



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**Faculdade de Ciências Aplicadas**



**RENATA DA SILVA SANTOS**

**ANÁLISE DO PROCESSO DE MARCAÇÃO A LASER EM SUPERFÍCIE DE PEÇAS  
DE ALUMÍNIO**

**LIMEIRA**  
**2024**



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
Faculdade de Ciências Aplicadas



RENATA DA SILVA SANTOS

**ANÁLISE DO PROCESSO DE MARCAÇÃO A LASER EM SUPERFÍCIE DE PEÇAS  
DE ALUMÍNIO**

*Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Aplicadas da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestra em Engenharia de Produção e de Manufatura na área de Manufatura de Materiais Avançados.*

*Orientador:* Prof. Dr. Daniel Iwao Suyama  
*Coorientador:* Prof. Dr. Eduardo Paiva Okabe

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELA ALUNA RENATA DA SILVA SANTOS, E ORIENTADO PELO PROF. DR. DANIEL IWAO SUYAMA E COORIENTADO PELO PROF. DR. EDUARDO PAIVA OKABE.

LIMEIRA  
2024

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)  
Biblioteca da Faculdade de Ciências Aplicadas  
Ana Luiza Clemente de Abreu Valério - CRB 8/10669

Santos, Renata da Silva, 1995-  
Sa59a Análise do processo de marcação a LASER em superfície de peças de  
alumínio / Renata da Silva Santos. – Limeira, SP : [s.n.], 2024.

Orientador: Daniel Iwao Suyama.

Coorientador: Eduardo Paiva Okabe.

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP),  
Faculdade de Ciências Aplicadas.

1. Rastreabilidade. 2. Alumínio. 3. Qualidade. I. Suyama, Daniel Iwao,  
1984-. II. Okabe, Eduardo Paiva, 1976-. III. Universidade Estadual de  
Campinas (UNICAMP). Faculdade de Ciências Aplicadas. IV. Título.

Informações Complementares

**Título em outro idioma:** Analysis of the LASER marking process on the surface of  
aluminum parts

**Palavras-chave em inglês:**

Traceability

Aluminum

Quality

**Área de concentração:** Manufatura de Materiais Avançados

**Titulação:** Mestra em Engenharia de Produção e de Manufatura

**Banca examinadora:**

Daniel Iwao Suyama [Orientador]

Fernanda Martins Queiroz

Jaime Hideo Izuka

**Data de defesa:** 26-07-2024

**Programa de Pós-Graduação:** Engenharia de Produção e de Manufatura

**Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)**

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0009-0006-6472-2629>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/6449324063096402>

## **Folha de Aprovação**

**Autora: Renata da Silva Santos**

**Título: Análise do processo de marcação a LASER em superfície de peças de alumínio**

**Natureza:** Dissertação

**Área de Concentração:** Manufatura de Materiais Avançados (MMA)

**Instituição:** Faculdade de Ciências Aplicadas – FCA/Unicamp

**Data da Defesa:** Limeira-SP, 26 de julho de 2024.

### **BANCA EXAMINADORA:**

Prof. Dr. Daniel Iwao Suyama (orientador)  
Faculdade de Ciências Aplicadas - FCA/Unicamp

Prof. Dr. Jaime Hideo Izuka (membro)  
Faculdade de Ciências Aplicadas - FCA/Unicamp

Dra. Fernanda Martins Queiroz  
Escola e Faculdade de Tecnologia SENAI Paulo Ernesto Tolle

A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria do Programa da Unidade.

## DEDICATÓRIA

*À minha família, por todo o amor, incentivo e inspiração que me deram durante essa jornada acadêmica, em especial para meu filho Anthony Lameu Deotti que me fortalece e me ajuda a manter a sanidade em momentos de estresse e dificuldade.*

## AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho não seria possível sem a ajuda de muitas pessoas que generosamente contribuíram com seu tempo e conhecimento. Quero expressar minha sincera gratidão a todos que me ajudaram ao longo dessa jornada acadêmica de desafios.

Para começar, quero agradecer ao meu orientador Daniel Iwao Suyama, pela orientação cuidadosa e precisa constantemente e mentoria ao longo do trabalho. Sua calma, compreensão e expertise foram inestimáveis e fizeram toda a diferença em minha trajetória.

Agradeço também à minha família e amigos, pelo apoio e incentivo que sempre me ofereceram. Sem a ajuda deles, eu não teria chegado tão longe. Em especial meu esposo, Luiz Gustavo Deotti que de forma carinhosa me deu força e coragem, me apoiando nos momentos de dificuldade e estressantes. Quero agradecer também o meu filho, Anthony Lameu Deotti, que embora não tivesse conhecimento disto, mas iluminou de maneira essencial os meus pensamentos me levando a buscar mais conhecimento e ser uma pessoa cada vez mais humana. E não deixando de agradecer de forma grandiosa meus pais, Santana Maria da Silva Santos e José Lameu Alves dos Santos, e minha irmã Rafaela da Silva Santos, a quem realizo oração todas as noites a minha existência e a pessoal que me tornei e o objetivos que alcancei e venho alcançando.

Por fim, quero expressar minha gratidão à Universidade Estadual de Campinas e ao Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial por me dar oportunidade de estudar e crescer academicamente. Estou honrada por fazer parte desta comunidade e sou grata pelos recursos e oportunidade disponíveis.

Espero contribuir de alguma forma no futuro, meu muito obrigada.

*“Não creio que por ser mulher deva ser tratada de maneira especial... de certo estaria reconhecendo que sou inferior aos homens, e eu não sou inferior a nenhum deles”.*

**Marie Curie.**

## RESUMO

No cenário atual, as máquinas a LASER desempenham uma função significativa na indústria. Geralmente, é o método de marcação a LASER que dá início ao controle da produção de várias peças que em conjunto com outros processos de fabricação, resultam na criação de produtos comuns em nosso cotidiano. Diante deste contexto, um dos principais dilemas dos dispositivos para realizar marcação a LASER está relacionado com a escolha inadequada dos parâmetros de marcação. O ajuste inadequado desses parâmetros resulta na baixa da qualidade da superfície marcada, uma condição difícil de reverter. Essa perda de qualidade se manifesta na rugosidade superficial. No estudo foram executadas várias marcações de amostras utilizando tecnologia de marcação a LASER de fibra óptica. Diferentes configurações de parâmetros de marcação foram experimentadas, utilizando o alumínio como matéria prima. Os resultados desta pesquisa têm implicações significativas para a rastreabilidade e identificação de produtos no setor de produção. Eles podem ser utilizados para rastreabilidade do setor automotivo, metalmecânica e marcação em geral, através do código QR Code. Em resumo, esta pesquisa contribui para o conhecimento e a compreensão da marcação das superfícies de peças de alumínio na saída do LASER de fibra óptica considerando os parâmetros de potência, velocidade e frequência, evidenciando a importância do tamanho adequado do vetor para marcação do código, bem como a especificidade do objetivo da marcação, obtendo que a potência de radiação teve influência significativa no estudo. Os resultados obtidos por meio dos experimentos e análises realizadas, foi estabelecido que os melhores parâmetros para a marcação de códigos QR Code são  $P_s V_m F_i$ ,  $P_m V_m F_s$  e  $P_m V_i F_m$ , com dimensões mínimas de 10 mm. Esses resultados são relevantes para pesquisadores, profissionais e estudantes que deseja aplicar marcação/ gravação a LASER em seus respectivos campos para rastreabilidade.

**Palavras-chave:** parâmetros, marcação a LASER, rastreabilidade, alumínio e qualidade.

## ABSTRACT

In the current scenario, LASER machines play a significant role in the industry. Generally, it is the LASER marking method that starts the control of the production of various parts that, together with other manufacturing processes, result in the creation of common products in our daily lives. Given this context, one of the main dilemmas of devices for performing LASER marking is related to the inadequate selection of marking parameters. The inadequate adjustment of these parameters results in the low quality of the marked surface, a condition that is difficult to reverse. This loss of quality manifests itself in surface roughness. In the study, several sample markings were performed using fiber optic LASER marking technology. Different marking parameter configurations were tested, using aluminum as the raw material. The results of this research have significant implications for product traceability and identification in the manufacturing sector. They can be used for traceability in the automotive, metalworking and general marking sectors, through the QR Code. In summary, this research contributes to the knowledge and understanding of the marking of the surfaces of aluminum parts at the output of the fiber optic LASER considering the parameters of power, speed and frequency, highlighting the importance of the adequate size of the vector for code marking, as well as the specificity of the marking objective, obtaining that the radiation power had a significant influence on the study. The results obtained through the experiments and analyzes carried out, it was established that the best parameters for marking QR Code codes are PsVmFi, PmVmFs and PmViFm, with minimum dimensions of 10 mm. These results are relevant for researchers, professionals and students who want to apply LASER marking/engraving in their respective fields for traceability.

