

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a) o texto completo desta Tese será disponibilizado somente a partir de 06/12/2022.

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

Lista de Figuras	13
1 INTRODUÇÃO	18
1.1 MOTIVAÇÃO	18
1.2 OBJETIVO	21
1.3 ESTRUTURA DO DOCUMENTO	21
1.4 PUBLICAÇÕES OBTIDAS	21
2 REVISÃO DA LITERATURA	23
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
3 MATERIAIS E MÉTODOS	45

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
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	60
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
5	CONCLUSÕES	79
	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS	81

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

α : Difusividade térmica

σ : Desvio padrão

ρ : 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 difusividade 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; CHRYSSOLOURIS, 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 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 al₂o₃ 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 al₂o₃ 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 al₂o₃ 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.