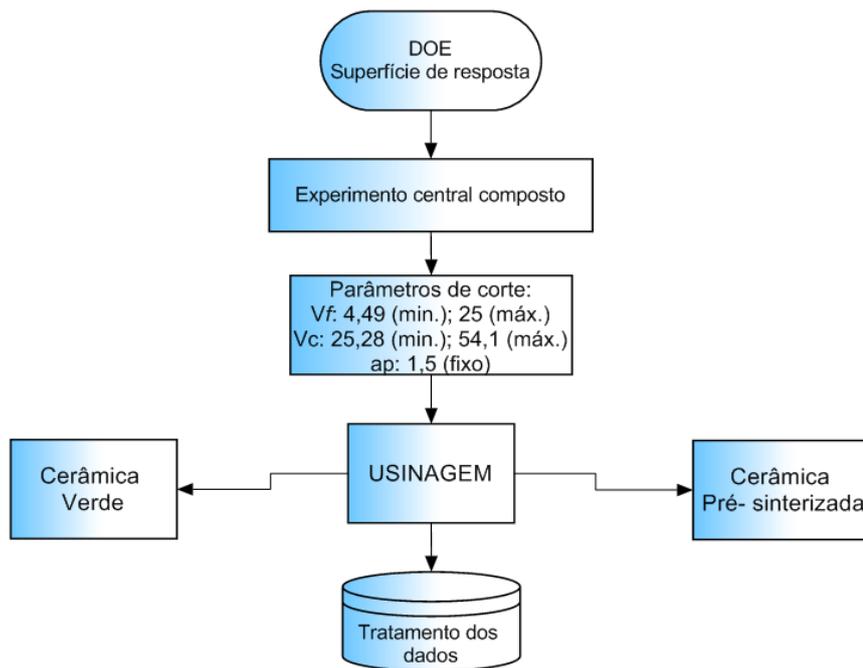
Os níveis dos fatores selecionados foram iguais para ambos os estados do compacto (verde e pré-sinterizado) devido à semelhança do acabamento e da rugosidade gerada no ensaio fracionário. Os valores utilizados de mínimos e máximos para  $V_f$  foram de 4,49 - 25 mm/min e para  $V_c$  de 25,28 - 54,10 m/min. O critério para selecionar esses valores foi baseado nos resultados obtidos no DOE fracionário. A Figura 4.33 ilustra o arranjo do experimento central composto com os parâmetros estabelecidos em cada condição. Já a Figura 4.34, ilustra o fluxograma de forma resumida do DOE superfície de resposta.

Figura 4.33 - Arranjo do experimento central composto com os parâmetros estabelecidos.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 4.34 - Fluxograma do DOE superfície de resposta.

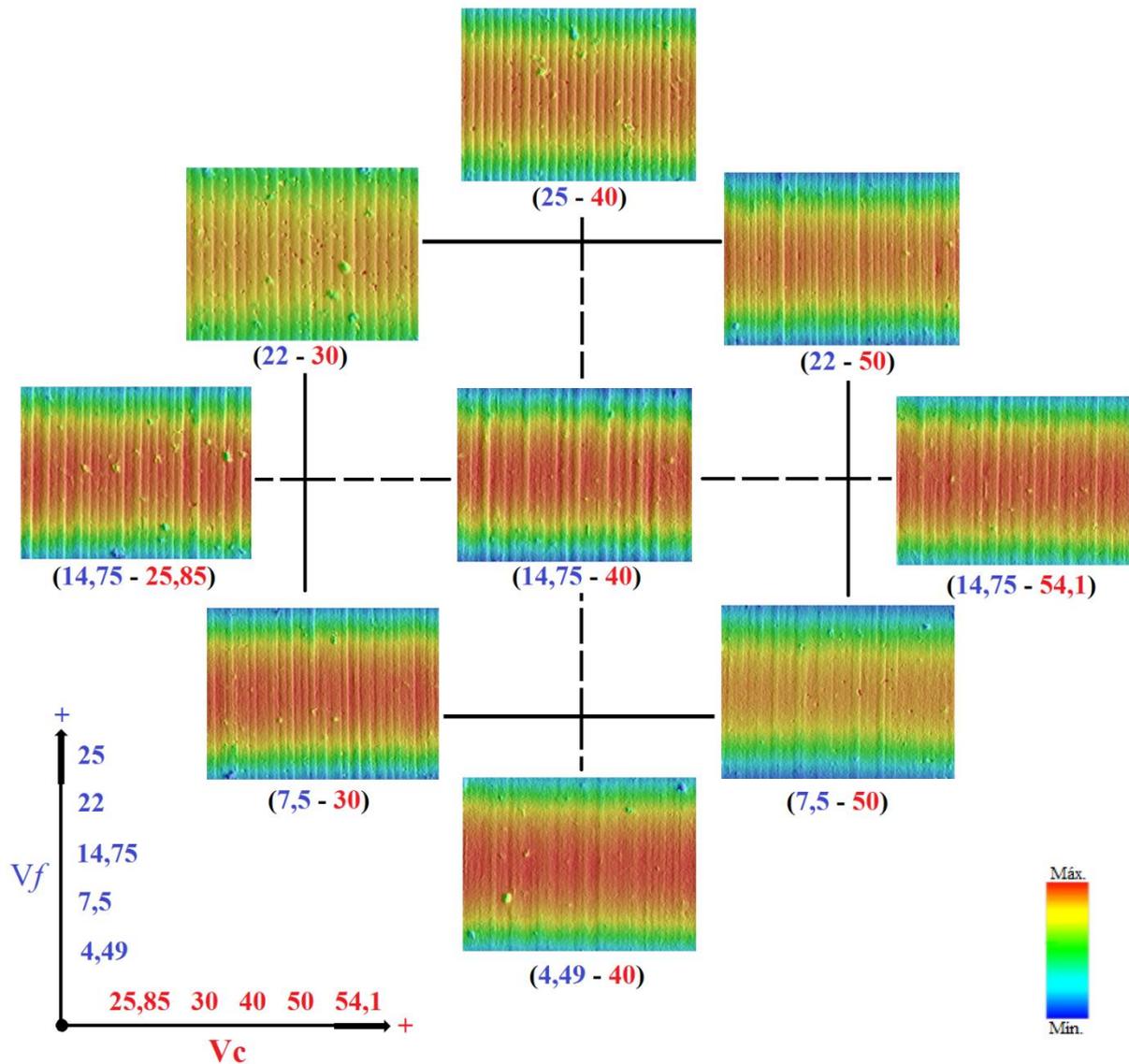


Fonte: elaborado pelo autor.

#### 4.2.1 Resultados para cerâmica em verde

Todos os compactos foram usinados sem apresentar quebras durante os ensaios. A Figura 4.35 ilustra as superfícies obtidas pelo microscópio confocal após o torneamento com os parâmetros estabelecidos no DOE superfície de resposta. Verifica-se acabamentos com a ocorrência de danos concentrados, principalmente, nas condições com baixa  $V_c$  e alta  $V_f$ , essas condições propiciam remoção mais severa de material, ao invés de fraturar e “cortar” o material, elas promovem arrancamentos de aglomerados.

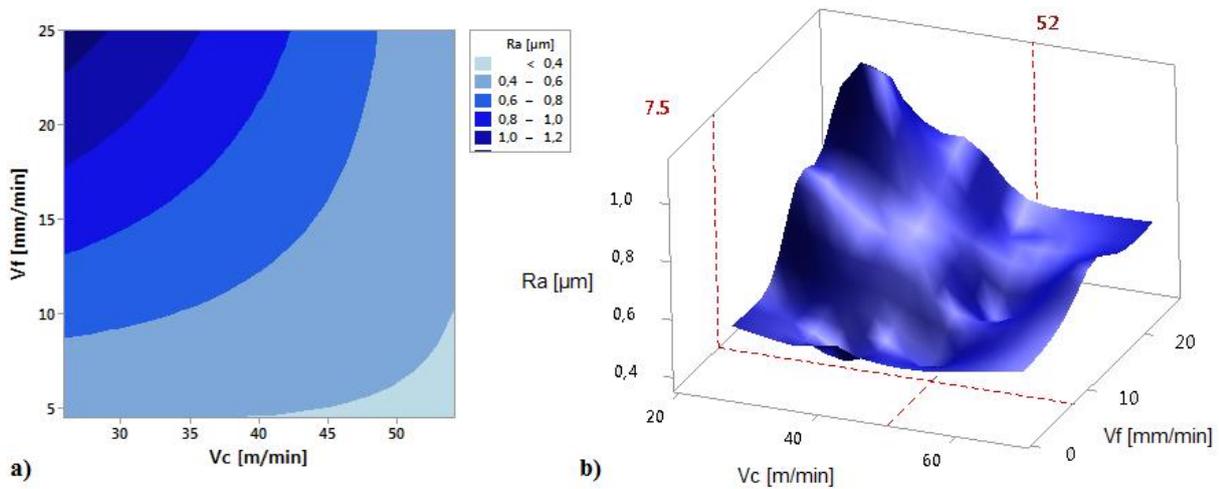
Figura 4.35 - Superfícies gerada após o torneamento no DOE superfície de resposta.



Fonte: elaborado pelo autor.

Para quantificar o acabamento superficial, a rugosidade ( $R_a$ ) foi medida, a Figura 4.36 apresenta a análise para a rugosidade em função da  $V_c$  e  $V_f$ . Constatou-se que as menores rugosidades foram obtidas ao utilizar maiores  $V_c$  e menores  $V_f$ , o que corrobora com os melhores acabamentos gerados.

Figura 4.36 - Análise da rugosidade para a cerâmica em verde.

a) Contorno de resposta para  $R_a$ . b) Superfície de resposta para  $R_a$ .

Fonte: elaborado pelo autor.

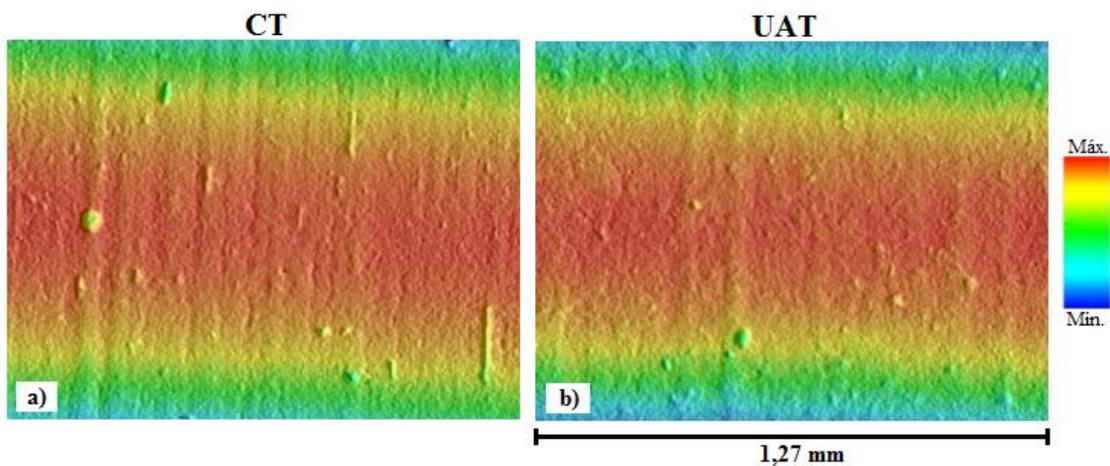
De acordo com a Figura 4.36 (a), verificou-se que, a região para obter as menores rugosidades a  $V_c$  mínima seria de 45 m/min com  $V_f$  menor que 5 mm/min. No entanto, avanços extremamente baixos, acarretam em um fluxo elevado de material que é removido na superfície de saída da ferramenta, na qual esse material pode se aderir com maior facilidade na ferramenta. Foi verificado na condição com  $V_f = 4,49$  mm/min da figura 4.35 alguns danos concentrados, que possivelmente foram gerados pela baixa  $V_f$  utilizada, condição que facilita a aderência de material na ferramenta, logo, pode ocasionar remoção de aglomerados que aderiram à ferramenta.

Assim, as condições adequadas de parâmetros de corte para obter baixa rugosidade seriam quando utilizada  $V_c$  maior que 50 m/min, o que possibilitaria  $V_f$  maior que 5 mm/min, porém, a mesma deve ser limitada até 9 mm/min, para permanecer na região determinada no DOE.

Já a Figura 4.36 (b) apresenta a superfície de resposta para  $R_a$  que é gerada em função da combinação da  $V_c$  e  $V_f$  empregadas nos ensaios, sendo exibida a condição de parâmetros de corte para redução da rugosidade, o que neste trabalho pode ser considerado uma condição otimizada para o processo. Pela superfície de resposta, a condição adequada de corte para obter os menores valores de  $R_a$  é obtida quando empregado os parâmetros de:  $V_c = 52$  m/min e  $V_f = 7,5$  mm/min.

Para avaliar a condição adequada estabelecida pelo DOE, foram realizados ensaios com a condição ideal de corte, com objetivo de visualizar o acabamento e a influência do sistema ultrassônico. A Figura 4.37 apresenta os acabamentos gerados nessas condições, como também, a rugosidade medida. Pode ser observado que ambas as condições apresentaram  $R_a < 0,4 \mu\text{m}$ , e que o sistema ultrassônico propiciou leve redução dos arrancamentos de aglomerados e de danos advindos da aderência momentânea de material removido aderido à ferramenta de corte.

Figura 4.37 - Acabamentos obtidos com parâmetros de corte estabelecido pelo DOE.



Condição	Fatores				
	Freq. [kHz]	Vf [mm/min]	Vc [m/min]	ap [mm]	Ra (D.P.A) [ $\mu\text{m}$ ]
a)	0	7,5	52	1,5	0,390 (0,12)
b)	28	7,5	52	1,5	0,366 (0,06)

Fonte: elaborado pelo autor.

Além das condições otimizadas de usinagem que visam reduzir a rugosidade e os danos no acabamento superficial, outro fator que deve ser levado em consideração é a pressão de compactação utilizada. É possível fazer essa afirmação devido ao trabalho realizado por Bukvic (2015). O autor realizou uma comparação da rugosidade obtida em função da pressão de compactação e, verificou-se que, a pressão de 200 MPa propiciou uma redução significativa da rugosidade após o processo de usinagem em relação a pressão de 100 MPa.

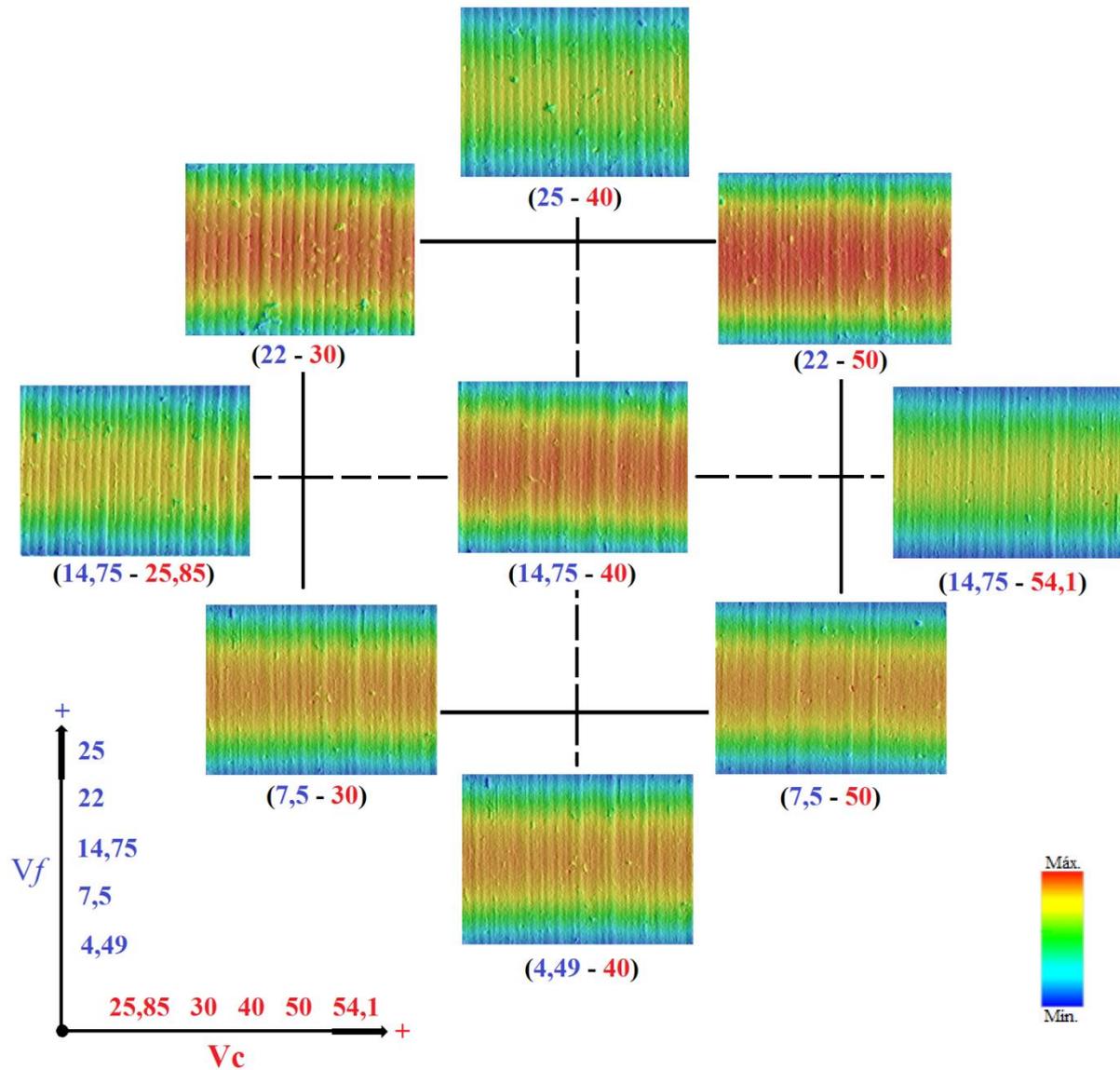
Portanto, o aumento da pressão de compactação leva a uma maior resistência mecânica da peça em verde (há aumento da coesão entre as partículas de alumina com o ligante), o que reduz consideravelmente a chance de gerar danos severos e lascamentos de

borda. Além de apresentar uma distribuição homogênea dos gradientes de densidade que melhoram o controle da retração após a sinterização.