**Keywords:** Parameters, LASER marking, traceability, aluminum and quality.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|  |    |
|--|----|
| Figura 1. Interação da luz com a matéria.....  | 22 |
| Figura 2. Diagrama relativo aos tipos de lasers.....                                 | 23 |
| Figura 3. Três componentes importantes do laser. ....                                | 24 |
| Figura 4. Esquema de um laser de fibra. ....   | 27 |
| Figura 5. Perfil de rugosidade Ra .....  | 32 |
| Figura 6. Rugosidade parcial Zi, para definir Rz .....                               | 32 |
| Figura 7. Representação do sistema de variáveis do processo .....                    | 33 |
| Figura 8. Diagrama de fluxo do PRISMA.....   | 36 |
| Figura 9. Produção Científica Anual .....  | 39 |
| Figura 10. Autores mais relevantes .....   | 40 |
| Figura 11. Produção científica dos países .....                                      | 42 |
| Figura 12. Teste para definição da potência mínima .....                             | 46 |
| Figura 13. Desalinhamento.....   | 43 |
| Figura 14. Ajuste da lente.....  | 43 |
| Figura 15. Alinhamento.....  | 48 |
| Figura 16. Teste para definição da sobreposição e espaçamento do preenchimento ..... | 51 |
| Figura 17. Representação do Código QR Code.....                                      | 52 |
| Figura 18. Desenho 2D da chapa.....  | 54 |
| Figura 19. Chapa utilizada no experimento.....                                       | 54 |
| Figura 20. Experimento para definição da Rugosidade Inicial da chapa. ....           | 55 |
| Figura 21. Máquina a laser de Fibra Óptica .....                                     | 56 |
| Figura 22. Sistema de exaustão .....   | 57 |
| Figura 23. Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) .....                           | 57 |
| Figura 24. Rugosímetro .....   | 58 |
| Figura 25. Máquina de medição por coordenadas óptica - Alicona .....                 | 59 |
| Figura 26. Microscópio Óptico.....   | 60 |
| Figura 27. Leitura com dispositivo móvel (celular). ....                             | 61 |
| Figura 28. Contorno de formas – círculos.....  | 56 |
| Figura 29. Contorno de formas - quadrados.....                                       | 62 |
| Figura 30. Preenchimento de formas – círculos.....                                   | 57 |
| Figura 31. Preenchimento de formas – quadrados .....                                 | 63 |
| Figura 32. Contorno e preenchimento de código QR Code .....                          | 63 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 33. Gráfico dos elemetos nas amostras .....                      | 64 |
| Figura 34. Resultados Ra - Quadrado preenchido 10 mm.....               | 65 |
| Figura 35. Resultados Rz - Quadrado preenchido 10 mm.....               | 65 |
| Figura 36. Resultados Ra - Quadrado preenchido 5 mm.....                | 66 |
| Figura 37. Resultados Ra - Círculo preenchido 10 mm .....               | 66 |
| Figura 38. Resultados Ra - Círculo preenchido 5 mm .....                | 67 |
| Figura 39. MEV amostra PiViFi.....                                      | 66 |
| Figura 40. MEV amostra PsViFs.....                                      | 72 |
| Figura 41. MEV amostra PmVmFs.....                                      | 66 |
| Figura 42. MEV amostra PsVsFm.....                                      | 72 |
| Figura 43. Gráfico dos melhores parâmetros para rugosidade menor .....  | 73 |
| Figura 44. Gráfico dos melhores parâmetros para rugosidade normal ..... | 74 |
| Figura 45. ANOVA.....   | 68 |
| Figura 46. ANOVA.....   | 74 |
| Figura 47. Gráfico dos melhores parâmetros para rugosidade menor .....  | 75 |
| Figura 48. ANOVA.....   | 69 |
| Figura 49. ANOVA.....   | 76 |
| Figura 50. Gráfico dos melhores parâmetros para rugosidade menor .....  | 77 |
| Figura 51. ANOVA.....   | 71 |
| Figura 52. ANOVA .....  | 77 |
| Figura 53. Gráfico dos melhores parâmetros para rugosidade menor .....  | 78 |
| Figura 54. ANOVA.....   | 72 |
| Figura 55. ANOVA .....  | 79 |
| Figura 56. Leitura do QR Code.....                                      | 73 |
| Figura 57. Leitura do QR Code .....                                     | 80 |

## LISTA DE TABELAS

|   |     |
|---|-----|
| Tabela 1. Tipos de laser.....                                       | 25  |
| Tabela 2. Propriedades do Alumínio comercialmente puro .....        | 29  |
| Tabela 3. Série das ligas de Alumínio .....                         | 30  |
| Tabela 4. Fatorial completo e o método Taguchi .....                | 34  |
| Tabela 5. Matrizes ortogonais de Taguchi.....                       | 34  |
| Tabela 6. Pesquisa por palavras-chave .....                         | 37  |
| Tabela 7. Produção Científica Anual.....                            | 38  |
| Tabela 8. Produção científica por fonte.....                        | 40  |
| Tabela 9. Produção científica por afiliação .....                   | 41  |
| Tabela 10. Artigos mais citados .....                               | 43  |
| Tabela 11. Os três artigos mais citados resumo.....                 | 43  |
| Tabela 12. Matrizes ortogonais de Taguchi.....                      | 46  |
| Tabela 13. Nomenclatura para amostras de marcação .....             | 47  |
| Tabela 14. Parâmetros dos ensaios .....                             | 47  |
| Tabela 15. Etapas do procedimento experimental.....                 | 50  |
| Tabela 16. Propriedades mecânicas da chapa de Al 1100-H14.....      | 53  |
| Tabela 17. Propriedades químicas da chapa de Al 1100-H14.....       | 53  |
| Tabela 18. Propriedades físicas da chapa de Al 1100 - H14 .....     | 53  |
| Tabela 19. Rugosidade superficial das chapas .....                  | 55  |
| Tabela 20. Especificações da máquina laser .....                    | 56  |
| Tabela 21. Especificação do MEV .....                               | 598 |
| Tabela 22. Especificação do Rugosímetro .....                       | 59  |
| Tabela 23. Especificação do Alicona .....                           | 60  |
| Tabela 24. Resultados obtidos no microscópio Alicona .....          | 68  |
| Tabela 25. Dados do microscópio óptico - Quadrado .....             | 70  |
| Tabela 26. Análise estatística do Quadrado preenchido de 10 mm..... | 75  |
| Tabela 27. Análise estatística do Quadrado preenchido de 5 mm.....  | 76  |
| Tabela 28. Análise estatística do Círculo preenchido de 10 mm ..... | 78  |
| Tabela 29. Análise estatística do Círculo preenchido de 5 mm .....  | 79  |
| Tabela 30. Parâmetros recomendados - preenchimento .....            | 79  |
| Tabela 31. Análise das marcações no código QR .....                 | 81  |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

**ABNT:** Associação Brasileira de Normas Técnicas

**Al:** Alumínio

**ANOVA:** Analysis of Variance

**CNC:** Controle Numérico Computadorizado

**DOE:** Design of Experiments

**DOI:** Digital Object Identifier

**DXF:** Drawing Exchange Format

**°C:** Graus Celsius

**F:** Frequência

**FCA:** Faculdade de Ciências Aplicadas

**HAZ:** Zona Afetada pelo Calor

**i:** inferior

**INMETRO:** Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia

**ISO:** International Organization for Standardization

**KHz:** Quilo Hertz

**L:** litros

**LASER:** Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

**M:** média

**MEV:** Microscópio Eletrônico de Varredura

**mm:** Milímetro

**Mpa:** Mega Pascal

**NBR:** Norma Brasileira Regulamentadora

**P:** Potência

**PRISMA:** Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta- Analysis

**QP:** Questão de Pesquisa

**QUORUM:** Quality of Reporting of Meta- Analisis

**s:** Segundo

**S:** superior

**SENAI:** Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial

**UNICAMP:** Universidade Estadual de Campinas

**V:** Velocidade

**W:** Watt

**Ra:** Rugosidade média aritmética

**Rz:** Média da distância entre picos e vales em dez pontos

## SUMÁRIO

|   |    |
|---|----|
| 1 INTRODUÇÃO.....   | 17 |
| 1.1 OBJETIVOS.....  | 19 |
| 1.1.1 OBJETIVO GERAL .....                                      | 19 |
| 1.1.2 Objetivos específicos .....                               | 19 |
| 1.2 JUSTIFICATIVAS E RELEVÂNCIA .....                           | 20 |
| CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....                         | 22 |
| 2.1 ESTADO DA ARTE.....   | 22 |
| 2.1.1 O LASER.....  | 22 |
| 2.1.2 Alumínio.....   | 28 |
| 2.1.3 RUGOSIDADE SUPERFÍCIAL.....                               | 31 |
| 2.1.4 Técnicas estatísticas.....                                | 33 |
| 2.2 REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA E BIBLIOMETRIA .....      | 35 |
| 2.2.1 Publicações por ano .....                                 | 38 |
| 2.2.2 Colaboradores proeminentes .....                          | 39 |
| 2.2.3 Estudos mais citados.....                                 | 42 |
| CAPÍTULO 3: METODOLOGIA.....                                    | 45 |
| 3.1 DIMENSÃO DE ESTUDO.....                                     | 45 |
| 3.2 MÉTODO EXPERIMENTAL .....                                   | 45 |
| 3.3 MATERIAL E EQUIPAMENTOS .....                               | 53 |
| CAPÍTULO 4: RESULTADOS E DISCUSSÃO.....                         | 62 |
| 4.1 PROCESSAMENTO DAS AMOSTRAS .....                            | 62 |
| 4.2 ANÁLISE DA RUGOSIDADE SUPERFÍCIAL .....                     | 64 |
| 4.3 ANÁLISE POR MICROSCOPIA ÓPTICA .....                        | 69 |
| 4.4 ANÁLISE POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) ..... | 72 |
| 4.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA COM O SOFTWARE MINITAB .....            | 73 |
| 4.5.1 QUADRADO PREENCHIDO 10 MM .....                           | 73 |
| 4.5.2 QUADRADO PREENCHIDO 5 MM .....                            | 75 |
| 4.5.3 CÍRCULO PREENCHIDO 10 MM.....                             | 76 |
| 4.5.4 CÍRCULO PREENCHIDO 5 MM.....                              | 78 |
| 4.6 ANÁLISE DE RECONHECIMENTO DO QR CODE .....                  | 80 |

|   |     |
|---|-----|
| CAPÍTULO 5: CONCLUSÃO.....                | 83  |
| 5.1 PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS ..... | 84  |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....          | 85  |
| APÊNDICES .....                           | 89  |
| Software EzCad .....                      | 89  |
| Dados do MEV .....                        | 90  |
| ANEXOS .....                              | 94  |
| ANEXO I .....                             | 94  |
| ANEXO II .....                            | 95  |
| ANEXO III.....                            | 96  |
| ANEXO IV .....                            | 97  |
| ANEXO V .....                             | 99  |
| ANEXO VI .....                            | 101 |
| ANEXO VII .....                           | 103 |

