

RESSALVA

Atendendo solicitação do autor, o texto completo deste documento será disponibilizado somente a partir de 24/01/2027.



Unesp - Universidade Estadual Paulista
"Júlio de Mesquita Filho"
Faculdade de Engenharia
Campus de Bauru -SP



CUNHA, P.A.

Pós-Graduação – Stricto Sensu

Engenharia Mecânica

PEDRO AUGUSTO DA CUNHA

**USINAGEM POR EMISSÃO ELÁSTICA
DE MATERIAIS FRÁGEIS**

Bauru
2025

USINAGEM POR EMISSÃO ELÁSTICA DE MATERIAIS FRÁGEIS

PEDRO AUGUSTO DA CUNHA

USINAGEM POR EMISSÃO ELÁSTICA DE MATERIAIS FRÁGEIS

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Bauru/ FEB da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” / UNESP, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof Dr Thiago Valle França

**Bauru
2025**

C972u

Cunha, Pedro Augusto da

Usinagem por emissão elástica de materiais frágeis / Pedro Augusto da Cunha. -- Bauru, 2024

95 p. : il., tabs., fotos

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Bauru

Orientador: Thiago Valle França

Coorientador: Bruno Torquato Ramasco

1. Usinagem por emissão elástica. 2. Planejamento de experimentos. 3. Usinagem. I. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE PEDRO AUGUSTO DA CUNHA, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 23 dias do mês de janeiro do ano de 2025, às 9h, no(a) Sala de reuniões do Departamento de Engenharia Mecânica, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de PEDRO AUGUSTO DA CUNHA, intitulada **INFLUÊNCIA DOS FATORES DO PROCESSO DE USINAGEM POR EMISSÃO ELÁSTICA NA TAXA DE REMOÇÃO DE MATERIAL UTILIZANDO EXPERIMENTOS FATORIAIS FRACIONADOS**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. THIAGO VALLE FRANÇA (Orientador(a) - Participação Presencial) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Universidade Estadual Paulista -UNESP Faculdade de Engenharia Câmpus de Bauru, Prof. Dr. LUIZ EDUARDO DE ANGELO SANCHEZ (Participação Presencial) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Universidade Estadual Paulista (UNESP) - Faculdade de Engenharia - Câmpus de Bauru , Prof. Dr. RENATO GOULART JASINEVICIUS (Participação Presencial) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Universidade de São Paulo (USP) - Escola de Engenharia de São Carlos. Após a exposição pelo mestrando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final: APROVAÇÃO . Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. THIAGO VALLE FRANÇA

PROPOSTA DE ALTERAÇÃO DO TÍTULO

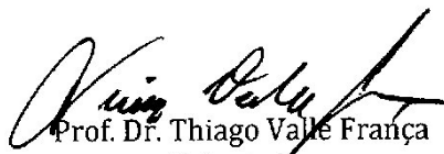
A COMISSÃO EXAMINADORA PROPÕE A ALTERAÇÃO DO TÍTULO DO TRABALHO DO ALUNO:
PEDRO AUGUSTO DA CUNHA

DE: "INFLUÊNCIA DOS FATORES DO PROCESSO DE USINAGEM POR EMISSÃO ELÁSTICA NA TAXA
DE REMOÇÃO DE MATERIAL UTILIZANDO EXPERIMENTOS FATORIAIS FRACIONADOS"

PARA:

USINAGEM POR EMISSÃO ELÁSTICA DE MATERIAIS FRÁGEIS

Bauru, 23 de janeiro de 2025.


Prof. Dr. Thiago Valle França
Orientador

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que nunca me desamparou me ensinando em suas palavras, guiando-me em minha caminhada, com muitas graças em momentos difíceis, onde tudo estava ruim, em caminhos errados.

Ao Professor Dr Thiago Franca, gostaria de agradecer profundamente pela oportunidade logo no início do mestrado, me acolhendo e juntos podendo desenvolver um trabalho de qualidade. Agradeço pela paciência quando houve momentos difíceis, por toda orientação e ensino durante todo este tempo. Muito Obrigado Professor vai ficar marcado por toda minha vida !!!!!

Agradeço também ao meu CO-Orientador Bruno Ramasco, por ter nos auxiliado no decorrer do trabalho, além dos amigos Marcelo Munhoz, Leonardo, Matheus, Joel, Hélio, Guilherme e Cristiano Soares Júnior que juntos conseguimos alcançar nosso objetivo do projeto, sendo fundamentais para o trabalho a participação de todos.