#### 4.2.2 Resultados para cerâmica pré-sinterizada

Todos os compactos foram usinados sem apresentar avarias durante os ensaios. A Figura 4.38 ilustra as superfícies após o torneamento com os parâmetros estabelecidos no DOE superfície de resposta. Os acabamentos com a ocorrência de danos concentrados são verificados nas condições com baixa  $V_c$  e alta  $V_f$ , conforme verificado nos compactos em verde. Também foi possível analisar, de modo geral, que a condição pré-sinterizada apresentou menores danos concentrados, em relação ao estado verde, devido ao aumento da resistência mecânica gerada pelo processo de pré-sinterização.

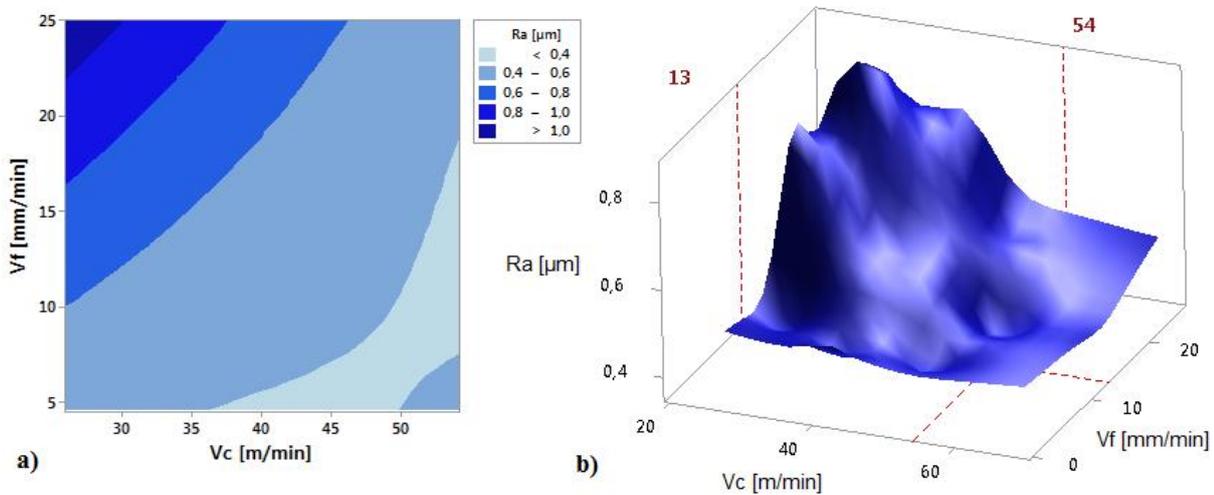
Figura 4.38 - Superfícies geradas após o torneamento no DOE superfície de resposta.



Fonte: elaborado pelo autor.

Para avaliar a rugosidade em função da  $V_f$  e  $V_c$  nas condições executadas, a Figura 4.39 exibe o contorno de resposta e a superfície de resposta para  $R_a$ . Pode-se verificar que, a região que apresentou maior  $R_a$  foi gerada pela combinação de alta  $V_f$  e baixa  $V_c$ , fato que corresponde com os parâmetros que geraram maiores danos no acabamento, o mesmo é observado principalmente na condição com  $V_f = 22$  mm/min e  $V_c = 30$  m/min.

Figura 4.39 - Análise da rugosidade para a cerâmica pré-sinterizada.

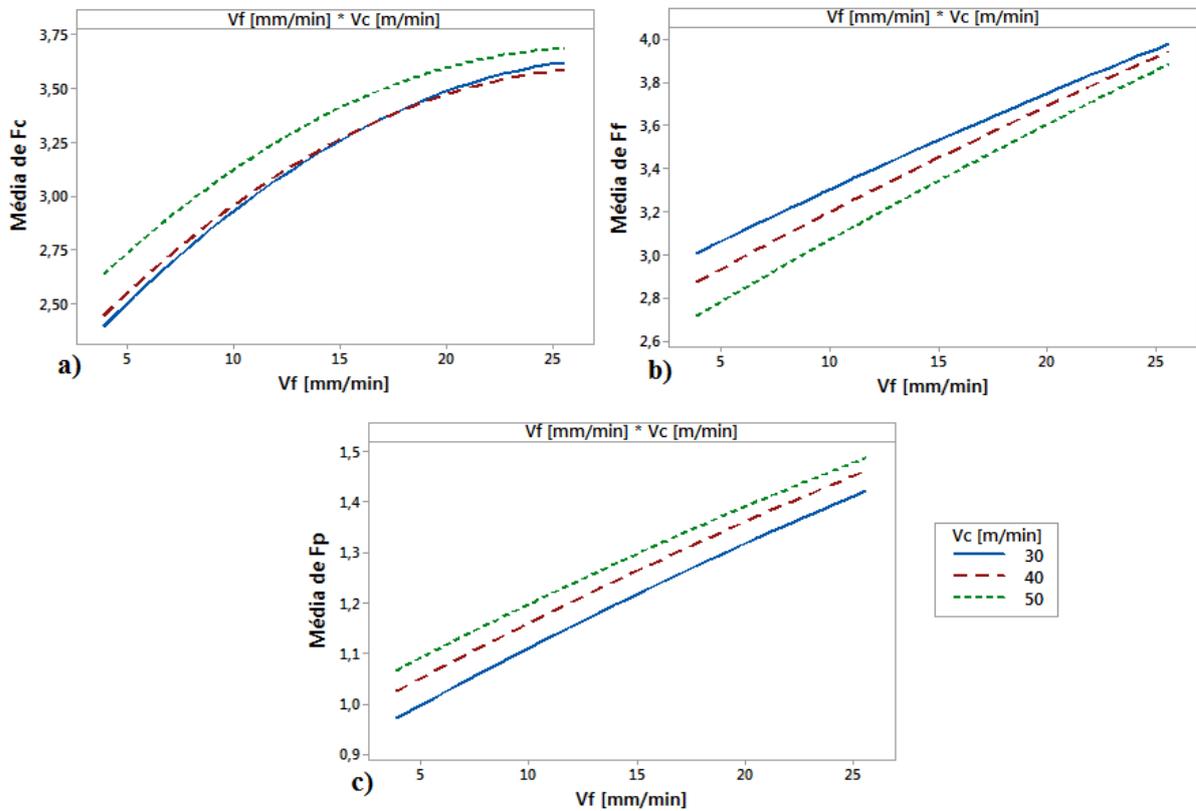
Contorno de resposta para  $R_a$ . b) Superfície de resposta para  $R_a$ .

Fonte: elaborado pelo autor.

Observou-se na Figura 4.39 (a) que conforme o aumento da  $V_c$  é possível aumentar a  $V_f$  gradualmente, assim, é possível manter a menor rugosidade possível. A região para obter os menores valores de  $R_a$  é maior do que a região apresentada no contorno de resposta para a condição em verde (Figura 4.36), principalmente em relação à  $V_f$ . Portanto, há uma faixa mais ampla de parâmetros de corte aplicáveis para obter condições otimizadas de acabamento.

Já a Figura 4.39 (b) apresenta a superfície de  $R_a$  gerada em função da combinação da  $V_c$  e  $V_f$  empregadas nos ensaios, na qual é demonstrada a condição de parâmetros de corte necessária para minimizar a rugosidade. Logo, essa condição para obter os menores valores de  $R_a$  é quando se emprega os parâmetros de:  $V_c = 54$  m/min e  $V_f = 13$  mm/min. A análise da rugosidade é importante, pois é um indicativo para avaliar os danos gerados pelo processo de usinagem, visto que os dados apresentados na análise de  $R_a$  corroboram com as superfícies apresentadas na Figura 4.38.

Durante o ensaio dos compactos pré-sinterizados, as forças foram mensuradas para verificar a influência nos níveis dos fatores  $V_f$  e  $V_c$  no comportamento das forças geradas. A Figura 4.40 apresenta a interação para as forças de usinagem ( $F_c - F_f - F_p$ ) e demonstra as forças médias em função da variação de  $V_f$  e  $V_c$ . Essa análise não foi executada na condição em verde, pois a variação nas forças em função dos parâmetros de corte estabelecidos foi baixa.

Figura 4.40 - Interação para as forças ( $F_c$  -  $F_f$  -  $F_p$ ) em função da  $V_f$  e  $V_c$ .

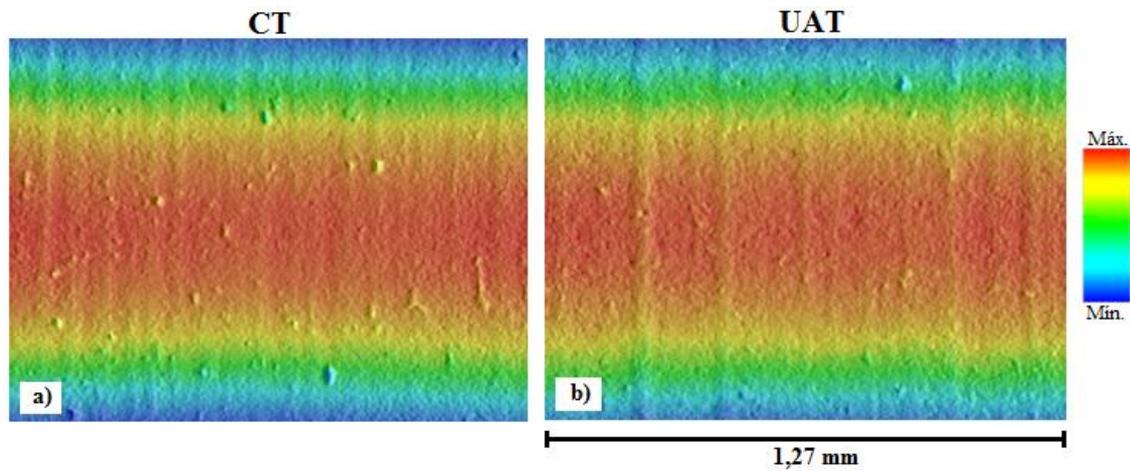
a) Força de corte. b) Força de avanço. c) Força de profundidade.

Fonte: elaborado pelo autor.

Na Figura 4.40, observa-se que a  $V_c$  apresentou uma baixa variação entre os níveis analisados. Já a  $V_f$  é responsável pelos maiores incrementos nas forças medidas, conforme o aumento da  $V_f$  há um acréscimo na força. Vale salientar que a  $F_f$  apresentou as maiores forças mensuradas, seguida pela  $V_c$  e  $F_p$  respectivamente, corroborando com os dados apresentados no DOE fatorial fracionário.

Foram realizados testes com as condições de parâmetros de corte indicadas no DOE superfície de resposta, com objetivo de avaliar o acabamento superficial e a rugosidade para comparar os métodos CT e UAT. A Figura 4.41 apresenta os acabamentos gerados e suas respectivas rugosidades. Observa-se que as rugosidades obtidas foram próximas e o método UAT proporcionou leve melhora no acabamento superficial gerado.

Figura 4.41 - Acabamentos obtidos com parâmetros de corte estabelecido pelo DOE.

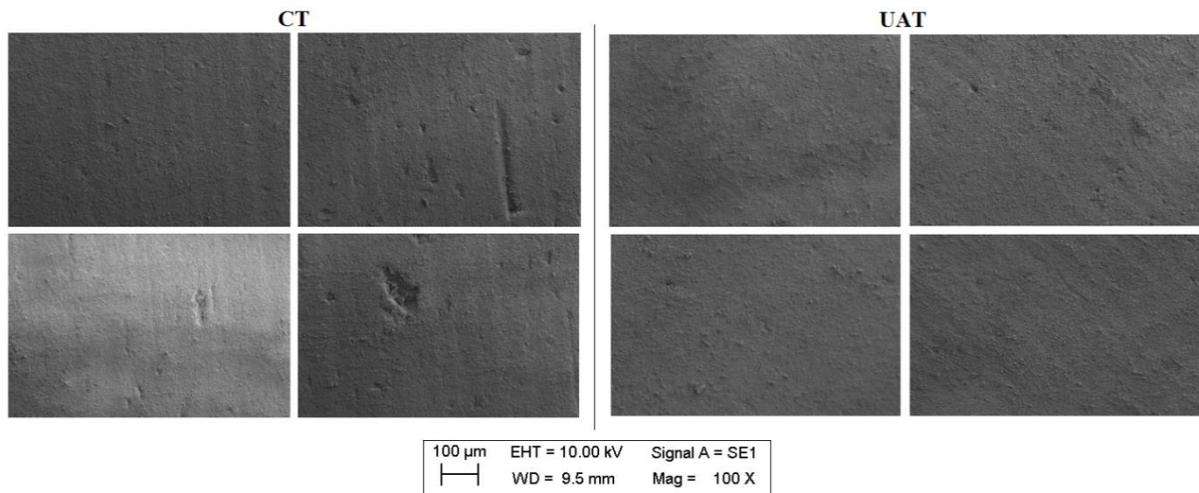


Condição	Fatores				
	Freq. [kHz]	Vf [mm/min]	Vc [m/min]	ap [mm]	Ra (D.P.A) [ $\mu$ m]
a)	0	13	54	1,5	0,364 (0,11)
b)	28	13	54	1,5	0,344 (0,07)

Fonte: elaborado pelo autor.

Para visualizar melhor os acabamentos superficiais e os danos gerados com os parâmetros de corte estabelecidos pelo DOE, a Figura 4.42 exibe as superfícies após o processo de usinagem pelos métodos CT e UAT, obtidas por MEV. Destaca-se que há um acabamento superficial mais uniforme pelo método UAT. Portanto, o sistema ultrassônico promove melhores acabamentos superficiais, além de reduzir o aparecimento de danos concentrados e/ou críticos.

Figura 4.42 - MEV do acabamento superficial gerado pelos métodos CT e UAT.



Fonte: elaborado pelo autor.