## 1 INTRODUÇÃO

O conceito central que orienta todo o processo estudado é sobre o LASER que é um acrônimo para Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, em português significa Amplificação da Luz pela Emissão Estimulada da Radiação. Acrônimos, que são siglas formadas pelas iniciais de uma expressão, geralmente são representados em caixa alta para facilitar sua identificação e compreensão em textos e documento, no entanto a partir deste ponto, optaremos por utilizar no texto letras minúsculas para referenciar a tecnologia.

Os lasers são amplamente utilizados em muitos setores, pesquisas consideráveis indicam uma grande variedade em muitos ramos científicos e técnicos, como por exemplo, comunicação (YIN et al.,2018), medicina (SEREBRYAKOV et al., 2010), física nuclear (IZAWA et al.,2008) e processamento de materiais (ARAI et al., 2011).

O corte e marcação a laser é um processo popular, que encontra ampla aplicação em diversas indústrias manufatureiras devido à sua precisão de operação e baixo custo (ÇAYDAS e HASÇALIK, 2008).

A micro usinagem a laser tem recebido muita atenção devido às amplas aplicações em quase todos os setores de fabricação (HUANG, YANG e LIU, 2014). Em determinados setores industriais, como o processamento de materiais, ela também pode ser usada para identificação e rastreabilidade de produtos e componentes. Nesses casos, são necessários que o processo apresente alta repetitividade, métodos não invasivos e tenha um alto grau de resistência ao desgaste (DUTRA, 2017).

Diante disso, a gravação a laser tornou-se um dos métodos eficazes para gravar chapas metálicas devido à sua flexibilidade e tempo consumido. Além disso, ao contrário dos métodos de usinagem convencionais, a laser oferece vantagens significativas em termos de produtividade onde poderia ser realizado induzindo o feixe de laser de alta intensidade sobre uma pequena região do material (STAERHR et al.,2016). Esse processo não envolve contato e nenhuma força mecânica de corte comparado com a usinagem que tem o desgaste da ferramenta. Na marcação a laser o material do produto é fundido localmente pela luz infravermelho focalizada (NAGELS, DUFLOU, and HUMBECK, 2007).

Afim de assegurar uma produção eficiente e garantir qualidade para peças marcadas, torna-se imprescindível a escolha criteriosa dos parâmetros de processo. Esses parâmetros exercem influência direta sobre as características microscópicas e macroscópicas particulares das peças finalizadas, tais como a extensão da zona afetada pelo calor (HAZ) e a rugosidade

da superfície após o processamento. Portanto, a seleção da combinação ideal de tais parâmetros é fundamental para obter os resultados desejados (YU, 1997).

A influência dos parâmetros operacionais nas características de qualidade é uma questão complexa, uma vez que identificar os parâmetros operacionais ideais se torna desafiador e complexo. Em sistemas tão complexos e multivariados, a relação entre os fatores não é claramente definida. Dentre os parâmetros foi demonstrado que a qualidade da marcação a laser depende principalmente da potência do laser, frequência de pulso, velocidade de corte e posição de foco (ÇAYDAS e HASÇALIK, 2008).

Atualmente, no mercado, é possível encontrar uma vasta gama de materiais e ligas disponíveis. Com o contínuo desenvolvimento de novos produtos, a seleção do material adequado para uma determinada aplicação requer a consideração de diversos fatores. Entre eles estão o custo, as propriedades necessárias, as características de fabricação e, é claro, as vantagens e limitações de uso associadas a cada material (ASHBY e JOHNSON, 2014). Neste cenário, o alumínio (Al) e ligas apresentam uma combinação excelente de propriedades, tornando altamente atrativos para uma série de aplicações. Além disso, destaca-se que esse material é economicamente viável, o que reforça ainda mais sua relevância e utilidade.

O alumínio e suas ligas são considerados materiais difíceis de cortar e gravar com o processo a laser, pois é afetado por alta refletividade que causa altos requisitos de potência do laser e feixes retro refletidos (SCINTILLA, 2014).

A partir da revisão da literatura, entendeu-se que o trabalho de pesquisa na área de marcação a laser de fibra óptica para analisar a qualidade das superfícies do processo em chapa de alumínio era limitado. Embora a aplicação da otimização e análise dos parâmetros existisse na literatura, para outros materiais como aço inox e aço. Portanto, o trabalho foi focado em prever a condição da marcação ideal considerando a geometria e qualidade da superfície usando pesquisa experimental.

A presente dissertação foi organizada de acordo com a estrutura que apresenta a seguir.

Primeiramente na Revisão Bibliográfica são abordados conceitos sobre o tema da pesquisa e são apresentados uma revisão sistemática da literatura seguida de uma análise bibliométrica.

O terceiro capítulo aborda todos os procedimentos empregados na execução e experimentação das marcações. Ele é dividido em seções que serão detalhadas os equipamentos, materiais e metodologia empregada na pesquisa.

O quarto capítulo de Resultados e Discussão, são apresentados, analisados e discutidos os ensaios realizados para obter as marcações. Ademais, são apresentadas as principais descobertas e constatações fornecidas pelos diversos ensaios.

O quinto capítulo traz as principais Conclusões obtidas, a partir do desenvolvimento desta pesquisa.

Por fim, são apresentadas as Sugestões para trabalhos futuros dos ensaios com o LASER, bem como melhorias sugeridas para obter resultados de marcação ainda mais significativas.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo geral**

O trabalho tem como objetivo principal a avaliação da qualidade gerada no processamento de marcação a laser utilizado na obtenção de característica de micro usinagem e rastreabilidade, tendo como base formas geométricas e o código QR Code em chapas metálicas de alumínio. O estudo enfatizará principalmente a relação entre as características dos parâmetros na saída do laser e a qualidade, utilizando análise no MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura), microscopia óptica e da rugosidade superficial através do rugosímetro e do microscópio Alicona.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

Para atingir os objetivos gerais deste trabalho, os seguintes objetivos específicos são apresentados:

- I. Realizar uma pesquisa bibliográfica e análise bibliométrica para definir o estado da arte e verificar as características importantes a serem analisadas em uma marcação a laser;
- II. Realizar testes experimentais utilizando chapas de alumínio, um material amplamente utilizado na indústria para fins de manufatura;
- III. Avaliar a viabilidade de marcação do laser do código QR Code para rastreabilidade de produtos, encontrando o melhor conjunto de parâmetros; e
- IV. Analisar os parâmetros que resulta a qualificação e otimização da marcação a laser.

## 1.2 Justificativas e relevância

A indústria 4.0 representa uma revolução na forma como a produção industrial é realizada, impulsionada pela integração de tecnologias avançadas, automação, coleta e análise de dados em tempo real. Nesse cenário, a otimização dos parâmetros de marcação a laser na saída para qualidade das superfícies em chapas de alumínio desempenha um papel crucial para a implementação bem-sucedida dos conceitos da indústria 4.0 nas operações de manufatura como: eficiência e flexibilidade; redução de desperdícios; manufatura inteligente e integração da cadeia de suprimentos (rastreadabilidade) (SOUZA; JUNIOR; NETO, 2017).

De acordo com a NBR ISO 9000 (2000), rastreadabilidade é a capacidade de acompanhar o histórico, a aplicação, o movimento e a localização de um objeto por meio de estágios especificados de produção, processamento e distribuição. Ou seja, em outras palavras, o rastreamento consiste em manter registros essenciais para identificação e fornecer informações referentes a cada peça e lote de produção.

Com o ritmo acelerado das mudanças nas indústrias, é imprescindível garantir uma elevada confiabilidade em relação ao desempenho dos produtos, bem como em todas as informações que abrangem parâmetros tecnológicos, dados de custos e processos logísticos, que englobam desde o armazenamento inicial dos produtos até sua expedição final e entrega aos clientes. Adicionalmente, o suporte pós-venda assume importância significativa, pois trata-se da assistência técnica prestada pela empresa caso o produto necessite ser devolvido para reparos ou apoio técnico (CORRÊA; CARDOSO; CHAVES, 2006).

O setor da indústria busca garantir, expandir e valorizar suas atividades em meio à crescente competitividade. Para alcançar esse objetivo, a indústria adota diversas abordagens para obter rastreadabilidade dos produtos durante seus processos produtivos. Essa iniciativa não apenas visa reduzir falsificações e fraudes, mas também aprimorar a qualidade e segurança dos itens fabricados e comercializados. Nesse contexto, a marcação direta a LASER é amplamente empregada como um método versátil para criar marcas permanentes em peças, contendo informações de rastreadabilidade e identificação, tal com código bidimensional, exemplo o QRCode (DUTRA, 2017).