Agradeço também a contribuição da UNESP Bauru e USP de São Carlos, pela utilização de todas as estruturas onde podemos desenvolver e analisar todos os resultados

Agradeço a você Melissa Moretti Ferreira da Cunha, minha esposa amada, por estar sempre ao meu lado, me ajudando sempre. Te amo !! e principalmente nossa filha Louise que Deus nos proporcionou sendo minha inspiração diária

Agradeço a meus pais José Pedro da Cunha e Izabel Scarpinelli da Cunha, pela educação e apoio em minha vida, além disso, agradeço a toda minha família pelo apoio, educação e respeito, mas em especial, meu irmão José, minha cunhada Jamile, minha sobrinha Helena, meus avós Pedro Lourenço (*in memorian*), Pedro Scarpinelli (*in memorian*) e Maria (*in memorian*), Marinez Moretti, Amanda Moretti, Nélio, Murilo, meus amigos e amigas, minhas tias, meus tios e demais primos e primos, por estar ao meu lado sempre que precisei, dando-me apoio e muito carinho.

Agradeço a todos que de alguma forma contribuíram e apoiaram essa etapa.

RESUMO

O processo de usinagem, tem como característica a obtenção da forma final ou transformação de um material bruto em uma peça acabada por meio da remoção de material, sendo uma das principais formas de fabricação utilizadas na indústria para produzir uma ampla variedade de componentes, desde peças simples até produtos complexos. Com a evolução da usinagem, novos materiais e processo desafiaram os limites da usinagem tradicional, levando ao desenvolvimento de técnicas mais avançadas, como a usinagem de precisão, que é caracterizada pela produção de peças com alta precisão dimensional, acabamento e tolerâncias extremas. A usinagem por emissão elástica é uma técnica de alta precisão, sem contato entre a peça e a ferramenta, havendo a usinagem pelo fluxo abrasivo, suspensas em água destilada. O objetivo deste trabalho é estudar a técnica de usinagem por emissão elástica e identificar os principais fatores que governam o processo. O método de pesquisa será realizado através de ensaios, utilizando planejamento fracionado para avaliar os parâmetros de velocidade tangencial, tempo, dureza da ferramenta, acabamento da ferramenta e carga adicionada. Com os resultados, foi possível analisar os efeitos de cada fator sobre a variável de resposta, identificando que o fator: acabamento da ferramenta é o fator mais significativo, indicando que existe uma forte relação do acabamento da ferramenta com a taxa de remoção de material.

Palavras-chave: Usinagem por Emissão Elástica , Planejamento de experimentos , Usinagem.

ABSTRACT

The machining process is characterized by obtaining the final shape or transformation of a raw material into a finished part by removing material. It is one of the main forms of manufacturing used in industry to produce a wide variety of components, from simple parts to complex products. With the evolution of machining, new materials and processes have challenged the limits of traditional machining, leading to the development of more advanced techniques, such as precision machining, which is characterized by the production of parts with high dimensional accuracy, finish and extreme tolerances. Elastic emission machining is a high-precision technique, with no contact between the part and the tool, with machining by abrasive flow, suspended in distilled water. The aim of this work is to study the elastic emission machining technique and identify the main factors governing the process. The research method will be carried out through tests, using fractional planning to evaluate the parameters of tangential speed, time, tool hardness, tool finish and added load. With the results, it was possible to analyze the effects of each factor on the response variable, identifying that the factor: tool finish is the most significant factor, indicating that there is a strong relationship between tool finish and material removal rate.

Keywords: Elastic Emission Machining , Design of experiments , Machining.

