

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

**MONITORAMENTO E PROCESSAMENTO DE  
SINAIS NO PROCESSO A LASER DE  
CERÂMICAS AVANÇADAS**

Ana Carolina Balarin de Andrade

**Bauru**

**2021**

Ana Carolina Balarin de Andrade

**MONITORAMENTO E PROCESSAMENTO DE  
SINAIS NO PROCESSO A LASER DE  
CERÂMICAS AVANÇADAS**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Bauru, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica na Área de Processos de Fabricação, como parte dos requisitos necessários à obtenção de Título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Titular Paulo Roberto de Aguiar

**Bauru**

**2021**

A553m Andrade, Ana Carolina Balarin de  
Monitoramento e Processamento de Sinais no Processo a Laser de  
Cerâmicas Avançadas / Ana Carolina Balarin de Andrade. -- Bauru,  
2021  
86 f.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),  
Faculdade de Engenharia, Bauru  
Orientador: Paulo Roberto de Aguiar

1. Processamento digital de Sinais. 2. Processo de usinagem a laser.  
3. Cerâmicas Avançadas. 4. Monitoramento de Usinagem. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de  
Engenharia, Bauru. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.



# Agradecimentos

Expresso profunda gratidão, primeiramente, a Deus, pelo o dom da vida.

Aos meus pais, que não mediram esforços e ficaram sempre ao meu lado me apoiando, para que eu pudesse completar essa etapa.

Ao Diego, meu companheiro, que esteve presente comigo em todo esse processo, me animando e servindo de pilar nos momentos mais difíceis, além de compartilhar comigo os momentos bons.

A minha família, que mesmo distante me fizeram sentir acolhida.

Ao Professor Titular Paulo Roberto de Aguiar expresso minha gratidão pela confiança, em ter me orientado neste trabalho, pelas experiências e ensinamentos, que foram de grande valia para o desenvolvimento da pesquisa.

Ao Professor Dr. Thiago Valle França, agradeço pela disponibilização do Laboratório, agradeço também aos auxílios e contribuições nos ensaios.

Ao Professor Titular Eduardo Carlos Bianchi, expresso minha gratidão por ter feito parte da minha trajetória no meu ingresso ao programa de pós-graduação.

A CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela bolsa de estudos concedida. Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Aos meus amigos do curso de mestrado e colegas do laboratório LADAPS, pelo companheirismo, por todas as ajudas e contribuições que foram essenciais a este trabalho.

A Faculdade de Engenharia de Bauru – FEB, ao Departamento de Engenharia Mecânica, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, e aos funcionários da

Secção de Pós-Graduação, por todo o suporte.

Por fim, agradeço a todos que contribuíram diretamente ou indiretamente para esta etapa em minha vida.

ANDRADE, A.C.B., MONITORAMENTO E PROCESSAMENTO DE SINAIS NO PROCESSO A LASER DE CERÂMICAS AVANÇADAS, Bauru: Faculdade de Engenharia, UNESP - Universidade Estadual Paulista, 2021, 86 p., Dissertação (Mestrado).

**Palavras chave:** usinagem a laser; cerâmicas; transdutor piezoelétrico; monitoramento; processamento digital de sinais.

**Resumo** - Este trabalho propõe uma nova técnica de monitoramento na usinagem a laser de cerâmicas avançadas. As cerâmicas avançadas possuem dentre as suas principais propriedades mecânicas alta dureza e resistência, porém essas propriedades acabam dificultando a sua usinagem em métodos convencionais. Nesse sentido, a usinagem a laser é apresentada como uma alternativa aos métodos convencionais, além de permitir uma usinagem mais precisa. Assim sendo, são necessários sistemas de monitoramento em tempo real para otimizar a usinagem a laser em cerâmicas e este trabalho propõe um novo método para o monitoramento do processo de marcação a laser em uma peça de alumina usando um transdutor piezoelétrico de baixo custo e processamento digital de sinais. No decorrer do trabalho, foram realizados testes considerando variáveis que influenciam diretamente na usinagem a laser, como a potência e a velocidade de varredura do laser. Através dessas condições de usinagem, o transdutor piezoelétrico de baixo custo foi utilizado como sensor de emissão acústica, e os sinais provenientes das marcações a laser foram adquiridos a uma taxa de amostragem de 2MHz. O processamento digital foi realizado a partir destes sinais, e foram realizadas análises no domínio do tempo, com as estatísticas RMS e os cálculos do valor médio e desvio padrão; e análises no domínio da frequência utilizando a FFT, buscando as melhores bandas de frequência que melhor caracterizam o processo de marcação a laser. A caracterização mecânica foi feita por meio de ensaios utilizando microscópio digital, microscópio óptico e perfilômetro óptico, de modo a obter os valores das larguras e profundidades das ranhuras resultantes da

marcação a laser. Os resultados do processamento digital mostraram uma correlação bastante satisfatória com as condições de usinagem utilizadas, no qual os sinais apresentaram uma maior atividade acústica em marcações que ocorreram mais ablação e danos, enquanto que a atividade acústica foi menor em marcações com menos danos e ablação. Por meio dos resultados foi possível também demonstrar que há uma boa sensibilidade à atividade acústica do transdutor piezoelétrico de baixo custo, o que permite o seu uso com eficiência no monitoramento do processo de marcação a laser de alumina.



ANDRADE, A.C.B., MONITORING AND DIGITAL SIGNAL PROCESSING IN  
ADVANCED CERAMICS LASER PROCESS, Engineering College of Bauru, UNESP  
- São Paulo State University, 2021, 86 p., Dissertation (Master's degree).

**Keywords:** laser machining; ceramic; piezoelectric transducer; monitoring; digital signal processing.

**Abstract** - This work presents a new method of monitoring advanced ceramics in laser process machining. Advanced ceramics, due to their particular properties, are widely used in industry. However, the machining of ceramics by conventional methods is difficult due to its high level of hardness and brittleness. In this sense, laser machining emerges as an alternative to traditional methods, and in turn real-time monitoring systems are needed to optimize laser machining in ceramics. Thus, this work proposes a new technique for monitoring the laser grooving process of ceramic components using a low-cost piezoelectric transducer and digital signal processing. Tests were performed during the research, in which variables that directly influence laser machining were considered, such as laser power and scanning speed. Adopting the selected machining conditions, a low-cost piezoelectric transducer was used as an acoustic emission sensor and the signals from the laser grooving process were collected at a sampling rate of 2MHz. Time-domain and frequency domain analyses were performed, applying RMS statistics, the mean values and standard deviation, and the FFT, to find a frequency band that best correlates with the process conditions. The mechanical characterization was carried out through tests using a digital microscope, optical microscope, and optical profilometer to obtain the widths and depths values of the grooves resulting from laser grooving. The digital processing results present a satisfactory correlation between the signals and the machining conditions used, which showed higher acoustic activity in grooves with a higher material removal and damage, whereas grooves with minor damage and less laser ablation showed a lower acoustic activity. The results also showed that the low-

cost piezoelectric transducer was sensitive to the acoustic activity generated during the process, allowing the real-time monitoring of the laser grooving process in the alumina piece.

# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>13</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>18</b>
1.1 MOTIVAÇÃO . . . . .	18
1.2 OBJETIVO . . . . .	21
1.3 ESTRUTURA DO DOCUMENTO . . . . .	21
1.4 PUBLICAÇÕES OBTIDAS . . . . .	21
<b>2 REVISÃO DA LITERATURA</b>	<b>23</b>
2.1 MATERIAIS CERÂMICOS . . . . .	23
2.1.1 Propriedades mecânicas das cerâmicas . . . . .	25
2.1.2 Métodos de fabricação de cerâmicas . . . . .	26
2.2 USINAGEM DE CERÂMICAS AVANÇADAS . . . . .	28
2.2.1 Processo de Usinagem a Laser . . . . .	29
2.2.2 Aplicação do processo de usinagem a laser em cerâmicas avançadas	33
2.3 MONITORAMENTO E PROCESSAMENTO DE SINAIS NA USINA-	
GEM . . . . .	36
2.3.1 Monitoramento dos processos de usinagem a laser . . . . .	37
2.3.2 Transdutor Piezoelétrico de Baixo Custo . . . . .	39
2.3.3 Estudo dos Sinais provenientes do Monitoramento . . . . .	42
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>45</b>

3.1	PROCEDIMENTO DOS ENSAIOS . . . . .	45
3.2	ENSAIOS INICIAIS . . . . .	47
3.2.1	Banco de ensaios . . . . .	47
3.2.2	Procedimento experimental . . . . .	48
3.2.3	Avaliação superficial das marcações a laser . . . . .	49
3.2.4	Processamento digital dos sinais . . . . .	49
3.3	ENSAIOS FINAIS . . . . .	51
3.3.1	Banco de ensaios . . . . .	51
3.3.2	Calibração da posição focal ( <i>Spot Size</i> ) . . . . .	52
3.3.3	Procedimento experimental . . . . .	54
3.3.4	Avaliação superficial das marcações a laser . . . . .	55
3.3.5	Processamento digital dos sinais . . . . .	56
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>60</b>
4.1	ENSAIOS INICIAIS . . . . .	60
4.1.1	Resultados da avaliação superficial das marcações a laser . . . . .	60
4.1.2	Resultados do processamento digital dos sinais . . . . .	62
4.2	ENSAIOS FINAIS . . . . .	65
4.2.1	Resultados da calibração da posição focal ( <i>Spot Size</i> ) . . . . .	65
4.2.2	Resultados da avaliação superficial das marcações a laser . . . . .	67
4.2.3	Resultados do processamento digital dos sinais . . . . .	73
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>79</b>
	<b>REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>81</b>

# Lista de Figuras

2.1	Importantes relações na fabricação de cerâmicas. Fonte: adaptado de Rahaman (2003) . . . . .	27
2.2	Representação esquemática para processos (a) uni, (b) bi e (c) tridimensional de usinagem a laser. Fonte: adaptado de Chryssolouris, Sheng e Alvensleben (1991) . . . . .	30
2.3	Estrutura perovskita do tipo $ABO_3$ . Fonte: Uchino (2017) . . . . .	41
2.4	Estrutura de um transdutor piezoelétrico de baixo custo. Fonte: adaptado de Freitas e Baptista (2016) . . . . .	41
3.1	Representação do banco de ensaios utilizados nos ensaios experimentais. .	46
3.2	Dimensões dos corpos de prova em milímetros [mm] utilizados nos ensaios experimentais. . . . .	47
3.3	Banco de ensaios para os ensaios iniciais. . . . .	48
3.4	Diagrama esquemático do procedimento experimental para os ensaios iniciais. . . . .	49
3.5	Esquema das etapas do processamento digital de sinais dos ensaios iniciais.	50
3.6	Dispositivo de fixação do corpo de prova. . . . .	52
3.7	Banco de ensaios dos ensaios finais. . . . .	52
3.8	Diagrama esquemático do procedimento experimental para determinar a melhor posição focal. . . . .	53

3.9	Diagrama esquemático do procedimento experimental utilizado nos ensaios finais. . . . .	54
3.10	Esquema das etapas do processamento digital de sinais dos ensaios iniciais.	57
3.11	Regiões dos processos de marcações a laser dos sinais do PZT de baixo custo amostrados pelo oscilógrafo da (a) Condição 1, (b) Condição 2, (c) Condição 3, e (d) Condição 4. . . . .	58
4.1	Imagens geradas das ranhuras pelo microscópio digital para as velocidades de (a)3 mm/s; (b)6 mm/s; (c)12 mm/s; e (d)20 mm/s. . . . .	61
4.2	Valores médios das larguras das ranhuras e o desvio padrão. . . . .	61
4.3	Valores médios RMS e o desvio padrão para os sinais brutos. . . . .	63
4.4	Espectro de sinais puros do PZT no domínio da frequência e a banda de frequência selecionada. . . . .	64
4.5	Valores médios RMS e o desvio padrão para os sinais filtrados. . . . .	65
4.6	Resultados da calibração da posição focal. . . . .	66
4.7	Resultados da calibração da posição focal para o papel fotográfico adesivo.	67
4.8	Imagens geradas pelo microscópio óptico em negativo, com ampliação de 60x, da (a) condição 1, (b) da condição 2, (c) da condição 3, e (d) da condição 4. . . . .	68
4.9	Valores médios e desvio padrão das larguras das marcações a laser das condições de usinagem a laser. . . . .	69
4.10	Valores médios e desvio padrão das larguras da área afetada pelo calor do feixe do laser. . . . .	69
4.11	Imagem da marcação a laser para a condição 1 com ampliação de 60x, com a representação das larguras utilizadas nas medições. . . . .	70
4.12	Imagens tridimensionais geradas pelo perfilômetro óptico em negativo, com ampliação de 20x, da (a) condição 1, (b) da condição 2, (c) da condição 3, e (d) da condição 4. . . . .	71

4.13	Valores médios e desvio padrão das profundidades das marcações a laser das condições da usinagem a laser. . . . .	72
4.14	(a) Imagem bidimensionais gerada pelo perfilômetro óptico para a ranhura de condição 1 (Potência de 75W e Velocidade de 20 mm/s), e (b) Gráfico das profundidades da região . . . . .	72
4.15	Sinal bruto e sinal após a estatística RMS, adquirido pelo PZT de baixo custo para o ensaio da condição 2. . . . .	74
4.16	Valores médios RMS de cada condição de usinagem do sinal bruto. . . . .	74
4.17	Valores médios RMS de cada condição de usinagem do sinal filtrado. . . . .	75
4.18	Espectro de sinais puros do PZT no domínio da frequência e a banda de frequência selecionada. . . . .	76
4.19	Sinais sem filtro e filtrado na banda de frequência de 33 a 35 kHz, adquirido pelo PZT de baixo custo para o ensaio da condição 2. . . . .	76
4.20	Comparação entre os coeficientes $R^2$ para os valores médios normalizados do RMS para os sinais filtrados e não filtrados . . . . .	78

# Lista de Símbolos e Abreviações

$\alpha$ : Difusividade térmica

$\sigma$ : Desvio padrão

$\rho$ : Densidade

$B$ : Índice simples de Fragilidade

$C_p$ : Calor específico

$d$ : Espessura da peça

$DFT$ : Discrete Fourier Transform - Transformada Discreta de Fourier

$EA$ : Emissão Acústica

$EA_{RMS}$ : Valor de RMS de um sinal de emissão acústica

$FFT$ : Fast Fourier Transform - Transformada Rápida de Fourier

$H$ : Dureza relacionada a resistência à deformação

$KIc$ : Dureza relacionada a resistência a fratura

$k$ : Condutividade térmica

$N$ : Número de amostras discretas

$n$ : Tamanho da população

$P$ : Potência do laser incidente

$E_{volume}$ : Volume de energia

$A$ : Área do diâmetro do laser

$PZT$ : Cerâmica piezoelétrica de zirconato de titanato de chumbo

$RMS$ : Root mean square – Raiz do valor quadrático médio

$T$ : Temperatura



$T_i$ : Intervalo do tempo de integração

$t$ : Tempo

$V$ : Velocidade de varredura do laser

$w_k$ : Diâmetro do feixe do laser

$X_{normalizado}$ : valor normalizado

$x$ : Valor que será calculado

$x_{medio}$ : Média dos valores no intervalo  $n$

$x_i$ : Amostra na posição  $i$

$min_x$ : Valor mínimo de  $x$

$max_x$ : Valor máximo de  $x$

# Capítulo 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1 MOTIVAÇÃO

A história da cerâmica sempre esteve entrelaçada com a história humana, desde o seu primeiro uso durante a idade da pedra, na formação de vasos de argila, passando pelo uso de refratários na indústria siderúrgica, até na fabricação de fibras ópticas para comunicação em alta velocidade. Sendo assim, pode-se dizer que a cerâmica se manteve presente e participou da evolução da civilização humana de várias maneiras (GUO; LI; KOU, 2017). As cerâmicas avançadas ganharam importância nos últimos anos no setor industrial, e isto ocorreu devido as suas propriedades superiores em comparação com a maioria dos materiais (ROWE, 2013). Estabilidade térmica e química a altas temperaturas, alta resistência, alta dureza e baixo peso específico, são algumas destas propriedades que caracterizam as cerâmicas estruturais avançadas. Entretanto, as principais características dos materiais cerâmicos, como alta dureza e fragilidade, tornam a sua usinagem difícil pelos métodos convencionais (CALLISTER; RETHWISCH, 2020; DONG; SHIN, 2014).

As propriedades térmicas das cerâmicas, como baixa condutividade e difusidade térmica, as tornam adequadas para o processo de usinagem a laser (RAKSHIT; DAS, 2019; SAMANT; DAHOTRE, 2009). A usinagem a laser é um processo não-tradicional

térmico e sem contato, que é amplamente utilizado em várias áreas e aplicações industriais, tais como aeroespacial, eletrônica, automotiva e no setor civil (RADOVANOVIC; MADIC, 2011). Dentre as motivações para a escolha da usinagem a laser, estão a sua flexibilidade e o fator econômico (SAMANT; DAHOTRE, 2009).

O mecanismo de remoção de material na usinagem a laser consiste na focalização do feixe do laser na superfície da peça; desta forma, a energia é absorvida pelo material, levando ao seu aquecimento até a sua fusão, vaporização ou mudança de estado químico. Um fluxo de gás é utilizado para garantir que esse material seja removido. O aquecimento é feito de forma localizada, e pode ser controlado por meio das configurações ópticas do feixe do laser e pelos parâmetros relacionados ao processo (DONG; SHIN, 2014; DUBEY; YADAVA, 2008).

A maioria dos fenômenos que ocorrem durante o processo de marcação a laser podem ser comparados com os que atuam durante o corte a laser, exceto a evacuação do material derretido, que não pode fluir na parte traseira da peça ranhurada, como acontece em uma peça cortada (LALLEMAND *et al.*, 2000). Como se tratam de processos de usinagem a laser bidimensional, o feixe do laser se movimenta longitudinalmente na superfície da peça e a remoção de material ocorre durante o derretimento ou vaporização do material formando uma ranhura (do inglês *groove*) no processo de marcação a laser, ou um corte (do inglês *kerf*) no processo de corte a laser (SHENG; CHRYSOLOURIS, 1994).

Durante a usinagem a laser de materiais cerâmicos, devido a baixa condução térmica do material e altas temperaturas do processo, podem ocorrer estresses térmicos na peça usinada, que causam microfissuras ou trincas indesejadas, e variação das larguras da ranhura ou do corte, dependendo do processo a laser. Uma forma efetiva de evitar esses efeitos térmicos que podem ocorrer durante o processo, e então afetar a qualidade, é por meio do monitoramento da usinagem a laser (LI, 2010). O monitoramento proporciona informações valiosas sobre o processo e permite avaliar a qualidade superficial das peças usinadas e, então, controlar o processo através das escolhas dos parâmetros corretos de usinagem.

A emissão acústica (EA) no monitoramento de processos de usinagem é bastante eficaz para a identificação de danos e defeitos (LAURO *et al.*, 2014). A tecnologia de sensores piezoelétricos é apropriada para medir emissões acústicas, sendo assim, o monitoramento da EA em um processo de corte a laser, utilizando um sensor piezoelétrico em contato com a peça, permite controlar de maneira eficiente os danos decorrentes da usinagem. A atividade acústica se mostra superior quando há uma presença maior de danos e, conseqüentemente, tem-se uma qualidade de corte inferior (KEK; GRUM, 2009; TETI *et al.*, 2010).

Devido ao alto investimento necessário para sensores EA convencionais, alternativas com custos menores se tornam interessantes. Assim sendo, os transdutores piezoelétricos de baixo custo vem sendo utilizados em várias aplicações, dentre elas está o seu uso no monitoramento de processos de usinagem (RIBEIRO *et al.*, 2017). O seu uso como sensor na análise da qualidade superficial de materiais cerâmicos, durante o processo de retificação, apresentam resultados que possuem uma grande similaridade ao serem comparados com um sensor de EA convencional, o que tornam os transdutores piezoelétricos de baixo custo uma boa alternativa devido ao seu menor custo e também a sua fácil utilização (VIERA *et al.*, 2019).

Portanto, este trabalho propõe uma técnica de monitoramento no processo de marcação a laser em cerâmicas avançadas utilizando transdutores piezoelétricos de baixo custo. Por meio do processamento digital dos sinais obtidos pelo sensor PZT, busca-se a correlação com as características mecânicas dos danos causados a peça após a usinagem, através de análises no domínio do tempo e no domínio da frequência, utilizando as estatísticas RMS e FFT respectivamente. A aplicação de transdutores piezoelétricos de baixo custo no monitoramento do processo de usinagem laser não foi encontrado na literatura, tornando este trabalho uma abordagem nova e de grande importância para a indústria.

## 1.2 OBJETIVO

O objetivo geral deste trabalho é propor uma nova técnica de monitoramento no processo de marcação a laser em cerâmicas avançadas utilizando um transdutor piezoelétrico de baixo custo. Como as características geométricas afetam a qualidade superficial do processo de marcação a laser em materiais cerâmicos, esta pesquisa tem como objetivo específico monitorar os valores de largura de ranhura e a variação desses valores ao longo da região usinada, durante a marcação a laser de uma peça de alumina.

## 1.3 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

O presente trabalho foi estruturado em cinco capítulos. No primeiro capítulo é apresentada a introdução, onde são mostradas as motivações da pesquisa, assim como os objetivos buscados. O segundo capítulo apresenta a revisão da literatura utilizada como base teórica para a realização deste trabalho. O terceiro capítulo aborda a metodologia utilizada para os ensaios, com o detalhamento do banco de ensaios e como será realizada a análise dos dados. No quarto capítulo é feita a apresentação dos resultados e discussões dos ensaios realizados. No quinto e último capítulo, são apresentadas as conclusões obtidas e ideias para futuras pesquisas nesta área. Por fim, são apresentadas as referências bibliográficas consultadas e utilizadas para a construção da dissertação.

## 1.4 PUBLICAÇÕES OBTIDAS

- ANDRADE, A. C. B. de *et al.* Monitoramento do Processo de Corte a Laser de Cerâmicas Avançadas usando Diafragmas Piezoelétricos de Baixo Custo. nov. 2019, São Paulo: Editora Blucher, nov. 2019. p. 275–282. Disponível em: <<http://www.proceedings.blucher.com.br/article-details/33275>>.
- ANDRADE, A. C. B. de *et al.* Monitoring of the Ceramic Kerf During the Laser

Cutting Process through Piezoelectric Transducer. Proceedings, v. 42, n. 1, p. 44, 14 nov. 2019. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2504-3900/42/1/44>>.