Portanto, é essencial controlar os parâmetros do processo de marcação a laser para determinar suas influências individuais ou interações, dependendo da aplicação específica. Para realizar os ajustes adequados que garantam uma aplicação confiável e segura para uma variedade de materiais, não é uma tarefa simples. Isso requer que os profissionais envolvidos possuam conhecimentos técnicos específicos, combinados com a realização de diversos testes práticos (BALLUFF, 2014).

Para o tema analisado neste estudo, o Brasil apresenta-se com pouca relevância nas produções de artigos e pesquisa, de acordo com estudo realizado no item 2.2.2 no segundo capítulo, o que abre oportunidades para pesquisas como a presente dissertação.

## CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

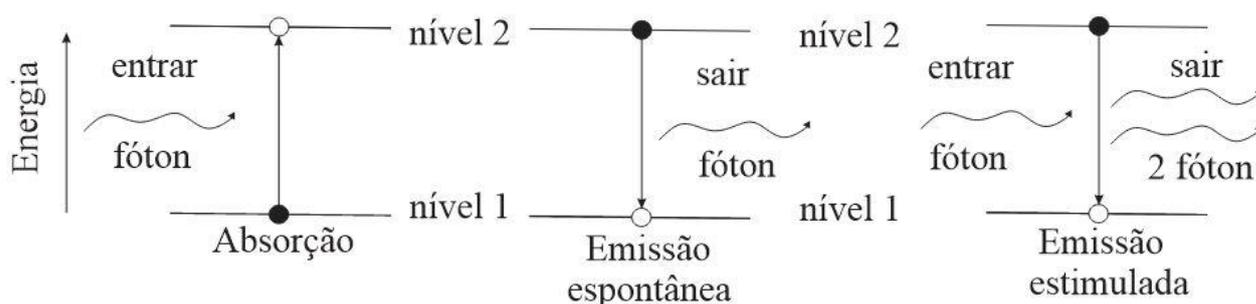
O presente capítulo foi dividido em duas partes: estado da arte sobre o tema e revisão sistemática da literatura seguida de uma análise bibliométria.

### 2.1 Estado da arte

#### 2.1.1 O LASER

O pesquisador Theodore Harold Maiman no ano de 1960 produziu em seu laboratório na Califórnia (EUA), o primeiro laser gerando a primeira emissão luz laser a partir de um cristal de rubi (INJEYAN; GOODNO, 2011). A partir de 1963, começaram a ser realizadas pesquisas para tornar viável o uso do laser em várias áreas. Isso impulsionou o estudo da interação da luz laser com os materiais processados, um campo de pesquisa que continua em andamento até os dias atuais. No entanto, os principais teóricos para seu funcionamento foram elencados no início do século XX, o pesquisador Albert Einstein, em 1916, baseado nas contribuições de Max Planck, ele que descreve o processo de estimulação, que é a essência da ação do laser em um de seus trabalhos sobre teoria quântica da radiação. No trabalho ele se baseia na capacidade apresentada por alguns materiais de, quando estimulados, liberarem uma parcela de energia na forma de radiação eletromagnética que possui uma característica muito específica de comprimento de onda emitido, que consiste em um fenômeno quântico em que a interação de um fóton com um átomo excitado provoca a produção de outro fóton idêntico (Dutra, 2017; PIRES, 2020). Na Figura 1 são apresentadas as representações visuais dos princípios discutidos em relação à emissão.

Figura 1. Interação da luz com a matéria



Fonte. RICHARTZ, 2017 [Adaptado]

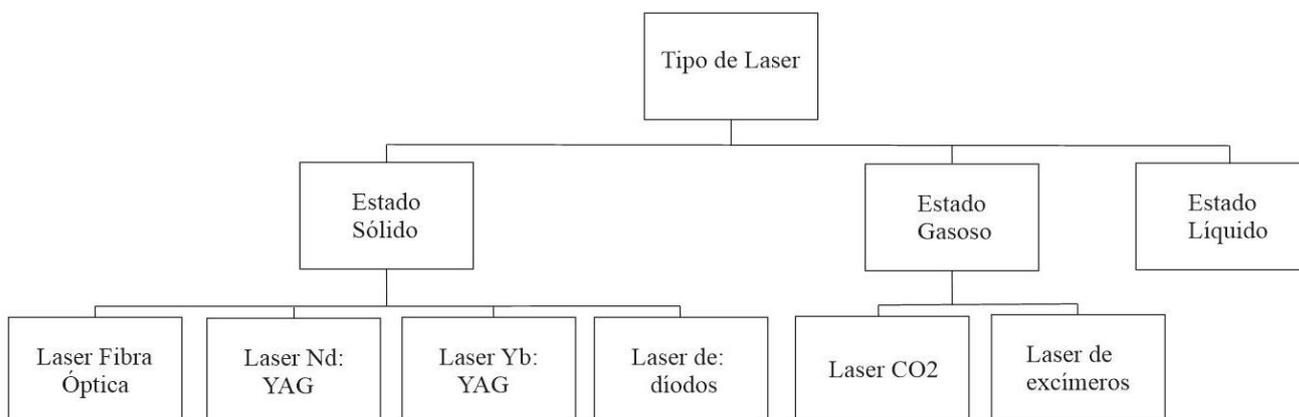
Descrevendo a interação de forma a simplificar a compreensão da geração de luz no laser, considere um átomo com apenas dois estados de energia distintos,  $E_1$  e  $E_2$ , onde  $E_2$  é maior do que  $E_1$ . Quando um átomo está no estado  $E_1$ , ele absorve a energia de um fóton, permanecendo em um estado excitado de energia  $E_2$ . Após um intervalo de tempo característico, o átomo emite espontaneamente um fóton com a mesma energia que absorveu,

em qualquer direção, retornando ao estado de energia E1. Esse processo é conhecido como emissão espontânea. Por outro lado, se um átomo já estiver excitado no estado E2 e for estimulado por um segundo fóton, ele emite instantaneamente dois fótons sincronizados, com a mesma quantidade de energia e comprimento de onda, na mesma direção e sentido do fóton incidente. Essa forma de emissão é fundamental para o laser e é chamada de emissão estimulada (INJEYAN; GOODNO, 2011).

Considerando o contexto descrito anteriormente, para alcançar a luz laser, é essencial manter uma taxa de emissão estimulada superior às taxas de absorção e emissão espontânea. É necessário um número considerável de fótons incidentes para assegurar que uma quantidade significativa de átomos permaneça no estado excitado. O elétron no E2 (estado excitado) naturalmente tende a voltar para o E1 (estado fundamental), mas quando impactado por um fóton externo, resultará na geração de outro fóton (raio de luz) idêntico com mesma energia e em fase, na direção do fóton incidente (RICHART, 2017).

Um laser é composto essencialmente por três componentes principais. O primeiro desses elementos é denominado meio ativo ou meio de ganho, podendo ser de natureza gasosa: CO<sub>2</sub>, He-Ne, Argônio, Criptônio; Sólida: Er:YAG, Er, Cr:YSGG, Nd:YAG; Líquida: Corantes orgânicos (STREEK; REGENFUSS; EXNER, 2013). A Figura 2 representa a classificação quanto ao meio ativo. O protótipo inaugural de laser que foi desenvolvido tinha como meio ativo uma barra de rubi. Nessa parte do laser, são encontrados átomos ou moléculas que abrigam elétrons capazes de emitir luz (fótons) por meio de transição entre níveis de energia. Esses fótons, por sua vez, formam a base da luz laser, portanto é onde ocorre a amplificação da luz através de emissão estimulada.

Figura 2. Diagrama relativo aos tipos de lasers



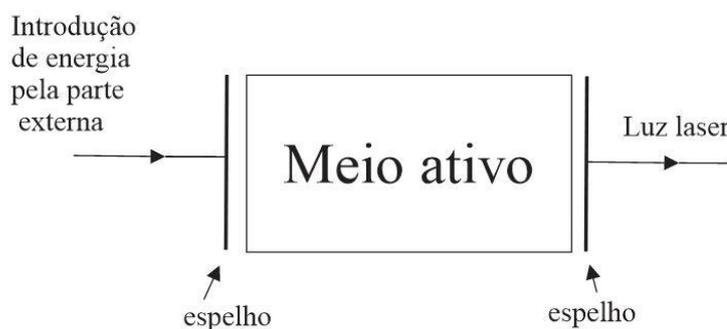
Fonte. AMARAL, 2018 [Adaptado]

O segundo componente essencial do laser, é uma fonte externa de energia, pois para induzir os elétrons a transitar para estados energéticos superiores, é preciso fornecer energia. A responsabilidade dessa fonte é gerar estados excitados, propiciando a geração de luz durante as transições de energia. Atuando sobre o meio ativo, frequentemente liberando fótons sobre ele, essa fonte ocasiona um grande número de átomos em estado excitado. Quando uma maioria substancial de átomos mantém elétrons em estados excitados, ocorre o que é conhecido como inversão populacional. Esse estágio é de suma importância para a produção do laser (STREEK; REGENFUSS; EXNER, 2013).

O terceiro componente do laser é a cavidade óptica ou ressonador. Sua finalidade reside em assegurar que os fótons que emergem do sistema retornem a ele, desencadeando um ciclo contínuo de emissão estimulada. Essa tarefa é executada utilizando-se espelhos posicionados nas extremidades dessa cavidade, sendo que um dos espelhos possui repletividades de cem por cento e outro parcial, os quais refletem os fótons de volta à amostra (STREEK; REGENFUSS; EXNER, 2013).