SUMÁRIO

Capítulo 1 - INTRODUÇÃO.....	10
Objetivos.....	16
Capítulo 2 - REVISÃO DA LITERATURA.....	17
2.1- Danos subsuperficiais.....	17
2.2- Técnicas de detecção de danos subsuperficiais destrutivo e não destrutivas.....	18
2.2.1 - Técnicas de polimento - Polimento cônico tradicional.....	18
2.2.2 - Dimpling.....	20
2.2.3 - Polimento MRF.....	21
2.2.4 - Microscopia transversal.....	21
2.2.5 - Microscopia Eletrônica de Transmissão.....	22
2.2.6 - Microscopia Confocal.....	23
2.2.7 - Tomografia óptica coerente.....	23
2.2.8 - Microscopia acústica de varredura.....	25
2.2.9 - Dispersão a laser.....	27
2.3 - Usinagem por emissão elástica.....	29
2.3.1 - Técnicas de Usinagem por Emissão Elástica.....	33
2.4 - Planejamento Experimental.....	45
2.4.1 - Planejamento Experimental Fatorial completo de dois níveis.....	51
2.4.2 - Planejamento Experimental Fatorial fracionado.....	52
Capítulo 3 - MATERIAL E MÉTODOS.....	58
3.1 Bancada de Experimentos e Materiais Utilizados.....	58
3.1.1 Bancada (equipamentos e dispositivos).....	58
3.1.2 Materiais (ferramentas, grãos abrasivos, água destilada, etc.).....	59
3.1.3 Montagem bancada de testes.....	63
3.2 Planejamento Experimental.....	67
3.2.1 Definição da variável resposta.....	67
3.2.2 Definição dos fatores e níveis.....	69
3.2.3 Definição do tipo de experimento.....	71
3.2.4 Procedimento de execução dos testes.....	74
Capítulo 4 - Resultados e Discussões.....	77
Capítulo 5 - Conclusões.....	91
Capítulo 6 - Referências Bibliográficas.....	92

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- CLSM** - confocal laser scanning microscopy
- CNC** - Controle Numérico Computadorizado
- CPCM** - cross-polarization confocal microscopy
- EDM** - descarga micro elétrica
- EEM** - Elastic emission machining
- FM** - fluido magnetoreológico
- MRF** - Magnetorheological Finishing
- OCT** - optical coherent tomography
- SAM** - scanning acoustic microscopy
- SSD** - Danos superficiais e subsuperficiais
- TC** - tomografia computadorizada
- TEM** - microscopia eletrônica de transmissão
- TIRM** - total internal reflection microscopy
- TOC** - Tomografia Óptica Coerente

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Existem vários processos de fabricação mecânica para produzir uma ampla gama de peças e componentes e com isso diversas maneiras de transformar uma matéria prima em um produto acabado, garantindo formas, dimensões, acabamentos, geometria e tolerâncias) e as propriedades (dureza, condutividade e resistência) exigidas para seu uso e aplicação .

De acordo com Wrublak et al. (2008), a usinagem é processo de remoção de material muito utilizado na indústria, sendo entendida como o processo que confere à peça sua forma, dimensões e acabamento, a partir da remoção de material sobressalente na forma de cavacos.

Segundo Pereira; (Correa; Pivato, 2005), diz que a usinagem é um método de produção amplamente utilizado, já que com o aumento das demandas por produtos com precisão geométrica, dimensões e acabamento superficial provenientes desse processo crescem, as operações de fabricação necessitam constantemente aprimorar suas capacidades para atender a essas exigências em evolução.

Pimentel (2014) explica que o ato de usinar consiste fundamentalmente em provocar modificações na matéria-prima visando a obtenção de um produto acabado. Conforme destacado pelo autor, quando se trata de alterações de forma, os processos de fabricação podem ser categorizados em três tipos: fabricação com remoção de material, fabricação sem remoção de material e fabricação com adição de material

Ainda de acordo com Pimentel (2014) a extensa aplicação dos processos de usinagem é atribuída principalmente à diversidade de geometrias que podem ser produzidas, aliada a um elevado nível de precisão dimensional e acabamento de superfície satisfatório. O autor destaca que tais características resultam na impossibilidade, na maioria dos casos, de substituir os processos de usinagem por outras formas de fabricação, sendo frequentemente empregados com o propósito de aprimorar o acabamento superficial ou a tolerância dimensional do produto

Qualquer processo de produção, incluindo a usinagem, residem na relação custo-benefício, alcançando um produto final de alta qualidade em menos tempo e a

um custo reduzido. Assim, a busca por otimização dos parâmetros de usinagem é crucial, com o objetivo de mitigar danos e desgastes nas ferramentas, e nas peças, que representam um dos principais desafios enfrentados pelas indústrias. (Rombaldi 2016),