# Capítulo 2

## REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo são apresentados os principais assuntos necessários para a fundamentação teórica do presente trabalho. São apresentadas literaturas publicadas sobre as cerâmicas avançadas e suas propriedades, sobre os processos de usinagem a laser e sobre o monitoramento de sinais na usinagem.

### 2.1 MATERIAIS CERÂMICOS

BARSOUM (2003) *apud* Callister e Rethwisch (2020) define cerâmica como sendo um composto sólido formado pela aplicação de calor, as vezes calor e pressão, constituído por ao menos dois elementos, desde que um deles seja um não-metal. O termo cerâmica vem da palavra grega *keramikos*, que significa material queimado, visto que as propriedades desejáveis destes materiais são normalmente alcançadas por meio de um processo térmico de alta temperatura, denominado queima ou sinterização (CALLISTER; RETHWISCH, 2018).

A maioria das cerâmicas são, geralmente, mais frágeis que materiais metálicos, e apresentam uma elevada dureza e alta resistência. As ligações atômicas que formam as cerâmicas são parcialmente covalentes e parcialmente iônicas, e, por se tratarem de ligações direcionais e fortes, demandam uma grande energia para serem rompidas, o que

explica a sua grande resistência mecânica. O deslizamento dos seus planos atômicos ocorre com mais dificuldade quando comparados com a maioria dos metais, resultando em uma baixa ductilidade (consequentemente uma maior fragilidade) ao ser submetido a uma carga. As principais propriedades das cerâmicas as tornam excelentes materiais para aplicações onde estarão expostas ao desgaste em temperatura ambiente e também em altas temperaturas (CALLISTER; RETHWISCH, 2020; CARTER; NORTON *et al.*, 2007).

As cerâmicas são geralmente classificadas de acordo com as suas propriedades e aplicações, sendo elas tradicionais ou avançadas. As cerâmicas tradicionais têm sido usadas a mais de 2500 anos, enquanto que as cerâmicas avançadas vêm sendo desenvolvidas desde 1970 aproximadamente. Segundo a Associação Brasileira de Cerâmica (ABC, 2016), as cerâmicas avançadas são materiais desenvolvidos a partir de matérias-primas sintéticas de altíssima pureza e por meio de processos rigorosamente controlados. As cerâmicas avançadas passaram a ser desenvolvidas a partir da necessidade de aplicações especiais, onde materiais como metais e polímeros não eram viáveis (TELLE, 1999).

As cerâmicas avançadas podem ser classificadas em categorias estruturais e funcionais. As cerâmicas estruturais avançadas são utilizadas para aplicações em que um componente de um sistema de engenharia está sujeito a altas cargas mecânicas, tribológicas, térmicas ou químicas. E as cerâmicas funcionais, em contraste com as estruturais, utilizam efeitos microestruturais localizados no seu volume, nos limites dos grãos ou nas superfícies da cerâmica. Tais efeitos abrangem propriedades semicondutoras, piezoelétricas, piroelétricas, ferroelétricas e supercondutoras. Existem também os materiais biocerâmicos, que possuem uma excepcional estabilidade estrutural em um ambiente corpóreo, que é altamente corrosivo, o que leva a sua aplicação em áreas como ortopédica, buco-maxilo-facial e odontológica (HEIMANN, 2010).

As cerâmicas estruturais comumente usadas são: zircônia ( $ZrO_2$ ), carboneto de boro ( $B_4C$ ), alumina ( $Al_2O_3$ ), carboneto de silício ( $SiC$ ), nitreto de silício ( $Si_3N_4$ ), berílio ( $BeO$ ), magnésia ( $MgO$ ), carboneto de titânio ( $TiC$ ), nitreto de titânio ( $TiN$ ), diboreto



de titânio ( $\text{TiB}_2$ ), nitreto de zircônio ( $\text{ZrN}$ ) e diboreto de zircônio ( $\text{ZrB}_2$ ) (SAMANT; DAHOTRE, 2009).

### 2.1.1 Propriedades mecânicas das cerâmicas

Os materiais cerâmicos ganharam grande importância nos últimos anos no setor industrial devido as suas propriedades, sendo a dureza e a fragilidade as principais propriedades mecânicas que caracterizam um material cerâmico. A dureza HV de uma cerâmica é superior a 1,000 Vickers, o que torna a sua usinagem mais difícil e com um custo mais elevado (HUANG; LIU, 2003; ZANOTTO; MIGLIORE, 1991).

A fragilidade também terá uma influência na sua usinagem, e requer uma atenção para evitar fraturas indesejadas. Fragilidade é uma medida que define o quanto um material é suscetível a deformação e a fratura, a equação 2.1 mostra o índice simples de fragilidade proposto por LAWN; MARSHALL (1979) *apud* Boccaccini (1997), que determina a relação ductilidade (deformação) *versus* fratura.

$$B = H/K_{IC} \quad (2.1)$$

onde H é a dureza que quantifica a resistência à deformação, e  $K_{IC}$  é a tenacidade à fratura. Os valores de B para aços são  $\approx 0,1 \mu_m^{-1/2}$ , enquanto que para vidros e cerâmicas, esse valor varia entre 3-9  $\mu_m^{-1/2}$ .

As propriedades da cerâmica podem ser divididas em: propriedades que são intrínsecas e as propriedades que dependem da sua microestrutura. As propriedades intrínsecas são aquelas que não sofrem mudanças quando ocorre uma modificação da microestrutura do material, como exemplo: o ponto de fusão, o módulo de elasticidade, o coeficiente de expansão térmica, entre outras. Já a resistência mecânica, a constante dielétrica e a condutividade elétrica são exemplos de propriedades que se modificam quando há uma alteração da microestrutura do material, sendo assim, estão totalmente relacionadas ao

processo de fabricação da cerâmica.

### 2.1.2 Métodos de fabricação de cerâmicas

As cerâmicas podem ser fabricadas por uma variedade de métodos, sendo alguns deles originados nos primórdios da civilização. A fabricação de cerâmica permite a combinação de diferentes materiais e microestruturas, de diferentes tamanhos e formas (RAHAMAN, 2003).

O processo de fabricação de componentes cerâmicos para aplicação mecânica normalmente é realizado na seguinte ordem: síntese de pó/matéria-prima, conformação no molde, sinterização e usinagem, para acabamentos superficiais. O processo de fabricação da cerâmica alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) é geralmente feito por meio de sinterização de pó de alumina em alta temperatura ( $> 1300^\circ\text{C}$ ) (FUJITA, 2007).

A sinterização é uma técnica de processamento para a produção de materiais e componentes de densidade controlada, e transforma pós em um corpo sólido por meio da aplicação de energia térmica/calor, sendo uma técnica muito conhecida no processamento de materiais cerâmicos. Quando a energia térmica é aplicada ao pó compactado, há uma junção das partículas sem que ocorra um derretimento delas, conseqüentemente há a densificação, diminuindo os poros (vazios) presentes, e tem-se um aumento nos tamanhos dos grãos (CARTER; NORTON *et al.*, 2007; KANG, 2004).

Durante a sinterização, uma série de transformações ocorrem na microestrutura da peça cerâmica, e irão influenciar nas propriedades que não são intrínsecas, ou seja, as propriedades características decorrentes da composição química do material. Como exemplo, após a sinterização, uma peça de alumina possuirá uma densidade maior (menor porosidade) e aumentará a sua resistência mecânica (KANG, 2004). A Figura 2.1 apresenta as relações mais importantes que envolvem a fabricação de cerâmicas.

Para aplicações de engenharia, há uma necessidade de peças de cerâmicas em dimensões com pequenas tolerâncias ou possuir uma geometria complexa, desta forma

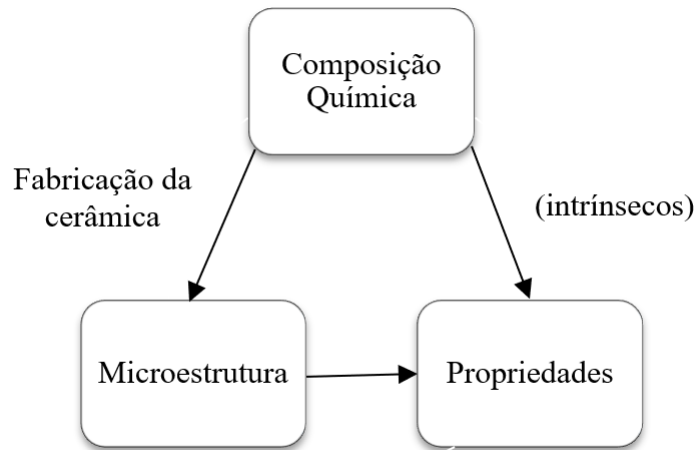


Figura 2.1: Importantes relações na fabricação de cerâmicas. Fonte: adaptado de Rahman (2003)

deve ser levado em consideração não apenas as propriedades do material, mas também a sua qualidade superficial e tensão residual. Na indústria eletrônica, os substratos de alumina representam cerca de 10 % do mercado geral de placas eletrônicas de circuitos impressos. Em muitos casos práticos, a alumina é o substrato preferido, pois sua robustez diante de choques mecânicos e térmicos oferece vantagens práticas para essas aplicações (MOORHOUSE *et al.*, 2005). As placas de cerâmica de alumina têm sido amplamente utilizadas como materiais de dispositivos eletrônicos devido as suas propriedades estáveis a temperatura elevada e resistência à corrosão, baixa condutividade e grande estabilidade mecânica (FUJITA, 2007; BARNES; MORGAN; SKEEN, 2003; PABIER; LENSCH, 1987). Os materiais cerâmicos vêm sendo utilizados em vários campos industriais e sua aplicação em peças de precisão também vem aumentando. Entretanto, dificilmente consegue-se uma alta precisão dimensional e boa qualidade de superfície (essenciais para peças de precisão) apenas por meio do processo convencional de formação e sinterização, sendo necessário processos de acabamento. Processos abrasivos, como retificação e polimento com abrasivos de diamante, geralmente são adotados para acabamento de precisão de cerâmicas (SREEJITH; NGOI, 2001).

## 2.2 USINAGEM DE CERÂMICAS AVANÇADAS

A resistência a altas temperaturas, maior resistência ao desgaste, elevada dureza, baixa condutividade térmica e elétrica, e estabilidade química são fatores característicos na maior parte das cerâmicas. Muitas destas características que fazem a cerâmica tão atrativa também dificultam a sua fabricação por métodos tradicionais de usinagem. Após a sinterização das peças cerâmicas, são utilizados alguns processos de usinagem para garantir a qualidade final e a sua precisão geométrica. A retificação se tornou o principal processo de usinagem quando se tratam de materiais cerâmicos (JAHANMIR, 1998; TSUTSUMI; OKANO; SUTO, 1993).

Entretanto, as cerâmicas são susceptíveis a formação de microfissuras superficiais durante o processo de retificação devido a sua baixa tenacidade à fratura, sendo o modo frágil seu principal mecanismo de remoção de material. Desta forma, há uma necessidade que ocorra uma transição de mecanismo de remoção de frágil para dúctil (KUMAR; MELKOTE; LAHOTI, 2011).

A principal característica do modo dúctil é a ausência de trincas residuais na peça e pode ocorrer durante a retificação. Se o calor gerado na interface peça/rebolo, pelo processo de retificação, for consideravelmente alto, a ductilidade do material aumenta e o mecanismo de remoção predominante pode ser de fratura dúctil (KITAJIMA *et al.*, 1992).

Embora a retificação convencional utilizando rebolo diamantado satisfaça os requisitos de precisão e acabamento superficial, ainda há uma importante questão a ser resolvida: o alto custo de usinagem, que representa cerca de 60 a 90 % do custo total do produto final. Há também uma demanda por métodos de processamento de cerâmicas com maiores taxas de remoção de material, mais redução de desgaste da ferramenta, e a constante busca de aumento da qualidade da superfície das peças (CHANG; KUO, 2007).

## 2.2.1 Processo de Usinagem a Laser

O laser é um dispositivo que gera ou amplifica luz, sendo seu nome uma sigla que significa luz amplificada por emissão estimulada de radiação (*Light Amplified by Stimulated Emission of Radiation*). Os lasers são amplamente utilizados na indústria como ferramentas de usinagem devido a precisão de operação, processamento localizado, baixo custo e alta velocidade de operação (YILBAS, 1997).

A usinagem a laser oferece vantagens consideráveis em relação aos métodos de usinagem convencionais. Algumas dessas vantagens incluem o contato não mecânico entre a ferramenta de corte e a peça de trabalho, precisão de operação, tratamento local e baixo custo. No entanto, a usinagem a laser envolve o processamento a alta temperatura, que, por sua vez, resulta em gradientes de altas temperaturas ao longo do corte, ao mesmo tempo em que causa a formação de um campo de alta tensão na seção de corte (DONG; SHIN, 2014).

O processo de remoção de material do corte a laser consiste em um feixe de alta intensidade de luz concentrado na superfície da peça por meio de uma lente. Ao ser atingido pelo feixe de laser, o material absorve os fótons da luz do feixe, convertendo a energia em calor. O material é aquecido a uma temperatura superior à sua temperatura de fusão e, após ser derretido, é facilmente removido com um gás auxiliar, que age coaxialmente com o feixe de laser. Esta área de material removido é movida conforme há a movimentação do bocal do laser, seguindo uma geometria previamente selecionada (CARISTAN, 2004; POWELL, 1993; WANG; LUO, 2018).

A remoção de material ocorre por meio da fusão ou da vaporização do material da peça, e quando o material derretido não é totalmente ejetado para fora da peça, ele passa por uma ressolidificação e é denominado como escória. Para formar uma ranhura, o feixe de laser penetra a peça parcialmente e a remoção de material ocorre até atingir uma profundidade específica. Para a formação de um corte, a remoção de material ocorre por toda a espessura da peça de trabalho. Esse processo de remoção

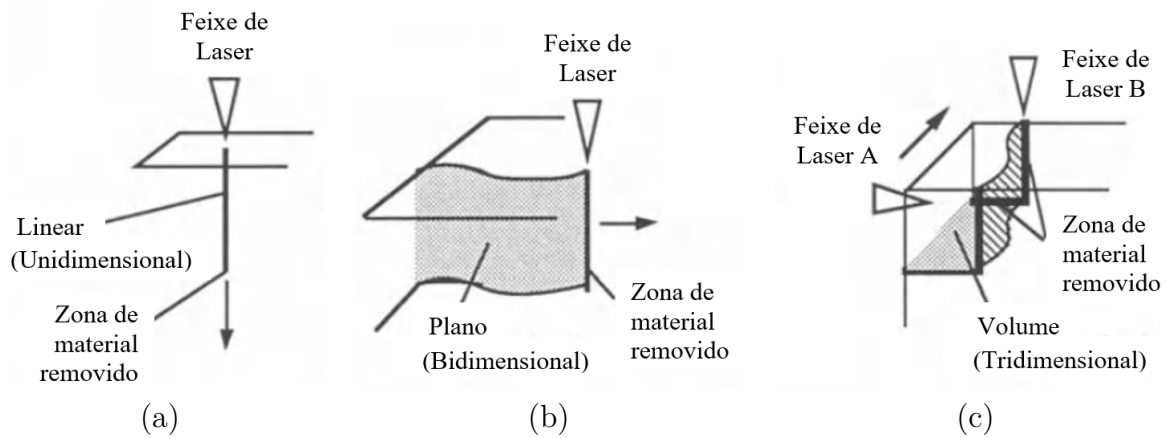


Figura 2.2: Representação esquemática para processos (a) uni, (b) bi e (c) tridimensional de usinagem a laser. Fonte: adaptado de Chryssolouris, Sheng e Alvensleben (1991)

de material com a ajuda de um laser como fonte de energia é chamado de ablação a laser. Os mecanismos de ablação são influenciados pela energia do fóton do laser. Lasers que possuem comprimentos de onda mais curtos, oferecem fótons com energias mais altas para quebra de ligações e processos decorrentes da remoção de material (CHRYSSOLOURIS; SHENG; ALVENSLEBEN, 1991).

A usinagem a laser é uma ferramenta bastante flexível, permitindo alterar o processo por meio da alteração dos parâmetros. Pode ser dividida em processos unidimensional, bidimensional e tridimensional, de acordo com a forma que ocorre a interação do feixe do laser com o material que será usinado (Figura 2.2). No processo unidimensional tem-se a furação, no qual o feixe de laser se mantém estacionário em relação a peça e a zona de material removido é linear. No processo bidimensional, é possível realizar operações de corte e marcação/gravação, de forma que o feixe de laser é movimentado longitudinalmente, e com isso tem-se uma superfície bidimensional usinada. Enquanto que, no processo tridimensional, dois ou mais feixes de lasers são utilizados e um volume do material é removido (CHRYSSOLOURIS; SHENG; ALVENSLEBEN, 1991).

Os processos de corte e marcação a laser são processos térmicos, sendo assim, as propriedades térmicas dos materiais, e não as propriedades mecânicas, definem a sua usinabilidade. As propriedades térmicas das cerâmicas, como baixa condutividade e di-

fusividade térmica, as tornam adequadas para usinagem a laser (SAMANT; DAHOTRE, 2009).

Um dos fenômenos mais importantes em um processo a laser é a absorção da radiação do laser. A radiação do laser é composta essencialmente por ondas eletromagnéticas, desta forma, a absorção da luz pode ser explicada pela interação da radiação eletromagnética com os elétrons do material. A energia do laser absorvida pelo material durante a interação laser/material é convertida em calor, seguido por vários processos de transferência de calor, como condução para o material, convecção e radiação da superfície, sendo que o processo de transferência de calor mais significativo é a condução de calor no material (DAHOTRE; HARIMKAR, 2008).

A condução de calor na cerâmica é governada pela lei apresentada pela Equação 2.2:

$$\frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} = \alpha(T) \left[ \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial z^2} \right] \quad (2.2)$$

onde o T é o campo de temperatura, t é o tempo e x, y e z são as direções espaciais. O termo  $\alpha(T)$  é a difusividade térmica dependente da temperatura do material, dada por  $k(T) / \rho C_p(T)$ , onde  $\rho$  é a densidade da cerâmica,  $C_p(T)$  é o calor específico dependente da temperatura, e  $k(T)$  é a condutividade térmica da cerâmica (SAMANT, 2009).

Durante a marcação e o corte a laser, vários parâmetros do processo devem ser levados em consideração, tendo em vista que irão influenciar na qualidade final do produto, sendo alguns deles a potência do laser, a velocidade de varredura do laser e o diâmetro do feixe (USLAN, 2005; STOURNARAS *et al.*, 2009).

De acordo com Son e Lee (2020), o volume de energia é um importante parâmetro para o processo de usinagem a laser, e é usado para entender a interação entre o laser e o material usinado. O volume de energia ( $E_{volume}$ ) representa o laser irradiado por unidade de volume, e pode ser calculado pela Equação 2.3.

$$E_{volume} = \frac{P_{laser}}{VA} \left[ \frac{J}{mm^3} \right] \quad (2.3)$$

onde  $P_{laser}$  é a potência do laser [W],  $V$  é a velocidade de varredura do laser [mm/s], e  $A$  é a área do feixe de laser na superfície a ser usinada [mm<sup>2</sup>].

Yilbas (1997) demonstra que para obter uma mesma profundidade de corte no processo de corte a laser de CO<sub>2</sub>, mantendo as mesmas condições da velocidade do gás auxiliar, ao aumentar a potência do laser, deve ser aumentada a velocidade do laser. A velocidade com que o feixe atravessa a superfície do material e a potência do laser estão relacionadas com o tempo de interação entre o feixe de laser e a superfície do material. Para velocidades menores tem-se um tempo de contato maior do laser com o material, o que causa uma maior exposição e uma absorção de energia mais pronunciada. Enquanto que, para velocidades maiores, a absorção de calor e a condução será menor (FENOUGHTY; JAWAID; PASHBY, 1994; WEE; CROUSE; LI, 2008).

O diâmetro do feixe do laser na superfície da peça está diretamente relacionado com a posição focal do laser. A posição focal é um parâmetro determinado pela distância da lente do bocal até a superfície da peça, tendo efeito na largura do corte ou ranhura. Até certo ponto, quanto menor for esta distância focal, menor será o diâmetro do feixe de laser na superfície da peça, o que resulta em uma largura de corte menor e mais precisa. Entretanto, quando a distância focal começa a ficar muito pequena, há um aumento da concentração de calor na superfície da peça devido a um aumento de energia concentrada no ponto, o que aumenta o diâmetro do feixe de laser (CAO *et al.*, 2017; RAKSHIT; DAS, 2019).

A relação empírica entre potência do laser incidente na peça ( $P$ ), velocidade de varredura ( $V$ ), espessura da peça ( $d$ ) e o diâmetro do feixe do laser ( $w_k$ ), pode ser escrita como mostra a Equação 2.4:



$$P = Bw_k^{0.001}d^{0.21}V^{0.16} \quad (2.4)$$

sendo que  $B$  irá variar de acordo com o material da peça, podendo ser aço, cerâmica, vidro, plástico, entre outros (DAVIM, 2013).

Em qualquer processo de usinagem a laser, há uma preocupação com relação a taxa de remoção de material, a precisão dimensional e a qualidade superficial. A qualidade superficial pode ser relacionada à medição da zona afetada pelo calor. Durante o corte ou marcação a laser de materiais com baixa condutividade térmica, a presença de gradientes de altas temperaturas ocorrem e geram estresse térmico na peça. Em decorrência, ocorre a presença de micro-fissuras indesejadas e, conseqüentemente, terá variação dos valores de largura da ranhura ou do corte ao longo da área usinada, o que irá comprometer a qualidade final; sendo assim, há a necessidade de controlar o processo afim de evitar esses efeitos térmicos (LI, 2010). No processo de marcação a laser, a taxa de remoção de material pode ser relacionada diretamente à profundidade da ranhura. A qualidade pode ser associada as características dimensionais, como a largura da ranhura e a variação das larguras de ranhura. A precisão dimensional depende, em grande parte, da precisão do sistema de posicionamento da peça e da forma da superfície da ranhura (CHRYSSOLOURIS; SHENG; ALVENSLEBEN, 1991; DUBEY; YADAVA, 2008; SHARMA; YADAVA, 2018).

### **2.2.2 Aplicação do processo de usinagem a laser em cerâmicas avançadas**

As operações bidimensionais de corte, marcação e gravação a laser, encontraram aplicações em puncionamento, corte e marcação de metais, cerâmicas e plásticos em virtude de sua alta taxa de remoção de material e flexibilidade geométrica (SHENG; CHRYSSOLOURIS, 1994).