A Figura 3 apresenta um esquema simplificado destes três componentes importantes do laser.

Figura 3. Três componentes importantes do laser.



Fonte. BRAGNATO, 2001 [Adaptado]

Conforme discutido previamente, a história do surgimento do laser e a maneira como a luz laser é emitida estabeleceram um alicerce sólido para a compreensão dessa tecnologia. Neste momento, é relevante explorar as principais características do laser, os quais desempenham um papel fundamental em sua aplicabilidade e funcionamento.

O laser é uma fonte de energia que emana de um dispositivo capaz de produzir um feixe de luz monocromática, ou seja, constituído por uma única cor, correspondente a um único comprimento de onda ( $\lambda$ ) uma característica importante nos dispositivos lasers (STREEK; REGENFUSS; EXNER, 2013).

A magnitude essencial para distinguir as categorias de laser é o seu comprimento de onda ( $\lambda$ ). O comprimento de onda está diretamente vinculado à energia do fóton, desempenhando, portanto, uma influência significativa na interação entre o laser e o material no qual incide. A Tabela 1 apresenta quatro exemplos de fontes laser, com seus comprimentos de onda.

Tabela 1. Tipos de laser.

| Laser   | $\lambda$ [nm] |
|---------|----------------|
| CO2     | 10600          |
| Fibra   | 1000 - 1100    |
| Nd: YAG | 1064           |
| Diodo   | 800 – 1030     |

Fonte. RICHARTZ, 2017 [Adaptado]

Outra característica do laser é a sua natureza direcional, que concentra o feixe em uma única direção. A direcionalidade do feixe está relacionada à pouca divergência da luz quando comparada com a luz comum de fonte irradiantes. Em outras palavras, todo o feixe se propaga em uma única direção, contribuindo para uma dispersão mínima (BAGNATO, 2001).

Temos também que a luz laser apresenta coerência espacial e temporal. Coerência espacial se refere à propriedade onde a luz em qualquer ponto do feixe apresenta coerência. Por outro lado, a coerência temporal é resultante da situação em que dois feixes de luz laser mantêm coerência por um período significativo após passarem por um ponto específico. Ou seja, fótons de mesmo comprimento de onda, se propagando na mesma direção e vibrando na mesma frequência (HITZ; EWING; HECHT, 2012).

A tecnologia de laser tem encontrado utilização como uma ferramenta versátil de processamento em uma variedade de aplicações e propósitos. Por meio de uma fonte laser, é possível realizar tarefas como aquecimento, fusão, vaporização e sublimação de materiais, desde que haja uma configuração óptica apropriada para o processamento do material. Entre as múltiplas aplicações possíveis, destacam-se: corte a laser, soldagem, marcação, manufatura aditiva e tratamento da superfície (RICHART, 2017).

O presente trabalho tem como ponto central a marcação. A marcação a laser representa um método eficiente para criar imagens permanentes de alta qualidade na superfície de diversos materiais usados na engenharia. As principais fontes de lasers utilizadas incluem CO2, lasers Nd: YAG e laser de fibra. O método vem ganhando destaque devido à necessidade de rotulagem superior para produtos e à flexibilidade de marcar uma ampla gama de itens. As vantagens incluem a versatilidade em termos de materiais marcados, facilidade

de alteração das marcações por meio de ajustes no software, rapidez no processo, qualidade das marcas produzidas e baixo impacto ambiental. Embora existam mecanismos distintos de marcações, nenhum é completamente compreendido para ser modelado com precisão. Isso torna a abordagem de tentativa e erro a forma mais comum de estabelecer parâmetros de processamento. A aplicação predominantemente da marcação a laser é a identificação de produtos em indústrias diversas (BAGNATO, 2001).

A gravação compreende a fusão localizada ou vaporização da superfície, geralmente a uma profundidade de aproximadamente 0,1 mm. Neste contexto, a gravação resulta do impacto do feixe mais intenso, removendo mais material resultando em uma gravação mais profunda, que tende a ser mais resistente a impactos mecânicos e à exposição a ambientes adversos.

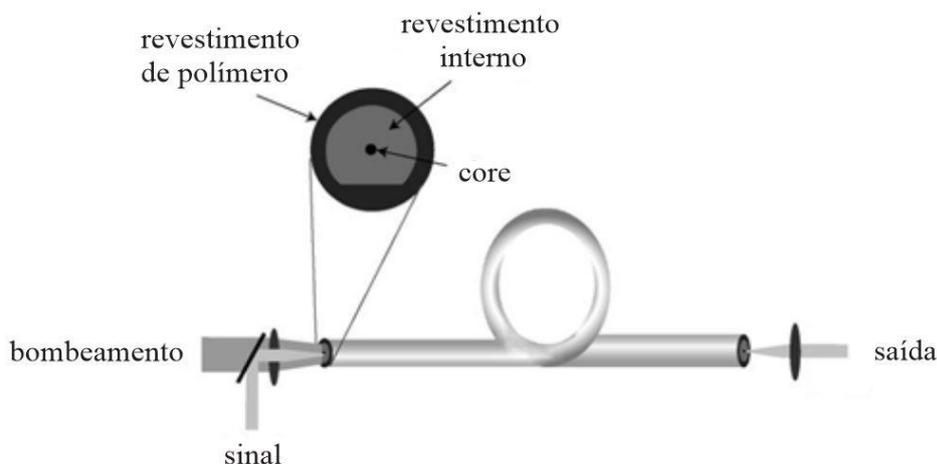
Dentro do panorama das tecnologias laser, uma ampla variedade de máquinas e equipamentos está disponível. Esse estudo concentra-se particularmente na máquina a laser de fibra óptica, motivo pelo qual é relevante delinear certos conceitos relacionados a essa tecnologia.

No laser de fibra óptica, a produção do feixe de laser se dá por meio da excitação de cristais. As fibras, compostas predominantemente por sílica, são dopadas internamente com íons, possuindo também uma camada exterior que não é dopada. Isso permite que a luz proveniente de excitação seja absorvida pela camada interna. A camada externa deve ser feita de vidro ou material polimérico, com o objetivo de minimizar os índices de refração (AMARAL, 2018).

Importante ressaltar que os lasers de fibra óptica tem comprimento de onda do feixe um valor de  $1064\mu\text{m}$ .

Os lasers de fibra são caracterizados por sua robustez e formato compacto, sua característica construtiva do ressonador é fundada em uma fibra óptica, com comprimento de até dez metros, dopada no núcleo e recoberta por um revestimento (HECHT, 2012). Elementos comuns usados para dopagem incluem érbio (Er), neodímio (Nd) e itérbio (Yb). O revestimento em lasers de fibra óptica, são geralmente feitos de materiais com índice de refração menor do que o núcleo da fibra, como sílica pura ou dopada. A etapa de bombeamento geralmente envolve o uso de um laser de diodo (KANNATEY-ASIBU, 2009). Na Figura 4 representa o esquema de um laser de fibra.

Figura 4. Esquema de um laser de fibra.



Fonte. KANNATEY-ASIBU, 2009 [adaptado]

O núcleo da fibra pode ser do tipo monomodo ou multimodo. Fibras monomodo possibilitam a geração de feixes de saída limitados pela difração, porém com potências de emissão relativamente mais modesta. Já as fibras multimodos têm a capacidade de gerar feixes de saída de maior intensidade, embora com qualidade relativamente inferior. A área da seção transversal do revestimento interno tende a ser cerca de 100 a 1000 vezes maior do que a do núcleo. Isso permite a utilização de lasers de diodo mais potentes para realizar o processo de bombeamento (KANNATEY-ASIBU, 2009).

Algumas das vantagens dos lasers de fibra são:

- Configurações compactas são possíveis, pois as fibras podem ser arranjadas em uma disposição enrolada (KANNATEY-ASIBU, 2009);
- A obtenção de uma qualidade de feixe superior é um resultado da utilização de núcleos de fibra monomodo (KANNATEY-ASIBU, 2009);
- A capacidade para produzir feixes de laser com pulsos ultracurtos e uma ampla faixa ajustável, devido ao vasto espectro de emissão do meio de ganho de vidro (KANNATEY-ASIBU, 2009);
- Eficiência de saída relativamente alta de cerca de 50% em comparação com cerca de 10 – 30% para CO<sub>2</sub> e 2% lasers Nd: YAG (RIBEIRO, 2019).

As desvantagens dos lasers de fibra incluem:

- Desafio de alinhar a saída do laser de bomba as fibras ópticas monomodo (KANNATEY-ASIBU, 2009);
- Possibilidade de causar danos à fibra em níveis elevados de potência (KANNATEY-ASIBU, 2009);

- Necessidade de usar comprimento de cavidade longos, pois a absorção da bomba por unidade de comprimento é limitada (KANNATEY-ASIBU, 2009).

Outro aspecto importante neste capítulo, são os parâmetros relacionados ao sistema que exercem o impacto mais significativo na saída do processo, com foco nas variações que podem comprometer a qualidade do processo de marcação a laser. Para manter uma alta taxa de produção e assegurar a qualidade aceitável das peças cortadas, é de fundamental importância a cuidadosa seleção dos parâmetros de processo no laser. Essa escolha criteriosa se torna essencial, uma vez que tais parâmetros exercem influência sobre as características microscópicas e macroscópicas das peças finalizadas (YU, 1997).