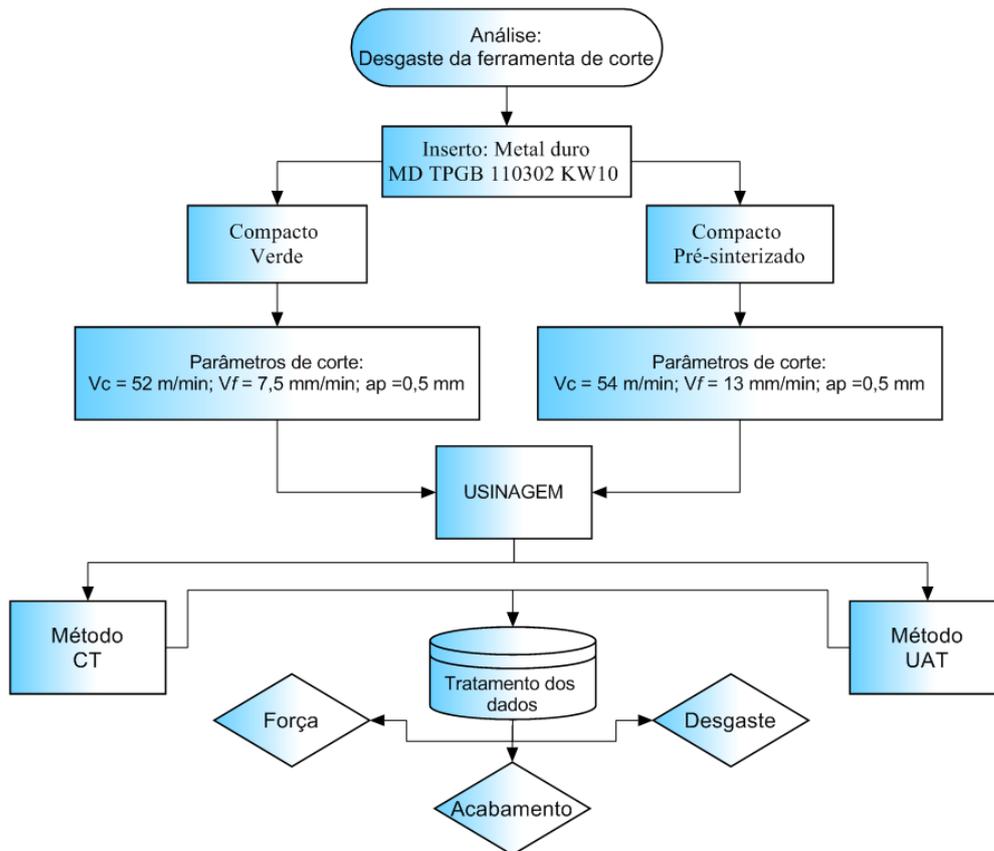
Ao tratar-se da ferramenta de corte empregada no DOE superfície de resposta (cerâmica em verde e pré-sinterizada), foi apresentado um desgaste de flanco máximo de 24,97  $\mu\text{m}$ , sendo extremamente baixo, conforme foi observado na análise do DOE fatorial fracionário (vide Figura 4.31 da página 118). Portanto, o desgaste da ferramenta de corte não interferiu na análise dos resultados.

### 4.3 Desgaste da ferramenta de corte

Para avaliar a resposta do sistema ultrassônico em relação à vida da ferramenta de corte, foram realizados testes com os parâmetros de corte determinados no DOE superfície de resposta para cada estado do compacto (em verde e pré-sinterizado). Desse modo, foram executados 4 ensaios distintos (cada estado do compacto pelos métodos CT e UAT).

A  $a_p$  empregada foi de 0,5 mm, sendo suficientes para a análise, pois, conforme a ISO 3685,  $a_p$  inferiores ao raio de ponta restringem o desgaste à ponta, sem alcançar o flanco da ferramenta. Vale ressaltar que o percurso de usinagem foi de 15 mm, e os parâmetros ultrassônicos utilizados foram:  $a = 1,15 \mu\text{m}$  e frequência = 28 kHz. Na Figura 4.43 é ilustrado o fluxograma resumido do processo.

Figura 4.43 - Fluxograma da análise do desgaste da ferramenta de corte.

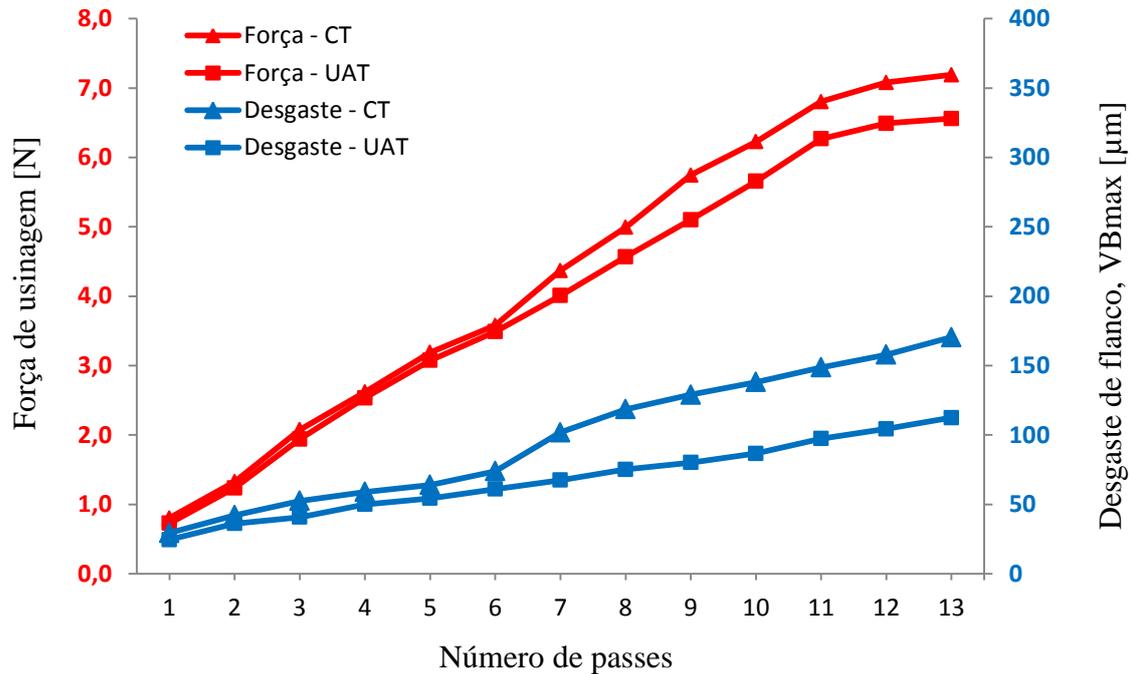


Fonte: elaborado pelo autor.

#### 4.3.1 Resultados para cerâmica em verde

A primeira análise realizada foi com relação ao compacto em verde, foram executados 13 passes com a mesma aresta de corte para ambos os métodos (CT e UAT), pois a aresta já apresentava um desgaste considerável, sendo assim, suficientes para a análise. A Figura 4.44 apresenta as força de usinagem média ( $F_u$ ) e o desgaste de flanco máximo, medidos em função de cada passe executado. Optou-se por utilizar  $F_u$  para facilitar a comparação entre os métodos, visto que já foi realizada uma análise das componentes da  $F_u$  nos experimentos fatoriais fracionários.

Figura 4.44 - Força de usinagem e desgaste da ferramenta em função dos passes.



Fonte: elaborado pelo autor.

Ao observar a Figura 4.44, é verificado que a utilização do sistema ultrassônico no processo apresentou resultados interessantes, já que o mesmo reduziu o desgaste de flanco gerado e, conseqüentemente, a força de usinagem. O desgaste de flanco máximo no método UAT foi de 112  $\mu\text{m}$ , já no método CT foi 170  $\mu\text{m}$ , se comparado em porcentagem, há uma redução de 34 % do desgaste. Em relação às forças geradas, os métodos CT e UAT apresentaram 7,19 e 6,56 N respectivamente.

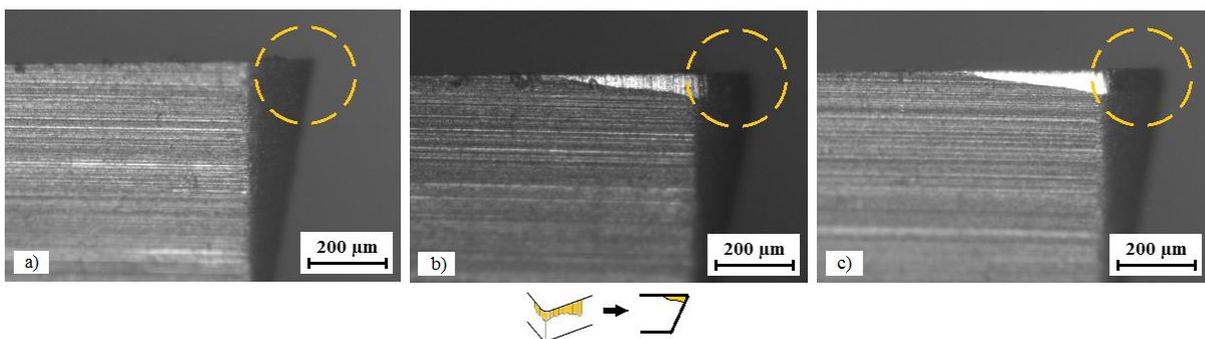
Esses resultados corroboram que o desgaste da ferramenta não afetou os resultados anteriores (fatorial fracionário e superfície de resposta), uma vez que, em todos os ensaios, o desgaste de flanco máximo não chegou a 35  $\mu\text{m}$  na ferramenta de diamante utilizada para cada experimento. Pois na análise de desgaste, logo no primeiro passe quando empregada a ferramenta de metal duro, exibiu-se um desgaste de flanco de 32,59  $\mu\text{m}$  pelo método CT.

Ainda na Figura 4.44, os desgastes e as forças apresentaram comportamentos semelhantes e valores próximos até o 6º passe, já no passe 7º, o método CT apresentou um acréscimo acentuado na taxa de desgaste e, conseqüentemente, na força de usinagem. Após essa diferença significativa, os valores obtidos no decorrer dos passes tiveram aumento gradual constante e apresentaram uma diferença uniforme (padrão) entre os métodos.

Esse comportamento ocorreu em função da perda considerável do raio de ponta da ferramenta, de forma contínua, devido ao desgaste de flanco, o que ocasionou a destruição da aresta de corte e aumentou o contato entre a peça-ferramenta de modo elevado no método CT, suscitando incrementos a partir do 7º passe. No método UAT houve minimização da destruição da aresta de corte devido à alteração do corte imposta, além de dissipar de forma mais rápida o material removido, o que reduz a capacidade abrasiva do cavaco formado.

A Figura 4.45 apresenta a ferramenta de corte após o 7º passe de ambos os métodos, como também, traz a ferramenta sem uso para comparação. É possível comparar a modificação da ponta devido à alteração da aresta de corte gerada pelo desgaste de flanco devido à abrasão, sendo mais elevada no método CT.

Figura 4.45 - Ferramenta de corte após o 7º passe.

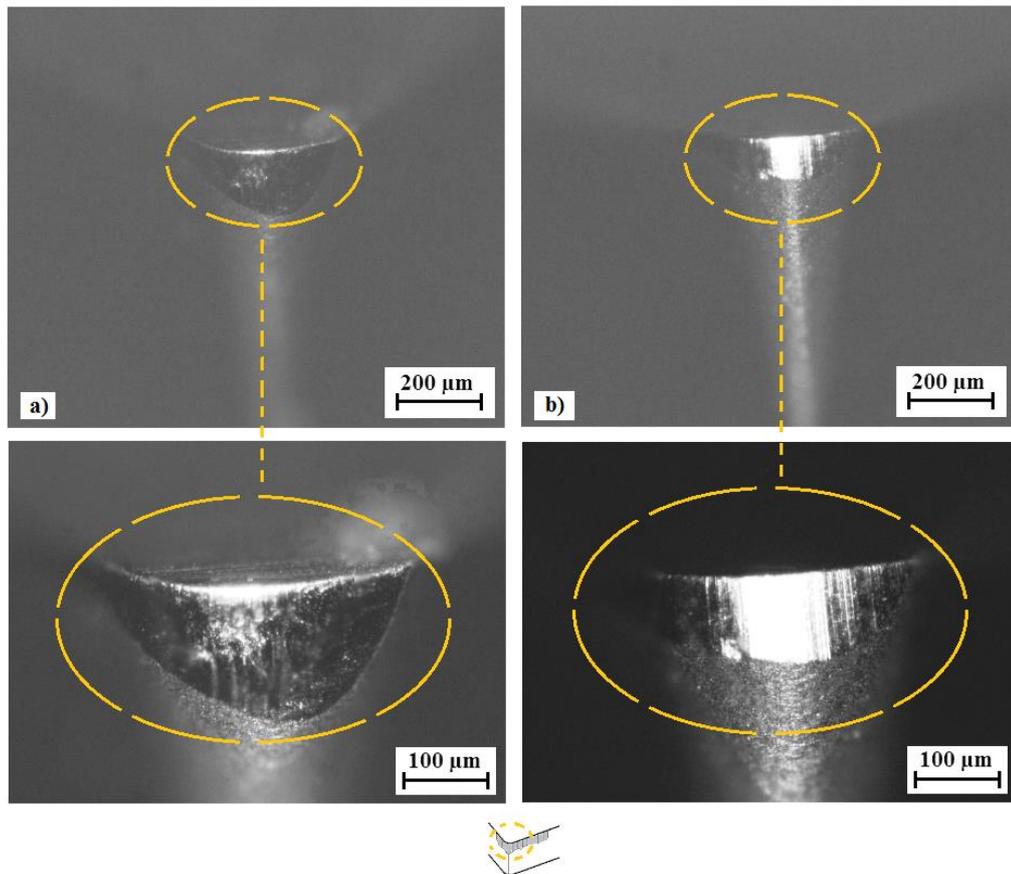


a) Ferramenta sem uso. b) Método CT. c) Método UAT.

Fonte: elaborado pelo autor.

Para visualizar o desgaste máximo de flanco da ferramenta, a Figura 4.46 apresenta a ferramenta de corte após todos os passes executados pelos métodos CT e UAT, é visível a diferença do desgaste entre os métodos. Foi verificado que o desgaste máximo ocorreu na região do centro da ponta da ferramenta, local em que a abrasividade foi superior. No **Apêndice C** são apresentados os desgastes em cada passe. Ressalta-se que, na análise de desgaste, as ferramentas avaliadas não geraram desgaste de flanco na aresta secundária de corte.

Figura 4.46 - Desgaste da ferramenta após todos os passes executados.

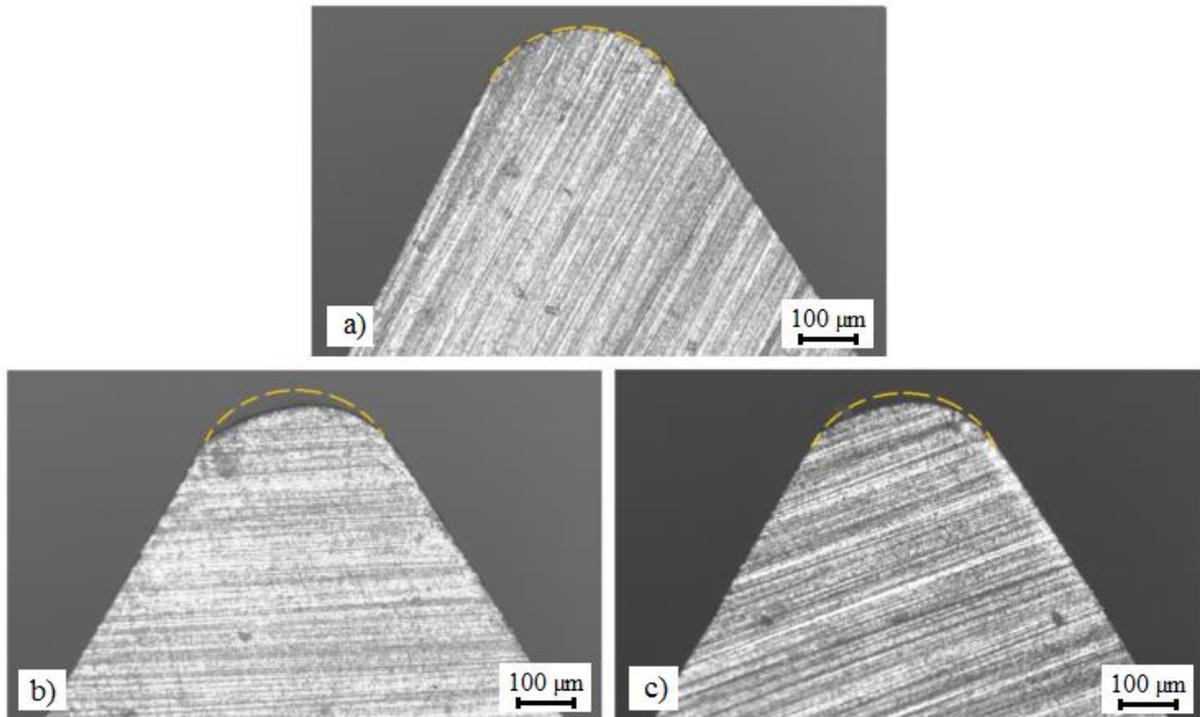


Desgaste máximo de flanco da ferramenta: a) Método CT. b) Método UAT.