A usinagem a laser de cerâmicas é amplamente utilizada na indústria de microeletrônica para gravação e perfuração, visto que os processos convencionais de corte e furação não são capazes de acompanhar o desenvolvimento dos requisitos necessários para fabricação de dispositivos microeletrônicos (KUAR *et al.*, 2008).

Uma das aplicações da marcação a laser em cerâmicas é a realização de ranhuras ou linhas de furos, totalmente penetrantes ou não, que serão suficientes para enfraquecer a estrutura da peça, para que esta possa ser quebrada mecanicamente sem fraturas indesejadas (SCHAAF, 2010).

Zheng *et al.* (2017) analisaram a aplicação da usinagem a laser para criar texturas na superfície da peça, conhecido como LST (*Laser surface texturing*), e como afeta a adesão de um revestimento de níquel em um substrato de alumina, em relação a profundidade da textura, de forma a garantir um revestimento contínuo e uniforme na superfície, propondo uma substituição do tratamento tradicionalmente químico.

A LAM (*Laser-assisted machining*) se trata de uma alternativa inovadora de usinagem de cerâmica que vem sendo desenvolvida nas últimas décadas. É definido como um processo de usinagem a quente que combina a tecnologia do laser com o método de usinagem tradicional. O material é pré-aquecido pelo laser enquanto é usinado por processos convencionais. O pré-aquecimento reduz a resistência à tração, dureza e endurecimento do material de trabalho, o que permite a deformação na cerâmica no modo dúctil, reduzindo a energia de processamento mecânico na ferramenta e melhora as taxas de remoção de material. Idealmente, apenas a zona de corte do material é rapidamente aquecida, a uma temperatura desejável, e a maior parte da energia térmica é eliminada através dos cavacos (JEON; LEE, 2012; KANNAN *et al.*, 2014; ZHANG *et al.*, 2014).

Uma das limitações da LAM é trabalhar com a ferramenta de corte em temperaturas altas, então uma nova tecnologia de usinagem híbrida foi desenvolvida por Guerrini *et al.* (2018), capaz de induzir trincas em um volume definido de material através de um tratamento a laser antes da usinagem convencional. Por meio de usinagem a laser, são realizadas trincas de forma controlada na superfície da peça. A geração destas trincas

facilita a remoção de material em uma posterior retificação, pois reduz a resistência mecânica da peça, o que a torna muito interessante para usinagem de materiais duros como as cerâmicas avançadas.

## 2.3 MONITORAMENTO E PROCESSAMENTO DE SINAIS NA USINAGEM

Processos de usinagem são amplamente utilizados na fabricação de peças e componentes que requerem grande acurácia e/ou grande qualidade superficial de acabamento. O monitoramento do processo é de particular importância quando uma pequena alteração nos parâmetros do processo pode significar uma considerável perda de qualidade. Sendo assim, o monitoramento e controle desses processos podem representar economia e praticidade, pois ajudam a detectar desgaste em ferramentas, rugosidade superficial, e anomalias que podem ocorrer durante a usinagem e causar desperdícios, danos e outros fatores prejudiciais (LAURO *et al.*, 2014). Outro ponto interessante a ser levado em consideração é o desenvolvimento da automação dos processos de fabricação, que depende da eficácia e, conseqüentemente, do controle do processo, buscando informações relevantes às condições do processo de usinagem (LIANG; HECKER; LANDERS, 2004).

As técnicas de medição para o monitoramento de processos de usinagem são tradicionalmente categorizadas em duas abordagens, direta ou indireta. Na abordagem direta, tem-se uma mensuração real dos fenômenos durante os processos de usinagem. Como exemplos de medição direta temos o uso de câmeras para inspeção visual, isótopos radioativos, raios laser e resistência elétrica. Muitos métodos diretos podem ser usados apenas como técnicas de laboratório devido as limitações práticas causadas por problemas de acesso durante a usinagem, iluminação e uso de fluido de corte. Através das abordagens de medição indireta, podem ser medidas quantidades auxiliares, onde a mensuração dos fenômenos é deduzida por meio de correlações empiricamente determinadas. Os métodos indiretos são menos precisos que os diretos, mas também são menos complexos e mais adequados para aplicações práticas. Em contraste com a detecção tradicional das condições da ferramenta, a abordagem é que os processos de usinagem estão sendo monitorados continuamente por meio de dispositivos sensores para quantificar o desempenho do processo ou fornecer informações para otimização do processo

usando sensores (TETI *et al.*, 2010).

### 2.3.1 Monitoramento dos processos de usinagem a laser

As técnicas de usinagens designadas como não-tradicionais, refere-se a um grupo de processos que tem sua maioria caracterizada pelo método de remoção de material baseado em fenômenos físicos e químicos. No caso da usinagem a laser, trata-se de um processo térmico onde a remoção de material ocorre com o derretimento e evaporação do material (KRUTH, 1994).

A usinagem a laser requer uma remoção controlada de material, com vaporização dentro de uma dimensão estreita e com um menor aquecimento da periferia da peça (menor zona afetada termicamente). O processo pode ser estendido para corte, furação, gravação, marcação ou limpeza a laser, visto que em todos esses processos, a remoção de material sem danificar a peça é um desafio (SCHAAF, 2010). Durante o processo de corte a laser em cerâmicas, há a formação de uma região afetada por calor com uma tendência a induzir rachaduras. Uma vez que os níveis de tensão térmica atingem valores críticos, a formação de fissuras ao longo do corte se torna inevitável, o que pode limitar as aplicações das cerâmicas em peças usinadas se não forem bem controladas (SAMANT; DAHOTRE, 2009; YILBAS; AKHTAR; KARATAS, 2014).

O monitoramento dos processos de usinagem a laser não é fácil, uma vez que é quase impossível medir *on-line* de forma direta o processo (ou seja, saídas do processo como produtividade, qualidade da superfície ou sub-superfície como rugosidade, ausência de marcas de queima, etc.). Portanto, as saídas pretendidas deverão ser avaliadas monitorando outras variáveis de saída dependentes do processo, geralmente chamadas de sinais de detecção, com sensores apropriados para medir esses sinais intrínsecos do processo (KRUTH *et al.*, 2007).

Segundo Lauro *et al.* (2014), um dos métodos de monitoramento de usinagem mais precisos para identificar danos é por meio da emissão acústica (EA). A EA é definida

como a classe de fenômenos, onde ondas elásticas transitórias são geradas pela liberação rápida de energia armazenada em um material (RUBIO; TETI; BACIU, 2006). Quando há uma falta de homogeneidade na estrutura do material sob carga, a resposta ao campo de tensão desse material é alterada induzindo uma queda de tensão local nesse campo. Esta queda de tensão atua como um centro de radiação para as ondas elásticas que se propagam por toda a estrutura, e são detectadas por um transdutor e registradas como um sinal de emissão acústica (ASHBY; BULLOUGH; HARTLEY, 2017).

Técnicas de EA são amplamente investigadas para monitorar e caracterizar os processos de usinagem a laser. A origem das emissões acústicas observadas em um processo a laser são provenientes da geração de plasma e vapor, e também devido a reflexão do feixe de laser (LI, 2002). Sabendo que as ondas acústicas podem ser induzidas dentro da peça pela transformação de fases, os sinais provenientes desse tipo de emissão acústica são normalmente monitorados por meio de um transdutor piezoelétrico fixado na peça (LI; STEEN, 1992).

Chryssolouris, Sheng e Alvensleben (1991) discutem um conceito de controle de usinagem a laser, utilizando um sensor acústico para inferir geometria de furos, cortes e ranhuras em tempo real. O sensor detecta o sinal acústico emitido pelo impacto do jato de gás na frente da erosão, e apresentam correlações entre a frequência ressonante e a geometria da área usinada.

A ablação a laser de uma fina película de cromo em um substrato de vidro foi investigada por Liu, Toncich e Harvey (2004), com base em observações da morfologia da superfície e na análise de emissões acústicas. As características (por exemplo, RMS, energia, variância) extraídas dos sinais apresentam correlação com o mecanismo de ablação do filme Cr e com o dano do substrato de vidro. Portanto, a emissão acústica pode ser usada como uma ferramenta de diagnóstico *on-line* para calibrar o processo.

Kek e Grum (2009) apresentam o monitoramento da qualidade do processo de corte a laser em metais, utilizando emissão acústica por meio de um sensor piezoelétrico com contato na peça. Os resultados mostram que quanto maiores forem os danos do corte, há

uma maior ocorrência de atividade acústica, e tem-se uma qualidade de corte inferior.

A aplicabilidade de um sistema de monitoramento acústico para o processo de perfuração a laser foi investigado por Stournaras *et al.* (2009). A correlação entre a saída do sensor acústico e as características geométricas dos furos foram avaliadas. Foi demonstrado que os sinais acústicos, adquiridos durante o processo de perfuração a laser, contêm informações sobre o processo (à medida que os furos apresentavam uma profundidade maior, as amplitudes dos sinais também aumentavam) e podem ser utilizados para fins de monitoramento do processo.

Wasmer *et al.* (2018) propõem o monitoramento em tempo real do processo de soldagem a laser em uma peça de liga de alumínio-magnésio, combinando sensores de emissão acústica e aprendizado de máquinas (do inglês *machining learning*). Foi utilizada radiografia de alta velocidade para correlacionar os sinais de EA com os eventos reais de processamento, e a precisão dos resultados variou de 74 a 95, demonstrando uma abordagem inovadora e realmente promissora.

Kacaras *et al.* (2019) caracterizaram a EA emitida no processo de ablação com laser de pulsos ultra-curtos, medida por um sensor piezoelétrico adaptado para uma peça AISI 4140, e correlacionou os sinais com a posição focal e os resultados da topografia de superfície. Devido a forte relação, os resultados mostram que é possível detectar a posição focal de forma indireta através do valor médio de várias intensidades de sinais de EA, como exemplo, para posições focais menores houve uma ablação maior e uma maior emissão acústica.

### **2.3.2 Transdutor Piezoelétrico de Baixo Custo**

Piezoelasticidade vem da palavra “piezo”, que significa pressão em grego, e seu significado original quer dizer “eletricidade por pressão”. Os irmãos Pierre e Jacques Curie descobriram o efeito piezoelétrico em um único cristal de quartzo em 1880, onde, sobre pressão, o quartzo gerou uma carga elétrica. A piezoelasticidade descreve o fenômeno

de geração de uma carga elétrica em uma substância, na qual é proporcional a um estresse mecânico aplicado e, inversamente, uma mudança dimensional proporcional a um campo elétrico aplicado. Um requisito essencial para a interação piezoelétrica é que certos eixos do material possuam polaridade. Após a sinterização, a cerâmica é isotrópica e não-piezoelétrica por causa da orientação aleatória dos dipolos elétricos de cada grão, para se tornar piezoelétrica, a cerâmica passa por um processo de polarização que consiste na aplicação de um campo elétrico alto em uma direção escolhida para mudar os eixos polares dos grãos para esta direção. Após tirar o campo elétrico, os dipolos não conseguem voltar a sua posição original com facilidade, desta forma a cerâmica permanecerá polarizada e, conseqüentemente, com propriedades piezoelétricas (GALLEGO-JUAREZ, 1989; YANG, 2006).

O zirconato de titanato de chumbo (PZT) é a cerâmica piezoelétrica mais comum devido suas excelentes propriedades. O PZT é uma solução sólida de zirconato de chumbo ( $\text{PbZrO}_3$ ) e titanato de chumbo ( $\text{PbTiO}_3$ ), e possui uma estrutura cristalina de perovskita, o que explica as suas excelentes propriedades como materiais em campos dielétricos, piezoelétricos, semicondutores ou supercondutores. A estrutura perovskita  $\text{ABO}_3$  do PZT é mostrada na Figura 2.3. No caso do PZT, o A é preenchido por íons de Pb (chumbo) e o B é preenchido aleatoriamente por íons de Zr (zircônio) ou Ti (titânio)(UCHINO, 2017).

Sensores piezoelétricos são particularmente adequados para medir emissões acústicas em monitoramento do processo de usinagem (TETI *et al.*, 2010). O funcionamento de um transdutor acústico piezoelétrico durante o processo de usinagem ocorre da seguinte forma: o cristal piezoelétrico é deformado por ondas acústicas provenientes dos fenômenos da usinagem, e uma voltagem piezoelétrica proporcional é induzida, sendo esta que será captada pelo sensor (REGTIEN, 2012).

Os transdutor piezoelétricos de baixo custo, mais conhecidos como “*buzzer*”, são geralmente empregados em dispositivos de sinalização de áudio devido a sua estrutura simples. A estrutura do transdutor piezoelétricos de baixo custo é mostrada na Figura



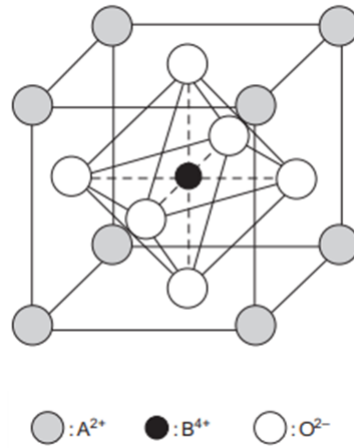


Figura 2.3: Estrutura perovskita do tipo  $ABO_3$ . Fonte: Uchino (2017)

2.4. Consiste em um disco de cerâmica piezoelétrica disposta em uma placa de latão, e a cerâmica é revestida com uma fina película metálica, geralmente prata, que serve como eletrodo. Sua aplicação como sensor o torna muito atraente, tendo em vista sua facilidade de obtenção e o baixo custo, permitindo obter sinais com várias informações do processo que estará monitorando (FREITAS; BAPTISTA, 2016).

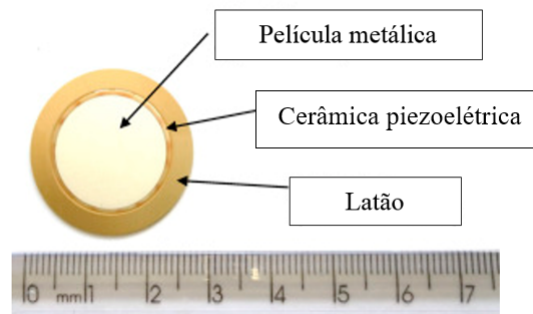


Figura 2.4: Estrutura de um transdutor piezoelétrico de baixo custo. Fonte: adaptado de Freitas e Baptista (2016)

O uso de transdutores piezoelétricos de baixo custo é relatado em muitas pesquisas com várias aplicações, mas seu uso no monitoramento de usinagem é relativamente novo. Ribeiro *et al.* (2017) propõem a utilização do transdutor de baixo custo no monitoramento do processo de retificação de um aço SAE 1045. Os valores de rugosidade aumentam à medida que a condição de retificação fica mais severa, sendo assim, os

valores médios de RMS, quando os sinais são filtrados em uma banda de frequência, apresentam um comportamento que se correlaciona com a caracterização mecânica da peça. Os resultados do transdutor foram comparados com um sensor de emissão acústica convencional, demonstrando sua eficácia no monitoramento de queima na retificação de aços, podendo ser estendido para outros materiais.

Viera *et al.* (2019) apresentam uma técnica de monitoramento da integridade superficial na retificação de materiais cerâmicos utilizando o transdutor piezoelétrico de baixo custo. Os resultados mostram que o aumento da atividade acústica proveniente do transdutor é proporcional com o aumento da rugosidade superficial, e apresenta o mesmo comportamento ao ser comparada a um sensor EA convencional. Com isso, é possível demonstrar a confiabilidade dessa abordagem inovadora de monitoramento com o uso de transdutores piezoelétricos de baixo custo.

### **2.3.3 Estudo dos Sinais provenientes do Monitoramento**

Sabe-se que a EA possibilita detectar a maioria dos fenômenos de usinagem, como: quebra do cavaco, atrito entre peça/ferramenta, tensão residual, deformação plástica, temperatura de mudança de fase, e outros. Entretanto, uma aquisição de dados e processamentos de sinais significativos se fazem necessários (TETI *et al.*, 2010). O processamento digital dos sinais tem como finalidade analisar as informações contidas nos sinais e relacioná-las com os fenômenos durante o processo de usinagem. Para isto, são utilizados algoritmos e técnicas de processamento dos sinais.

#### **Valor Médio Quadrático (RMS)**

Como os sinais obtidos pelos sensores acústicos trazem informações do processo, a utilização da estatística do valor médio quadrático é muito satisfatória para pesquisas sobre usinagem. O valor médio quadrático (RMS) do sinal de emissão acústica é um dos parâmetros mais utilizados para o monitoramento de sinais de processos de usinagem.

Para um tempo  $t$ , o valor de RMS de um sinal puro de emissão acústica pode ser expresso pela Equação 2.5

$$EA_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T_i} \int_{t-T_i}^t EA^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N EA^2(i)} \quad (2.5)$$

onde  $EA$  é o sinal puro de emissão acústica,  $T_i$  é o intervalo do tempo de integração, e  $N$  é o número de amostras discretas consideradas no cálculo (AGUIAR *et al.*, 2006).

### Média e Desvio padrão

A média e o desvio padrão são respectivamente empregados para a determinação do valor médio e da dispersão de um sinal. Todas essas características são resumidas pelos momentos da distribuição ou derivadas. A média é calculada a partir da Equação 2.6.

$$x_{m\u00e9dio} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (2.6)$$

onde,  $x_{m\u00e9dio}$  é a média dos valores no intervalo  $n$ ,  $x_i$  é o valor da amostra na posição  $i$  e  $n$  é o tamanho da população.

O desvio padrão é comumente usado para indicar a variação em um conjunto de amostras. O desvio padrão de uma população de valores é definido pela Equação 2.7.

$$\sigma = \sqrt{\frac{(x_i - x_{m\u00e9dio})^2}{n}} \quad (2.7)$$

onde,  $\sigma$  é o valor do desvio padrão,  $x_i$  é o valor da amostra na posição  $i$ ,  $x_{m\u00e9dio}$  é o valor médio da população, e  $n$  é o tamanho da população (MORETTIN, 2010).

## Transformada Rápida de Fourier (FFT)

Quando um sinal é analisado no domínio do tempo, as vezes não é possível obter certas informações que são de grande importância. Então, para ter uma melhor compreensão, utiliza-se uma técnica de processamento de sinais que analisa o espectro de frequência dos sinais. Um dos métodos utilizados na análise em frequência do sinal é a Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform*), conhecida como FFT. A FFT é uma implementação simplificada e altamente otimizada da Transformada Discreta de Fourier (*Discrete Fourier Transform*). A Transformada discreta de Fourier (DFT) é uma transformação que necessita de uma sequência de dados amostrados (um sinal) e calcula o conteúdo de frequência dessa sequência de dados. Isto dará a representação do sinal no domínio da frequência, ao contrário da representação familiar do domínio do tempo (PARKER, 2017).

# Capítulo 3

## MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são descritos os equipamentos e materiais empregados nos ensaios. Também são descritos os parâmetros utilizados durante o monitoramento do processo de marcação a laser e o processamento digital dos sinais. Os ensaios iniciais deste trabalho foram realizados na empresa FAROL Pesquisa, Desenvolvimento e Consultoria, em Bauru, SP, e os ensaios finais foram realizados no Laboratório de CNC, do departamento de Engenharia Mecânica da UNESP - Bauru, SP.

### 3.1 PROCEDIMENTO DOS ENSAIOS

Para os ensaios experimentais da técnica proposta de monitoramento no processo de usinagem a laser, foi projetado um banco de ensaios, sendo utilizado o mesmo procedimento para os ensaios iniciais e finais. A Figura 3.1 apresenta uma representação esquemática dos bancos de ensaios.

O trabalho propõe uma nova técnica de monitoramento de usinagem a laser bidimensional em materiais cerâmicos, sendo assim, ensaios experimentais foram realizados para verificar a viabilidade do método proposto, através do processo de marcação a laser.

Durante os ensaios experimentais, foram utilizados como corpos de prova peças de alumina, com as dimensões representadas na Figura 3.2. A composição química da

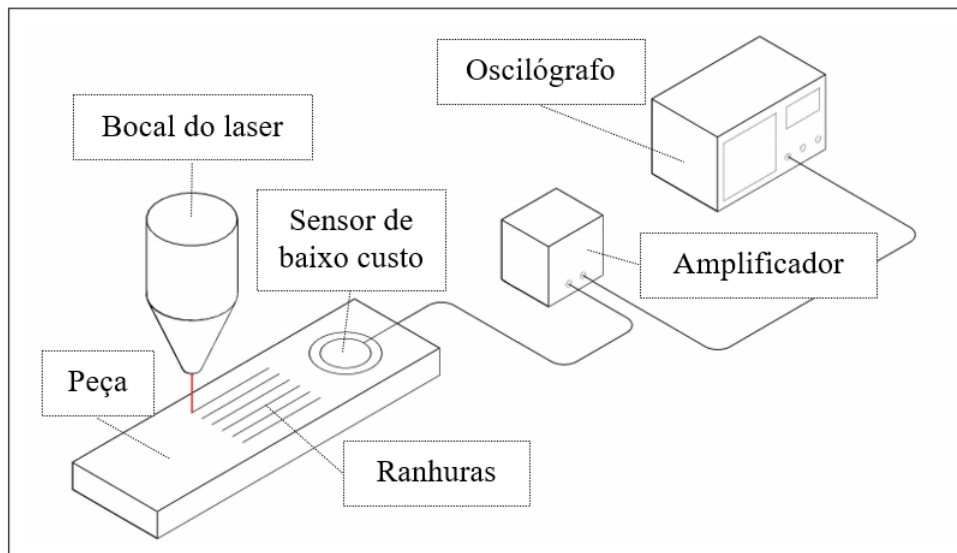


Figura 3.1: Representação do banco de ensaios utilizados nos ensaios experimentais.

alumina é composta de 96 de óxido de alumínio e 4 de outros óxidos, com microdureza Vickers de  $1339 \pm 47$  HV1 (Norma JIS R1610-1991).

Um transdutor piezoelétrico de baixo custo, modelo 7BB-20-6 da empresa Murata Electronics North America, foi utilizado como sensor de atividade acústica nos ensaios. A escolha do modelo dos transdutores foi feita a partir de um estudo de Freitas e Baptista (2016), no qual foram comparados quatro transdutores de diferentes tamanhos da empresa Murata, com os diâmetros externos de 12 a 35 mm, e o modelo de diâmetro de 20 mm apresentou uma maior sensibilidade em seu uso como sensor.