Os principais parâmetros do sistema que afetam a qualidade do processo de marcação incluem a posição e alinhamento do laser para regulagem do foco, potência do feixe, velocidade de deslocamento e frequência.

A frequência de pulso, expressa em hertz (kHz), que influencia o espaçamento temporal entre eles, essencialmente estabelece o intervalo em que a energia é distribuída. A energia de pulsos é uma consequência da capacidade de alimentação e da frequência com que são emitidos (DUTRA, 2017).

O parâmetro de potência da radiação, expressa em Watt (W), é responsável por determinar a densidade de energia introduzida no material, tem que ser determinada tendo em conta as características do material (AMARAL, 2018).

A velocidade de processamento representa a rapidez com que o feixe laser focalizado percorre a superfície da peça de trabalho, expressa em milímetro por segundo (mm/s), determinando assim a duração do procedimento. A velocidade, combinada com a frequência de pulsos, estabelece o espaçamento entre pulsos consecutivos na superfície de trabalho e também determina o tempo necessário para tratar uma área específica na peça. Portanto, quando se busca uma qualidade específica de marcação, há um limite superior para a velocidade que pode ser empregada (DUTRA, 2017).

### **2.1.2 Alumínio**

A produção industrial de alumínio teve início após um avanço significativo no laboratório, sendo concretizada em 1889 por Charles Martin Hall, nos Estados Unidos, e Louis Toussaint Héroult, na França, que obtiveram o metal puro a partir da dissolução

eletrolítica de óxido de alumínio (alumina), em banho de criolita. O processo Hall-Héroult, como é conhecido, ainda é o principal processo de produção de alumínio (ABAL, 2023).

A história da indústria do alumínio no Brasil teve início em 1917, com a fundação da Companhia Paulista de Artefatos de Alumínio. Esse marco aconteceu no mesmo ano em que a produção mundial de alumínio atingiu sua marca de um milhão de toneladas. A partir dos anos 1950, começaram a ser instaladas as primeiras fábricas de alumínio primária no país (ABAL, 2023). O Brasil atualmente é um importante produtor de alumínio (Al) devido às vastas reservas do minério bauxita, a principal fonte de matéria prima do alumínio, encontradas nos estados de Minas Gerais e Pará. Além disso é o segundo elemento mais abundante na crosta terrestre, alumínio é o metal não ferroso mais consumido impulsionado pelas suas características físico-químicas favoráveis (SOUZA, 2017).

O metal não ferroso Al se destaca quando comparado a outros metais devido seus importantes características, tais como excelente condutividade elétrica e térmica, baixa densidade e, principalmente, sua capacidade natural de formar uma camada protetora e impermeável, o alumínio encontra ampla utilização em diversas aplicações industriais (ALVES, 2012). A Tabela 2 apresenta as propriedades do Alumínio comercialmente puro.

Tabela 2. Propriedades do Alumínio comercialmente puro

| Propriedades físicas típicas      | Unidade de medida | Alumínio |
|-----------------------------------|-------------------|----------|
| Densidade                         | g/cm <sup>3</sup> | 2,7      |
| Temperatura de fusão              | °C                | 660      |
| Módulo de elasticidade            | MPa               | 70000    |
| Coefficiente de dilatação térmica | L/C               | 23.10-6  |
| Condutibilidade térmica a 25C     | Cal/cm/C          | 0,53     |
| Condutibilidade elétrica          | %IACS             | 61       |

Fonte. ABAL, 2023 [Adaptado]

As ligas de alumínio resultam da adição de elemento de liga que são responsáveis por diversas alterações nas propriedades do metal. As diversas propriedades mencionadas conferem ao alumínio uma notável versatilidade. Em muitas aplicações, duas ou mais dessas propriedades são combinadas, como por exemplo, o baixo peso aliado à resistência mecânica ou a alta resistência à corrosão em conjunto com a elevada condutibilidade térmica. Na indústria atual, há uma demanda por ligas que representem propriedades distintas, e para atender a essa diversidade, são utilizadas combinações de diferentes elementos, como cobre, manganês, ferro, entre outros. Isso resulta em uma ampla variabilidade de características, como resistência mecânica, dureza, resistência à corrosão e produtos químicos,

condutibilidade elétrica, usinabilidade, ductibilidade, entre outras vantagens, tornando essas ligas adaptáveis a aplicações específicas (ABAL, 2023).

A Tabela 3 mostra as diversas séries existentes de ligas de Alumínio conforme a composição do elemento principal de liga e suas principais aplicações.

Tabela 3. Série das ligas de Alumínio

| Série | Composição                                     | Principal utilização                        |
|-------|--|---|
| 1xxx  | Alumínio puro (99% Al)                         | Indústria química, eletroeletrônica         |
| 2xxx  | Cobre  | Indústria aeronáutica                       |
| 3xxx  | Manganês                                       | Latas de bebidas, painéis                   |
| 4xxx  | Silício  | Metal de adição para soldas                 |
| 5xxx  | Magnésio                                       | Fins marítimos                              |
| 6xxx  | Magnésio + Silício                             | Indústria automotiva                        |
| 7xxx  | Zinco  | Indústria aeronáutica (estrutura de aviões) |
| 8xxx  | Outros elementos como estanho, lítio, ferro... | Várias                                      |
| 9xxx  | Reservado para novas ligas                     | Não se aplica                               |

Fonte. ABAL, 2023 [Adaptado]

De acordo com a Aluminum Association, as ligas de alumínio que não passam por tratamento térmico não podem ser endurecidas por precipitação, sendo sua resistência aumentada apenas através de deformação plástica a frio. Além disso, a adição de elemento de liga como o magnésio (Mg) intensifica esse efeito, resultando em maior resistência. Esse processo de endurecimento é viável somente nas ligas 1xxx, 3xxx, 4xxx e 5xxx. As ligas de alumínio tratáveis termicamente compreendem as ligas 2xxx, 6xxx, 7xxx e 8xxx. Essas ligas têm sua resistência aprimorada por meio do processo de endurecimento, que envolve solubilização e têmpera, seguidos do envelhecimento por precipitação (ASSOCIATION TA, 2016).

O alumínio pode apresentar alguns problemas na marcação devido à interação entre o material e a radiação laser. Os problemas pontenciais incluem: refletividade do alumínio, marcação superficial limitada, formação de óxido, mudanças de óxido e mudanças de cor (RAPID DIRECT, 2023).

Na marcação a laser quando a energia radiante atinge a superfície do material, uma porção da radiação térmica é refletida, outra é absorvida, e uma parte é transmitida.

A refletividade do alumínio se dá por meio da sua natureza reflexiva e apresenta desafios significativos quando se utiliza máquinas de marcação a laser. Devido à alta refletividade da superfície do alumínio, o raio laser é refletido, tornando menos compatível com esse tipo de equipamento. Alguns operadores tentam resolver esse problema cobrindo a

superfície do alumínio com tinta ou fita adesiva. No entanto, essa abordagem não é eficaz para eliminar o reflexo. Em vez disso, uma alternativa é utilizar um laser específico para alumínio com alta frequência e os parâmetros adequados, pois pode reduzir o efeito de reflexão. Outra opção é optar por ligas de alumínio menos reflexivas, que contêm elementos de liga como magnésio, zinco e silício (KEIKHOSRAVY et al., 2012).

Estudo aponta que uma grande variedade da produção em massa existente nos setores automotivo, aeroespacial e indústria de computadores depende significativamente do uso de chapas de alumínio (ALBERTO, 2019).

Neste trabalho daremos um maior enfoque as ligas de Alumínio da série 1xxx que é o objeto principal de investigação do estudo.

### 2.1.3 Rugosidade Superficial

A textura ou imperfeições superficiais são caracterizadas por pequenas variações geométricas presentes na superfície do material trabalhado, resultantes do processamento. Essas irregularidades são classificadas como desvios macro-geométricos (tolância geométrica) e desvios micro-geométricos (rugosidade) (AMARAL, 2018).

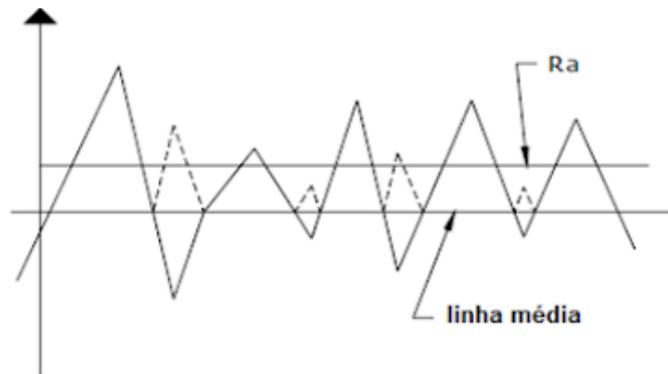
A rugosidade de uma superfície é geralmente avaliada por meio de parâmetros associados à altura (amplitude) e a largura (ou espaçamento) das variações, ou então pela combinação dessas características. Parâmetros frequentemente empregados incluem: a rugosidade média,  $R_a$  (roughness average); rugosidade média quadrática,  $R_q$  (rms roughness); a máxima distância pico a vale,  $R_t$ ; média das distâncias entre saliências,  $S_m$ ; a fração de contato,  $t_p$  (bearing ratio); a média da inclinação das variações do perfil  $\Delta a$ , entre outros (CARPINETTI et al., 2020).