Diniz (et al., 2014) cita que a tecnologia da usinagem se alavancou durante o Taylorismo, no mesmo período em que o aço rápido foi descoberto, e foi possível aumentar a produtividade e a competitividade no setor industrial, onde, a diferenciação de produtos não era algo explorado, pois a produção era em massa e focada na velocidade de fabricação. Já no cenário atual, com o avanço da tecnologia e segmentação do mercado, o foco da indústria está na diferenciação de produtos e para atender essa demanda sendo necessário modernizar as máquinas e buscar novas ferramentas que trazem maior durabilidade e qualidade ao processo de usinagem

Groover (et al., 2014) destaca que o processo de fabricação envolve a conversão da matéria-prima em um produto final, seja por meio de métodos que não envolvam remoção de material, como fundição, soldagem, metalurgia do pó, conformação, entre outros, ou por meio de métodos que requerem remoção de material, como usinagem convencional ou não-convencional

Machado (et al., 2009), classifica os processos de fabricação em dois grandes grupos com remoção de cavaco e sem remoção de cavaco

Com a evolução da usinagem e o processo de fabricação ao longo do tempo, novos materiais, novos metais de alta resistência e os polímeros de engenharia, desafiaram os limites da usinagem tradicional, levando ao desenvolvimento de técnicas mais avançadas, como a usinagem de alta velocidade e a micro usinagem, também chamadas de usinagem de precisão

Na usinagem de precisão, segundo o autor é uma usinagem que exige tolerâncias estreitas; envolvendo uma série de processos e de materiais em sua aplicação, além de condições específicas para sua realização com diversas modalidades, como usinagem química, convencional e descargas elétricas (Diniz et al. 2014).

Segundo Schroeter, (1997) a usinagem de precisão é uma técnica fundamental na indústria moderna, caracterizada pela produção de peças com alta precisão dimensional, acabamento de superfície superior e tolerâncias extremamente apertadas. Esse processo é essencial em diversos setores, incluindo aeroespacial, automotivo, médico, óptico, eletrônico e de defesa, onde a precisão e a qualidade são críticas.

O autor ainda cita que existem várias técnicas e tecnologias empregadas na usinagem de precisão, cada uma adaptada às necessidades específicas das peças a serem produzidas. Algumas das principais características da usinagem de precisão incluem tolerâncias em micrômetros (μm) ou até mesmo em nanômetros (nm). Isso garante que as dimensões das peças sejam precisas e consistentes, atendendo aos requisitos de montagem e funcionamento (Schroeter, 1997).

A usinagem de alta precisão demanda um elevado padrão de qualidade, livre de imperfeições, uma vez que o controle dimensional e superficial precisa ser extremamente rigoroso, especialmente em peças com medidas extremas, exigindo uma perfeição absoluta em seu processo de usinagem, assim em algumas usinagens podemos encontrar algumas imperfeições, trincas e danos causados nas respectivas usinagens chamados danos subsuperficiais que interferem diretamente na qualidade da peça.

Os danos subsuperficial podem ser definidos como qualquer efeito degradante que se manifeste abaixo da superfície da peça, como tensões residuais, microtrincas e alterações na dureza próximas à superfície (Faccio, 2002).

Segundo Fujita (2007) um exemplo de danos subsuperficiais é durante a retificação quando ocorre uma grande quantidade de eventos que geram um campo radial de tensões tangenciais, o autor cita que existem vários métodos de medir a extensão do trincamento subsuperficial, porém a maioria deles é destrutivo para a peça.

O dano subsuperficial na forma de tensões residuais pode ser medido através de técnicas de raios-X. Esta técnica é baseada na determinação da deformação do retículo cristalino provocada pelas tensões (Fujita, 2007).

Os danos subsuperficiais são prejudiciais à resistência, desempenho e vida útil de uma peça usinada. Para fabricar uma peça de alta qualidade, é necessário detectar e remover os danos subsuperficiais induzidos pela usinagem pelos processos precedentes. No entanto, os danos subsuperficiais geralmente são cobertos com uma camada gerada em um processo de usinagem, sendo é bastante difícil observar e detectar diretamente por microscopia óptica. Uma detecção eficiente de danos subsuperficiais leva diretamente à melhoria da qualidade e economia de tempo na usinagem de materiais.