Os sinais puros foram amostrados por um oscilógrafo, modelo DL850 da empresa Yokogawa, com uma frequência de amostragem de 2MHz. Condicionadores de sinais foram utilizados para amplificar os sinais de tensão coletados pelo oscilógrafo. Após a aquisição dos sinais, o processamento dos mesmos foi feito em um computador por meio do software Matlab®.

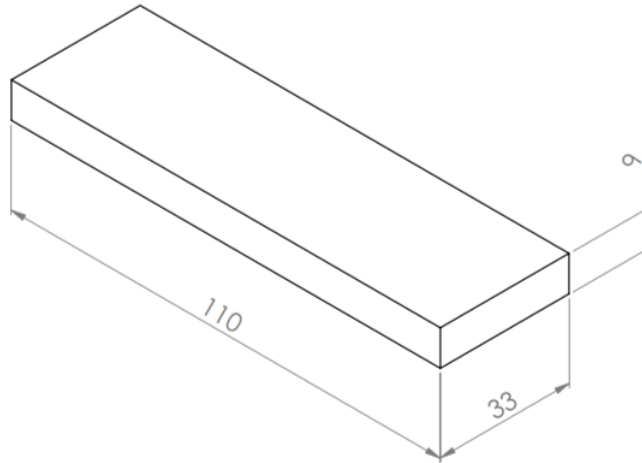


Figura 3.2: Dimensões dos corpos de prova em milímetros [mm] utilizados nos ensaios experimentais.

## 3.2 ENSAIOS INICIAIS

A seguir encontra-se o detalhamento dos ensaios experimentais, que foram realizados com o intuito de coletar os primeiros resultados da técnica de monitoramento proposta. Foi analisado a influência da velocidade de varredura do laser no processo de marcação a laser, usando condições de usinagem mais severas com velocidades menores, e com condição de usinagem mais brandas com velocidades maiores.

### 3.2.1 Banco de ensaios

Nos ensaios iniciais, o banco de ensaios foi montado conforme a Figura 3.1. Para estes ensaios foi utilizada uma máquina de modelo CNC Router A12060, da empresa JDR com um laser acoplado feito de semicondutor, com comprimento de onda de 450nm, distância focal de 18mm, e Potência com pulso de 15W e média de 8W. O condicionador de sinais utilizado é um amplificador de tensão em modo diferencial, com ganho de 25 V/V.

A Figura 3.3 apresenta o banco de ensaios utilizado nos ensaios experimentais.

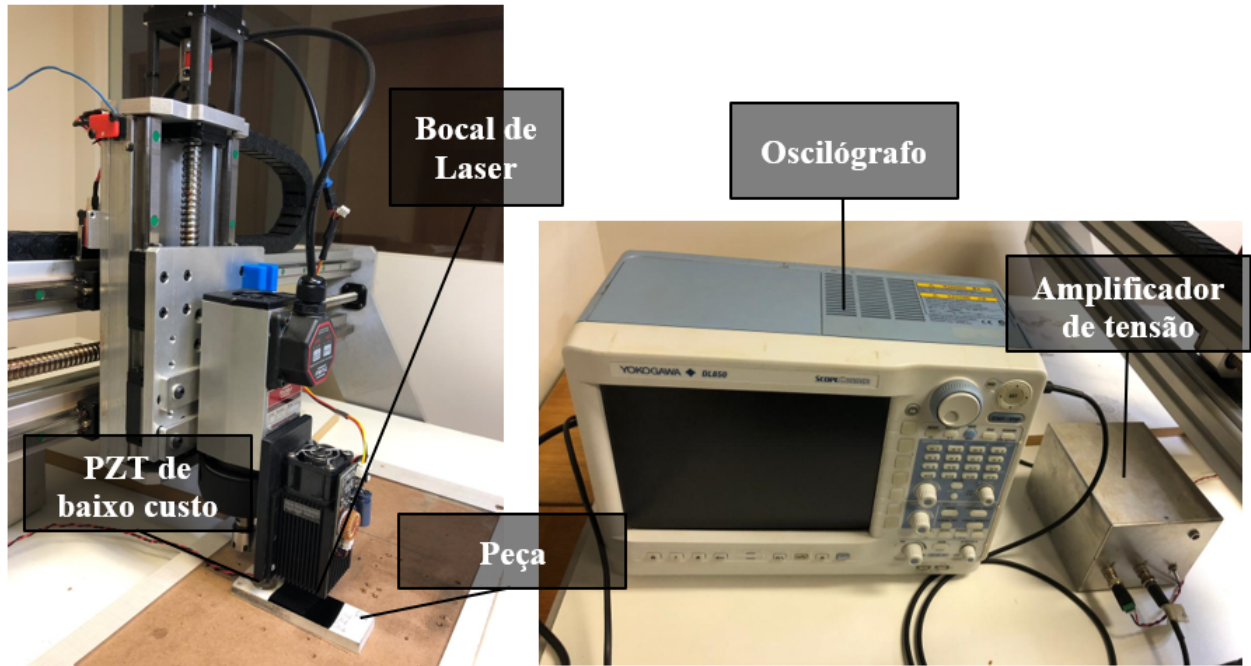


Figura 3.3: Banco de ensaios para os ensaios iniciais.

### 3.2.2 Procedimento experimental

O diagrama esquemático do procedimento experimental utilizado nos ensaios é mostrado na Figura 3.4.

Durante os ensaios, foram realizadas oito marcações a laser com 30 mm de comprimento no corpo de prova. A cada duas marcações, a velocidade de varredura do laser variava enquanto os outros parâmetros do processo não se alteravam. Foi utilizada a potência máxima da máquina a laser de 15W e as velocidades utilizadas foram de 3 mm/s, 6 mm/s, 12 mm/s e 20 mm/s. A peça de alumina possui uma coloração branca, e após testes iniciais com a potência utilizada, verificou-se a necessidade de pintar a superfície da peça com um pincel marcador permanente, da marca Faber Castell® na cor preta, para evitar as reflexões indesejadas, garantindo assim uma efetiva absorção da energia do laser durante o processo.



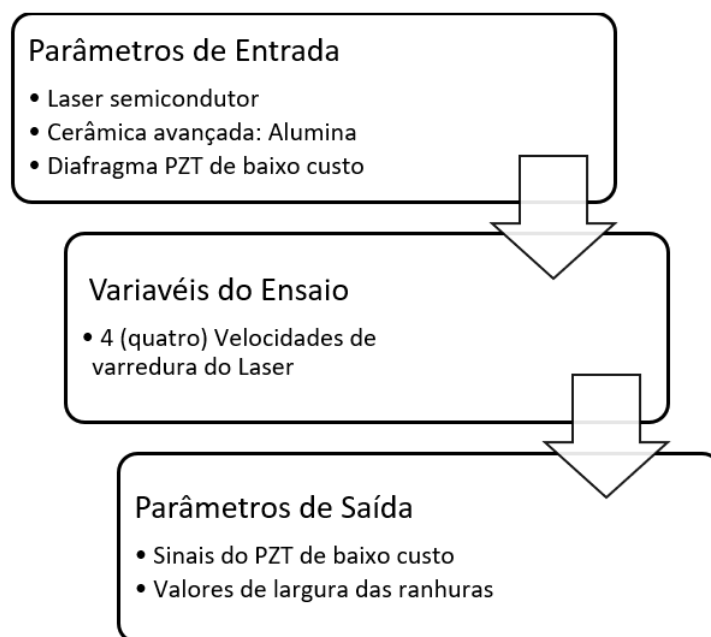


Figura 3.4: Diagrama esquemático do procedimento experimental para os ensaios iniciais.

### 3.2.3 Avaliação superficial das marcações a laser

Após as marcações a laser no corpo de prova, foi feita a avaliação superficial por meio de um microscópio digital da marca Inskam, de 30W e 1000x, para analisar o processo de ablação gerado pelo laser. Para isso, foram medidas as larguras das ranhuras. Primeiramente, foi efetuada a limpeza da tinta do pincel marcador, utilizando uma solução a base de acetona, para facilitar a leitura do microscópio digital. Para cada marcação foi gerada uma imagem digital, e foram selecionados seis pontos equidistantes para medir a largura da ranhura através do software do microscópio digital. Também foi feita a avaliação da variação dos valores de largura ao longo da ranhura. Com os resultados das medidas, foram calculadas a média e o desvio padrão das marcações para cada velocidade utilizada.

### 3.2.4 Processamento digital dos sinais

Os sinais puros foram coletados durante o processo de marcação a laser no corpo de prova. O processamento dos sinais foi realizado digitalmente no software Matlab®, e

seguiu as etapas conforme a Figura 3.5 para cada velocidade utilizada nos ensaios.

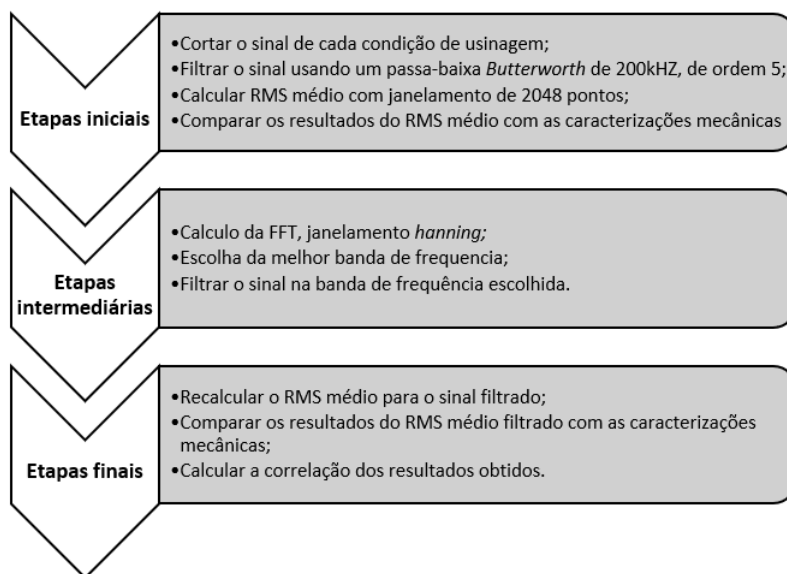


Figura 3.5: Esquema das etapas do processamento digital de sinais dos ensaios iniciais.

Freitas e Baptista (2016) avaliaram a sensibilidade a danos do transdutor piezoelétrico de baixo custo de 20 mm de diâmetro externo, e os resultados apresentam uma maior sensibilidade do sensor na faixa de frequência até 250 kHz. Desta forma, primeiramente, os sinais puros do PZT foram filtrados, com um filtro digital do tipo passa baixo a 200 kHz, *Butterworth*, de ordem 5.

Em seguida, os sinais foram divididos em janelas de 2048 pontos, representando intervalos de aproximadamente 1 ms, janela de tempo conhecida e conforme recomendado por WEBSTER *et. al.* (1996). Foi calculado o valor de RMS para cada intervalo, e então calculou-se o valor médio de RMS e o desvio padrão para cada condição de velocidade.

Um estudo dos espectros dos sinais no domínio da frequência foi realizado com o cálculo da FFT, com janela de *Hanning* em blocos de 2048 amostras. Buscou-se identificar bandas de frequência que apresentam uma menor sobreposição dos espectros entre todas as condições testadas e com comportamento acústico que se correlaciona com os resultados da avaliação superficial das ranhuras. Desta forma, dentre as faixas de frequências, foi escolhida aquela que apresentava um comportamento de diminuição da

atividade acústica à medida que a velocidade de varredura do laser aumentava. Após a seleção da melhor banda de frequência, um filtro digital do tipo passa-banda, sendo a frequência de corte a banda selecionada, *Butterworth* de ordem 5, foi aplicado nos sinais puros, e o cálculo do RMS foi feito para o sinal filtrado.

### 3.3 ENSAIOS FINAIS

Neste tópico, encontra-se o detalhamento dos ensaios experimentais finais, que foram realizados com o intuito de coletar mais resultados da técnica de monitoramento proposta. Foi analisado a influência da velocidade de varredura do laser e da potência no processo de marcação a laser, usando condições de usinagem mais severas com velocidades menores, e com condição de usinagem mais brandas com velocidades maiores.

#### 3.3.1 Banco de ensaios

A mesma configuração do banco de ensaios foi usada para os ensaios finais, conforme Figura 3.1. Para estes ensaios foi utilizada uma máquina de modelo L-560 da empresa ECNC com tubo de laser de CO<sub>2</sub>, da marca Puri modelo PRR100W, com potência máxima de 100W, e um comprimento de onda de 10,6 $\mu$ m. O processo de refrigeração do laser é realizado utilizando água, na temperatura entre 10-35°C. Nos ensaios finais, o condicionador de sinais usado é o amplificador de carga, cujo ganho é de  $V/Q$ , ou seja, converte a entrada de carga  $Q$  [C] em tensão. O seu circuito emprega um capacitor de realimentação com valor de 100 pF, logo, sua tensão de saída é dada por  $Q/100$  pF. Por causa da incompatibilidade das condições geométricas da máquina a laser e do corpo de prova, houve a necessidade de construir um dispositivo de fixação, projetado de forma que o corpo de prova permanecesse fixo e imóvel durante todos os ensaios. A Figura 3.6 apresenta o dispositivo de fixação do corpo de prova. A Figura 3.7 apresenta o banco de ensaios utilizado nos ensaios experimentais finais.

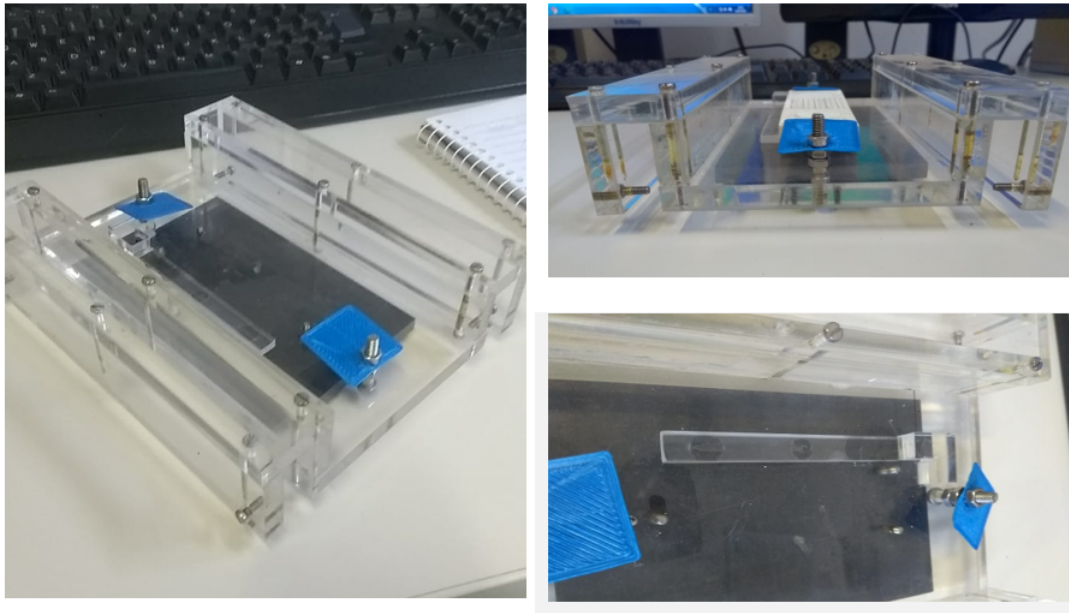


Figura 3.6: Dispositivo de fixação do corpo de prova.

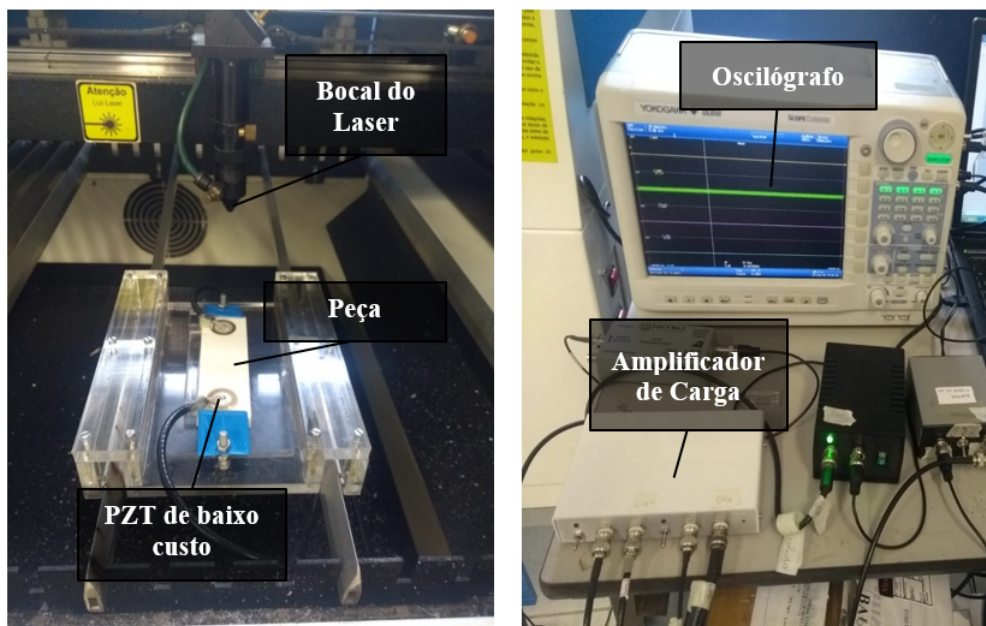


Figura 3.7: Banco de ensaios dos ensaios finais.

### 3.3.2 Calibração da posição focal (*Spot Size*)

No processo de usinagem a laser, há uma necessidade de encontrar o menor diâmetro do feixe de laser na superfície da peça, pois desta forma tem-se um feixe mais focalizado

e uma zona afetada pelo calor mais estreita. Sendo assim, foram realizados ensaios para determinar a melhor posição focal do laser.

A calibração foi realizada na máquina a laser que será utilizada nos ensaios finais. A Figura 3.8 apresenta o diagrama esquemático do procedimento experimental para encontrar a melhor posição focal.

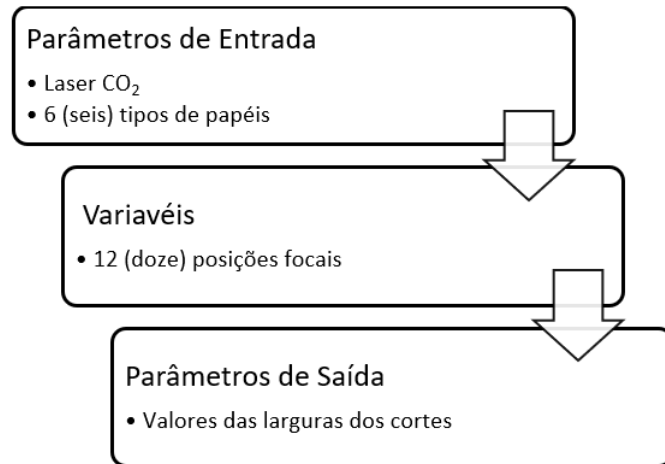


Figura 3.8: Diagrama esquemático do procedimento experimental para determinar a melhor posição focal.

Foram utilizados seis tipos de papéis para serem cortados na máquina a laser, buscando obter uma variedade de informações, sendo eles: papel sulfite A4; papel fotográfico comum; papel fotográfico adesivo; papel tipo cartolina; papel de nota fiscal; e papel tipo *contact*.

Para serem cortados, os papéis foram colados em uma peça de metal para evitar movimentações durante o corte. As distâncias focais analisadas foram: 1.5 mm, 2.5 mm, 3.5 mm, 5 mm, 6 mm, 7 mm, 8 mm, 9 mm, 10 mm, 11 mm, 12 mm e 13 mm. Para cada distância focal e tipo de papel foram feitos dois cortes de 10 mm de comprimento.

Os parâmetros de usinagem utilizados foram os disponibilizados pelo fabricante para cortes em papel. Sendo estes, potência de 34W e velocidade de 50 mm/s, e se mantiveram constantes em todos os cortes enquanto mudava-se a distância focal.

Para determinar a melhor distância focal, foram medidos os valores de largura dos

cortes em todos os papéis. Para avaliar as larguras dos cortes foi utilizado um microscópio digital da marca Inskam, de 30W e 1000x. Foram geradas imagens digitais e, a partir do software do microscópio, foram medidas as larguras dos cortes. Para medir as larguras foram selecionados dois pontos equidistantes em cada corte, totalizando quatro pontos para cada papel e distância focal. A partir destas medidas de largura de corte, foi calculado o valor médio para cada distância focal e papel. Os resultados foram plotados em um gráfico gerado pelo Excel.

### 3.3.3 Procedimento experimental

O diagrama esquemático do procedimento experimental utilizado nos ensaios finais é mostrado na Figura 3.9.

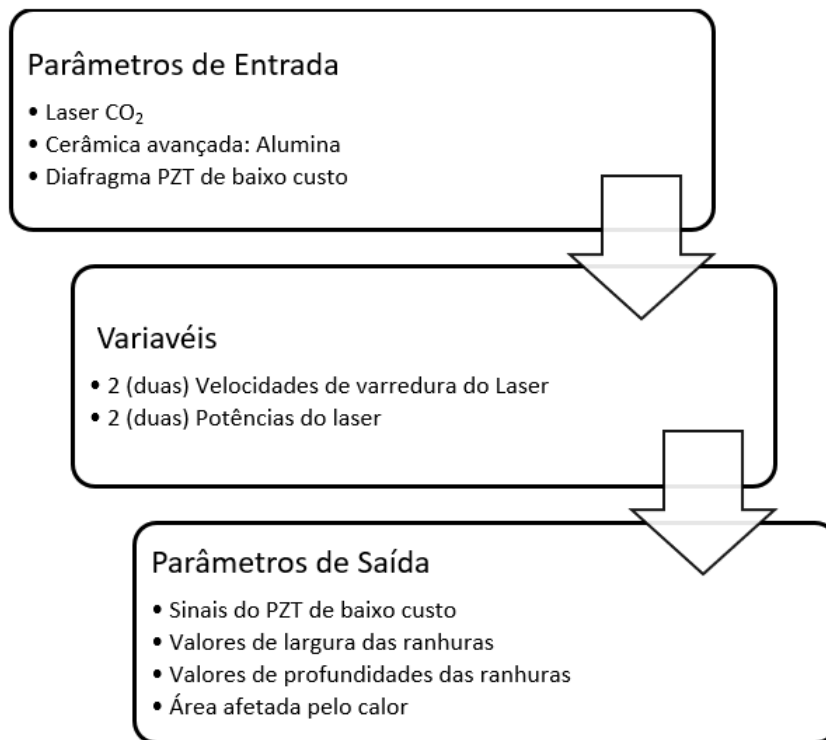


Figura 3.9: Diagrama esquemático do procedimento experimental utilizado nos ensaios finais.