Fonte: elaborado pelo autor.

Para verificar a alteração na ponta da ferramenta ao final dos passes, a Figura 4.47 exibe, por outra vista, as ferramentas utilizadas. Nela, é visível a maior perda da ponta da ferramenta pelo método CT, ratificando que a vibração ultrassônica reduziu o intenso contato entre peça e a ferramenta, como também, propiciou a remoção mais rápida do material removido na interface cavaco-ferramenta, o que reduz a adesão do material na ferramenta. Segundo Herlinger et al. (2006), o acúmulo de pó cerâmico exacerba o desgaste da ferramenta e aumenta a pressão da mesma durante o corte.

Figura 4.47 - Detalhe da geometria da ponta da ferramenta após os passes executados.

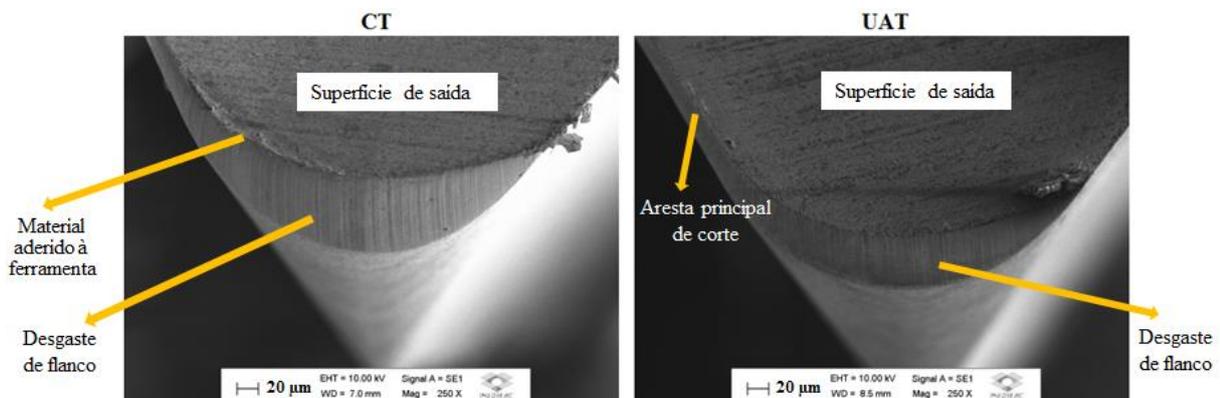


a) Ferramenta sem uso. b) Método CT. c) Método UAT.

Fonte: elaborado pelo autor.

Foram utilizadas técnicas de MEV e EDS para avaliar a ferramenta de corte. A Figura 4.48 demonstra as imagens produzidas pelo MEV da ferramenta de corte empregada em cada método.

Figura 4.48 - MEV da ponta da ferramenta após os passes executados.



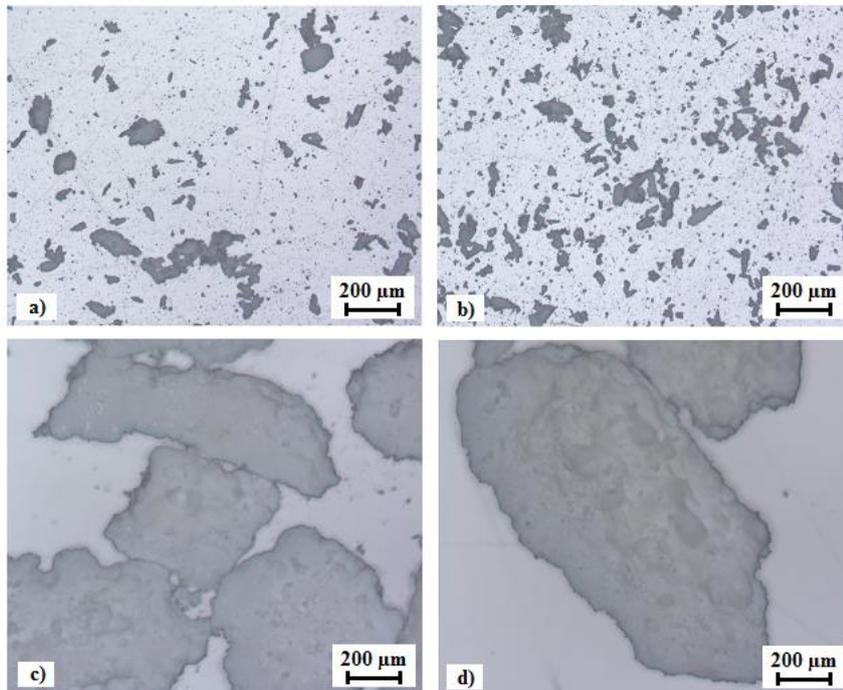
Fonte: elaborado pelo autor.

Observa-se na Figura 4.48 que as ferramentas desgastadas denotam a presença de um mecanismo abrasivo, uma vez que apenas arranhões paralelos perpendiculares à aresta de corte principal, produzidos pelas partículas de cerâmica da peça, são vistos. Como também, verificou-se adesão de material à ferramenta em ambos os métodos, que pela análise do EDS, foi possível identificar alumínio (Al) e oxigênio (O) que são os componentes químicos da alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Porém, no método CT foi encontrado maior quantidade de adesão de material, principalmente dos elementos químicos citados. Comprova-se então que o método UAT reduziu a adesão de material na ferramenta.

O cavaco foi analisado no processo para correlacionar com os dados (vide Figura 4.49 da página 136), observou-se que, a partir do 9º passe no método CT, houve aparecimento de porções de aglomerados com dimensões maiores (comprimentos maiores que até 1,2 mm), fato devido à perda considerável da aresta de corte e, em consequência, a alteração total do raio de ponta da ferramenta. Desse modo, foi gerado maior contato e pressão na interface peça-ferramenta, o que facilita a remoção de aglomerados maiores, pois o compacto nesse estágio está somente coeso pelos aditivos empregados na prensagem, resultando em danos no acabamento superficial e na borda do compacto. Esse acontecimento foi observado somente a partir do 12º passe no método UAT, devido ao menor desgaste imposto.

Conclui-se então que o cavaco pode ser utilizado para auxiliar no controle do processo de usinagem de cerâmica em verde. Pois quando a ferramenta de corte começa apresentar um desgaste considerável, há um aumento gradual dos materiais removidos, além de alterar os comprimentos médios de 0,1 mm para 0,8 mm, também apresentam alguns fragmentos com comprimentos superiores a 1 mm.

Figura 4.49 - Material removido em função do desgaste da ferramenta.

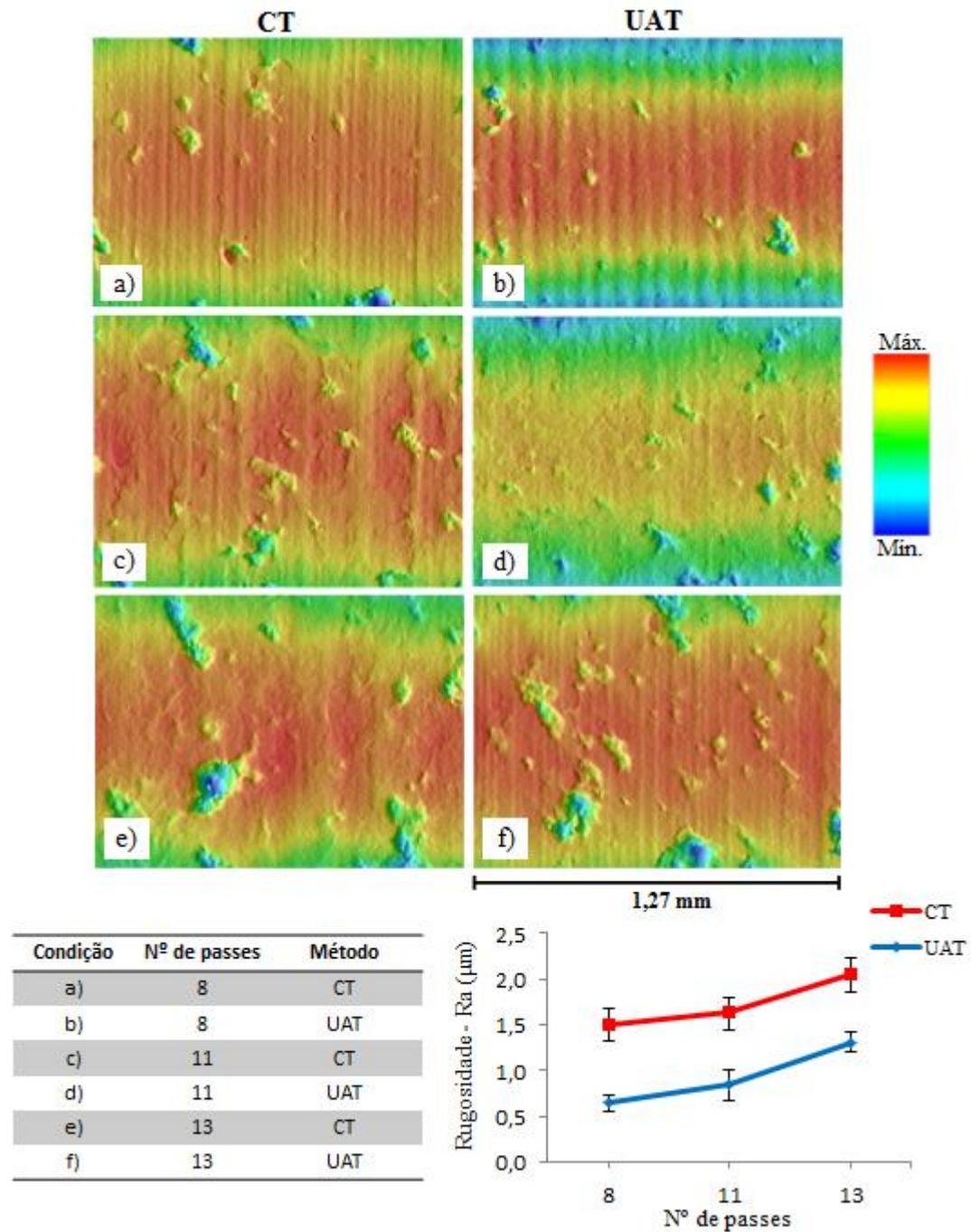


Cavaco gerado em função: a) Ferramenta sem desgaste (CT). b) Ferramenta sem desgaste (UAT).  
c) Ferramenta com desgaste, 9º passes (CT). d) Ferramenta com desgaste, 13º passe (CT).

Fonte: elaborado pelo autor.

Em relação ao acabamento superficial, o desgaste da ferramenta promoveu danos críticos, pois a rugosidade gerada com a ferramenta sem desgaste é  $< 0,4 \mu\text{m}$  (verificado do DOE superfície de resposta), já com o desgaste apresentado no 13º passe, propiciou-se rugosidades médias no método CT e UAT de  $2,049 \mu\text{m}$  e  $1,313 \mu\text{m}$  respectivamente. Assim, a redução do desgaste pelo método UAT acarretou uma redução da  $R_a$  em relação ao CT. A Figura 4.50 apresenta o acabamento superficial e a rugosidade gerada em função do desgaste da ferramenta de corte.

Figura 4.50 - Acabamento e rugosidade gerada em função do desgaste da ferramenta.



Fonte: elaborado pelo autor.

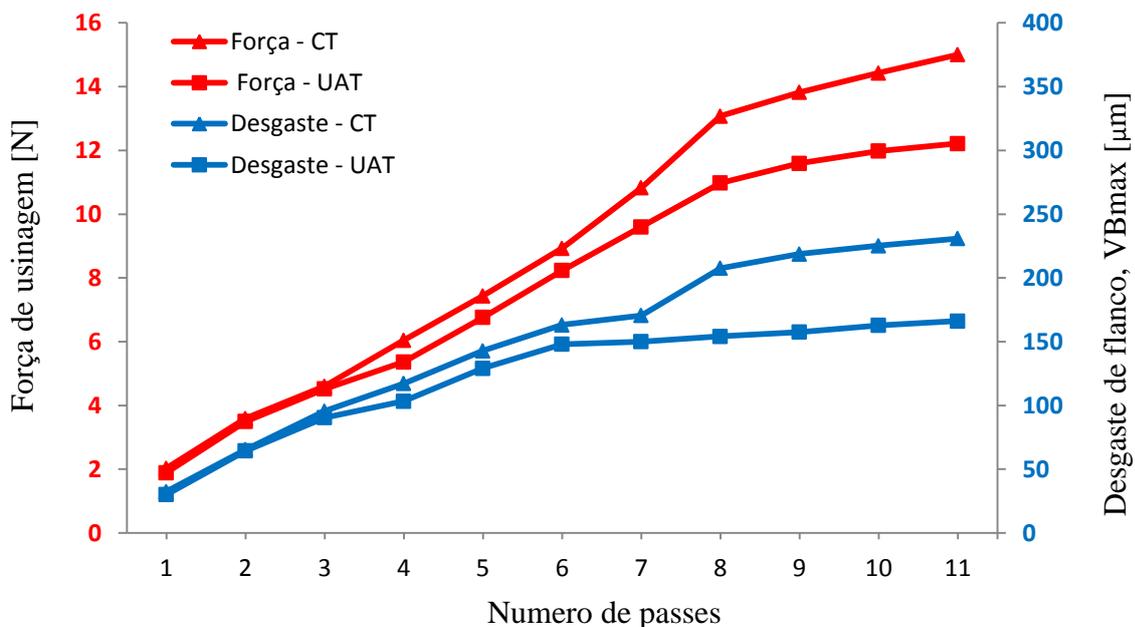
Pode-se observar nas imagens das superfícies apresentadas na Figura 4.50 que as condições (a - b) tiveram acabamentos semelhantes, porém, a  $R_a$  no método CT foi maior. Conforme passes foram executados, os danos gerados por arrancamento de aglomerados tornaram-se maiores e mais frequentes, pois com o aumento progressivo do desgaste, o contato entre peça-ferramenta é ampliado, além de aumentar a pressão no corte.

Nas imagens da Figura 4.50 (e) e (f) pode-se observar maiores danos nas superfícies, principalmente pelo método CT, que apresenta uma superfície irregular com  $R_a$  de 2,049  $\mu\text{m}$ , de modo que não é possível verificar as marcas (sulcos) geradas durante o torneamento, devido ao desgaste elevado da aresta de corte.

#### 4.3.2 Resultados para cerâmica pré-sinterizada

Para a análise de desgaste foram realizados 11 passes para cada método. Essa condição foi imposta devido ao desgaste de flanco apresentar baixa variação nos últimos passes em ambos os métodos (CT e UAT), além de que o acabamento superficial apresentou danos críticos no método CT. A Figura 4.51 apresenta a força média de usinagem e o desgaste de flanco máximo medido em função de cada passe executado. Observa-se a diminuição do desgaste gerado e, conseqüentemente, a redução da força de usinagem quando empregado o sistema ultrassônico.

Figura 4.51 - Força de usinagem e desgaste da ferramenta em função dos passes.



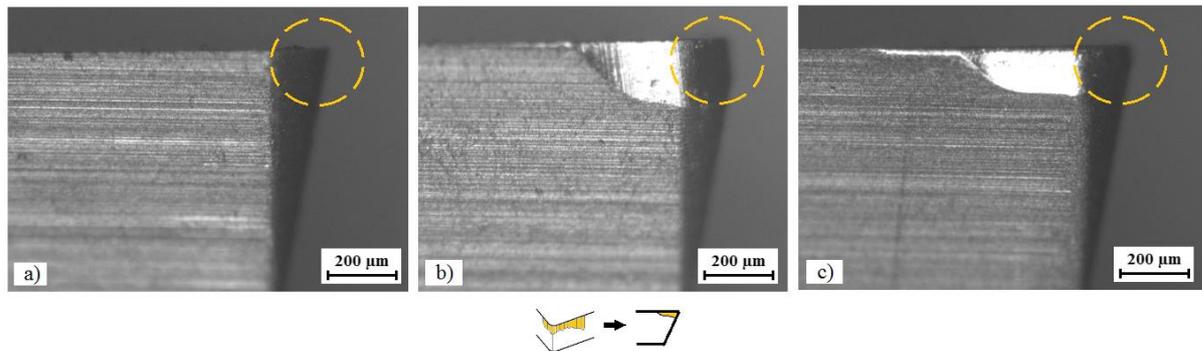
Fonte: elaborado pelo autor.