$R_a$  – É a média aritmética dos valores absolutos das distâncias dos pontos no perfil de rugosidade em relação à linha média, ao longo da trajetória de medição  $l_m$ .  $R_a$  pode ser determinada usando a Equação.

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y| \quad (1)$$

Onde  $y_i$ ,  $i = 1, \dots, n$ , são pontos discretos ao longo do perfil.

Figura 5. Perfil de rugosidade Ra



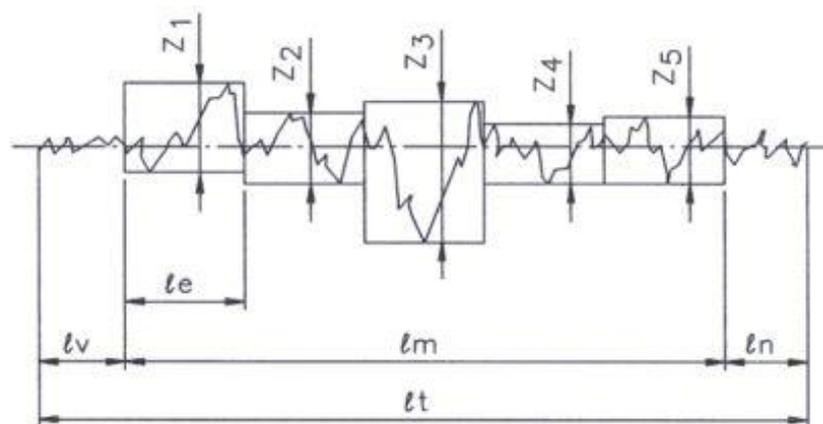
Fonte. AMARAL, 2018

Rz – Corresponde a média dos cinco valores de rugosidade parcial.

$$Rz = \frac{Z1 + Z2 + Z3 + Z4 + Z5}{5}$$

Onde Zi – rugosidade parcial

Figura 6. Rugosidade parcial Zi, para definir Rz



Fonte. AMARAL, 2018

O instrumento comumente empregado para avaliar a rugosidade de superfícies mecânicas é o rugosímetro. A principal função é analisar as questões associadas a rugosidade, ou seja, variações da superfície.

Os rugosímetros possuem uma estrutura fundamental constituída por vários componentes, todos desempenhando papéis essenciais na condução das medições. Essas partes são (RIBEIRO, 2019):

- Apalpador: também referido como “pick-up”, esse componente é responsável por deslizar sobre a superfície que será examinada, transmitindo os sinais da agulha apalpadora até o amplificador;

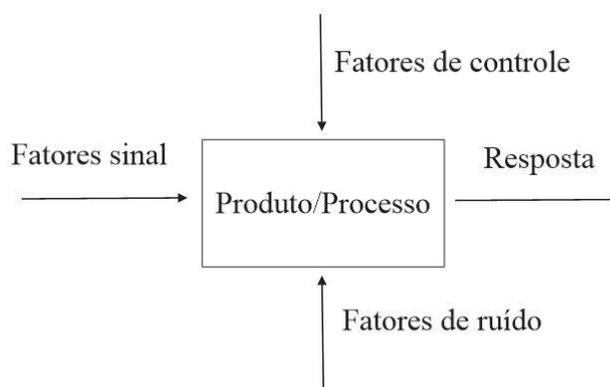
- Unidade de acionamento: este componente é encarregado de mover o apalpador ao longo da superfície sob análise, realizando um deslocamento com velocidade e direção constantes na distância determinada;
- Registrador: é responsável de gerar uma reprodução em papel do perfil real da superfície.
- Amplificador – contém a parte eletrônica central, equipado com um indicador de leitura que recebe os sinais provenientes da agulha, aumentando sua amplitude e efetuando cálculos com base no parâmetro selecionado.

#### 2.1.4 Técnicas estatísticas

As técnicas aplicadas no estudo, foram os métodos Taguchi e ANOVA (Análise de Variância) como ferramentas analíticas fundamentais para a abordagem experimental.

A origem do método Taguchi remonta ao engenheiro e estatístico japonês Genichi Taguchi. O método Taguchi é uma abordagem sistemática para otimizar processos e melhorar a qualidade, especialmente em situações de produção e manufatura. A eficácia na obtenção dos resultados desejados envolve uma seleção criteriosa dos parâmetros do processo, separando em variáveis de controle com por exemplo a velocidade de corte ou potência da radiação e variáveis de ruído, podendo ser as vibrações dos equipamentos ou qualidade do material processado (AMARAL, 2018). A Figura 7 representa a resposta de um processo ou produto pelos fatores de controle, e os fatores de ruído.

Figura 7. Representação do sistema de variáveis do processo



Fonte. RIBEIRO, 2019 [Adaptado]

De maneira tradicional, o planejamento de experiências, ou em inglês Design of Experiments (DOE) é baseado na avaliação de todas as possíveis combinações de fatores e níveis, conhecida como planejamento fatorial completo, no entanto essa abordagem frequentemente resulta em uma quantidade excessiva de testes. O método de Taguchi é um

método de planejamento de experiências fracionado que permite executar apenas uma fração do número total de experiências necessárias. Conforme podemos notar pela Tabela 4.

Tabela 4. Fatorial completo e o método Taguchi

| Número de experiências |        |                    |         |
|------------------------|--------|--------------------|---------|
| Fatores                | Níveis | Fatorial completo  | Taguchi |
| 2                      | 2      | 4 ( $2^2$ )        | 4       |
| 3                      | 2      | 8 ( $2^3$ )        | 4       |
| 4                      | 2      | 16 ( $2^4$ )       | 8       |
| 7                      | 2      | 128 ( $2^7$ )      | 8       |
| 15                     | 2      | 32768 ( $2^{15}$ ) | 16      |
| 4                      | 3      | 81 ( $2^4$ )       | 9       |

Fonte. AMARAL, 2018 [Adaptado]

O autor fundamentou-se nos conceitos do planejamento estatístico de experimentos fatoriais e elaborou vários agrupamentos de ensaios na forma de matrizes ortogonais, cujas configurações variam conforme o número de fatores e seus respectivos níveis abordados na pesquisa. O método de Taguchi utiliza uma terminologia particular para identificar as matrizes ortogonais de dimensões experimentais. Essas matrizes são denotadas como LK, em que o valor de K corresponde à quantidade de experimentos a serem conduzidos (AMARAL, 2018). Se o objetivo for examinar três fatores, cada um compreendendo três níveis, a exploração de várias combinações resultaria em uma matriz L9 ( $3^3$ ) correspondendo a um total de nove experimentos. Na Tabela 5 são apresentadas as matrizes ortogonais.

Tabela 5. Matrizes ortogonais de Taguchi

| N. de Nível | Número de parâmetro (p) |      |      |      |      |      |      |      |      |  |
|-------------|-------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|--|
|             | 2                       | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   |  |
| 2           | L4                      | L4   | L4   | L8   | L8   | L8   | L12  | L12  | L12  |  |
| 3           | L9                      | L9   | L9   | L18  | L18  | L18  | L18  | L27  | L27  |  |
| 4           | L'16                    | L'16 | L'16 | L'16 | L'32 | L'32 | L'32 | L'32 | L'32 |  |
| 5           | L25                     | L25  | L25  | L25  | L25  | L50  | L50  | L50  | L50  |  |

Fonte. RIBEIRO, 2019 [Adaptado]

Para seleção e definição de um plano experimental de Taguchi, é essencial levar em conta as seguintes etapas, primeiramente a identificação dos fatores do sistema, escolha dos níveis dos fatores do experimento, seleção da matriz ortogonal de Taguchi adequada, atribuição de fatores e interações as colunas da matriz ortogonal, realização dos ensaios, análise de dados e realização de ensaios de confirmação.

A ANOVA (Análise de Variância) em inglês Analysis of Variance o objetivo da técnica é compreender quais variáveis sob controle, com seus respectivos níveis, reduzem a variabilidade e, conseqüentemente, serão as mais significativas durante o processo (AMARAL, 2018).

Para realizar uma análise precisa através da ANOVA, é essencial descrever os dados usando um modelo adequado. Esses dados podem ser classificados em três tipos de modelos, sendo modelo com efeitos fixos, efeitos aleatórios e efeitos mistos (RIBEIRO, 2019).

## **2.2 Revisão sistemática da literatura e bibliometria**

Uma revisão da literatura no campo de pesquisa experimental é uma oportunidade para os pesquisadores explorarem o assunto de diferentes perspectivas. Isso proporciona uma oportunidade de obter uma visão real do estado atual da pesquisa no assunto, auxiliando a resumir de forma mais precisa as pesquisas existentes e compreender as tendências de pesquisa futura (MORANDI; CAMARGO, 2015). Portanto na segunda etapa do capítulo se aplicou uma revisão sistemática, que busca coletar evidências de maneira sistemática e realizar uma avaliação baseada em critérios pré-definidos em um protocolo, em vez de apresentar resultados aleatórios sujeitos à apreciação individual do pesquisador. Nesta perspectiva, na presente revisão sistemática da literatura se utilizou o método PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analysis), que consiste numa versão atualizada das recomendações QUORUM (Quality of Reporting of Meta-Analyses). As recomendações PRISMA incluem um protocolo, e um diagrama de fluxo dividido em quatro fases (LIBERATI et al., 2009).