Marcações a laser foram realizadas no corpo de prova de alumina. Cada marcação possui uma condição de usinagem com uma potência e velocidade de varredura do laser

Tabela 3.1: Parâmetros utilizados para cada condição de usinagem.

Condições de Usinagem	Volume de energia [J/mm <sup>3</sup> ]	Área do feixe de laser [mm]	Parâmetros de usinagem	
			Potência [W]	Velocidade de varredura do laser [mm/s]
1	0,099	37,87	75,0	20,0
2	0,125	37,87	95,0	20,0
3	0,247	37,87	75,0	8,0
4	0,313	37,87	95,0	8,0

diferente, conforme mostra a Tabela 3.1. Os valores de volume de energia foram calculados a partir da Equação 2.3. O feixe do laser manteve-se constante e o valor de A foi calculado utilizando os resultados obtidos pelo ensaio de calibração do diâmetro do feixe do laser na superfície da peça.

As condições de usinagens foram escolhidas de modo a obter uma condição mais severa (Condição 4), com uma maior potência e menor velocidade, apresentando um valor de volume de energia maior; e uma condição mais branda, com uma menor potência e maior velocidade (Condição 1), e, conseqüentemente, com um volume de energia menor. Também foram escolhidas condições intermediárias (Condição 2 e 3).

### 3.3.4 Avaliação superficial das marcações a laser

Para determinar a qualidade geométrica superficial das marcações a laser na alumina, utilizou-se um microscópio óptico da marca Biotika, modelo L60T Este- reomicroscópio Profissional Trinocular LED. Para cada marcação, serão feitas imagens digitais com ampliação de 20x, 40x, 60x e 100x, sendo que as ampliações são produzidas a partir da associação de uma lente fixa, com uma lente interna e com uma lente ajustada.

Por meio do programa Biotika Capture, versão 2.0.4.1, arquivos de imagens no formato .tif foram gerados e, a partir dessas imagens, os valores de larguras da ranhura foram medidos. Para cada condição foram obtidos 30 valores, utilizando o software Matlab para fazer as medições. Cada imagem possui uma reta de referência equivalente a 1 mm, que será utilizada na medição, permitindo a conversão dos valores de pixels para milímetros. O valor médio da largura da ranhura e o desvio padrão, serão calculado

para cada marcação a laser.

Por meio destas imagens geradas na microscopia, também foram medidas as larguras da área que foi afetada pelo calor do feixe de laser durante o processo de marcação a laser. O procedimento de medição será realizado similarmente com o procedimento de medição das larguras das ranhuras.

Como forma de dimensionar a quantidade de remoção de material que cada marcação a laser obteve, e assim classificar a severidade da usinagem, um perfilômetro óptico, da marca Veeco e modelo Wyko NT1100, foi utilizado para medir dos valores de profundidade das ranhuras. A ampliação utilizada foi selecionada de acordo com o tamanho das larguras das ranhuras, sendo utilizada uma ampliação de 10x, obtida a partir da associação de uma lente objetiva de 20x e uma lente multiplicadora de 0.5x. O princípio de medição do perfilômetro ocorre da seguinte forma: uma superfície de referência é selecionada e esta irá receber uma certa quantidade de luz, se outros pontos estiverem numa posição abaixo ou acima da referência, terá uma diferença na intensidade luminosa captada pelo perfilômetro.

Por meio do software Vision 4.2, foram obtidos 30 valores de profundidade para cada condição de usinagem. Por fim, o valor médio de profundidade e o desvio padrão foram calculados para cada marcação a laser.

### **3.3.5 Processamento digital dos sinais**

O processamento dos sinais do PZT de baixo custo foi realizado conforme a Figura 3.10.

O primeiro passo necessário do processamento dos sinais do processo de marcação a laser é cortar os sinais. O tempo total dos sinais amostrados pelo oscilógrafo foram de 10 segundos (equivalente a um total de 19922944 amostras); porém, para o processamento dos sinais, buscou-se trabalhar apenas com amostras que representam o processo em si. Para isto, calculou-se o tempo de duração de cada condição de usinagem. Como a



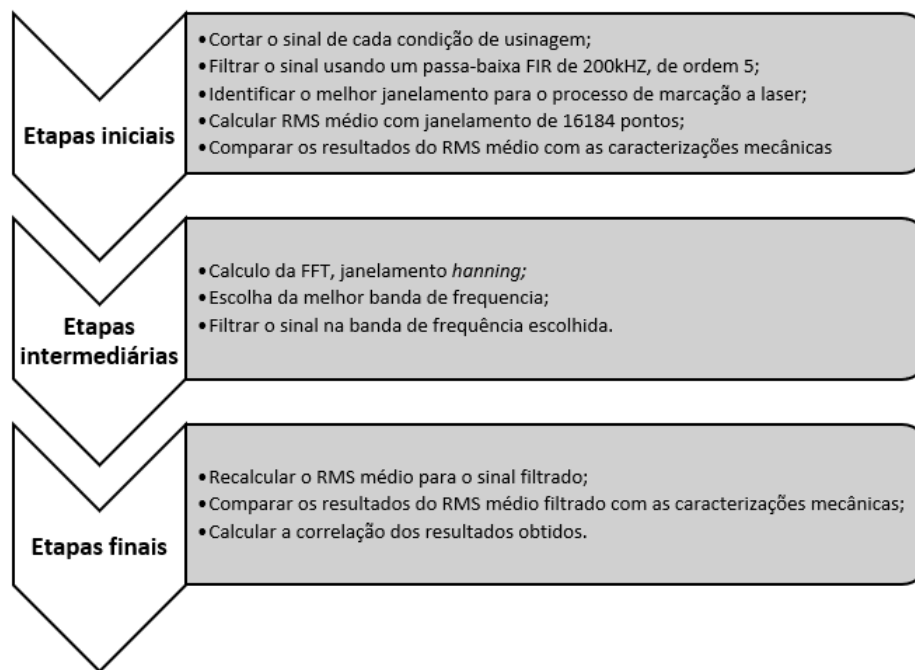


Figura 3.10: Esquema das etapas do processamento digital de sinais dos ensaios iniciais.

velocidade de varredura do laser é um parâmetro que está diretamente relacionado com o tempo, e as marcações a laser possuem um comprimento de 30 mm, temos que para as condições com velocidade de 8 mm/s o tempo de usinagem foi de 3,75 segundos (equivalente a 7471104 amostras) e para as condições com velocidade de 20 mm/s o tempo de usinagem foi de 1,5 segundos (equivalente a 2988442 amostras). Para cortar o sinal, os pontos que representam a região do processo de marcação a laser foram selecionados manualmente. A Figura 3.11 apresenta as regiões cortadas dos sinais coletados pelo oscilógrafo.

Com o sinal cortado, ou seja, apenas com as amostras do processo de marcação a laser, conforme explicado na seção 3.2.4, também utilizou-se um filtro inicial tipo passa-baixa.

Webster, Dong e Lindsay (1996) propõem uma janela de 2048 pontos para a análise de sinais de emissão acústica no processo de retificação, sendo assim, buscou-se realizar um estudo visando um janelamento que permitisse a melhor análise para o processo de marcação a laser. De forma empírica, foram testadas janelas entre 1024 a 32368 amos-

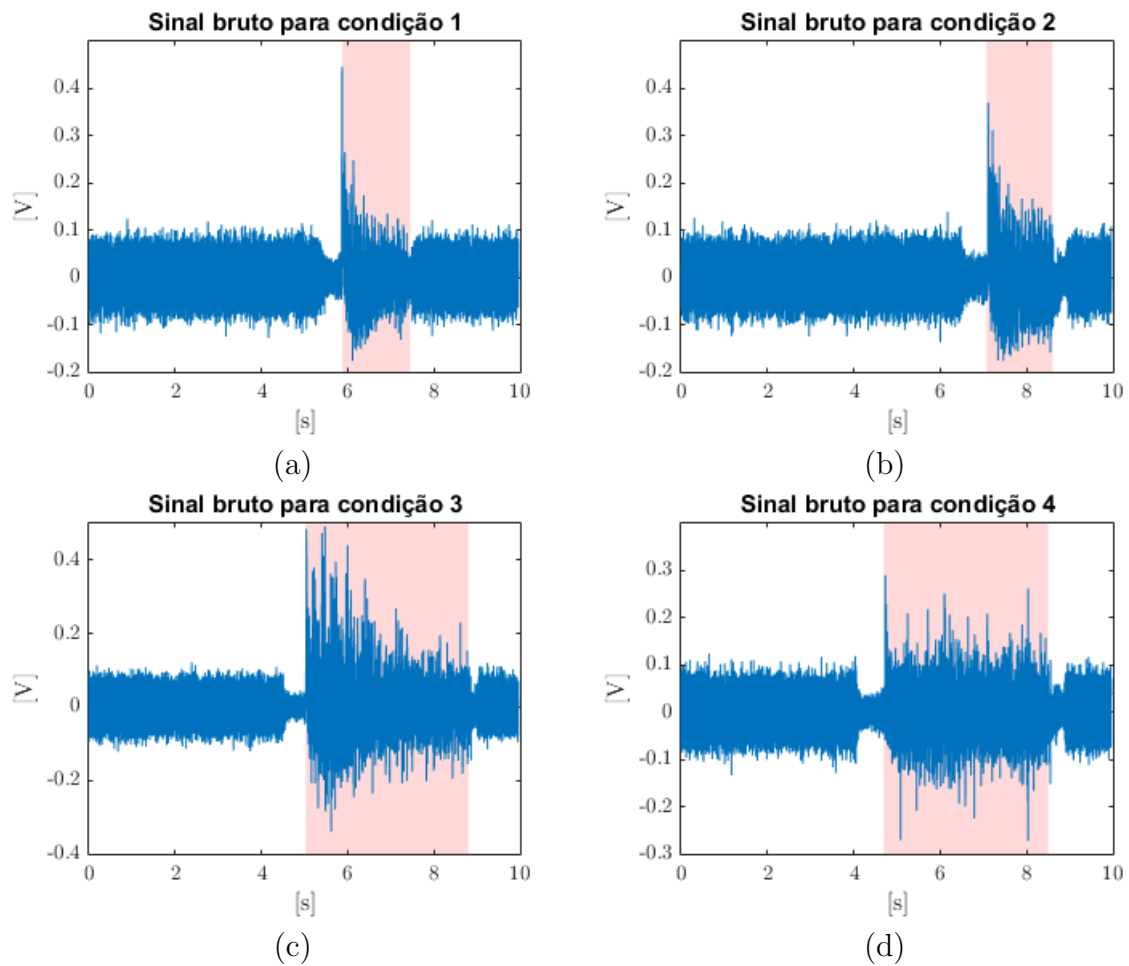


Figura 3.11: Regiões dos processos de marcações a laser dos sinais do PZT de baixo custo amostrados pelo oscilógrafo da (a) Condição 1, (b) Condição 2, (c) Condição 3, e (d) Condição 4.

tras, e obteve-se que o janelamento de 16184 amostras, equivalente a 8.1ms, apresentou os melhores resultados. Desta forma, a estatística RMS foi calculada em janelas de 16184 pontos, para cada condição de usinagem a laser e o seu valor RMS médio também foi calculado.

Prosseguindo com o processamento digital dos sinais do PZT de baixo custo, um estudo dos mesmos no domínio da frequência foi realizado para obter mais informações do processo. Para isso, a FFT foi realizada, com janela de *Hanning* e em blocos de 16184 amostras. Com os espectros da frequência de sinais de todas as condições de usinagem, buscou-se identificar bandas de frequência que apresentavam um comportamento acústico que se correlacionam com as condições das marcações a laser de acordo com o volume de energia calculado. Também deve-se buscar bandas com menor sobreposição desses espectros de sinais para facilitar a análise, conforme sugerido por Freitas e Baptista (2016). Após selecionada a banda de frequência, cada sinal foi filtrado usando um passa-faixa, com as frequências de corte da banda selecionada.

A estatística RMS foi refeita para os sinais filtrados, para que possa ser feita a análise e comparação dos resultados provenientes da caracterização mecânica das ranhuras. Também realizou-se uma correlação dos resultados obtidos, como forma de apresentar a eficácia do método de monitoramento de marcação a laser proposto. Para realizar a análise da correlação entre os valores RMS com e sem filtro, foi realizado a normalização dos dados por meio da seguinte equação:

$$X_{normalizado} = a + \left[ \frac{x - \min_x}{\max_x - \min_x} \right] (b - a) \quad (3.1)$$

Onde o valor X foi normalizado em um intervalo arbitrário [a b], sendo escolhido o intervalo de 1 a 2.

# Capítulo 4

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos procedimentos experimentais e as discussões provenientes da análise dos mesmos, com o intuito de avaliar e demonstrar a eficácia do método proposto para o monitoramento do processo de usinagem a laser de cerâmicas avançadas.

### 4.1 ENSAIOS INICIAIS

#### 4.1.1 Resultados da avaliação superficial das marcações a laser

A Figura 4.1 apresenta as imagens das marcações a laser geradas pelo microscópio digital. A potência foi mantida constante, e por meio dos resultados foi possível analisar como a variação da velocidade influenciou nos valores de largura das ranhuras. Analisando a Figura 4.1, o aumento da velocidade de varredura do laser culminou na diminuição das larguras das marcações.

Na Figura 4.2, são apresentados os resultados do valor médio e o desvio padrão das medições de largura das ranhuras para cada velocidade de varredura do laser, a partir das imagens geradas no microscópio digital. Durante os ensaios a potência e os outros parâmetros do processo a laser se mantiveram constantes, sendo analisado apenas a relação da variação da velocidade de varredura do laser, sendo possível observar o

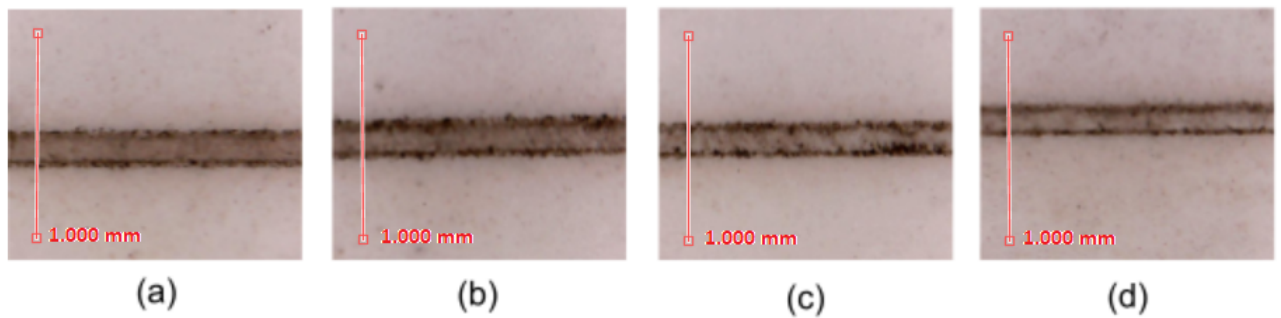


Figura 4.1: Imagens geradas das ranhuras pelo microscópio digital para as velocidades de (a)3 mm/s; (b)6 mm/s; (c)12 mm/s; e (d)20 mm/s.

aumento dos valores das larguras das marcações para as velocidades mais baixas. De acordo com Uslan (2005), na usinagem de corte a laser os valores de largura de corte são maiores quando há um aumento na intensidade de energia durante o processo. Na usinagem a laser, quando a velocidade é baixa, tem-se um maior tempo de interação entre o feixe do laser e a superfície da peça, isto causa uma maior exposição do material a energia do laser e resulta em uma absorção mais pronunciada.

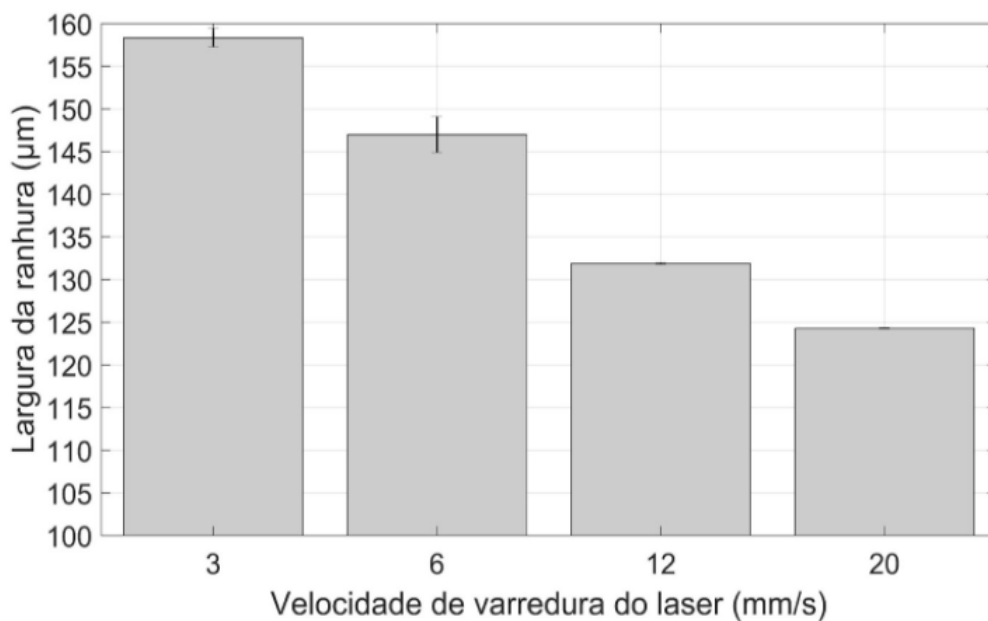


Figura 4.2: Valores médios das larguras das ranhuras e o desvio padrão.

Analisando a velocidade de 3 mm/s, tem-se um tempo de contato maior durante a

marcação a laser e, conseqüentemente, uma maior exposição do material ao laser. Devido a baixa condutividade térmica da alumina, o calor permanece concentrado na região usinada e aumenta a temperatura nesse local, resultando em uma região relativamente maior que passará pelo processo de remoção de material, formando assim uma ranhura mais larga. À medida que o tempo de contato diminui com o aumento da velocidade de varredura do laser, há uma diminuição da condução de calor e do tamanho da região fundida, gerando marcações com larguras menores, como visto para a velocidade de 20 mm/s (WEE; CROUSE; LI, 2008).

Por meio dos valores de desvio padrão presentes na Figura 4.2, é possível observar uma variação significativa dos valores para velocidades mais baixas, enquanto que, para velocidades mais altas quase não houve variação. Em velocidades baixas, há uma maior concentração de calor e o material atinge temperaturas mais altas. Altas temperaturas criam tensões térmicas e, se essas tensões térmicas excederem a resistência à fratura do material, ocorrerão danos à superfície da peça, levando uma ocorrência de variação da largura da ranhura ao longo do comprimento da marcação a laser (YILBAS, 2017). Este fenômeno pode ser observado para velocidades de 3 mm/s e 6 mm/s. Com o aumento da velocidade de varredura do laser, o efeito térmico é reduzido e, como consequência, há uma redução de danos, como ocorre nas velocidades de 12 mm/s e 20 mm/s.

#### **4.1.2 Resultados do processamento digital dos sinais**

A partir dos sinais do transdutor de baixo custo, os valores médios de RMS e desvio padrão para cada velocidade de varredura do laser são mostrados na Figura 4.3. Ao analisar a Figura 4.3, os valores médios de RMS não apresentaram um comportamento acústico esperado, que se correlacionasse com os resultados do microscópio digital (Figura 4.2), o que torna o sinal RMS do sinal bruto insuficiente para o monitoramento do processo de usinagem a laser bidimensional.

Os sinais RMS foram obtidos do sinal bruto do PZT de baixo custo sem qualquer

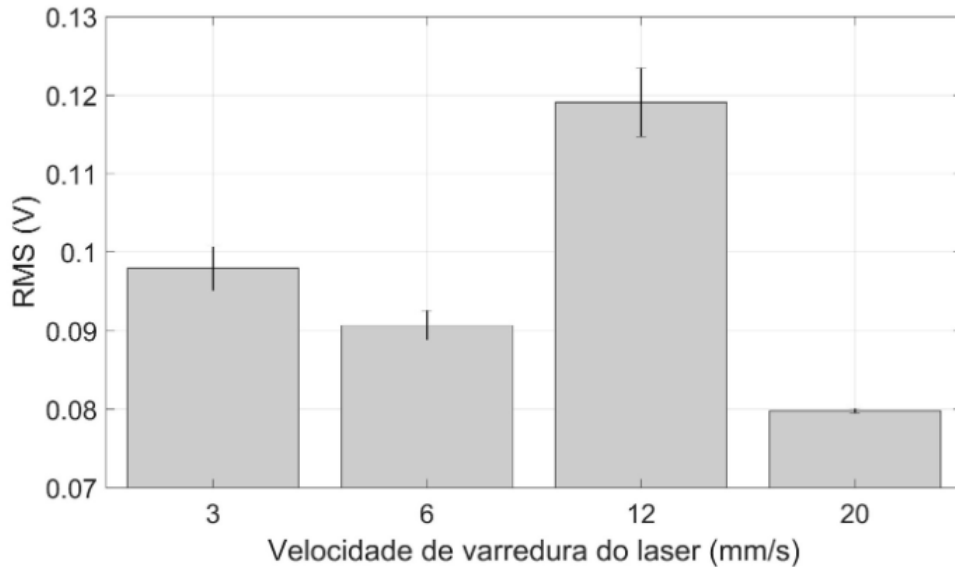


Figura 4.3: Valores médios RMS e o desvio padrão para os sinais brutos.

filtro, portanto, o sinal puro contém informações que estão relacionadas com a usinagem em si, mas também contém outras informações relacionadas com o processo a laser (como o motor de acionamento do bocal do laser, mecanismos de movimentação do bocal, dentre outras), além de vibrações inerentes do sistema e ruído elétrico da rede de energia; e todas estas informações refletem no cálculo do RMS. Assim sendo, a correlação não é boa nesta fase e há a necessidade de fazer um estudo no domínio da frequência para escolher uma banda que proporcionará uma seletividade das informações, que sejam relacionadas apenas ao processo de usinagem a laser.