Com relação às forças de usinagem no método CT, foi atingido um valor máximo de 15 N, e no método UAT o máximo foi de 12,2 N. Desse modo, a diferença do desgaste acarretado entre os métodos não provocou uma diferença significativa nas forças exercidas. Se forem relacionadas as forças de usinagem impostas no estado verde (atingiram um valor máximo de 7,2 N), a condição pré-sinterizada obteve mais que o dobro da força, fato relacionado ao maior desgaste gerado na ferramenta devido a maior resistência do material.

Os desgastes e as forças apresentaram comportamentos semelhantes e valores próximos até o 7º passe, já no 8º passe do método CT, houve um acréscimo acentuado na taxa de desgaste, e, em decorrência, na força de usinagem. Este fato ocorreu no estado verde e, provavelmente, pelos mesmos motivos já discutidos.

Após o 8º passe, o método CT gerou um acréscimo de desgaste com baixa variação até o último passe, já a força, teve um aumento gradual considerável. No método UAT, a força de usinagem apresentou um comportamento semelhante ao CT, porém, em relação ao desgaste, a partir do 6º passe houve um aumento gradual baixo até o último passe executado. A ferramenta de corte após o 8º passe de ambos os métodos é apresentada na Figura 4.52.

Figura 4.52 - Ferramenta de corte após o 8º passe.



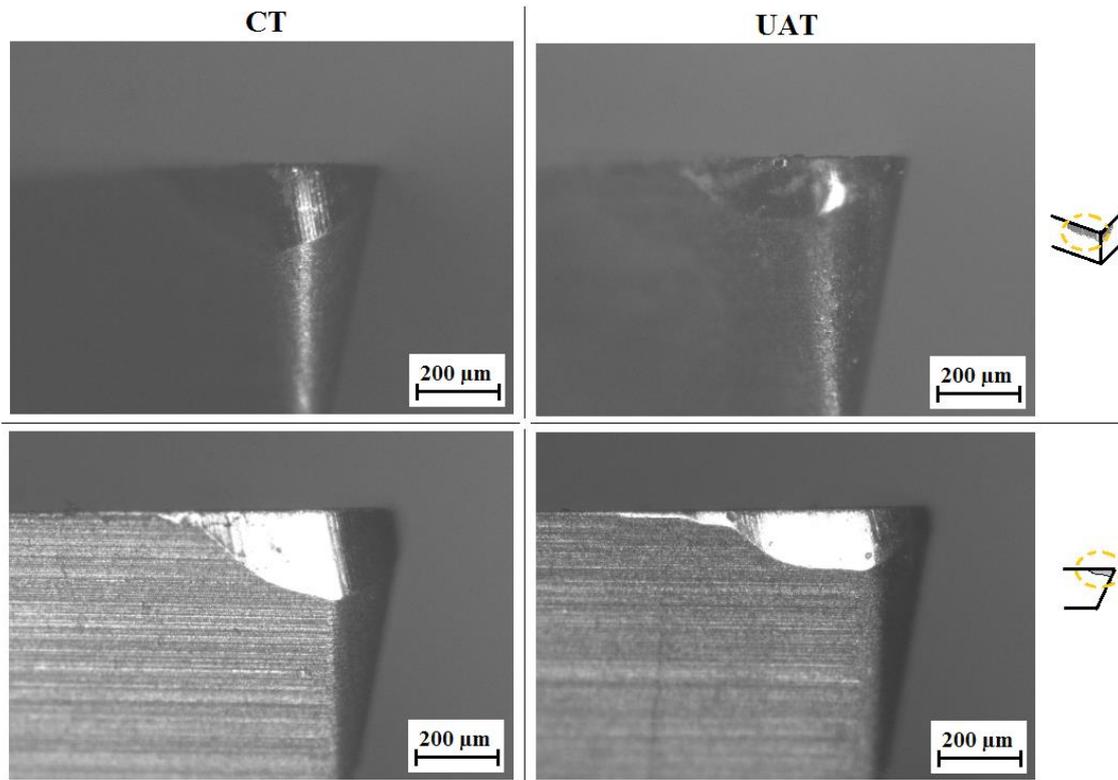
a) Ferramenta sem uso. b) Método CT. c) Método UAT.

Fonte: elaborado pelo autor.

Os desgastes de flanco máximo gerados nos métodos CT e UAT foram, respectivamente, de 231 µm e 166 µm, ou seja, uma redução de 28,1% do desgaste com a utilização do sistema ultrassônico. A Figura 4.53 exibe o desgaste de flanco máximo da ferramenta de corte após todos os passes executados pelos métodos CT e UAT. Foi observado que o desgaste de flanco máximo se concentrou na aresta de corte, e não na região do centro

da ponta da ferramenta, como foi verificado no estado verde. Os desgastes em cada passe são apresentados no **Apêndice D**.

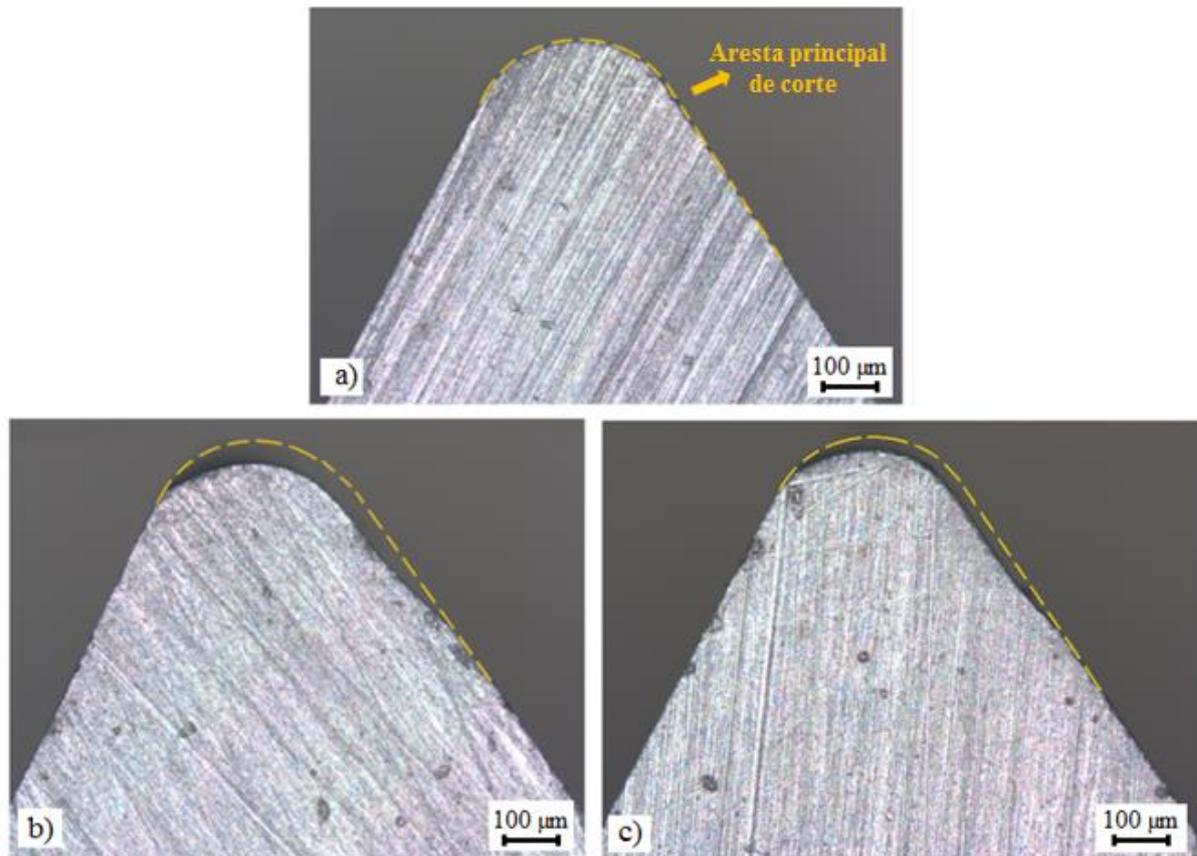
Figura 4.53 - Desgaste da ferramenta após todos os passes executados.



Fonte: elaborado pelo autor.

Para visualizar e comparar o raio de ponta das ferramentas utilizadas pelos métodos CT e UAT, na Figura 4.54 é ilustrada a vista superior das ferramentas de corte após os passes executados. Pode-se observar que a aresta principal de corte teve uma perda significativa no limite de contato com a profundidade de corte utilizada para ambos os métodos, fato pertinente à maior dureza do material pré-sinterizado, pois, no estado verde, não foi apresentado este fato. As mudanças promovidas na aresta de corte ocorrem em função dos maiores desgastes sofridos.

Figura 4.54 - Detalhe da geometria da ponta da ferramenta após os passes executados.



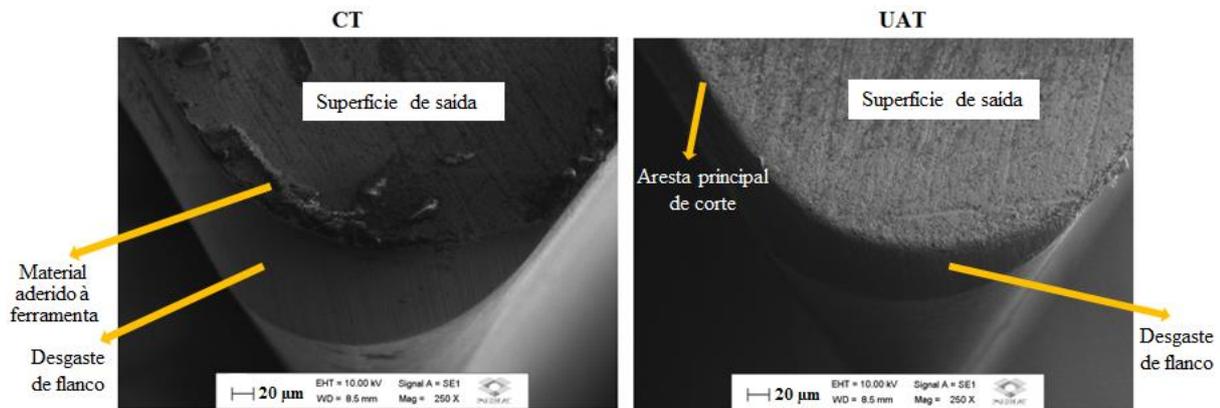
a) Ferramenta sem uso. b) Método CT. c) Método UAT.

Fonte: elaborado pelo autor.

Pela Figura 4.54, a aresta secundária de corte não apresentou desgaste em nenhuma condição, fato também averiguado no estado verde. Ao avaliar a ponta da ferramenta, o método CT apresentou maior perda da geometria original do raio de ponta da ferramenta.

Foram feitas imagens de MEV (Figura 4.55) nas ferramentas de corte empregadas para cada método. Observa-se grande quantidade de material aderido à ferramenta de corte utilizada no método CT, já a ferramenta utilizada no método UAT está praticamente isenta de aderência de material. Ressalta-se que o desgaste ocorreu devido à abrasão (discorrido na análise do desgaste da ferramenta usada na peça em verde).

Figura 4.55 - MEV da ponta da ferramenta após os passes executados.

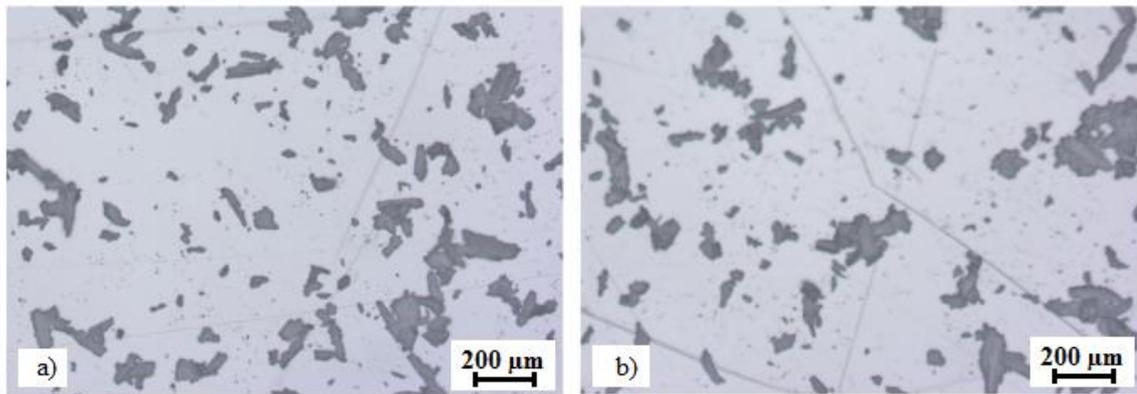


Fonte: elaborado pelo autor.

Pela análise de EDS realizada nas ferramentas da Figura 4.55, foi possível identificar alumínio (Al) e, principalmente, grande quantidade de oxigênio (O). Já no método UAT foi identificado somente oxigênio em pequena quantidade. Esses resultados corroboram que o método UAT melhorou o processo de usinagem, pois propiciou benefícios para a ferramenta (redução do desgaste e de aderência de material) e, em decorrência disso, minimizou a introdução de danos na superfície (vide Figura 4.42 da página 129).

O material removido no processo foi analisado e não apresentou variações significativas nas dimensões, mesmo com desgaste considerável da ferramenta de corte. Essa observação corrobora com a análise realizada do DOE fatorial fracionário, pois, não indicou variação significativa do material removido ao utilizar condições diferentes de usinagem. A Figura 4.56 ilustra uma parcela do material removido no 6° e 11° passe da análise de desgaste da ferramenta de corte.

Figura 4.56 - Material removido em função do desgaste da ferramenta.

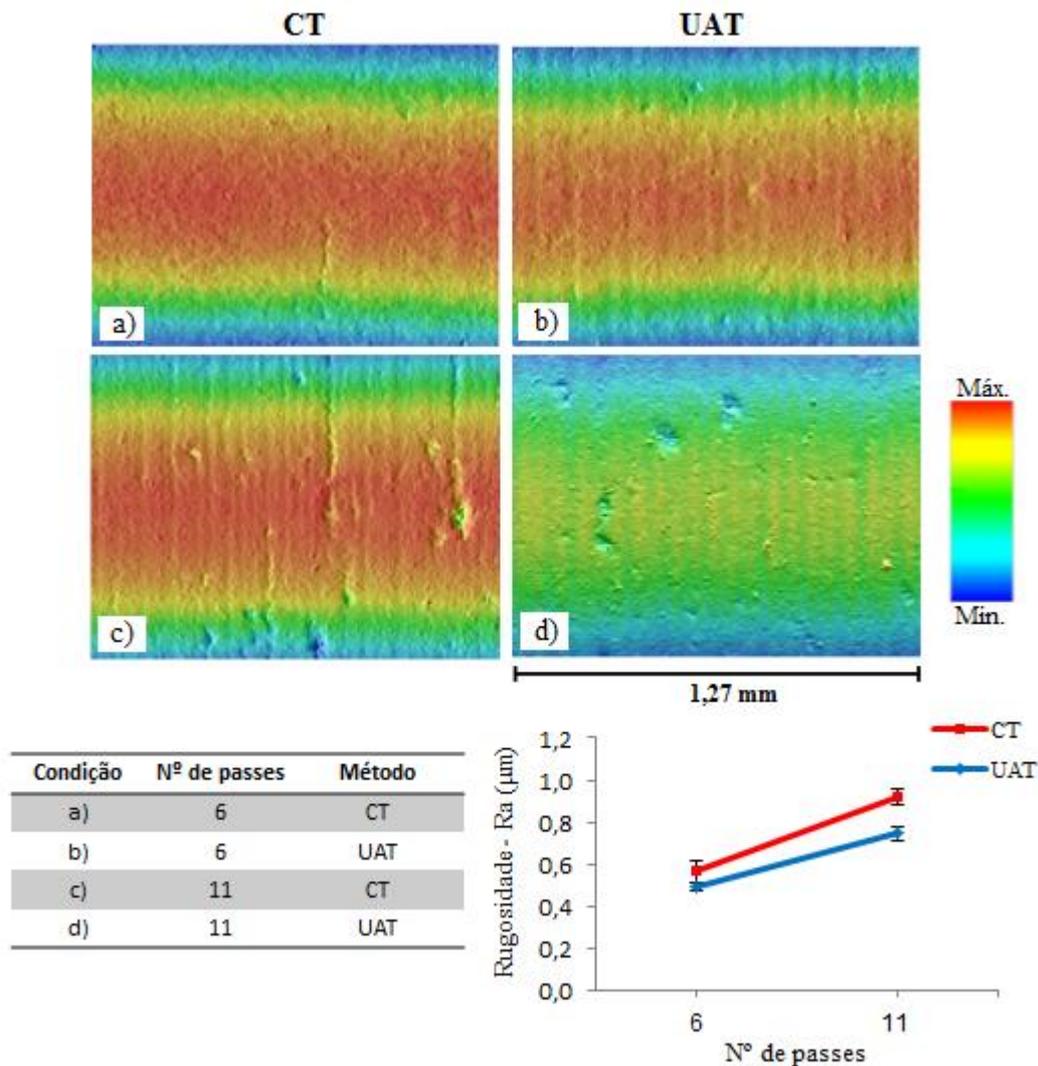


Cavaco gerado em função: a) 6º passe no método CT. b) 11º passe no método CT.