Os métodos de identificação de danos subsuperficiais podem ser realizados com métodos destrutivos e não destrutivos. Embora seja mais confiável, métodos destrutivos são tipicamente demorados e confinados às informações de danos locais. Métodos não destrutivos geralmente sofrem com fatores de incerteza, mas podem fornecer informações globais sobre a distribuição de danos (Fujita, 2007).

Yin et al. (2018) diz que os métodos destrutivos tendem a demandar mais tempo em comparação com métodos não destrutivos, o que reduz a eficiência da produção e aumenta os custos, devido a preparação da peça . Métodos não destrutivos preservam as amostras e detectam SSD com base no conhecimento de óptica e acústica, etc. Uma comparação dos métodos destrutivos é apresentada na Tabela

Tabela 1 - Comparação dos métodos destrutivos para detecção de SSD

Métodos	Vantagens	Desvantagens
Técnicas de polimento	Simple e fácil de operar	Gravura após polimento levando á propagação de trincas
Microscopia transversal simples	Alta precisão adquirindo apenas SSD local	Incapacidade de detectar a distribuição global
Microscopia TEM	Alta resolução para danos micro/nano	Procedimento sofisticados para a preparação de amostras; incapacidade de detectar SSD maiores
Gravura Química	Fácil de operar com baixo custo	Gravura levando á propagação de fissuras e erros de medição; produtos químicos prejudiciais á saúde humana e ambiental

Fonte - Adaptado de Yin et al. (2018)

Esses métodos são promissores porque podem fornecer uma capacidade de varredura rápida e detecção de danos subsuperficiais na distribuição espacial.

Segundo Yao Peng et al. (2010), os métodos não destrutivos preservam as amostras e economizam tempo de preparação, o que favorece a melhoria da

eficiência geral da fabricação e a redução de custos. No entanto, ainda existem algumas limitações a serem superadas. Os métodos estão listados e comparados na Tabela 2

Tabela 2 - Comparação dos métodos não destrutivos para detecção de SSD

Métodos	Vantagens	Desvantagens
Métodos preditivos	Simple, rápido e de baixo custo	Aplicável para prever a profundidade estatística do SSD; Incapaz de prever a configuração tridimensional e a distribuição adição de SSD;
OCT	Digitalização global e aplicável a imagens tridimensionais	Inaplicável à detecção de materiais com baixa dispersão de luz; Difícil processar imagens
TIRM	Varredura global e detecção em processo	Difícil medir quantitativamente a profundidade do SSD; Alta exigência nas condições da superfície, adequada para amostras polidas
CLSM	Varredura global e aplicável a três dimensões configuração profissional e distribuição espacial de SSD	Alta exigência nas condições da superfície, adequada para amostras polidas;
CPCM	Verificação global rápida; Alta resolução na direção de profundidade;	Baixa resolução
SAM	Alta eficiência de detecção; Alta resolução na direção de profundidade	Baixa resolução; Alta exigência nas condições da superfície

Fonte - Adaptado de Yin et al. (2018)

O EEM é um processo de usinagem sem contato, diferente do polimento convencional, que utiliza uma ferramenta abrasiva. O processo de remoção no EEM depende exclusivamente do contato entre as partículas de pó e a superfície da peça. A técnica é uma alternativa interessante na caracterização da subsuperfície de materiais, pois elimina os métodos convencionais que envolvem corte, lixamento e polimento da superfície a ser estudada.

Yamamura (2002) diz que a usinagem por emissão elástica (EEM) que é um método preciso de preparação de superfície que utiliza reações químicas entre superfícies sólidas, foi desenvolvido para resolver problemas que exigem usinagens de extrema precisão e que na visão geral do processamento a usinagem por emissão elástica tem suas vantagens sobre outros processos químicos.

Este processo se caracteriza pela remoção de material, baseado no estudo de Mori et al. (1987), uma contribuição significativa para o campo da engenharia de manufatura, especificamente na área de usinagem. Neste estudo, Mori e sua equipe exploram diferentes aspectos da usinagem, como o desempenho das ferramentas de corte, a influência dos parâmetros de usinagem na qualidade das peças e a otimização dos processos de fabricação.

Segundo Faccio (2002), uma usinagem geometricamente perfeita pode ser alcançada empregando um método de usinagem na ordem de tamanho atômico. A EEM (usinagem de emissão elástica), desenvolvida por Y. Mori, K. Yamauchi and K. Endo (1987), é uma das usinagens de tamanho de métodos atômico, introduzido a partir de conceito de ultra precisão seus princípios são desenvolvidos a partir de dois materiais de fase sólida compostos por diferentes elementos químicos realizando contato um com o outro, realizando interações.