Para garantir a análise somente da atividade acústica relacionada ao processo e as condições de velocidades, foi realizado o cálculo da FFT. Analisando os espectros dos sinais brutos para cada velocidade, todos apresentam comportamento semelhante, com os mesmos picos de frequências, diferenciando apenas as amplitudes devido as diferentes condições de velocidades utilizadas. A Figura 4.4 apresenta os espectros de sinais da banda escolhida. A escolha da banda de frequência foi feita buscando a melhor faixa que apresentava uma diferença significativa de amplitudes entre as condição do processo e que houvesse uma menor sobreposição entre elas, sendo escolhida a banda de 75 a 80

kHz.

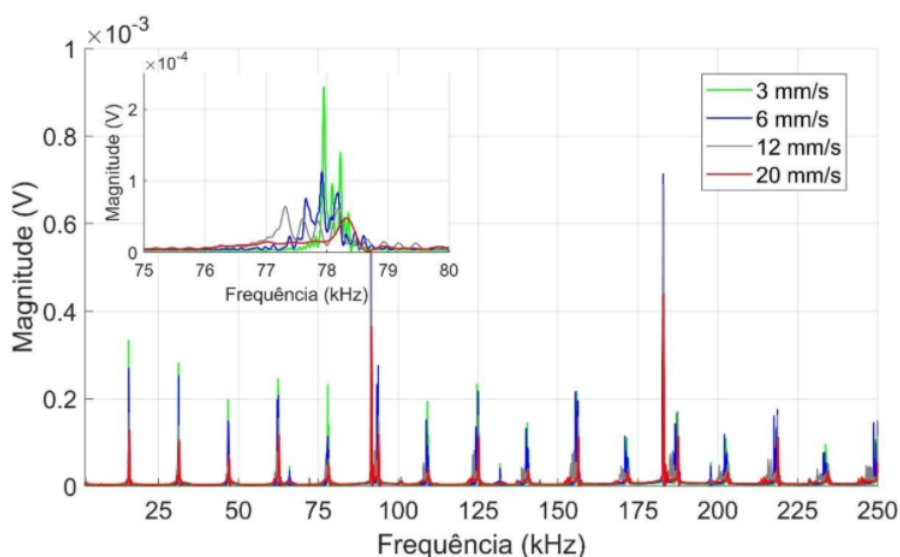


Figura 4.4: Espectro de sinais puros do PZT no domínio da frequência e a banda de frequência selecionada.

Após a aplicação de um filtro digital na banda de frequência selecionada, a estatística RMS foi calculada novamente. Os resultados dos valores RMS médio e desvio padrão recalculados são mostrados na Figura 4.5. Com esses resultados, é possível observar uma mudança considerável do comportamento da atividade acústica com a aplicação do filtro passa-banda, de forma que o comportamento acústico passou a ter uma correlação com os fenômenos do processo de usinagem a laser estudados.

Ao comparar os resultados da qualidade superficial representada pela largura da ranhura, conforme mostrado na Figura 4.2, com os resultados do cálculo do RMS para o sinal puro filtrado (Figura 4.5), os comportamentos e a variação do desvio padrão obtidos são similares. É observado que para velocidades mais baixas, devido a maior absorção do laser na peça, pelo tempo de interação laser/material ser maior, há uma atividade acústica maior. Isto ocorre pois, quanto mais energia a peça a ser usinada absorve, maior será a área de ablação e, em decorrência dos fenômenos provenientes da ablação a laser, maior será a geração de ondas acústicas que ocorrem no processo



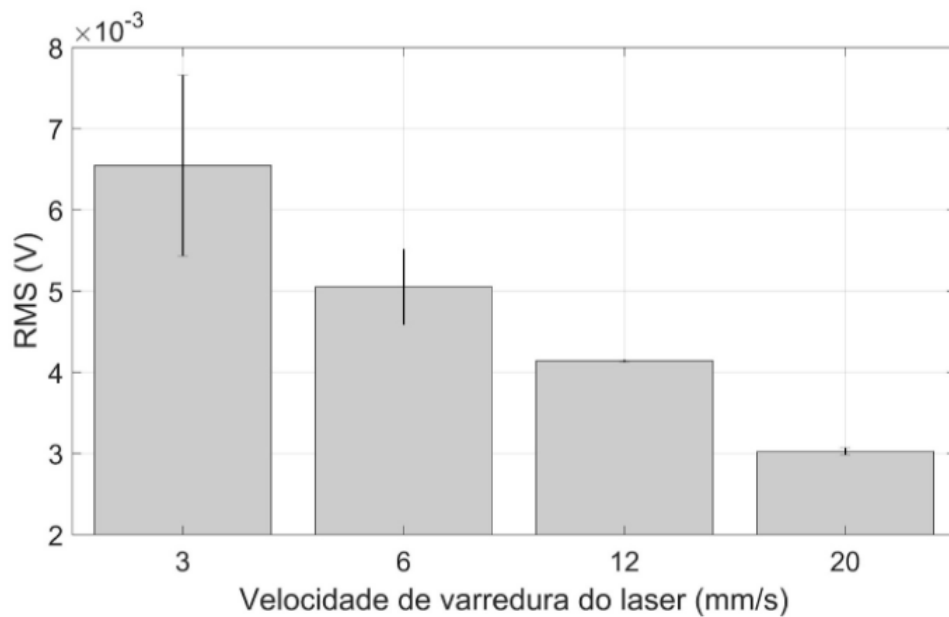


Figura 4.5: Valores médios RMS e o desvio padrão para os sinais filtrados.

de transformação de fase (fusão ou vaporização) do material. Para as velocidades mais altas, tem-se uma área de ablação a laser menor, assim como uma atividade acústica menor. Os resultados demonstram que o uso de filtro em uma banda de frequência cuidadosamente selecionada torna os sinais mais adequados para o monitoramento em tempo real da usinagem a laser, ao analisar a influência da velocidade de varredura do laser no processo. Desta forma, há uma viabilidade da aplicação do transdutor PZT de baixo custo para monitorar a largura da ranhura na usinagem a laser de componentes cerâmicos (LI, 2002; WEE; CROUSE; LI, 2008).

## 4.2 ENSAIOS FINAIS

### 4.2.1 Resultados da calibração da posição focal (*Spot Size*)

A Figura 4.6 apresenta os resultados do microscópio digital para a calibração da posição focal. Analisando o gráfico, é possível notar que houve um padrão similar entre todos os tipos de papéis. Observando as distâncias focais, até certo ponto, há uma rela-

ção no qual o tamanho da largura do corte diminui proporcionalmente com a diminuição da distância do bocal do laser com a superfície que será usinada. A partir desse ponto, ao diminuir a distância focal tem-se um aumento inversamente proporcional do diâmetro do feixe do laser na superfície, e isso só ocorre devido a geometria da focalização do laser (CAO *et al.*, 2017; RAKSHIT; DAS, 2019). Desta forma, saber qual será o ponto em que teremos o menor diâmetro do feixe de laser na peça, é de suma importância para garantir a precisão necessária para os ensaios de marcações a laser.

Os resultados para o papel de nota fiscal mostraram valores maiores da largura de corte, significando uma queima maior durante o corte. Para o papel fotográfico adesivo os valores foram menores, indicando cortes mais precisos.

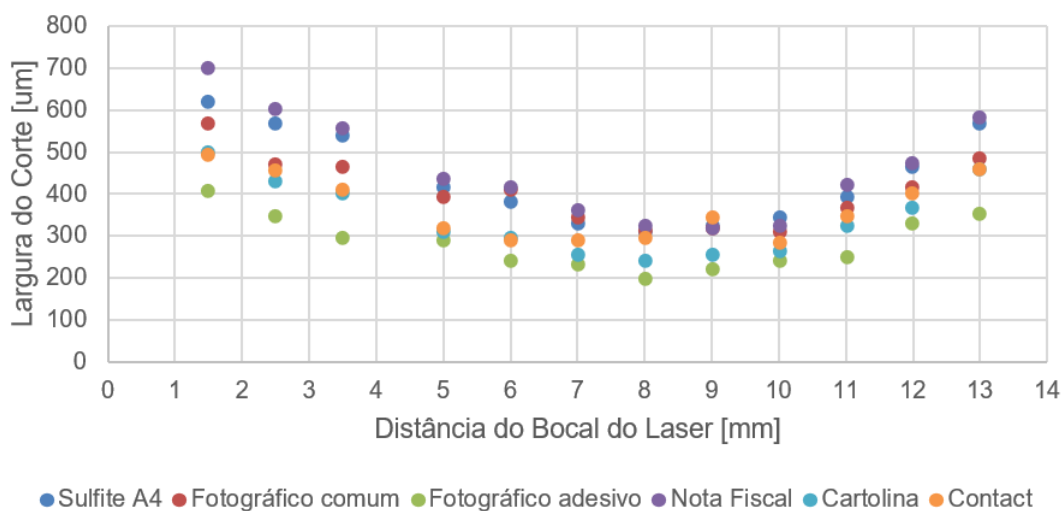


Figura 4.6: Resultados da calibração da posição focal.

A partir do gráfico, foi gerada uma equação da linha tendência para cada tipo de papel. Como o papel fotográfico adesivo apresentou os melhores resultados em relação a precisão, este foi utilizado como referência para entender o padrão de variação das posições focais. A Figura 4.7 mostra a equação obtida para o papel fotográfico adesivo.

Com a equação de tendência do papel fotográfico adesivo, foram calculados valores de larguras de corte para todas as distâncias focais em um intervalo de 1 mm a 13 mm, com variação de 0.1 mm. O resultado que apresentou o menor valor de largura de

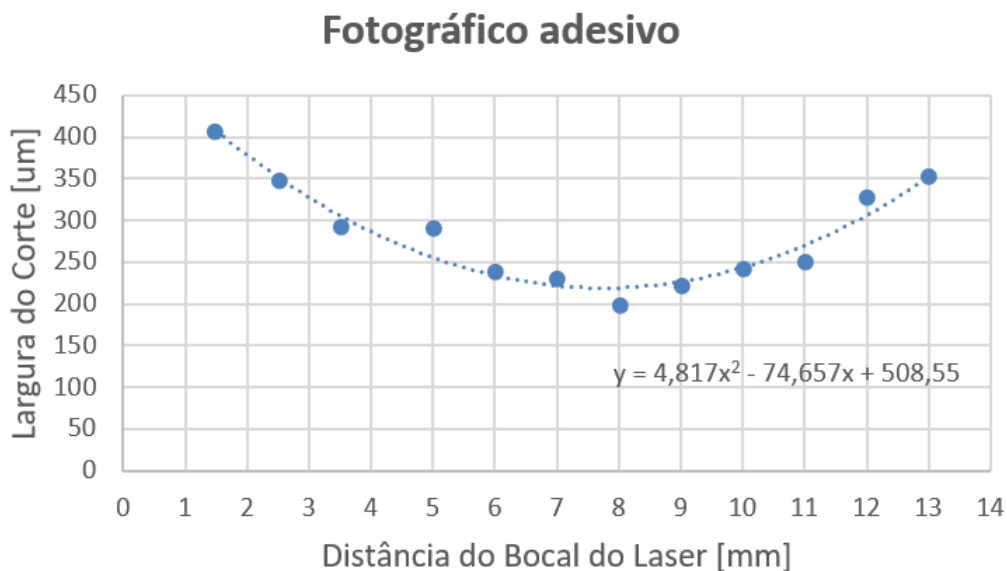


Figura 4.7: Resultados da calibração da posição focal para o papel fotográfico adesivo.

corde, conseqüentemente mais preciso, foi a distância focal de 8 mm, que apresentou um diâmetro focal do feixe de laser de aproximadamente 200  $\mu\text{m}$ , sendo este utilizado em todos os ensaios finais.

#### 4.2.2 Resultados da avaliação superficial das marcações a laser

Por meio da microscopia, foram obtidas imagens das marcações a laser com as seguintes ampliações: 20x, 40x, 60x e 100x. Para obter os valores de largura da ranhura de cada marcação, utilizou-se as imagens geradas com ampliação de 60x, visto que foram as que apresentaram uma melhor nitidez. A Figura 4.8 apresenta as imagens geradas pelo microscópio óptico com ampliação de 60x.

A partir das imagens do microscópio óptico, foi possível fazer as medições das larguras das ranhuras, apresentadas na Figura 4.9. A Figura 4.10 mostra os resultados das medições das larguras da possível área afetada pelo calor do feixe de laser. Para realizar as medições das marcações a laser, os valores foram obtidos como mostra a Figura 4.11.

Por meio da perfilometria óptica foram geradas imagens tridimensionais e bidimensionais. As imagens tridimensionais são mostradas na Figura 4.12. Analisando os gra-

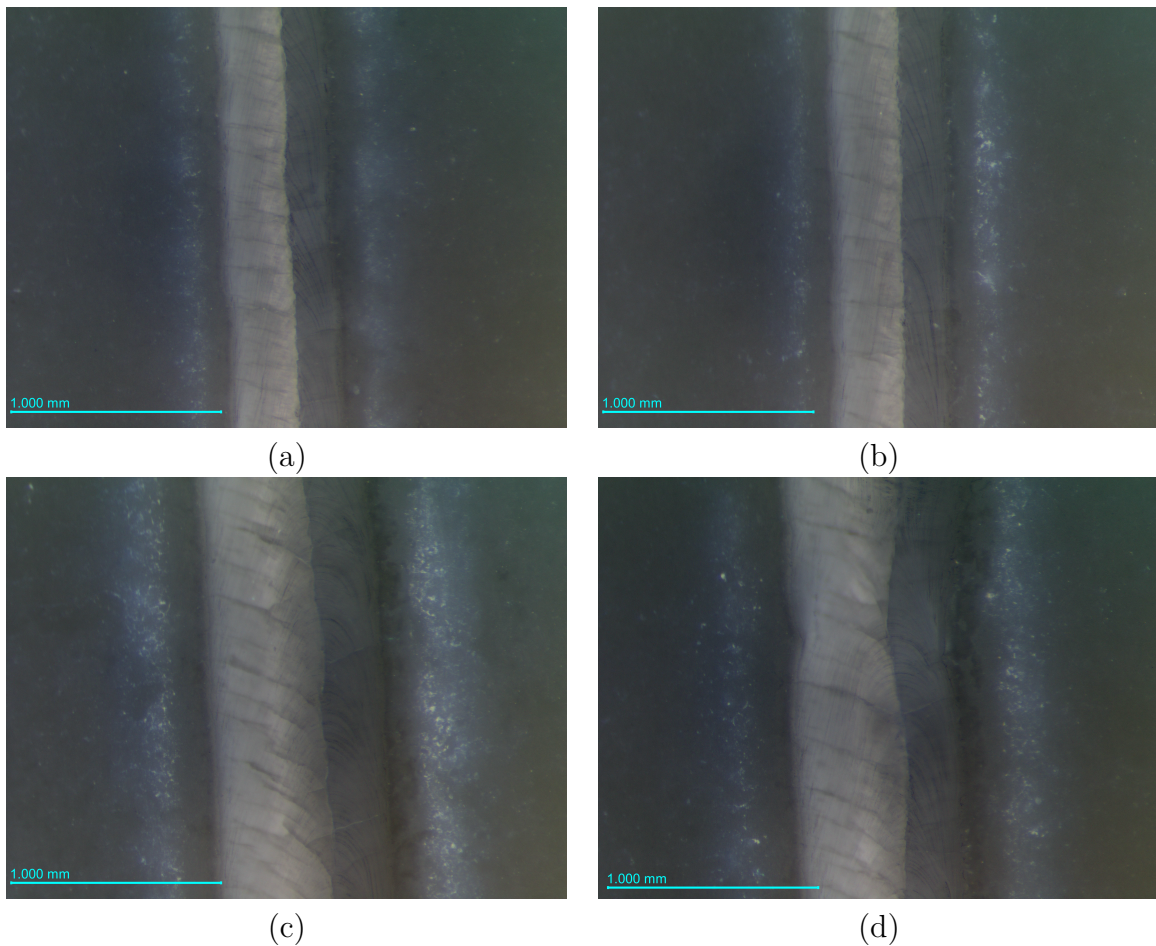


Figura 4.8: Imagens geradas pelo microscópio óptico em negativo, com ampliação de 60x, da (a) condição 1, (b) da condição 2, (c) da condição 3, e (d) da condição 4.

dientes de cores que representam a diferença de profundidade nas imagens geradas pelo perfilômetro óptico, é notável que a profundidade das marcações a laser foi aumentando com o aumento da energia do laser. Para a ranhura da condição 1 (Figura 4.12(a)) não houve uma diferença significativa entre os gradientes de cores, enquanto que na ranhura da condição 4 (Figura 4.12(d)) houve uma diferença nítida entre as cores, indicando uma maior diferença de profundidade.

Por meio das imagens bidimensionais do perfilômetro óptico, foram medidos os valores de profundidade das ranhuras. Os valores médios e o desvio padrão das profundidades das marcações a laser são apresentados na Figura 4.13.

De acordo com Yilbas (1997), ao aumentar a potência do laser e reduzir a sua velocidade de varredura, ocorre um aumento da largura do corte. Na figura 4.8 é possível

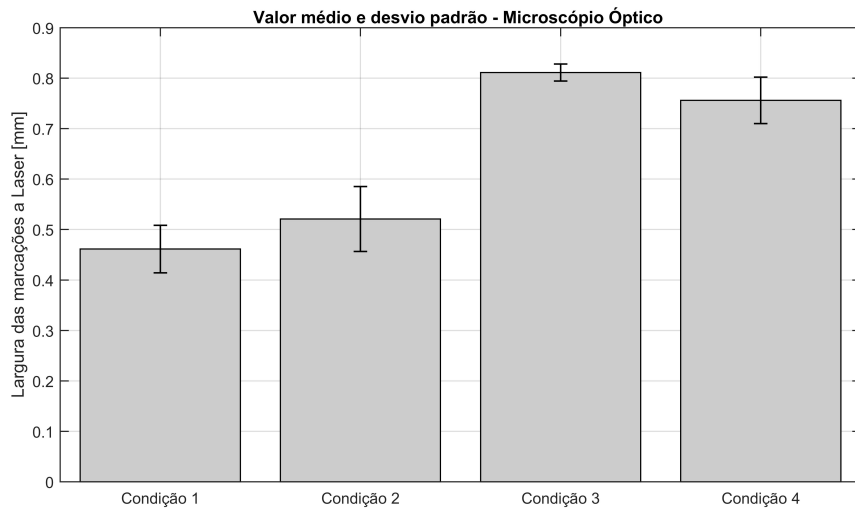


Figura 4.9: Valores médios e desvio padrão das larguras das marcações a laser das condições de usinagem a laser.

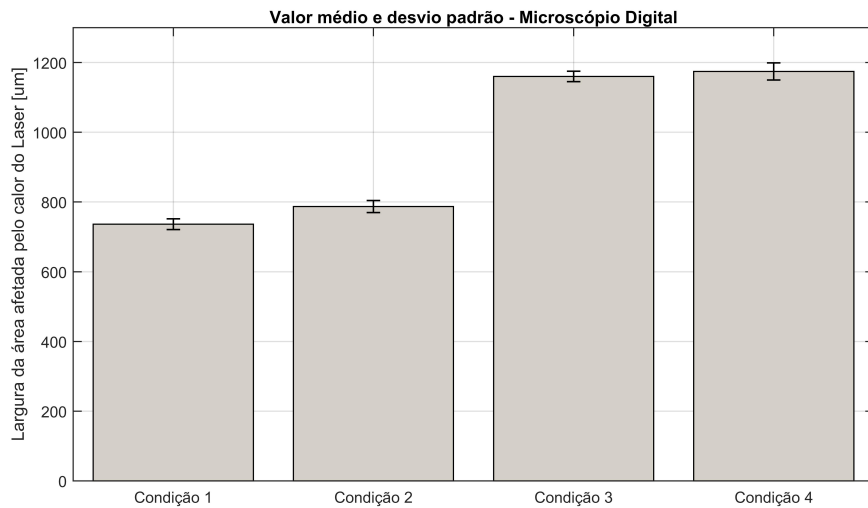


Figura 4.10: Valores médios e desvio padrão das larguras da área afetada pelo calor do feixe do laser.

comparar a condição mais branda com a condição mais severa, e é possível observar que há uma maior ablação a laser nas condições mais severas.

Ao analisar os resultados das figuras obtidas pelos microscópios e perfilmetro óptico, assim como ocorre na Seção 4.1, é possível perceber que quanto menor a velocidade de varredura do laser, maior é a energia absorvida e temos uma remoção maior de material (WEE; CROUSE; LI, 2008). Ao analisar os valores médios das larguras da

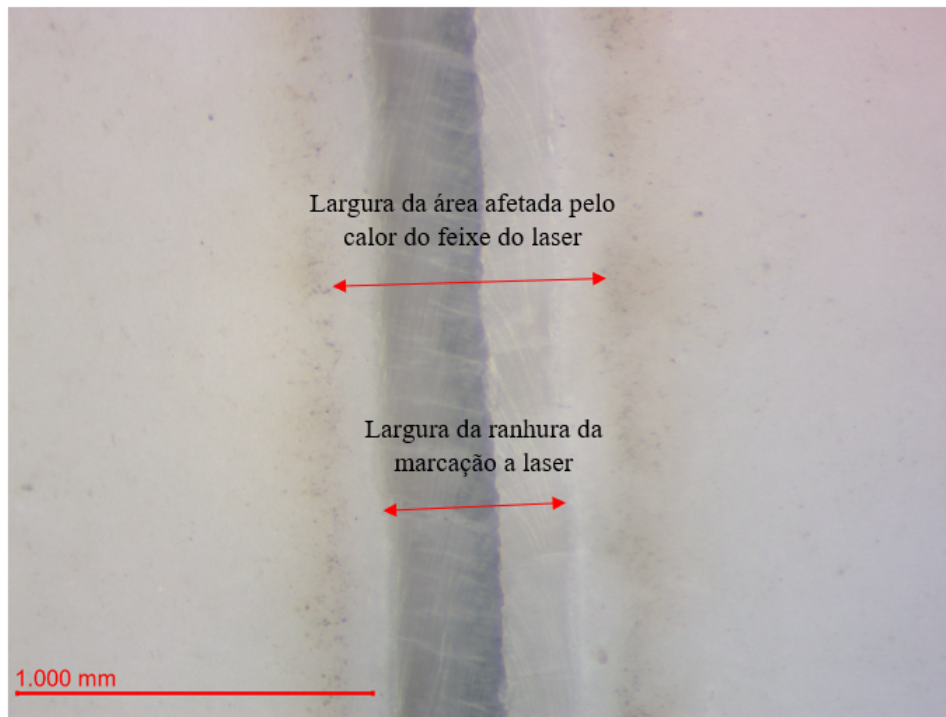


Figura 4.11: Imagem da marcação a laser para a condição 1 com ampliação de 60x, com a representação das larguras utilizadas nas medições.

marcação a laser, nota-se que não há uma diferença significativa da sua dimensão quando comparamos condições com mesma velocidade (Condição 3 e Condição 4), isto pode indicar que os valores de potências utilizadas nos ensaios foram muito próximos.