Fonte: elaborado pelo autor.

Em relação ao acabamento superficial, foi avaliada a sua superfície e mensurada a rugosidade da mesma após o 6º e o 11º passe (Figura 4.57). É verificado que as superfícies geradas apresentam um acabamento com poucos danos e, no último passe na condição com maior desgaste (método CT), gerou uma  $R_a$  de  $0,917 \mu\text{m}$ .

Figura 4.57 - Acabamento e rugosidade gerada em função do desgaste da ferramenta.



Fonte: elaborado pelo autor.

Pela Figura 4.57, é possível afirmar que as superfícies geradas foram semelhantes, porém, ao avaliar a rugosidade, o método UAT apresentou uma redução da  $R_a$ , o que pode ser atribuído ao menor desgaste de flanco gerado no método UAT. A condição pré-sinterizada do compacto se demonstrou mais benéfica na obtenção do acabamento do que a condição em verde, pois, mesmo com desgaste considerável da ferramenta, o método UAT gerou máxima  $R_a$  de  $0,93 \mu\text{m}$  no 11º passe. Em comparação, a  $R_a$  no estado verde atingiu o máximo de  $1,64 \mu\text{m}$  no mesmo número de passes, ou seja, reduziu a rugosidade em torno de 43%. Vale ressaltar que os maiores valores de rugosidades foram obtidos pelo método CT.

O fato do material removido no estágio pré-sinterizado ser de tamanho menor, como também, propiciar um acabamento relativamente bom, se deve a maior dureza adquirida pelo

material durante o processo de pré-sinterização, propiciando remoção de particulados menores (micro rachaduras). Nesse estado do material pré-sinterizado, inicia-se a união dos grãos pela formação do pescoço sem crescimento de grãos, assim, o mesmo está livre de materiais orgânicos, ao contrário do estágio em verde, que está consolidado somente pela compactação do particulado cerâmico com os aditivos (ligantes, plastificantes, defloculantes e lubrificantes), assim, o torna mais propício à remoção de aglomerados. Por fim, o sistema ultrassônico na usinagem pré-sinterizada se constatou benéfico para redução do desgaste da ferramenta de corte, e em decorrência, reduziu as forças de usinagem.

#### 4.4 Análise de precisão de usinagem de cerâmicas em verde e pré-sinterizadas

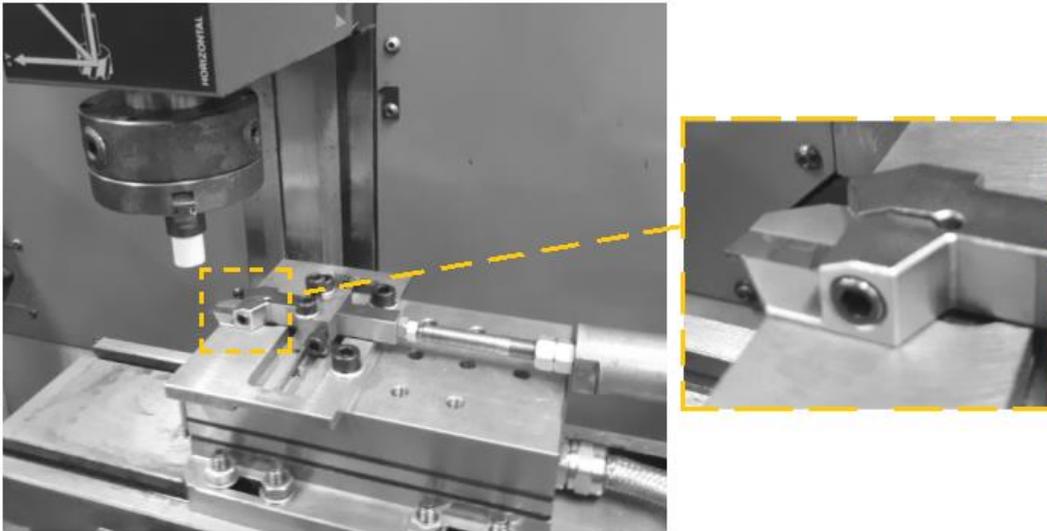
Após as análises em relação ao acabamento superficial, às forças de usinagem e ao desgaste da ferramenta de corte, foram realizados testes na operação de sangramento radial (entalhe circular) para verificar o comportamento durante a usinagem e avaliar o acabamento dos compactos em verde e pré-sinterizados.

Devido à maior área de contato do porta-ferramentas na superfície do *flexure hinge*, limitou-se a vibração, o que tornou inviável utilizar o sistema ultrassônico nesse experimento. Desse modo, foi empregado somente o método CT para o processo.

Primeiramente, foi realizado um passe de desbaste (0,5 mm) com as condições de parâmetros de corte obtidas pelo DOE superfície de resposta e, posteriormente, ao inserir a ferramenta de corte (bedame), foi executada a operação sangramento radial com os parâmetros:  $V_c = 35\text{m/min}$ ,  $V_f = 1,5\text{ mm/min}$  e  $a_p = 0,75\text{mm}$ .

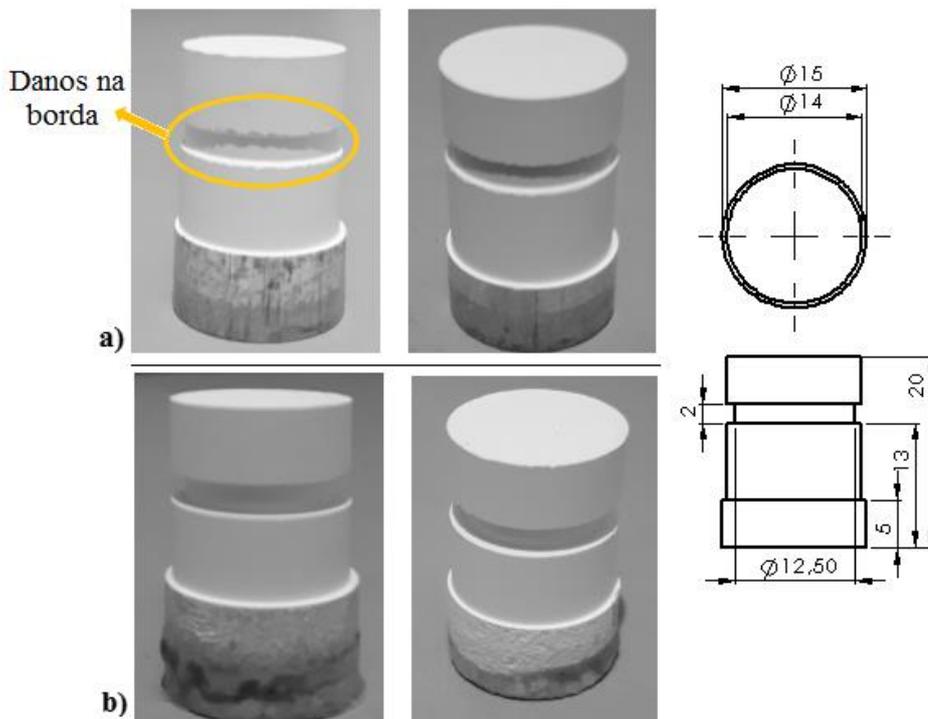
Foram realizados dois testes para cada condição (em verde e pré-sinterizado) e, para cada teste, foi utilizada uma nova ferramenta. A Figura 4.58 ilustra o sistema adaptado para a operação de sangramento radial. O porta-ferramentas utilizado foi DGTR 12B 2D 35 N e a ferramenta (bedame) DGN 2, ambos comercializados pela Iscar. Já a Figura 4.59 exhibe os compactos após a usinagem.

Figura 4.58 - Sistema adaptado para a operação de sangramento radial.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 4.59 - Compactos após a usinagem.



a) Compacto em verde. b) Compacto pré-sinterizado.

Fonte: elaborado pelo autor.

O sangramento radial foi executado nos dois estados do compacto sem ter quebras e/ou trincas, assim, é demonstrado que o compacto em verde, mesmo com baixa resistência mecânica, em condições adequadas de conformação, pode-se realizar a usinagem de peça com

geometria relativamente simples. No entanto, as peças em verde apresentaram micro danos ao longo da borda do entalhe devido à baixa resistência mecânica. Já os compactos pré-sinterizados foram, praticamente, isentos de danos no entalhe, devido ao aumento da resistência do material pelo processo de pré-queima, que dificulta a introdução de danos na borda. Vale ressaltar que, a temperatura e o patamar do processo de pré-sinterização influenciam o comportamento do compacto durante a usinagem.

#### 4.5 Análise geral das variáveis de usinagem de cerâmicas avançadas

Em relação aos estados da cerâmica avançada (verde, pré-sinterizado e sinterizado), é possível fazer uma comparação de alguns pontos importantes para o processo de usinagem desses materiais. A Tabela 4.1 sintetiza os resultados encontrados das variáveis de usinagem de cerâmica nos estados verde e pré-sinterizado, como também, relaciona o estado sinterizado.

Tabela 4.1- Análise geral de algumas variáveis de usinagem de cerâmicas avançadas.

Análise geral das variáveis de usinagem de cerâmica avançada	Estado do compacto		
	Verde	Pré-sinterizado	Sinterizado
Forças de usinagem	✓	▲	✗
Desgaste da ferramenta	✓	▲	✗
Danos na borda da peça	✗	✓	▲
Facilidade de manuseio da peça	✗	▲	✓
Taxa de remoção de material	▲	✓	✗
Técnicas convencionais de usinagem	✓	✓	✗
Peça com geometria complexa	▲	✓	✗
Custo de usinagem	✓	▲	✗
Geração de calor durante o processo	✓	✓	▲
Reaproveitamento de material	✓	✗	✗

Legenda: ✓ Vantagem  
✗ Desvantagem  
▲ Intermediário

Fonte: elaborado pelo autor.



## 5 CONCLUSÃO

Verificou-se neste estudo que o emprego da usinagem assistida por ultrassom em materiais cerâmicos em verde e pré-sinterizados proporciona benefícios para o processo, em termos de melhores acabamentos superficiais, redução da rugosidade, minimização de danos concentrados e/ou críticos e na redução do desgaste da ferramenta de corte.

Na usinagem em verde, o método CT gerou maiores danos na superfície, principalmente o aparecimento de pequenos vazios caracterizados como destacamentos de aglomerados do material. No entanto, esse fato foi minimizado quando empregado o método UAT, sobretudo, em condições com maiores  $V_c$  e  $V_f$ .

Em relação à usinagem pré-sinterizada, o método UAT favoreceu a redução da probabilidade de danos críticos, pois, nenhum ensaio com essa técnica apresentou tais danos. Esses danos ocorreram em 1/3 dos ensaios executados pelo método CT, sendo que, danos nessa magnitude podem inviabilizar a sua aplicação.

Por meio dos experimentos, foi possível constatar que os fatores  $V_f$  e  $V_c$  foram os fatores responsáveis pela variação significativa nas rugosidades mensuradas e nos danos gerados, no qual os melhores acabamentos superficiais ocorreram quando empregadas elevadas  $V_c$  e baixas  $V_f$ , porém, até certo limite.

Em ambos os estados do compacto, a profundidade de corte não teve influência nos acabamentos gerados. Desse modo, independente da profundidade de corte utilizada, a variação da rugosidade foi mínima.

No DOE fatorial fracionário, foi verificado que as forças geradas na usinagem se alteraram pouco com a variação dos parâmetros de corte, no qual o desgaste significativo da ferramenta de corte é o fator que exerce influência no incremento das forças. As forças na usinagem em verde não ultrapassaram 2,5 N no decorrer de um passe executado, já no estado pré-sinterizado, houve um aumento considerável na força em relação ao estado verde e as forças de usinagem atingiram 9 N no decorrer de um passe executado. Evidencia-se que as forças mensuradas pouco se alteraram entre os métodos CT e UAT ao se utilizar os mesmos parâmetros de usinagem.

Na análise de desgaste da ferramenta, em relação ao estado verde, o método UAT proporcionou uma redução de 34% no desgaste de flanco em comparação com o método CT.

Já para o estado pré-sinterizado, o método UAT propiciou uma redução de 28,1% no desgaste de flanco máximo em relação ao método CT. Como também, o método UAT reduziu a alteração da geometria da ponta da ferramenta de corte utilizada no processo para ambos os estados do compacto. Vale ressaltar que o desgaste foi maior na usinagem do compacto pré-sinterizado em relação ao compacto em verde.

Por fim, os resultados apresentados sugerem que o método UAT pode ser aplicado em materiais cerâmicos em verde e pré-sinterizados, pois, o mesmo propicia benefícios para o processo, principalmente, porque a usinagem desses materiais é difícil, devido à fragilidade dos corpos e a facilidade de introduzir danos. Salienta-se, também, que existem poucos trabalhos publicados que utilizam cerâmicas avançadas nesses estados pelo processo de torneamento. Além de ser novo o estudo da aplicação da técnica UAT em cerâmicas avançadas nos estados anteriores à sinterização.

## **6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

- Propor um sistema de UAT com vibração em duas direções (2D), e, avaliar o comportamento desse método para usinagem de cerâmica em verde e/ou pré-sinterizada;
- Realizar uma investigação de várias frequências e/ou amplitudes no método UAT, com intuito de avaliar as forças geradas, o acabamento superficial e o desgaste da ferramenta de corte;
- Análise da aplicação do método UAT em outros materiais cerâmicos no estado verde e/ou pré-sinterizado, como também, outros métodos e pressões de compactação;
- Verificar o comportamento do método CT e UAT na usinagem de materiais cerâmicos com porosidade controlada;
- Aplicar e/ou desenvolver técnicas mais eficazes de usinagem assistido por ultrassom para investigar detalhadamente os danos causados na superfície dos materiais frágeis.