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES

Neste estudo, foi aplicado o planejamento experimental em um processo de usinagem por emissão elástica, com a matriz baseada em cinco fatores: dureza da ferramenta, acabamento da ferramenta, velocidade de corte, carga e duração da carga.

Ao analisar os efeitos de cada fator sobre a variável de resposta, foi possível identificar que o fator: acabamento da ferramenta (B) é o fator mais significativo, indicando que existe uma forte relação do acabamento da ferramenta com as três variáveis de resposta analisadas. Além disso, o fator A (dureza da ferramenta) indica sua importância para a rugosidade superficial.

Após a realização da análise e verificação dos resultados, haverá a necessidade de realizar estudos mais aprofundados sobre a influência de alguns parâmetros principalmente referente acabamento da ferramenta (B) em relação ao mecanismo de remoção de material,

Pode ser observado que quando este fator está no seu menor nível (acabamento CNC) quando todas as variáveis de saída aumentam, em especial a taxa de remoção de material.

No modelo reduzido, considerando apenas os fatores B, C e a interação BC, para taxa de remoção de material (TRM) e profundidade da calota (h), possuem valores de R^2 acima de 85% para todas as variáveis de saída analisadas, o que indica uma forte adequação do modelo reduzido às observações medidas. Essa afirmação é válida também para o modelo reduzido feito para a rugosidade aritmética (R_a), que gerou valor de R^2 acima de 92%.

Ao final do estudo, constatou-se que os objetivos geral e específicos foram alcançados, uma vez que o planejamento experimental identificou os principais fatores influenciadores para otimizar os fatores para aumentar a taxa de remoção de material.

CAPÍTULO 6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTONY, J. **Design of experiments for engineers and scientists**. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2003. 152 p.

Araujo, Mariana Silva de - Utilização de resíduos de catalisador (ecat) e cinzas da casca de arroz (cca) na elaboração de vidros silicatos soda-cal destinados a embalagem, São Paulo – 2016

Arce, Carlos G. - Orientações para o polimento e retoque das lentes de contato rígidas gás permeáveis , UNICAMP, 1999

BANZATTO, D. A.; KRONKA, S. N. **Experimentação agrícola..** ed. Jaboticabal: Funep, 2006. 237 p.

BLAEDEL, K.L.; TAYLOR, J.S.; EVANS, C.J., Ductile-regime grinding of brittle materials.In: JAHANMIR, S.; RAMULU, M.; KOSHY, P. **Machining of Ceramics and Composites**,Marcel Dekker, Cap.5, 1999.

BOX, G. E. P.; HUNTER, J. S.; HUNTER, W. G. **Statistics for experimenters:** design, innovation, and discovery. 2. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2005. 633 p.

BORTOLINI, Juliano. Estudo de experimentos fatoriais 2k aplicados em um processo industrial. 2012. 143 p. Dissertação (Mestrado em Estatística e Experimentação Agropecuária) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2012."

CORREA , José R.; NAGATA, Tatsuya; NICOLA, Andre; RODRIGUES, Kelly . Microscopia Confocal Básica : Universidade de Brasília, 2012

DAMASCENO, Luiz Carlos Medeiros. Performance of fractional factorial to estimate main effects in the presence of double interactions. 2011. 79 f. Dissertação (Mestrado em Estatística Aplicada e Biometria) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.

DINIZ, Anselmo Eduardo; MARCONDES, Francisco Carlos; COPPINI, Nivaldo Lemos. Tecnologia da usinagem dos materiais. 9. ed. São Paulo, SP: Artliber, 2014.

FACCIO, I. Investigação sobre o acabamento superficial de usinagens com altíssimas velocidades de corte. 2002. Departamento de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

FUJIMOTO, J. G. Optical Coherence Tomography. C. R. Acad. Sci., series IV, 2, p., 2001.

Fujita, Humberto . Retificação da alumina com rebolo diamantado usando diferentes métodos de lubri-refrigeração, Bauru, 2007

GALDAMEZ, E. V. C.; CARPINETTI, L. C. R. Aplicação das técnicas de planejamento e análise de experimentos no processo de injeção plástica. **Gestão & Produção**, v. 11, n. 1, p. 121-134, 2004.