De acordo com Son e Lee (2020), na interação do laser/material, é evidente que o volume de energia afeta as larguras dos cortes em processo a laser CO<sub>2</sub>. O efeito do volume de energia nas larguras das ranhuras ocorre de forma que, ao aumentar a energia, os valores das larguras das ranhuras aumentam. Isso ocorre, pois, a medida que o volume de energia aumenta, o material tem um aquecimento mais rápido e maior, e como consequência terá uma área maior que sofrerá a ablação a laser.

Quando há um aumento da energia na superfície da peça usinada, além do tamanho da área que sofrerá ablação, há também um aumento de tensões térmicas que causam estriações ou trincas, e afetam a qualidade da usinagem, como é possível observar na Figura 4.13 o aumento do desvio padrão com o aumento do volume de energia (YILBAS, 1997).

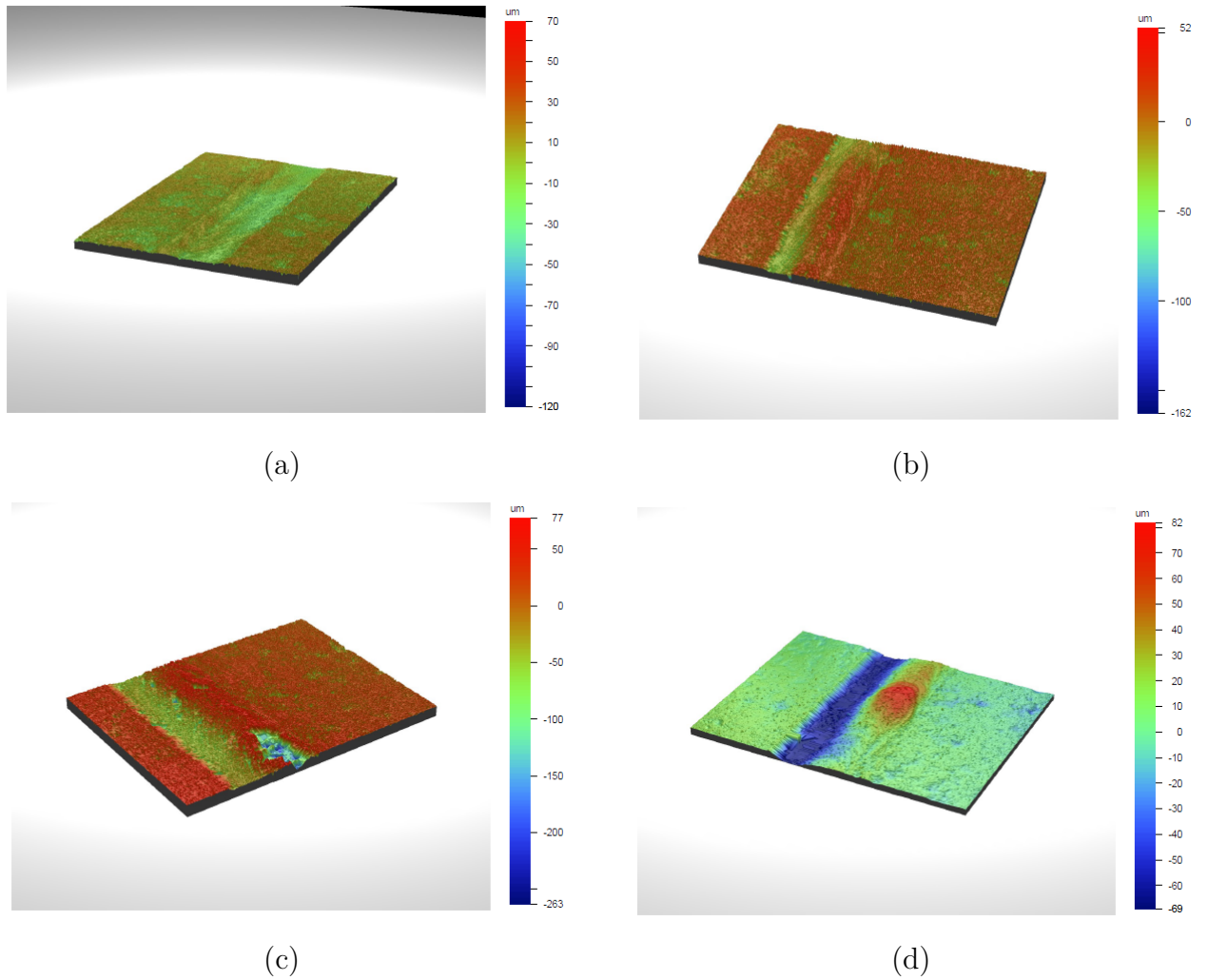


Figura 4.12: Imagens tridimensionais geradas pelo perfilômetro óptico em negativo, com ampliação de 20x, da (a) condição 1, (b) da condição 2, (c) da condição 3, e (d) da condição 4.

Na Figura 4.8, é possível observar que as condições de usinagem que possuem um índice de energia maior, sofreram mais ablação a laser, enquanto que as condições com índices menores, apresentaram ranhuras com larguras menores e uma possível área menor afetada pelo laser. Analisando a Figura 4.9, é notável que quando há velocidades de varredura do laser menores, maior será a remoção de material devido a o aumento de energia que será absorvido.

Também é possível observar a presença de cores distintas no canal das ranhuras na Figura 4.8. Analisando a imagem 4.14, pode-se observar que a região mais escura teve

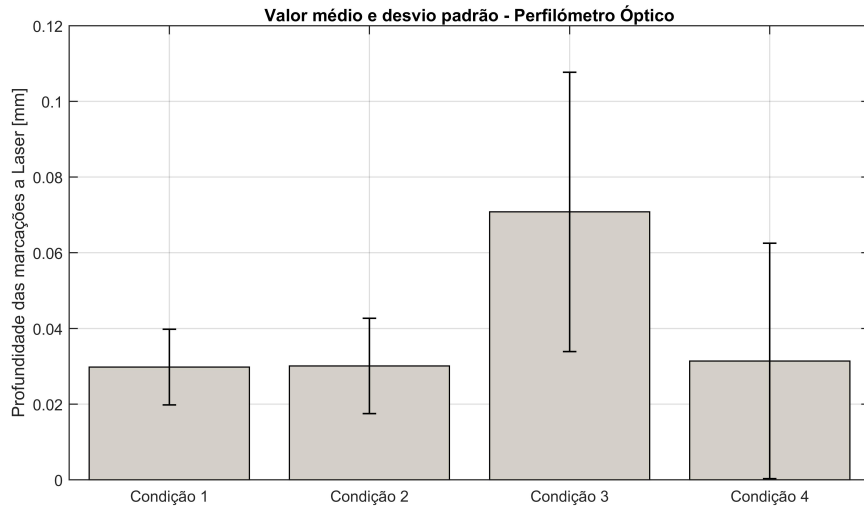


Figura 4.13: Valores médios e desvio padrão das profundidades das marcações a laser das condições da usinagem a laser.

uma profundidade menor ao comparada com a região clara, ou seja, menos material teve ablação a laser. Por meio dos resultados deste trabalho, não foi possível identificar a causa dessa diferença, sendo, então, necessário outros ensaios mais aprofundados na caracterização mecânica das ranhuranhas.

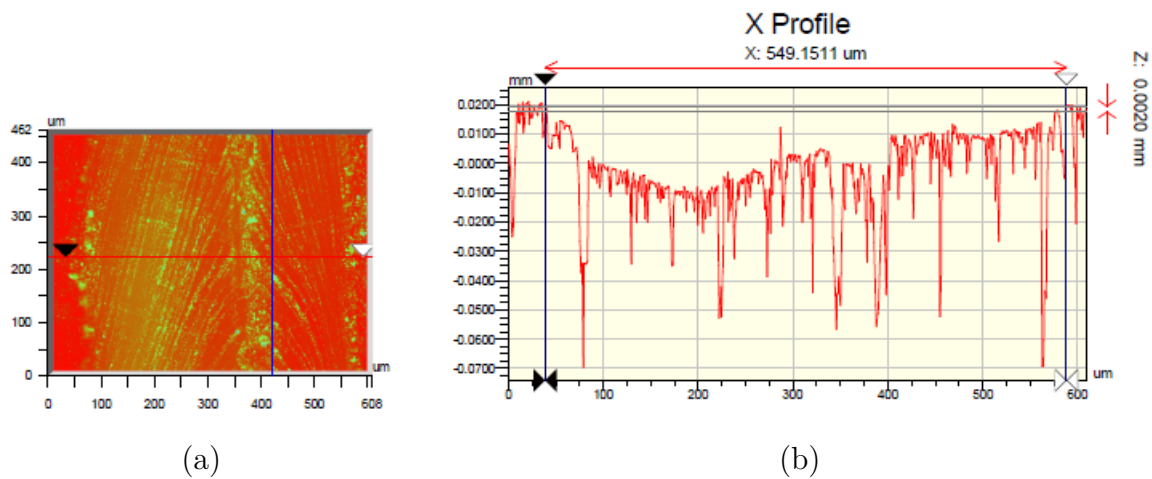


Figura 4.14: (a) Imagem bidimensionais gerada pelo perfilômetro óptico para a ranhura de condição 1 (Potência de 75W e Velocidade de 20 mm/s), e (b) Gráfico das profundidades da região

Ao analisar os valores médios das larguras da marcação a laser, nota-se que não há uma diferença significativa da sua dimensão quando comparamos condições com mesma



velocidade (Condição 3 e Condição 4), isto pode indicar que os valores de potências utilizadas nos ensaios foram muito próximos. O volume de energia influencia na interação do laser/material, principalmente em relação a velocidade de varredura, e afeta as larguras das ranhuras de forma que, ao aumentar a energia, os valores das larguras também aumentam. O material passará por uma maior absorção de energia e, como consequência, terá um aumento de tensões térmicas que causam estriações ou trincas, afetando a qualidade da usinagem, podendo ser observado por meio do alto desvio padrão dos valores da profundidade como mostra a Figura 4.13. Apesar dos valores apresentados na Figura 2 mostrarem que a Condição 4 obteve valores um pouco menores do que a Condição 3, mesmo apresentando um índice de energia maior, ao analisar as imagens tridimensionais (Figura 4.12) é possível observar que a ranhura obtida com os parâmetros da Condição 4 (Figura 4.12(d)) apresentou uma quantidade maior de escórias, ou seja, parte do material derretido passou por uma ressolidificação ao invés de ser ejetado para fora, gerando uma usinagem com mais danos (DAHOTRE; HARIMKAR, 2008; WANG; LUO, 2018).

### 4.2.3 Resultados do processamento digital dos sinais

O processamento dos sinais do PZT de baixo custo dos ensaios finais foi realizado de forma similar aos ensaios iniciais. Por meio da estatística RMS, como mostra a Figura 4.15 para a condição 2, é possível trabalhar apenas com amostras positivas da amplitude do sinal, sem perder o seu comportamento acústico.

Após o cálculo do RMS médio do sinal bruto, os valores foram plotados. A Figura 4.16 apresenta os valores médios RMS das condições de usinagem a laser utilizadas.

Conforme descrito na Seção 4.1, os sinais brutos apresentam outras informações do sistema além do processo de usinagem. Desta forma, há uma necessidade de um estudo dos espectros de sinais no domínio da frequência.

Uma banda de frequência foi selecionada de acordo com a correlação da atividade

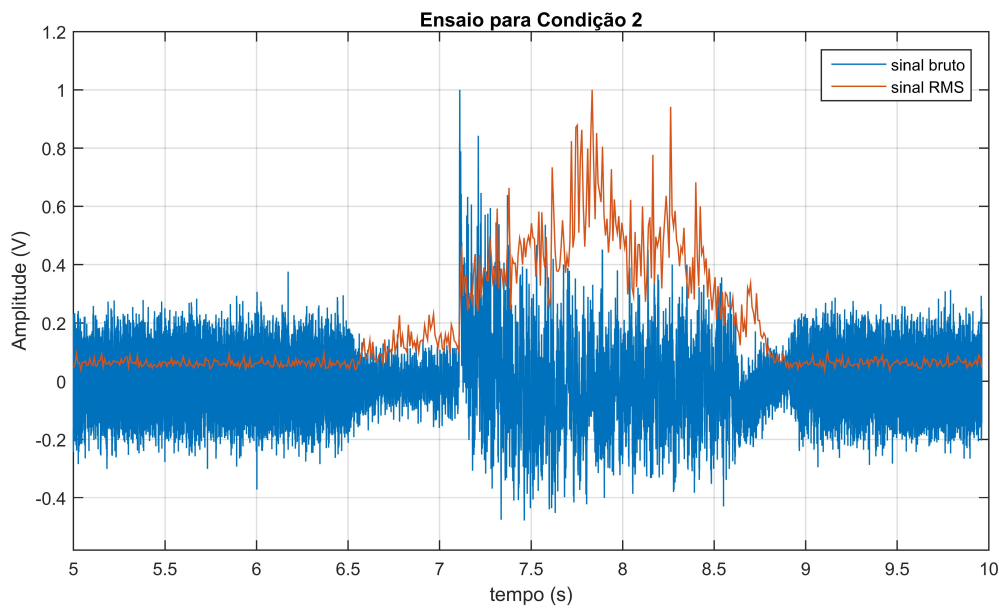


Figura 4.15: Sinal bruto e sinal após a estatística RMS, aquisitado pelo PZT de baixo custo para o ensaio da condição 2.

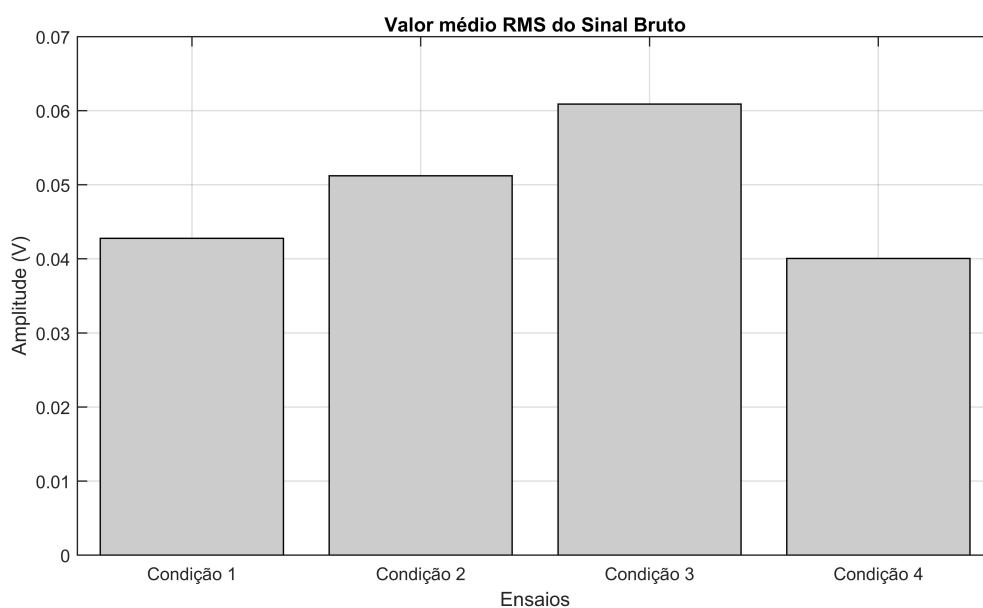


Figura 4.16: Valores médios RMS de cada condição de usinagem do sinal bruto.

acústica com a severidade das marcações a laser. A banda de frequência escolhida é mostrada na Figura 4.18, sendo os sinais do PZT de baixo custo filtrados nessa banda, e os valores RMS médio recalculados são apresentados na Figura 4.17.

Na Figura 4.18, o comportamento acústico dos espectros dos sinais no domínio da

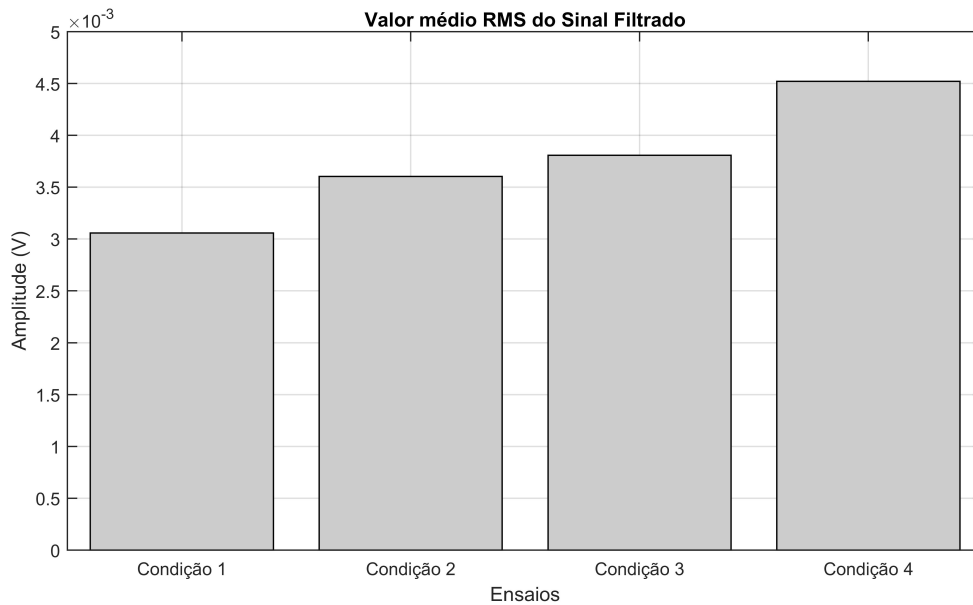


Figura 4.17: Valores médios RMS de cada condição de usinagem do sinal filtrado.

frequência ocorre da seguinte forma: a condição usinada com uma quantidade menor de energia do laser apresenta uma atividade acústica menor quando comparado com as condições usinadas com uma energia mais pronunciada. E a relação entre a atividade acústica da condição de usinagem a laser com o aumento do volume de energia do laser, prossegue de forma proporcional (aumentando o índice de energia há o aumento da atividade acústica).

Com o filtro, é possível eliminar ruídos e perturbações do sistema que afetam a utilização do sinal bruto para monitorar processos de usinagem. A Figura 4.19 apresenta o sinal bruto do PZT de baixo custo para a condição 2, e o sinal após a utilização do filtro digital com apenas as informações relacionadas ao processo de marcação a laser.

Após a aplicação do filtro, o comportamento obtido pelo cálculo RMS apresentou uma correlação com o índice de volume de energia 3.1. Quanto maior a concentração de energia presente no feixe do laser, maior foi a atividade acústica obtida. Para a condição 1, temos uma atividade acústica menor, pois há uma menor interação entre o laser e a peça, gerando menos modificações da estrutura química do material. Na condição 4, apesar dos resultados mecânicos indicarem medições com valores menores quando

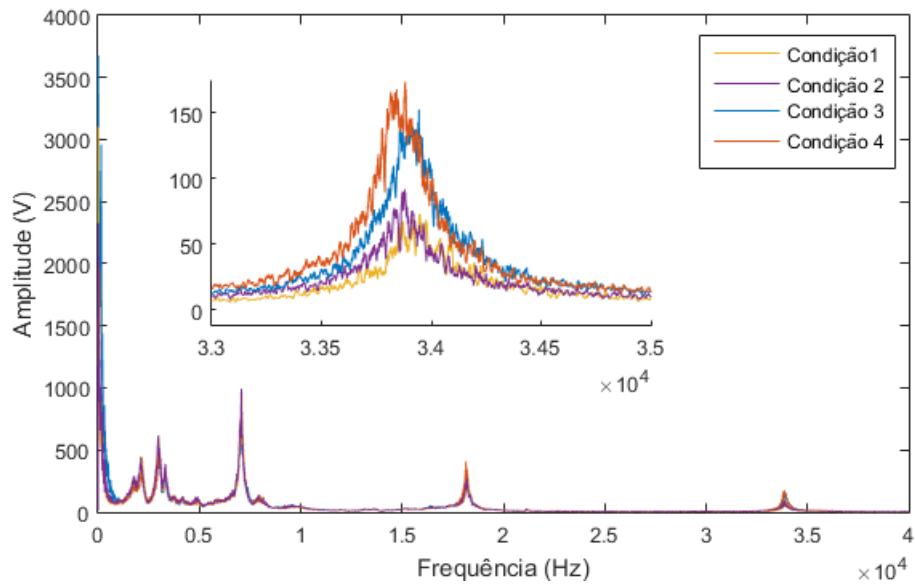


Figura 4.18: Espectro de sinais puros do PZT no domínio da frequência e a banda de frequência selecionada.

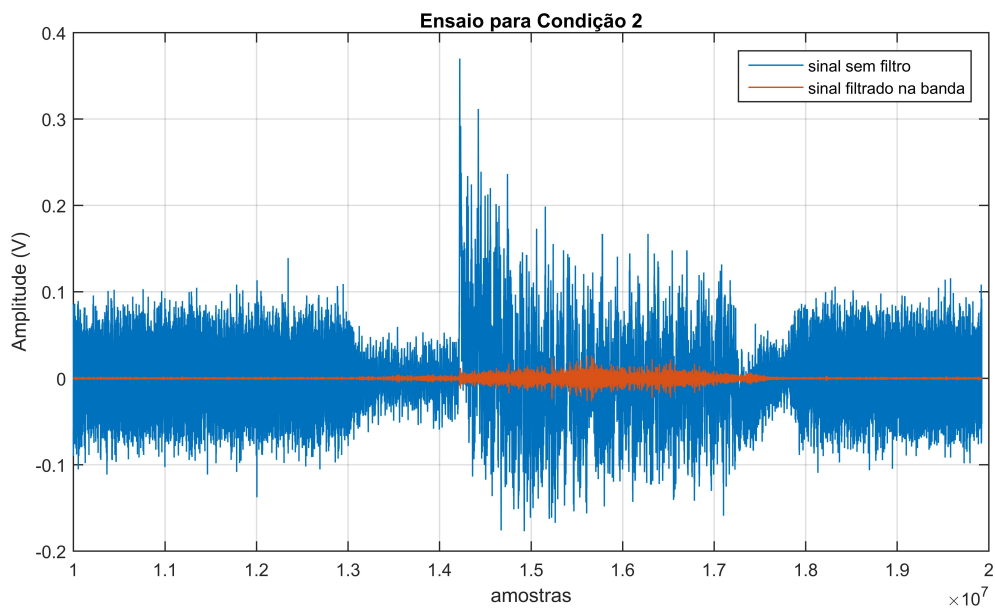


Figura 4.19: Sinais sem filtro e filtrado na banda de frequência de 33 a 35 kHz, adquirido pelo PZT de baixo custo para o ensaio da condição 2.

comparados com a condição 3, foi a condição que apresentou maior atividade acústica. Isso ocorre pois, nessa ranhura houve uma maior presença de escórias, e o processo químico do derretimento e ressolidificação do material geram ondas acústicas que são

captadas pelo sensor, sendo assim, quanto menor a qualidade superficial da usinagem a laser, maior será a atividade acústica (KEK; GRUM, 2009).