## REFERÊNCIAS

- AFSMONDIM. **MSR – Metodologia de Superfície de Resposta**. Disponível em: <<https://afsmondim.wordpress.com/2014/04/20/msr-metodologia-de-superficie-de-resposta/>>. Acesso em: 2 dez. 2018.
- AGARWAL, S.; RAO, P. V. Experimental investigation of surface/subsurface damage formation and material removal mechanisms in SiC grinding. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 48, n. 6, p. 698–710, 2008.
- ALBARO, J. L. A. A operação de prensagem: considerações técnicas e sua aplicação industrial, parte I: O preenchimento das cavidades do molde. **Cerâmica Industrial**, v. 6, n. 3, p. 23–28, 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, n. 3, p. 26–32, 2001.
- AMINI, S. et al. An experimental investigation on the machinability of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in vibration-assisted turning using PCD tool. **Materials and Manufacturing Processes**, v. 29, n. 3, p. 331–336, 2014.
- AMINI, S. et al. Effect of longitudinal–torsional vibration in ultrasonic-assisted drilling. **Materials and Manufacturing Processes**, v. 32, n. 6, p. 616–622, 2017.
- ANTONIO, M.; DUARTE, V.; MEOLA, T. **Curso de Planejamento Experimental**. [s.l.] UFU - Universidade Federal de Uberlândia, 2007.
- AZARMI, F.; AMIRI, A. Microstructural evolution during fabrication of alumina via laser stereolithography technique. **Ceramics International**, v. 45, n. 1, p. 271–278, 2019.
- BALESTRACCI, D. Data “sanity”: Statistics and reality. **Quality in Primary Care**, v. 14, n. 1, p. 49–53, 2006.
- BESSHI, T.; SATO, T.; TSUTSUI, I. Machining of alumina green bodies and their dewaxing. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 95, n. 1–3, p. 133–138, 1999.
- BOCH, P.; NIEPCE, J. C. **Ceramic materials : processes, properties and applications**. [s.l.: s.n.].
- BORGER, A. et al. Fracture of green and sintered ceramic bodies. **Key Engineering Materials**, v. 223, p. 83–90, 2002.
- BREHL, D. E.; DOW, T. A. Review of vibration-assisted machining. **Precision Engineering**, v. 32, n. 3, p. 153–172, 2008.
- BUKVIC, G. et al. Green machining oriented to diminish density gradient for minimization of distortion in advanced ceramics. **Machining Science and Technology**, v. 16, n. 2, p. 228–246, 2012.
- BUKVIC, G. **Estratégia de usinagem em verde dirigida ao projeto de peças cerâmicas**. [s.l.] Escola de Engenharia de São Carlos, 2015.
- CAKIR, F. H. et al. Finite Element Modeling of Ultrasonic Assisted Turning of Ti6Al4V Alloy. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 195, n. 222, p. 2839–2848, 2015.
- CHEN, W. et al. State-of-the-art review on vibration-assisted milling : principle , system

design , and application. p. 2033–2049, 2018.

CYGAN, T. et al. Mechanical properties of graphene oxide reinforced alumina matrix composites. **Ceramics International**, v. 43, n. February, p. 6180–6186, 2017.

DEBNATH, K.; SINGH, I.; DVIVEDI, A. Rotary mode ultrasonic drilling of glass fiber-reinforced epoxy laminates. **Journal of Composite Materials**, v. 49, n. 8, p. 949–963, 2015.

DEMARBAIX, A. et al. Behaviour of pre-sintered Y-TZP during machining operations: Determination of recommended cutting parameters. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 32, p. 85–92, 2018.

DENRY, I.; KELLY, J. R. State of the art of zirconia for dental applications. **Dental Materials**, v. 24, n. 3, p. 299–307, 2008.

DESFONTAINES, M. et al. Characterisation of the green machinability of AlN powder compacts. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 25, n. 6, p. 781–791, 2005.

FANTOZZI, G. et al. Advanced Ceramic Materials: Summary of Possible Applications. In: **Materials: Science and Engineering**. [s.l: s.n.]. p. 310.

FRIEDRICH, R.; LAMMERING, R. Flexure Hinge Mechanisms Modeled by Nonlinear Euler-Bernoulli-Beams. **Pamm**, v. 15, n. 1, p. 193–194, 2015.

GALDÁMEZ, E. V. C. **Aplicação das técnicas de planejamento e análise de experimentos na melhoria da qualidade de um processo de fabricação de produtos plásticos**. [s.l.] Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2002.

GAO, Y.; SUN, R.; LEOPOLD, J. Analysis of cutting stability in vibration assisted machining using an analytical predictive force model. **Procedia CIRP**, v. 31, p. 515–520, 2015.

GONÇALVES JÚNIOR, M. **Efeitos dos parâmetros de usinagem no acabamento superficial de materiais cerâmicos a verde**. [s.l.] Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 2014.

GONÇALVES JÚNIOR, M. et al. Análise do acabamento superficial e força de corte no torneamento de alumina a verde. **Revista Materia**, v. 20, n. 2, p. 480–490, 2015.

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

HONDO, T. et al. Coarse pore evolution in dry-pressed alumina ceramics during sintering. **Advanced Powder Technology**, v. 27, n. 3, p. 1006–1012, 2016.

HOSSEINABADI, H. N.; SAJJADY, S. A.; AMINI, S. Creating micro textured surfaces for the improvement of surface wettability through ultrasonic vibration assisted turning. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 96, p. 2825–2839, 2018.

JANSSEN, R.; SCHEPPOKAT, S.; CLAUSSEN, N. Tailor-made ceramic-based components-Advantages by reactive processing and advanced shaping techniques. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 28, n. 7, p. 1369–1379, 2008.

KANG, D.; GWEON, D. Analysis and design of a cartwheel-type flexure hinge. **Precision Engineering**, v. 37, n. 1, p. 33–43, 2013.

KAVASHIMA, L. H. et al. Análise da microdureza Vickers de zircônia Y-TZP pré-sinterizada para a usinagem e posterior aplicação como copings. **Matéria**, p. 11, 2017.

- KHAJEHZADEH, M.; RAZFAR, M. R. FEM and Experimental Investigation of Cutting Force During UAT Using Multicoated Inserts. **Materials and Manufacturing Processes**, v. 30, n. 7, p. 858–867, 2015.
- KUMAR, A. et al. Green properties of dry-pressed alumina compacts fabricated using sucrose as binder. **Ceramics International**, v. 40, n. 4, p. 6271–6277, 2014.
- LI, C. et al. Material removal mechanism and grinding force modelling of ultrasonic vibration assisted grinding for SiC ceramics. **Ceramics International**, v. 43, n. 3, p. 2981–2993, 2017.
- LI, J. Z. et al. Micro machining of pre-sintered ceramic green body. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 212, n. 3, p. 571–579, 2012.
- LIMA, R. M. B. DE. **Técnicas de Experimentação Estatística: Planos Factoriais e aplicações**. [s.l.] UNIVERSIDADE ABERTA, 2010.
- LINDQVIST, K.; CARLSTROM, E. Green machining of alumina formed by CIP, starch consolidation and latex slip casting. **Key Engineering Materials**, v. 213, p. 301–304, 2002.
- LIU, K. et al. Indirect selective laser sintering of epoxy resin-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic powders combined with cold isostatic pressing. **Ceramics International**, v. 40, n. 5, p. 7099–7106, 2014.
- LIU, X. et al. Analysis of surface texturing in radial ultrasonic vibration-assisted turning. **Journal of Materials Processing Tech.**, v. 267, n. September 2018, p. 186–195, 2019.
- LIU, Y. et al. Wear resistance of carbide tools with textured flank-face in dry cutting of green alumina ceramics. **Wear**, v. 372–373, p. 91–103, 2017.
- LIU, Y. et al. Effect of texture parameters on cutting performance of flank-faced textured carbide tools in dry cutting of green Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>ceramics. **Ceramics International**, v. 44, n. 11, p. 13205–13217, 2018.
- 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**. [s.l.] Escola de Engenharia de São Carlos, 2011.
- MARGARIDO, A. et al. Influence of the green-machining parameters on the mechanical properties of alumina rods. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, p. 10, 2016.
- MARINESCU, I. D. **Handbook of advanced ceramics machining**. New York: Taylor & Francis Group, 2006.
- MELO, C. C. et al. A validation procedure for numerical models of ceramic powder pressing. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 38, n. 8, p. 2928–2936, 2018.
- MINITAB. **Suporte ao Minitab 18**. Disponível em: <<https://support.minitab.com/pt-br/minitab/18/>>. Acesso em: 20 abr. 2018.
- MOHANTY, S. et al. Critical issues in near net shape forming via green machining of ceramics: A case study of alumina dental crown. **Journal of Asian Ceramic Societies**, v. 1, n. 3, p. 274–281, 2013.
- MOHANTY, S.; RAMESHBABU, A. P.; DHARA, S. Net shape forming of green alumina via CNC machining using diamond embedded tool. **Ceramics International**, p. 1–9, 2013.

- NAMPI, P. P. et al. Effect of surface roughness on grain growth and sintering of alumina. **Indian Academy of Sciences**, v. 34, n. 4, p. 799–804, 2011.
- NG, S. H.; HULL, J. B.; HENSHALL, J. L. Machining of novel alumina/cyanoacrylate green ceramic compacts. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 175, n. 1–3, p. 299–305, 2006.
- NIST/SEMATECH. **e-Handbook of Statistical Methods**. Disponível em: <<http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/>>. Acesso em: 20 maio. 2018.
- PATIL, S. et al. Modelling and simulation of effect of ultrasonic vibrations on machining of Ti6Al4V. **Ultrasonics**, v. 54, n. 2, p. 694–705, 2014.
- PENIDE, J. et al. High contrast laser marking of alumina. v. 336, p. 118–128, 2015.
- QIN, Y. et al. Micro-manufacturing: Research, technology outcomes and development issues. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 47, n. 9–12, p. 821–837, 2010.
- RAHAMAN, M. N. **Ceramic processing and sintering**. Segund ed. New York: [s.n.].
- RATNER, B. D.; HOFFMAN, A. S.; SCHOEN, F. J. **Biomaterials Science: An Introduction to Materials in Medicine**. [s.l.] Elsevier, 2012.
- RICHERSON, D. W. **Modern Ceramic Engineering: Properties, processing, and use in design**. Segund ed. New York: [s.n.].
- ROBERT-PERRON, E. et al. An integrated approach to the characterization of powder metallurgy components performance during green machining. **Materials Science and Engineering A**, v. 402, n. 1–2, p. 325–334, 2005.
- SAJJADY, S. A. et al. Analytical and experimental study of topography of surface texture in ultrasonic vibration assisted turning. **JMADE**, v. 93, p. 311–323, 2016.
- SALVENDY, G. **Handbook of industrial engineering: technology and operations management**. Third Edit ed. [s.l.] Wiley-Interscience Publication, 2001.
- SANCHEZ, L. E. A. et al. Allowance removal from green pieces as a method for improvement surface quality of advanced ceramics. **Journal of Cleaner Production**, v. 186, p. 10–21, 2018.
- SANTANNA-GRECO, J. A.; FABBRI, G. T. P. **Considerações sobre planejamento e análise de experimentos fatoriais fracionários assimétricos**. São Carlos: [s.n.].
- SCHELLER, W. L. Conventional Machining of Green Aluminum/Aluminum Nitride Ceramics. **Journal of Science**, v. v. 94, n. June, p. 151–154, 1994.
- SENTHIL KUMAR, A.; RAJA DURAI, A.; SORNAKUMAR, T. Development of alumina-ceria ceramic composite cutting tool. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, v. 22, n. 1, p. 17–20, 2004.
- SHARMA, V.; PANDEY, P. M. Recent advances in ultrasonic assisted turning: A step towards sustainability. **Cogent Engineering**, v. 3, n. 1, p. 1–20, 2016.
- SHEPPARD, L. M. Green machining - tools and considerations for machining unfired ceramic. **Ceramic Industry**, p. 65–76, 1999.
- SU, B.; DHARA, S.; WANG, L. Green ceramic machining: A top-down approach for the rapid fabrication of complex-shaped ceramics. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 28, n. 11, p. 2109–2115, 2008.

- TIAN, Y.; SHIRINZADEH, B.; ZHANG, D. Closed-form compliance equations of filleted V-shaped flexure hinges for compliant mechanism design. **Precision Engineering**, v. 34, n. 3, p. 408–418, 2010.
- WANG, R. et al. Compliant linear-rotation motion transduction element based on novel spatial helical flexure hinge. **Mechanism and Machine Theory**, v. 92, p. 330–337, 2015.
- WEBER, H.; HERBERGER, J.; PILZ, R. Turning of Machinable Glass Ceramics with an Ultrasonically Vibrated Tool. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 33, n. 1, p. 85–87, 1984.
- WEFERS, K.; MISRA, C. Oxides and Hydroxides of Aluminum. **Alcoa Technical Paper**, v. 19, p. 1–100, 1987.
- WEREMCZUK, A.; RUSINEK, R.; WARMINSKI, J. The concept of active elimination of vibrations in milling process. **Procedia CIRP**, v. 31, p. 82–87, 2015.
- WESTERHEIDE, R. et al. Advances in characterisation of machined green compacts. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 17, n. 96, p. 467–472, 1997.
- WU, K.; MCANANY, J. W. Acrylic binders for green machining. **American Ceramic Society Bulletin**, v. 75, p. 61–64, 1995.
- XIAO, M. et al. The effect of tool nose radius in ultrasonic vibration cutting of hard metal. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 43, n. 13, p. 1375–1382, 2003.
- XU, H. K.; JAHANMIR, S. Transitions in the mechanism of material removal in abrasive wear of alumina. **Wear**, v. 192, n. 95, p. 228–232, 1996.
- XU, W. X.; ZHANG, L. C. Ultrasonic vibration-assisted machining: principle, design and application. **Advances in Manufacturing**, v. 3, n. 3, p. 173–192, 2015.
- XU, W.; ZHANG, L. C.; WU, Y. Elliptic vibration-assisted cutting of fibre-reinforced polymer composites: Understanding the material removal mechanisms. **Composites Science and Technology**, v. 92, p. 103–111, 2014.
- YUQIN, W. et al. Study on contact performance of ultrasonic-assisted grinding surface. **Ultrasonics**, v. 91, n. March 2018, p. 193–200, 2019.
- ZAHEDI, A.; TAWAKOLI, T.; AKBARI, J. Energy aspects and workpiece surface characteristics in ultrasonic- assisted cylindrical grinding of alumina – zirconia ceramics. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 90, p. 16–28, 2015.
- ZHANG, X. et al. A model to predict the critical undeformed chip thickness in vibration-assisted machining of brittle materials. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 69, p. 57–66, 2013.
- ZHENG, F. et al. A theoretical and experimental investigation on ultrasonic assisted grinding from the single-grain aspect. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 148, n. September, p. 667–675, 2018.
- ZOU, L. et al. Investigation on diamond tool wear in ultrasonic vibration-assisted turning die steels. **Materials and Manufacturing Processes**, v. 32, n. 13, p. 1505–1511, 2017.
- ZUCUNI, C. P. et al. CAD / CAM machining Vs pre-sintering in-lab fabrication techniques of Y-TZP ceramic specimens: Effects on their mechanical fatigue behavior. **Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials**, v. 71, n. March, p. 201–208, 2017.