GIESBRECHT, Francis G.; GUMPERTZ, Marcia L. **Planning, construction, and statistical analysis of comparative experiments**. John Wiley & Sons, 2011.

GROOVER, Mikell P. Fundamentals of modern manufacturing: Materials, processes, and systems. New Jersey: John Wiley & Sons, 2014.

HINKELMANN, K.; KEMPERTHOTORNE, O. **Designs and Analysis of Experiments**, v.3. New York 2008

HIRATA T, TAKEI Y, MIMURA H. Machining property in smoothing of steeply curved surfaces by elastic emission machining[J]. Procedia CIRP, 2014, 13: 198-202.

HIRAOKA, D; K. HAMAZAKI; K. MATSUMURA, **Pesquisa sobre o desenvolvimento de um protótipo de máquina NC EEM para usinagem de espelhos a laser de alta potência** - KOYO Engineering Journal Edição em Inglês No.155E (1999)

JIJU, A. **Design of experiments for engineers and scientists**. Butterworth-Heinemann, 2003.

JIJU, A.; TZU-YAO, C.; SID, G. Training for design of experiments. 2003.

KANAOKA M, NOMURA K, YAMAUCHI K, et al.. Efficiency-enhanced elastic emission machining on the basis of processing mechanism[C]. Proceedings of the 12th Euspen International Conference, 2012

Kanaoka, M., Liu, C., Nomura, K., Ando, M., Takino, H., Fukuda, Y., Mori, Y., Mimura, H. e Yamauchi, K. (2007) 'Figurando e capacidades de suavização de usinagem de emissão elástica para óptica de vidro de baixa expansão térmica', Journal of Vacuum Science and Technology, Vol. B25, nº 6, pp.2110– 2113.

K.Nomura, M. Ando, H. Takino, Y. Fukuda, H. Mimura, K. Yamauchi, e Y. Mori. **Capacidades de figuração e suavização de usinagem de emissão elástica para óptica de vidro de baixa expansão térmica** - Citação: Journal of Vacuum Science & Technology B **25**, 2110 (2007); doi: 10.1116/1.2789440 Ver on-line: <http://dx.doi.org/10.1116/1.2789440> Veja o índice: <http://scitation.aip.org/content/avs/journal/jvstb/25/6?ver=pdfcov> Publicado pela AVS: Ciência e Tecnologia de Materiais, Interfaces e Processamento

KIM J D. Motion analysis of powder particles in EEM using cylindrical polyurethane wheel[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2002,

KOMANDURI, R.; LUCCA, D. A.; TANI, Y. Technological advances in fine abrasive processes. CIRP Annals-Manufacturing Technology, v. 46, n. 2, p. 545-596, 1997

Lacerda, Douglas Luiz Pinto da – Emprego de microscopia de força atômica e nanoindentação na caracterização termomecânica de minerais e matéria orgânica: uma aplicação em folhelhos da formação Irati, PUC-Rio, 2019

LI Jia-hui, HOU Xi, ZHANG Yun, WANG Jia, ZHONG Xian-yun. Research progress of

elastic emission machining in optical manufacturing[J]. Chinese Optics, 2021, 14(5): 1089-1103. doi: 10.37188/CO.2021-0022 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2021-0022>

LI, Xiang; SUDARSANAM, Nandan; FREY, Daniel D. Regularities in data from factorial experiments. **Complexity**, v. 11, n. 5, p. 32-45, 2006.

MACHADO, A. R.; SILVA, M. B. da. **Usinagem dos metais**. 8. ed. Uberlândia, 2009.

MASON, R. L.; GUNST, R. L.; HESS, J. L. **Statistical design and analysis of experiments** with applications to engineering and science. 2. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2003. 728 p.

MIMURA, Hidekazu et al. Fabrication of a 400-mm-long mirror for focusing X-ray free-electron lasers to sub-100 nm. In: Advances in X-Ray/Euv Optics and Components Iii. SPIE, 2008. p. 204-211.

MORI, Y.; YAMAUCHI, K.; ENDO, K. Elastic emission machining. Precision Engineering, v. 9, n. 3, p. 123-128, 1987.

MONTGOMERY, C. D.; RUNGER, G. C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. 4. ed. São Paulo :LTC, 2009.

MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**, 8. ed., John Wiley & Sons, Inc., 2009.

NOMURA K ;KANAOKA M, TAKINO H, , et al.. Propriedades de remoção de materiais de baixa expansão térmica com usinagem de emissão elástica de esfera rotativa [J]. Ciência e Tecnologia Avançada Materiais, 2007,

PEREIRA, C.; CORREA, S.J.; PIVATO, C. Como se apresentam e para que servem os lubrificantes e refrigerantes. **Máquinas e Metais**, abril, 2005.

PIMENTEL, Ricardo. Melhoria do processo de furação de ferro fundido cinzento com brocas helicoidais de metal-duro. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2014.

QU, X.; WU, C. F. J. One-Factor-at-a-Time Designs of Resolution V. **Statistical Planning and Inference**, 2005.

QU, W.; WANG, K.; MILLER, M.H.; HUANG, Y.; CHANDRA, A. Using vibration-assisted grinding to reduce subsurface damage. **Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology**, 2004.

RANDI, Joseph A.; LAMBROPOULOS, John C.; JACOBS, Stephen D. Subsurface damage in some single crystalline optical materials. **Applied optics**, v. 44, n. 12, p. 2241-2249, 2005.

RODRIGUES, Maria Isabel e IEMMA, Antônio Francisco. Planejamento de experimentos e otimização de processos: uma estratégia sequencial de planejamentos. . Campinas: Casa do Pão. . Acesso em: 06 maio 2024. , 2005

ROMBALDI, I. A. O Real custo de uma pastilha. O Mundo da Usinagem, São Paulo, 2016.

Santos, Dener Augusto Oliveira - Aplicação do planejamento de experimentos fatorial fracionário para análise de variáveis em impressão 3d - Ituiutaba – 2022

Schroeter, R. B. Usinagem de Ultraprecisão de Elementos Ópticos Transmissivos no Espectro Infravermelho. Florianópolis, UFSC, 1997. Universidade Federal de Santa Catarina, 1997.

Sousa, Jézica Cristina de Sá - Proposição de atividades práticas experimentais para a complementação do ensino da disciplina de planejamento de experimentos industriais (enp526), João Monlevade, 2019 - universidade federal de ouro preto

STORCK, L. et al. **Experimentação vegetal**. 2. ed. Santa Maria: Ed. UFSM, 2006. 198 p.

TANCO, Martin et al. How is experimentation carried out by companies? A survey of three European regions. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 24, n. 8, p. 973-981, 2008.

TAKEI Y, MIMURA H. Desenvolvimento de perfilador de superfície para mandril mestre de espelho elipsoidal de raios X [J]. Atas da SPIE, 2014, 9962: 99620C.

Teles, Valérya Carneiro -Uso de Microscopia de Luz e Eletrônica como Técnicas de Análise Morfológica, Brasília, DF– 2017

Tortora, Gerard j; Berdell R; Case, Christine L. Microbiologia. 12 Porto Alegre 2017

VASCONCELOS, Marçal J. Neto. Um sistema de metrologia utilizando reflectometria Óptica de Baixa Coerência. PIBIC, PUC-Rio, agosto 2006.

Yin, Jing-fei , Qian Bai and Bi Zhang. Methods for Detection of Subsurface Damage: A Review. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2018

YAMAMURAK,MIMURAH,YAMAUCHIK,Fabricação de superfícies asféricas com precisão de nível nm por usinagem de vaporização química de plasma numericamente controlada (CVM) e usinagem de emissão elástica (EEM),[2002](#),

YAO, PENG et al. Ductile and brittle mode grinding of fused silica. In: Key Engineering Materials. Trans Tech Publications Ltd, 2010. p. 21-25.

Yin, Jing-fei , Qian Bai and Bi Zhang. Methods for Detection of Subsurface Damage: A Review. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2018

WRUBBLACK, O. PILATTI, L.A. PEDROSO, B. Parâmetros e métodos de usinagem e sua relação com os custos do processo e o acabamento final do produto.Campos Gerais, MG, Agosto, 2008.

W, Wang K, Miller M, Huang Y, Chandra A Usando retificação assistida por vibração para reduzir danos subterrâneos, 2017



Unesp - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"
Faculdade de Engenharia - Campus de Bauru -SP
Telefones: (14) 3103-6108 e 3103-6109
e-mail: spg@feb.unesp.br