Ao ser submetido ao calor, a área do material usinado que entra em contato com o laser sofre uma modificação na sua estrutura química. De acordo com Wang, Yang e Wang (2002), a área do material que será afetada pelo calor do feixe de laser sofre uma diminuição quando a potência utilizada é diminuída e a velocidade de varredura do laser é aumentada. Ao comparar os resultados da Figura 4.10 com a Figura 4.18, é possível perceber um comportamento semelhante, no qual quanto maior a área que sofreu modificações na sua estrutura decorrente a sua interação com o laser, há uma maior presença de tensões térmicas e maior será o seu comportamento acústico. Assim como, quanto menor for essa interação com o laser, menor será a área afetada pelo calor e terá uma atividade acústica menor (LI, 2010).

Desta forma, o comportamento acústico obtido apresentou uma correlação com o índice de energia do laser, onde quanto maior for a energia presente no feixe de laser maior será a atividade acústica proporcionada. Sendo o contrário também válido. A Condição 1 apresentou a menor atividade acústica, a ranhura teve uma menor ablação a laser, pois houve uma menor interação entre o laser e a peça, gerando menos modificações da estrutura química do material. A Condição 4 apresentou a maior atividade acústica, e isto se deve ao fato de nesta ranhura ocorrer uma presença maior de escórias. O processo químico do derretimento e mais a ressolidificação que o material tem para o surgimento das escórias, geram ondas acústicas que são captadas pelo sensor, desta forma, quanto menor for a qualidade superficial da marcação a laser maior será a atividade acústica gerada. A Figura 4.20 apresenta os resultados da correlação entre as estatísticas RMS, normalizada em uma faixa de 1 a 2, dos sinais com filtro e dos sinais sem filtro, correlacionados ao índice de volume de energia do laser. O coeficiente de correlação obtido para o sinal filtrado foi de 0,8663, enquanto que para o sinal sem filtro foi de  $0,1 \times 10^{-7}$ .

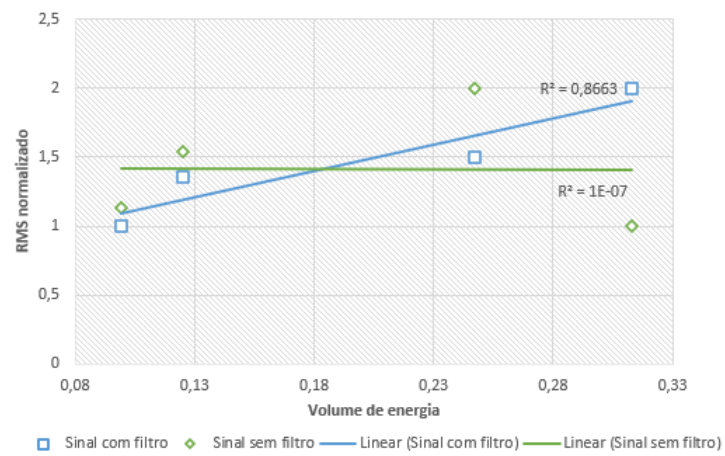


Figura 4.20: Comparação entre os coeficientes  $R^2$  para os valores médios normalizados do RMS para os sinais filtrados e não filtrados .

# Capítulo 5

## CONCLUSÕES

As cerâmicas avançadas possuem uma grande importância industrial, sendo utilizadas em muitas aplicações devido a suas excelentes propriedades. Porém, as suas principais propriedades mecânicas as tornam difíceis de serem usinadas. Sendo assim, o processo de usinagem a laser surge como uma alternativa viável, visto que as propriedades térmicas do material que definem a sua usinabilidade. Entretanto, o monitoramento de usinagem a laser não é fácil, sendo necessário formas indiretas de monitoramento, onde a mensuração dos fenômenos é deduzida por variáveis dependentes do processo. Por meio de sensores de EA em contato com a peça, é possível monitorar as transformações de fases que ocorrem no processo de ablação a laser, sendo essas transformações responsáveis por geração de ondas acústicas. Resultados utilizando o transdutor piezoelétrico de baixo custo como sensor de EA em processos de retificação, mostram que o seu uso apresenta uma resposta satisfatória e com o mesmo comportamento de um sensor EA convencional; desta forma buscou-se estender esta abordagem para o processo de usinagem a laser.

Em relação aos resultados obtidos neste trabalho, é possível concluir que os ensaios experimentais mostram que as condições de velocidade de varredura e a potência do laser possuem uma influência direta na atividade acústica, coletada pelo transdutor piezoelétrico de baixo custo, gerada durante o processo de marcação a laser, e também

na qualidade geométrica das ranhuras. Para velocidades mais lentas de varredura do laser, obtém-se um maior processo de ablação a laser com uma variação significativa das medidas de largura ao longo da ranhura, e há uma maior atividade acústica. Enquanto que, para velocidades de varredura do laser maiores, as medidas de largura da ranhura foram menores e com uma menor variação, além de apresentarem uma atividade acústica menor.

A potência também foi um parâmetro estudado, e foi possível analisar que quanto maior a potência, maior serão as escórias formadas nas ranhuras. Isto é possível detectar com um aumento na atividade acústica, indicando ranhuras com uma qualidade superficial inferior. Ao analisar os resultados da área de calor afetada, tem-se uma maior área afetada pelo calor do laser quando há um aumento na potência e um maior tempo de interação peça/laser, como consequência, a atividade acústica também será maior.

Após filtragem dos sinais, os valores médios da estatística RMS se mostraram diretamente proporcionais com os índices de energia do laser e também com o aumento da presença de escórias nas marcações.

Essa análise foi muito significativa para demonstrar a viabilidade do método proposto para monitorar a qualidade superficial do processo de marcação a laser em alumina utilizando um transdutor piezoelétrico de baixo custo, podendo ser estendido para outros processos de usinagem a laser e outros materiais.



# Referências Bibliográficas

- AGUIAR, P. R.; SERNI, P. J.; DOTTO, F. R.; BIANCHI, E. C. In-process grinding monitoring through acoustic emission. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, SciELO Brasil, v. 28, n. 1, p. 118–124, 2006.
- ASHBY, M. F.; BULLOUGH, R.; HARTLEY, C. *Dislocation Modelling of Physical Systems: Proceedings of the International Conference, Gainesville, Florida, USA, June 22-27, 1980*. [S.l.]: Elsevier, 2017.
- BARNES, S.; MORGAN, R.; SKEEN, A. Effect of laser pre-treatment on the machining performance of aluminum/sic mmc. *J. Eng. Mater. Technol.*, v. 125, n. 4, p. 378–384, 2003.
- BOCCACCINI, A. Machinability and brittleness of glass-ceramics. *Journal of Materials Processing Technology*, Elsevier, v. 65, n. 1-3, p. 302–304, 1997.
- CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. *Materials science and engineering: an introduction*. [S.l.]: Wiley New York, 2018. v. 9.
- CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. *Fundamentals of materials science and engineering: an integrated approach*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2020.
- CAO, B. X.; HOANG, P. L.; AHN, S.; KIM, J.-o.; NOH, J. High-precision detection of focal position on a curved surface for laser processing. *Precision Engineering*, Elsevier, v. 50, p. 204–210, 2017.
- CARISTAN, C. L. *Laser cutting guide for manufacturing*. [S.l.]: Society of manufacturing engineers, 2004.
- CARTER, C. B.; NORTON, M. G. *et al. Ceramic materials: science and engineering*. [S.l.]: Springer, 2007. v. 716.
- CHANG, C.-W.; KUO, C.-P. An investigation of laser-assisted machining of al<sub>2</sub>o<sub>3</sub> ceramics planing. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Elsevier, v. 47, n. 3-4, p. 452–461, 2007.
- CHRYSSOLOURIS, G.; SHENG, P.; ALVENSLEBEN, F. V. Process control of laser grooving using acoustic sensing. 1991.
- DAHOTRE, N. B.; HARIMKAR, S. *Laser fabrication and machining of materials*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2008.

- DAVIM, J. P. Nontraditional machining processes. *Manufacturing process selection handbook*, Springer, p. 205–226, 2013.
- DONG, X.; SHIN, Y. Laser machining and laser-assisted machining of ceramics. Elsevier, 2014.
- DUBEY, A. K.; YADAVA, V. Laser beam machining—a review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Elsevier, v. 48, n. 6, p. 609–628, 2008.
- FENOUGHTY, K.; JAWAID, A.; PASHBY, I. Machining of advanced engineering materials using traditional and laser techniques. *Journal of materials processing technology*, Elsevier, v. 42, n. 4, p. 391–400, 1994.
- FREITAS, E. S. de; BAPTISTA, F. G. Experimental analysis of the feasibility of low-cost piezoelectric diaphragms in impedance-based shm applications. *Sensors and Actuators A: Physical*, Elsevier, v. 238, p. 220–228, 2016.
- FUJITA, H. Retificação da alumina com rebolo diamantado usando diferentes métodos de lubri-refrigeração. Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2007.
- GALLEGO-JUAREZ, J. Piezoelectric ceramics and ultrasonic transducers. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, IOP Publishing, v. 22, n. 10, p. 804, 1989.
- GUERRINI, G.; FORTUNATO, A.; MELKOTE, S.; ASCARI, A.; LUTEY, A. Hybrid laser assisted machining: a new manufacturing technology for ceramic components. *Procedia Cirp*, Elsevier, v. 74, p. 761–764, 2018.
- GUO, J.-K.; LI, J.; KOU, H.-M. Advanced ceramic materials. In: *Modern Inorganic Synthetic Chemistry*. [S.l.]: Elsevier, 2017. p. 463–492.
- HEIMANN, R. B. *Classic and advanced ceramics: from fundamentals to applications*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2010.
- HUANG, H.; LIU, Y. Experimental investigations of machining characteristics and removal mechanisms of advanced ceramics in high speed deep grinding. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Elsevier, v. 43, n. 8, p. 811–823, 2003.
- JAHANMIR, S. Mechanisms of material removal in abrasive machining of ceramics. *Machining of ceramics and composites*, Marcel Dekker, p. 11–84, 1998.
- JEON, Y.; LEE, C. M. Current research trend on laser assisted machining. *International journal of precision engineering and manufacturing*, Springer, v. 13, n. 2, p. 311–317, 2012.
- KACARAS, A.; BÄCHLE, M.; SCHWABE, M.; ZANGER, F.; LEÓN, F. P.; SCHULZE, V. Acoustic emission-based characterization of focal position during ultra-short pulse laser ablation. *Procedia CIRP*, Elsevier, v. 81, p. 270–275, 2019.
- KANG, S.-J. L. *Sintering: densification, grain growth and microstructure*. [S.l.]: Elsevier, 2004.

- KANNAN, M. V.; KUPPAN, P.; KUMAR, A. S.; KUMAR, K. R.; JEGARAJ, J. J. R. Effect of laser scan speed on surface temperature, cutting forces and tool wear during laser assisted machining of alumina. *Procedia Engineering*, Elsevier, v. 97, p. 1647–1656, 2014.
- KEK, T.; GRUM, J. Monitoring laser cut quality using acoustic emission. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Elsevier, v. 49, n. 1, p. 8–12, 2009.
- KITAJIMA, K.; CAI, G.; KURNAGAI, N.; TANAKA, Y.; ZHENG, H. Study on mechanism of ceramics grinding. *CIRP annals*, Elsevier, v. 41, n. 1, p. 367–371, 1992.
- KRUTH, J.-P. Automatic supervision in physical and chemical machining. In: *Automatic Supervision in Manufacturing*. [S.l.]: Springer, 1994. p. 83–119.
- KRUTH, J.-P.; DUFLOU, J.; MERCELIS, P.; VAERENBERGH, J. V.; CRAEGHS, T.; KEUSTER, J. D. On-line monitoring and process control in selective laser melting and laser cutting. In: *Proceedings of the 5th Lane Conference, Laser Assisted Net Shape Engineering*. [S.l.: s.n.], 2007. v. 1, p. 23–37.
- KUAR, A.; BISWAS, P.; MITRA, S.; BISWAS, R. Experimental investigation of nd: Yag laser micro-grooving operation of alumina workpiece using rsm. *International Journal of Materials and Structural Integrity*, Inderscience Publishers, v. 1, n. 4, p. 355–370, 2008.
- KUMAR, M.; MELKOTE, S.; LAHOTI, G. Laser-assisted microgrinding of ceramics. *CIRP annals*, Elsevier, v. 60, n. 1, p. 367–370, 2011.
- LALLEMAND, G.; JACROT, G.; CICALA, E.; GREVEY, D. Grooving by nd: Yag laser treatment. *Journal of Materials Processing Technology*, Elsevier, v. 99, n. 1-3, p. 32–37, 2000.
- LAURO, C.; BRANDÃO, L.; BALDO, D.; REIS, R.; DAVIM, J. Monitoring and processing signal applied in machining processes—a review. *Measurement*, Elsevier, v. 58, p. 73–86, 2014.
- LI, L. A comparative study of ultrasound emission characteristics in laser processing. *Applied surface science*, Elsevier, v. 186, n. 1-4, p. 604–610, 2002.
- LI, L. The challenges ahead for laser macro, micro, and nano manufacturing. In: *Advances in Laser Materials Processing*. [S.l.]: Elsevier, 2010. p. 20–39.
- LI, L. t.; STEEN, W. Non-contact acoustic emission monitoring during laser processing. In: LASER INSTITUTE OF AMERICA. *International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics*. [S.l.], 1992. v. 1992, n. 1, p. 719–728.
- LIANG, S. Y.; HECKER, R. L.; LANDERS, R. G. Machining process monitoring and control: the state-of-the-art. *J. Manuf. Sci. Eng.*, v. 126, n. 2, p. 297–310, 2004.
- LIU, G.; TONCICH, D. J.; HARVEY, E. C. Evaluation of excimer laser ablation of thin cr film on glass substrate by analysing acoustic emission. *Optics and lasers in engineering*, Elsevier, v. 42, n. 6, p. 639–651, 2004.

- MOORHOUSE, C. J.; VILLARREAL, F.; WENDLAND, J. J.; BAKER, H. J.; HALL, D. R.; HAND, D. P. Co/sub 2/laser processing of alumina (al/sub 2/o/sub 3/) printed circuit board substrates. *IEEE transactions on electronics packaging manufacturing*, IEEE, v. 28, n. 3, p. 249–258, 2005.
- MORETTIN, L. G. *Estatística básica: probabilidade e inferência: volume único*. [S.l.]: Pearson Prentice Hall, 2010.
- PABIER, M.; LENSCH, G. Cutting and scribing of alumina ceramic using a co2-laser. In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICS AND PHOTONICS. *High Power Lasers: Sources, Laser-Material Interactions, High Excitations, and Fast Dynamics*. [S.l.], 1987. v. 801, p. 283–287.
- PARKER, M. *Digital Signal Processing 101: Everything you need to know to get started*. [S.l.]: Newnes, 2017.
- POWELL, J. *CO2 laser cutting*. [S.l.]: Springer, 1993. v. 214.
- RADOVANOVIC, M.; MADIC, M. Experimental investigations of co2 laser cut quality: a review. *Nonconventional Technologies Review*, v. 4, n. 4, p. 35, 2011.
- RAHAMAN, M. N. *Ceramic processing and sintering*. [S.l.]: CRC press, 2003.
- RAKSHIT, R.; DAS, A. K. A review on cutting of industrial ceramic materials. *Precision Engineering*, Elsevier, v. 59, p. 90–109, 2019.
- REGTIEN, P. P. *Sensors for mechatronics*. [S.l.]: Elsevier, 2012.
- RIBEIRO, D. M.; AGUIAR, P. R.; FABIANO, L. F.; D’ADDONA, D. M.; BAPTISTA, F. G.; BIANCHI, E. C. Spectra measurements using piezoelectric diaphragms to detect burn in grinding process. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, IEEE, v. 66, n. 11, p. 3052–3063, 2017.
- ROWE, W. B. *Principles of modern grinding technology*. [S.l.]: William Andrew, 2013.
- RUBIO, E.; TETI, R.; BACIU, I. Advanced signal processing in acoustic emission monitoring systems for machining technology. In: *Intelligent Production Machines and Systems*. [S.l.]: Elsevier, 2006. p. 1–6.
- SAMANT, A. Laser machining of structural ceramics: computational and experimental analysis. *Doctoral Dissertations*, p. 99, 2009.
- SAMANT, A. N.; DAHOTRE, N. B. Laser machining of structural ceramics—a review. *Journal of the European ceramic society*, Elsevier, v. 29, n. 6, p. 969–993, 2009.
- SCHAAF, P. *Laser processing of materials: fundamentals, applications and developments*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2010. v. 139.
- SHARMA, A.; YADAVA, V. Experimental analysis of nd-yag laser cutting of sheet materials—a review. *Optics & Laser Technology*, Elsevier, v. 98, p. 264–280, 2018.

- SHENG, P.; CHRYSOLOURIS, G. Investigation of acoustic sensing for laser machining processes part 2: Laser grooving and cutting. *Journal of materials processing technology*, Elsevier, v. 43, n. 2-4, p. 145–163, 1994.
- SON, S.; LEE, D. The effect of laser parameters on cutting metallic materials. *Materials*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 13, n. 20, p. 4596, 2020.
- SREEJITH, P.; NGOI, B. Material removal mechanisms in precision machining of new materials. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Elsevier, v. 41, n. 12, p. 1831–1843, 2001.
- STOURNARAS, A.; SALONITIS, K.; STAVROPOULOS, P.; CHRYSOLOURIS, G. Theoretical and experimental investigation of pulsed laser grooving process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Springer, v. 44, n. 1, p. 114–124, 2009.
- TELLE, R. Properties of ceramics. In: *Handbook of Ceramic Grinding & Polishing*. [S.l.]: Elsevier, 1999. p. 1–64.
- TETI, R.; JEMIELNIAK, K.; O'DONNELL, G.; DORNFELD, D. Advanced monitoring of machining operations. *CIRP annals*, Elsevier, v. 59, n. 2, p. 717–739, 2010.
- TSUTSUMI, C.; OKANO, K.; SUTO, T. High quality machining of ceramics. *Journal of Materials Processing Technology*, Elsevier, v. 37, n. 1-4, p. 639–654, 1993.
- UCHINO, K. *Advanced piezoelectric materials: Science and technology*. [S.l.]: Woodhead Publishing, 2017.
- USLAN, I. Co2 laser cutting: kerf width variation during cutting. *Proceedings of the institution of mechanical engineers, Part B: Journal of engineering manufacture*, Sage Publications Sage UK: London, England, v. 219, n. 8, p. 571–577, 2005.
- VIERA, M. A. A.; AGUIAR, P. R. D.; JUNIOR, P. O.; SILVA, R. B. D.; JACKSON, M. J.; ALEXANDRE, F. A.; BIANCHI, E. C. Low-cost piezoelectric transducer for ceramic grinding monitoring. *IEEE Sensors Journal*, IEEE, v. 19, n. 17, p. 7605–7612, 2019.
- WANG, X.; LUO, Y. Diameter prediction of removal particles in al<sub>2</sub>o<sub>3</sub> ceramic laser cutting based on vapor-to-melt ratio. *Journal of Materials Processing Technology*, Elsevier, v. 251, p. 109–117, 2018.
- WANG, Y.; YANG, L.; WANG, N. An investigation of laser-assisted machining of al<sub>2</sub>o<sub>3</sub> particle reinforced aluminum matrix composite. *Journal of materials processing technology*, Elsevier, v. 129, n. 1-3, p. 268–272, 2002.
- WASMER, K.; LE-QUANG, T.; MEYLAN, B.; VAKILI-FARAHANI, F.; OLBINADO, M.; RACK, A.; SHEVCHIK, S. Laser processing quality monitoring by combining acoustic emission and machine learning: a high-speed x-ray imaging approach. *Procedia Cirp*, Elsevier, v. 74, p. 654–658, 2018.

- WEBSTER, J.; DONG, W.; LINDSAY, R. Raw acoustic emission signal analysis of grinding process. *CIRP annals*, Elsevier, v. 45, n. 1, p. 335–340, 1996.
- WEE, L.; CROUSE, P.; LI, L. A statistical analysis of striation formation during laser cutting of ceramics. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Springer, v. 36, n. 7, p. 699–706, 2008.
- YANG, J. *Analysis of piezoelectric devices*. [S.l.]: World Scientific, 2006.
- YILBAS, B. The analysis of co2 laser cutting. *Proceedings of the institution of mechanical engineers, Part B: Journal of engineering manufacture*, Sage Publications Sage UK: London, England, v. 211, n. 3, p. 223–232, 1997.
- YILBAS, B.; AKHTAR, S.; KARATAS, C. Laser cutting of rectangular geometry into alumina tiles. *Optics and Lasers in Engineering*, Elsevier, v. 55, p. 35–43, 2014.
- YILBAS, B. S. *The laser cutting process: Analysis and Applications*. [S.l.]: Elsevier, 2017.
- ZANOTTO, E. D.; MIGLIORE, A. Propriedades mecânicas de materiais cerâmicos: uma introdução. *Cerâmica*, v. 37, n. 247, p. 7–16, 1991.
- ZHANG, X.; CHEN, G.; AN, W.; DENG, Z.; ZHOU, Z. Experimental investigations of machining characteristics of laser-induced thermal cracking in alumina ceramic wet grinding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Springer, v. 72, n. 9-12, p. 1325–1331, 2014.
- ZHENG, X.; TAN, J.; ZHANG, Q.; WANG, M.; MENG, L. Effect of laser surface texturing depth on the adhesion of electroless plated nickel coating on alumina. *Surface and Coatings Technology*, Elsevier, v. 311, p. 151–156, 2017.