**APÊNDICE A – Forças mensuradas em cada réplica dos ensaios fatorial fracionário.**

		Condição verde							
Condição		Forças [N]			Condição		Forças [N]		
		Fc	Fp	Ff		Fc	Fp	Ff	
1	Réplica 1	0,98	0,87	1,09	2	Réplica 1	1,42	0,78	0,82
	Réplica 2	1,16	0,92	0,95		Réplica 2	1,37	0,64	0,76
	Réplica 3	1,10	0,99	0,90		Réplica 3	1,39	0,61	0,73
	Desvio P.A	0,09	0,06	0,10		Desvio P.A	0,03	0,09	0,05
	Média Geral	1,08	0,93	0,98		Média Geral	1,39	0,68	0,77
3	Réplica 1	1,21	0,54	0,83	4	Réplica 1	1,10	0,89	0,63
	Réplica 2	1,34	0,58	0,90		Réplica 2	1,17	1,03	0,71
	Réplica 3	1,30	0,51	0,88		Réplica 3	1,28	1,06	0,69
	Desvio P.A	0,07	0,03	0,04		Desvio P.A	0,09	0,09	0,04
	Média Geral	1,29	0,54	0,87		Média Geral	1,18	0,99	0,68
5	Réplica 1	1,61	0,55	1,22	6	Réplica 1	1,63	0,87	1,14
	Réplica 2	1,48	0,65	1,16		Réplica 2	1,78	0,95	1,22
	Réplica 3	1,44	0,46	1,09		Réplica 3	1,57	1,00	1,29
	Desvio P.A	0,09	0,09	0,07		Desvio P.A	0,11	0,07	0,08
	Média Ger	1,51	0,55	1,16		Média Ger	1,66	0,94	1,22
7	Réplica 1	1,43	1,06	1,34	8	Réplica 1	1,96	0,69	1,19
	Réplica 2	1,39	1,11	1,36		Réplica 2	1,95	0,64	1,22
	Réplica 3	1,51	0,97	1,26		Réplica 3	1,85	0,57	1,07
	Desvio P.A	0,06	0,07	0,05		Desvio P.A	0,06	0,06	0,08
	Média Geral	1,44	1,05	1,32		Média Geral	1,92	0,63	1,16

		Condição pré-sinterizada							
Condição		Forças [N]					Forças [N]		
		Fc	Fp	Ff	Condição		Fc	Fp	Ff
1	Réplica 1	2,38	1,24	3,04	2	Réplica 1	3,50	0,91	3,46
	Réplica 2	2,47	1,33	2,87		Réplica 2	3,61	0,80	3,20
	Réplica 3	2,53	1,20	2,91		Réplica 3	3,60	0,85	3,38
	Desvio P.A	0,07	0,07	0,09		Desvio P.A	0,06	0,06	0,13
	Média Geral	2,46	1,26	2,94		Média Geral	3,57	0,85	3,35
3	Réplica 1	3,01	0,60	2,73	4	Réplica 1	3,85	1,42	3,91
	Réplica 2	2,89	0,61	2,64		Réplica 2	3,74	1,35	4,08
	Réplica 3	2,91	0,72	2,81		Réplica 3	3,98	1,28	4,15
	Desvio P.A	0,06	0,07	0,09		Desvio P.A	0,12	0,07	0,12
	Média Ger	2,94	0,64	2,73		Média Geral	3,86	1,35	4,05
5	Réplica 1	5,42	0,79	6,35	6	Réplica 1	5,52	1,37	6,80
	Réplica 2	5,34	0,84	6,21		Réplica 2	5,71	1,35	6,68
	Réplica 3	5,26	0,93	6,19		Réplica 3	5,62	1,52	6,63
	Desvio P.A	0,08	0,07	0,09		Desvio P.A	0,10	0,09	0,09
	Média Geral	5,34	0,85	6,25		Média Geral	5,62	1,41	6,70
7	Réplica 1	3,84	1,85	5,08	8	Réplica 1	4,98	1,29	5,71
	Réplica 2	4,11	1,68	5,20		Réplica 2	5,27	1,24	5,50
	Réplica 3	3,92	1,78	5,18		Réplica 3	5,05	1,30	5,85
	Desvio P.A	0,14	0,08	0,06		Desvio P.A	0,15	0,03	0,18
	Média Geral	3,96	1,77	5,15		Média Geral	5,10	1,28	5,69

**APÊNDICE B – Análise de variância gerada no DOE fatorial fracionário para as variáveis (R<sub>a</sub> - F<sub>c</sub> - F<sub>f</sub> - F<sub>p</sub>).**

**Condição verde**

**Análise de Variância (Fc)**

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Frequência [kHz]	1	0,20723	0,207228	21,40	0,000
Vf [mm/min]	1	0,26531	0,265311	27,40	0,000
Vc [m/min]	1	0,01354	0,013536	1,40	0,252
ap [mm]	1	0,95507	0,955070	98,62	0,000

**Sumário do Modelo**

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
0,0984082	88,68%	86,29%	81,93%

**Análise de Variância (Fp)**

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Frequência [kHz]	1	0,847456	0,847456	118,48	0,000
Vf [mm/min]	1	0,010818	0,010818	1,51	0,234
Vc [m/min]	1	0,004758	0,004758	0,67	0,425
ap [mm]	1	0,000347	0,000347	0,05	0,828

**Sumário do Modelo**

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
0,0845748	86,40%	83,54%	78,30%

**Análise de Variância (Ff)**

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Frequência [kHz]	1	0,02127	0,021271	2,58	0,124
Vf [mm/min]	1	0,09676	0,096758	11,76	0,003
Vc [m/min]	1	0,00328	0,003283	0,40	0,535
ap [mm]	1	0,91341	0,913414	110,98	0,000

**Sumário do Modelo**

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
0,0907220	86,87%	84,11%	79,05%

**Análise de Variância (Ra)**

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Frequência [kHz]	1	0,0575	0,0575	0,20	0,662
Vf [mm/min]	1	11,0530	11,0530	38,00	0,000
Vc [m/min]	1	7,6320	7,6320	26,24	0,000
ap [mm]	1	0,0036	0,0036	0,01	0,913

**Sumário do Modelo**

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
0,539333	77,23%	72,44%	63,67%

**Condição pré-sinterizada**

**Análise de Variância (Fc)**

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Frequência [Khz]	1	0,4189	0,4189	2,53	0,128
Vf [mm/min]	1	4,4583	4,4583	26,89	0,000
Vc [m/min]	1	0,4819	0,4819	2,91	0,104
ap [mm]	1	19,3742	19,3742	116,87	0,000

**Sumário do Modelo**

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
0,407155	88,70%	86,33%	81,98%

**Análise de Variância (Fp)**

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Frequência [Khz]	1	1,75418	1,75418	83,45	0,000
Vf [mm/min]	1	0,05169	0,05169	2,46	0,133
Vc [m/min]	1	0,16402	0,16402	7,80	0,012
ap [mm]	1	0,54875	0,54875	26,11	0,000

**Sumário do Modelo**

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
0,144982	86,31%	83,43%	78,16%

**Análise de Variância (Ff)**

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Frequência [Khz]	1	0,2565	0,2565	1,47	0,240
Vf [mm/min]	1	2,7620	2,7620	15,82	0,001
Vc [m/min]	1	0,9932	0,9932	5,69	0,028
ap [mm]	1	43,2030	43,2030	247,50	0,000

**Sumário do Modelo**

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
0,417804	93,44%	92,05%	89,53%

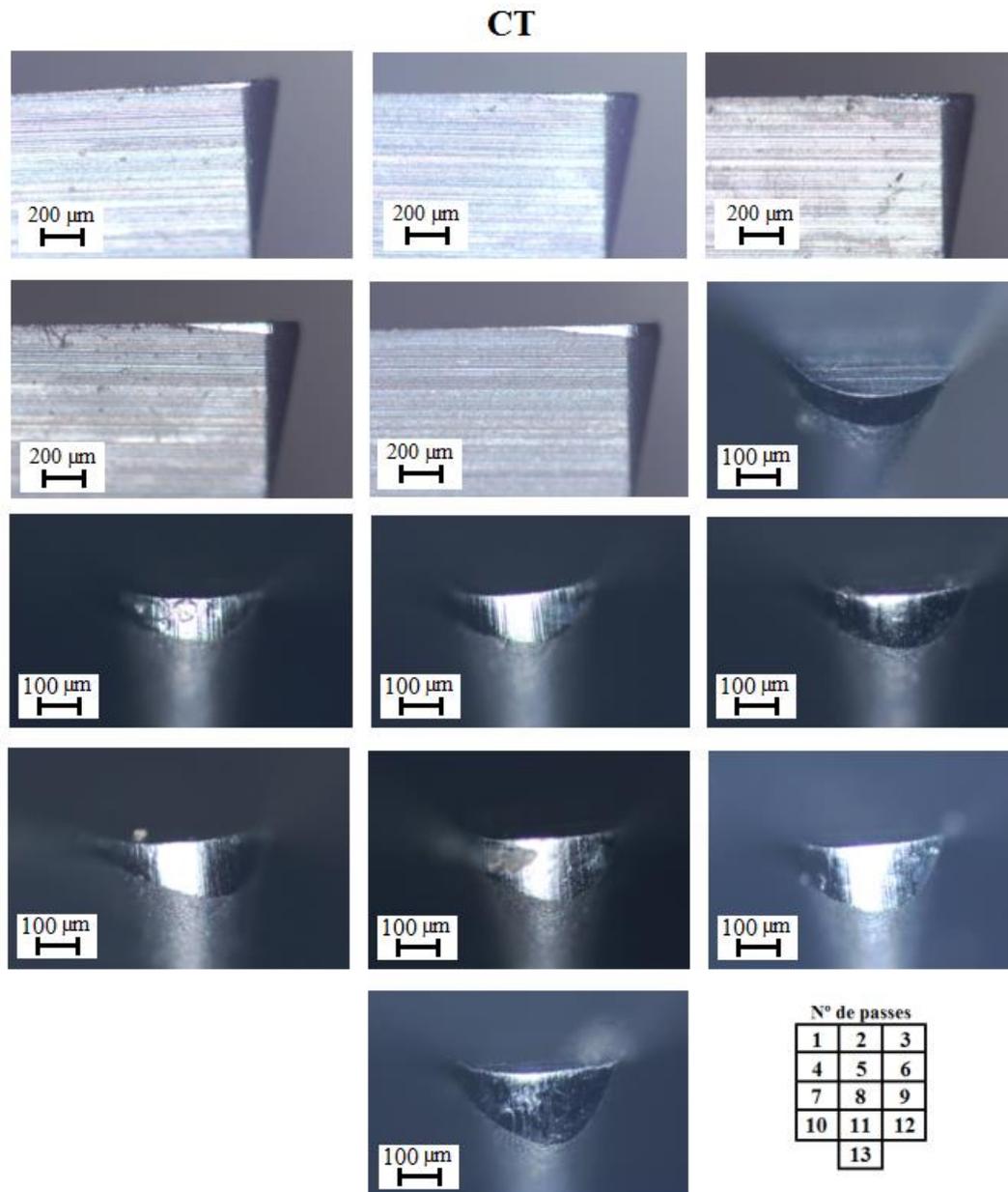
**Análise de Variância (Ra)**

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Frequência [Khz]	1	0,2008	0,20075	0,99	0,332
Vf [mm/min]	1	4,8232	4,82317	23,79	0,000
Vc [m/min]	1	4,5946	4,59463	22,67	0,000
ap [mm]	1	0,0108	0,01080	0,05	0,820

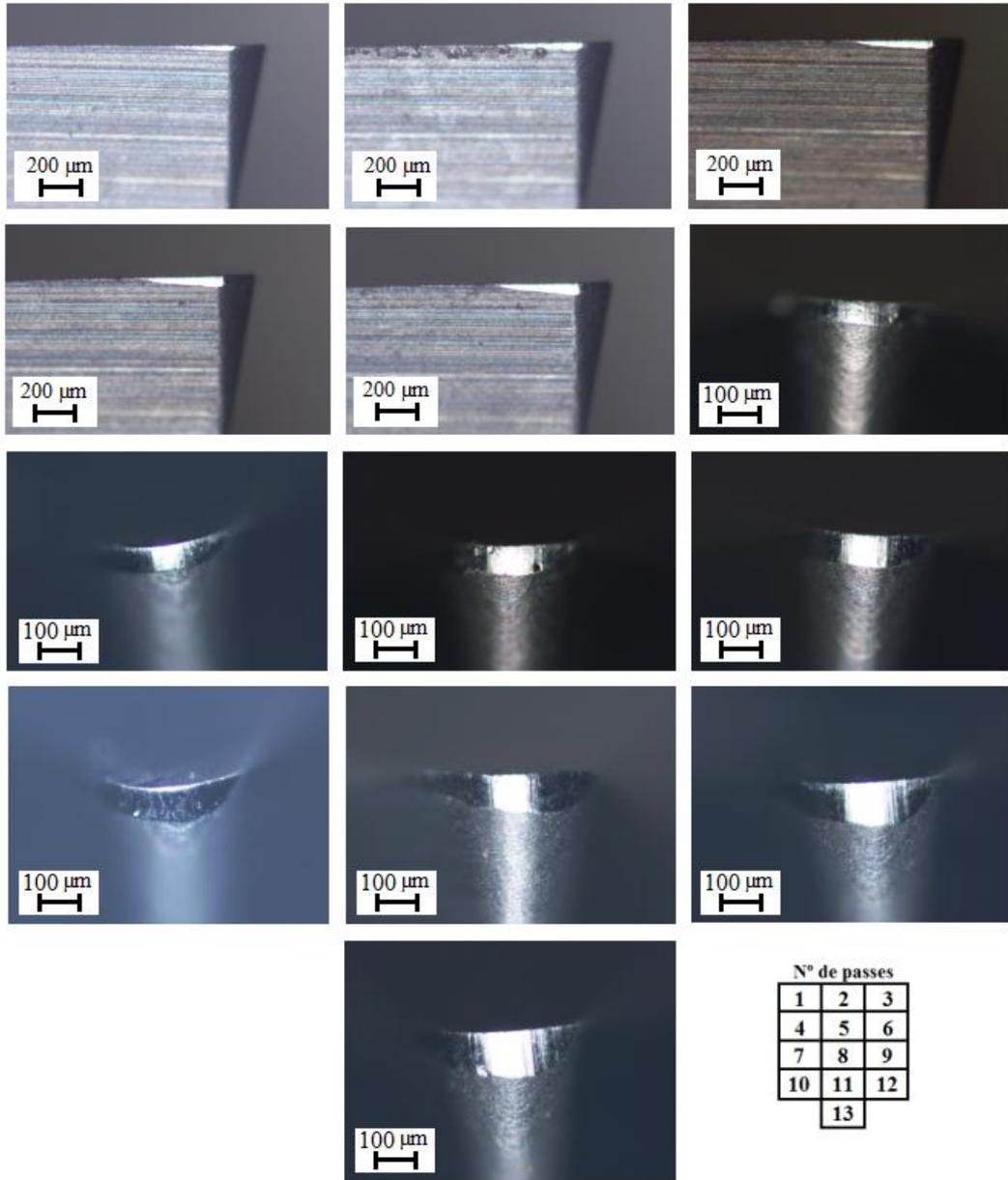
**Sumário do Modelo**

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
0,450220	71,43%	65,42%	54,42%

**APÊNDICE C – Desgaste gerado na ferramenta de corte em cada passe pelos métodos CT e UAT nos compactos em verde.**

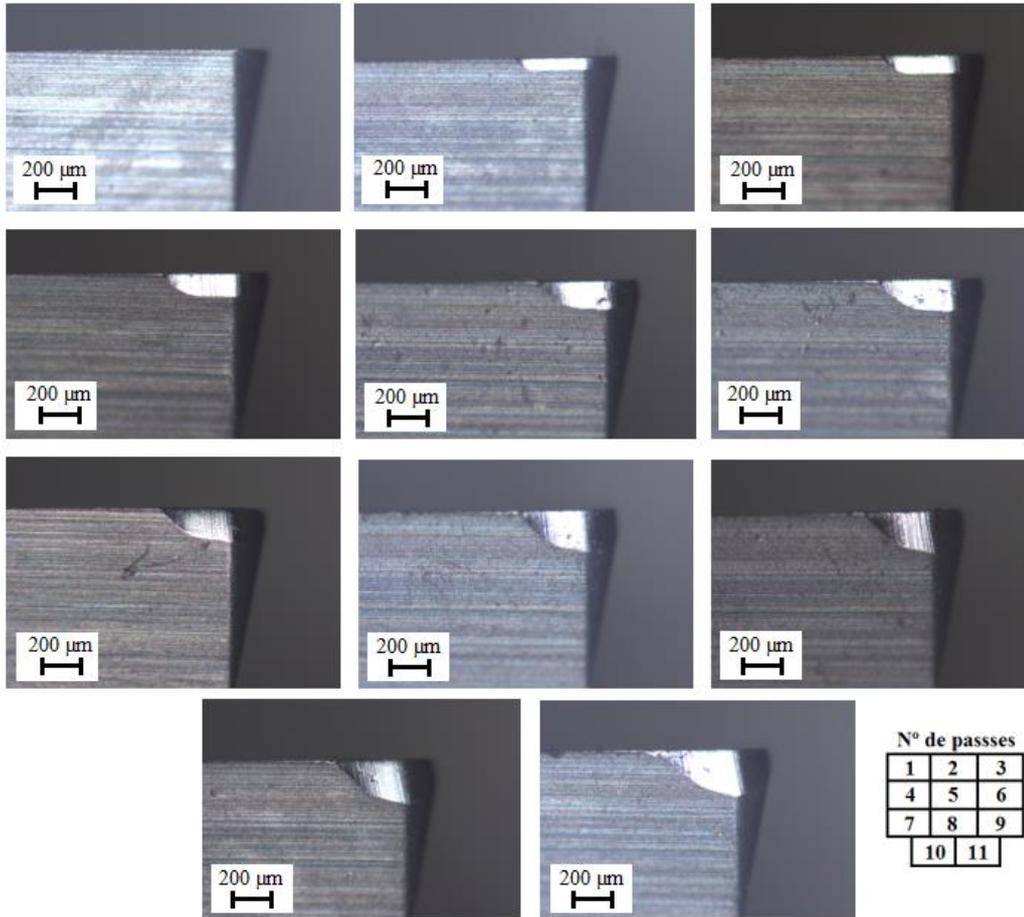


UAT



**APÊNDICE D – Desgaste gerado na ferramenta de corte em cada passe pelos métodos CT e UAT nos compactos pré-sinterizados.**

**CT**



UAT