Com base nessas considerações, neste capítulo, investigamos as seguintes questões de pesquisa (QP):

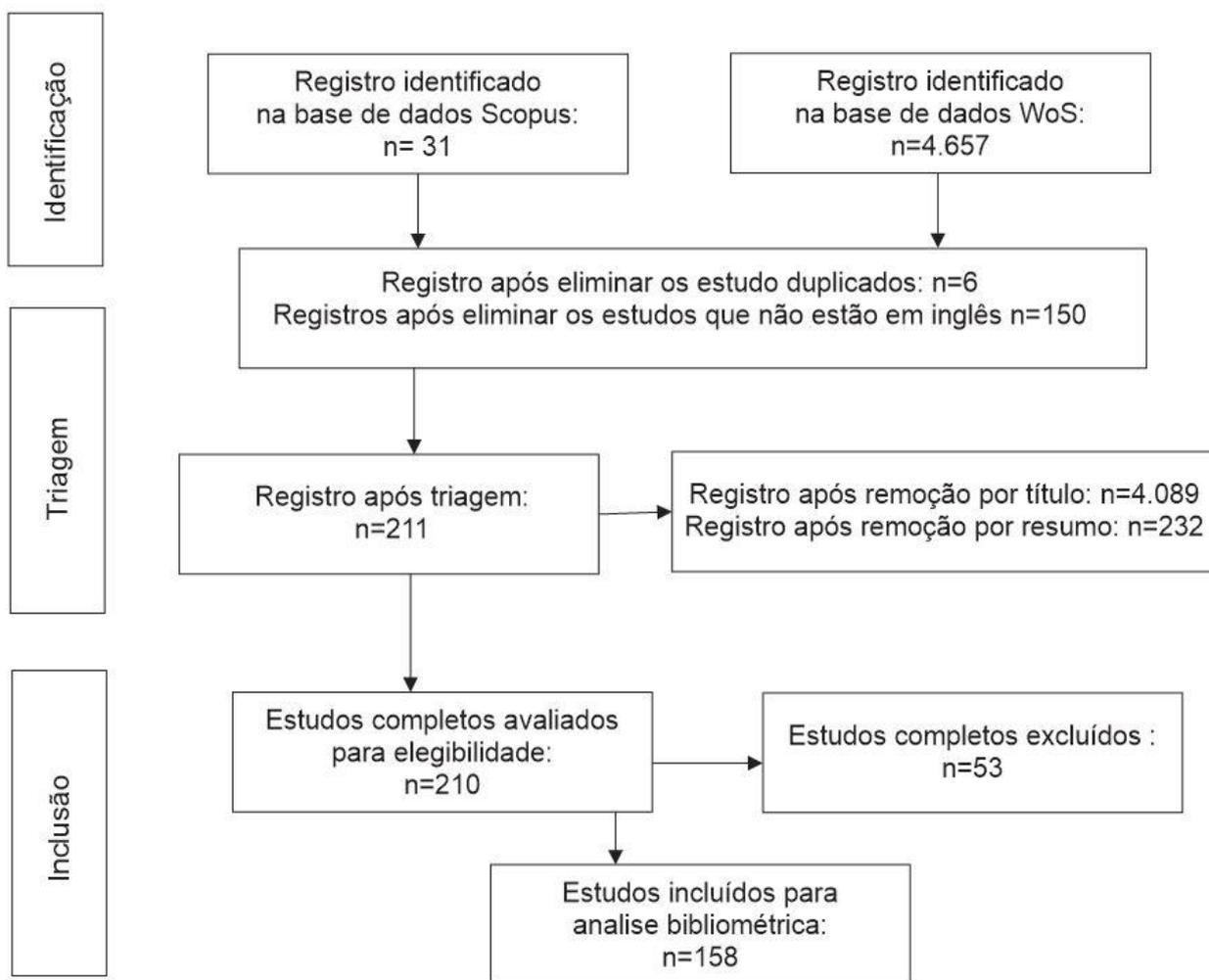
QP1: Como tem se desenvolvido a produção científica sobre análise da qualidade da superfície em peças de alumínio processadas por marcação a laser nos últimos anos?

QP2: Quem são os contribuidores influentes para a literatura sobre análise da qualidade da superfície em peças de alumínio processadas por marcação a laser?

QP3: Quais estudos podem ser considerados fundamentais na literatura científica sobre análise da qualidade de superfície em peças de alumínio processadas por marcação a laser?

De acordo com as recomendações desse método, a pesquisa foi dividida em três fases: identificação, triagem e inclusão. A Figura 8 apresenta o fluxograma da metodologia usada.

Figura 8. Diagrama de fluxo do PRISMA



Fonte. O autor, 2024

Conforme mostra a Figura 8, a revisão sistemática consistiu de três etapas. Primeiramente foi a etapa de identificação, foram selecionados artigos das bases de dados Scopus e Web of Science. Nesta pesquisa, optou-se por utilizar as bases de dados Web of Science (WoS) e Scopus devido a sua ampla cobertura multidisciplinar, credibilidade dos dados e recursos de pesquisa avançados. Além disso, sua reputação de fornecer dados confiáveis e de alta qualidade nos possibilita realizar uma pesquisa precisa e robusta, fortalecendo a revisão bibliométrica e a relevância da pesquisa desenvolvida neste estudo.

Para a seleção foram utilizadas as palavras-chaves e suas respectivas versões para o inglês considerando o item 5 da Tabela 6. A Tabela 6 foi desenvolvida para analisar a influência das palavras chave e os operadores booleano sobre os resultados dos registros obtidos nas duas bases de dados, visando filtrar os resultados com maior precisão ao tema. Deste modo, as palavras-chave utilizadas para pesquisa foram Parâmetros AND Marcação OR Corte AND LASER de Fibra AND Alumínio (Parameters AND Marking OR cut AND Fiber LASER AND Aluminum). A escolha de incluir tanto “marcação” quanto “corte” como

palavras-chave para análise bibliométrica nesta dissertação foi baseada na interação de abranger o campo de estudo relacionado ao uso do LASER considerando que os parâmetros são semelhantes na aplicação como ferramenta de processamento de materiais. Essa abordagem permite uma análise mais completa e integrada da pesquisa relacionadas ao tema, identificando tendências emergentes e proporcionando descobertas valiosas para o estudo.

Os documentos retornados foram refinados pelo idiomas e tipo de documento, considerando respectivamente o inglês e artigos científicos com DOI. Na base de dados Scopus inicialmente resultou em trinta e um artigos (n=31) e na Web of Science obteve quatro mil seiscentos e cinquenta e sete artigos científicos (n=4.657).

Tabela 6. Pesquisa por palavras-chave

| Item | Palavras-chave<br>(Português)                                      | Palavras-chave (Inglês)   | Base de Dados  |        | Filtros                         |
|------|--|---|----------------|--------|---------------------------------|
|      |  |   | Web of Science | Scopus |                                 |
| 1    | Marcação AND LASER de Fibra  | Marking AND Fiber LASER   | 480            | 128    | Idioma Inglês - Artigos com DOI |
| 2    | Marcação AND LASER de Fibra AND Manufatura                         | Marking AND Fiber LASER AND Manufacturing                       | 44             | 11     | Idioma Inglês - Artigos com DOI |
| 3    | Marcação AND LASER de Fibra AND Alumínio                           | Marking AND Fiber LASER AND Aluminum                            | 17             | 4      | Idioma Inglês - Artigos com DOI |
| 4    | Parâmetros AND LASER de Fibra AND Marcação OR corte AND Manufatura | Parameters AND Fiber LASER AND Marking OR cut AND Manufacturing | 42.631         | 23     | Idioma Inglês - Artigos com DOI |
| 5    | Parâmetros AND Marcação OR corte AND LASER de fibra AND Alumínio   | Parameters AND Marking OR cut AND Fiber LASER AND Aluminum      | 4.657          | 31     | Idioma Inglês - Artigos com DOI |

Fonte. O autor, 2024

Na fase seguinte (triagem), iniciou-se com a união dos resultados na mesma base de dados e a exclusão dos artigos que estavam duplicados e não escritos em inglês. Posteriormente, os artigos foram revisados por títulos e resumos, excluindo aqueles que não estavam dentro do escopo do tema pesquisado. Na última fase (terceira), os demais textos foram lidos na íntegra, excluindo-se aqueles que estavam fora do escopo ou que apenas abordavam o tema de interesse deste estudo, sendo assim, foram escolhidos cento e cinquenta e oito artigos (n=158), que parecem representar a produção científica relevante sobre análise da qualidade de superfície em peças de alumínio processadas por marcação e corte a laser.

Com base nos resultados encontrados seguindo o protocolo PRISMA, começou-se a análise bibliométrica. Esse método é muito indicado para mapear a arquitetura intelectual da literatura por ser quantitativo, sistemático, transparente e replicável (RAUCH, 2020). A

análise bibliométrica desempenha um papel fundamental na pesquisa acadêmica, permitindo uma compreensão abrangente do estado atual do assunto. Neste capítulo, apresentaremos uma análise bibliométrica minuciosa, que constitui uma das etapas essenciais desta dissertação. Essa análise permite identificar as principais tendências, lacunas e padrões presentes na literatura.

Foi realizada uma análise bibliométrica utilizando o pacote Bibliometrix no RStudio, com o objetivo de responder às questões de pesquisa apresentadas anteriormente. Na análise considerou o número de publicações por ano, por fonte, principais autores e suas afiliações. Além disso, foram identificados os estudos mais citados na base de dados, a fim de identificar aqueles considerados centrais. Os resultados obtidos nesta análise bibliométrica serão apresentados nas subseções subsequentes deste capítulo.

### 2.2.1 Publicações por ano

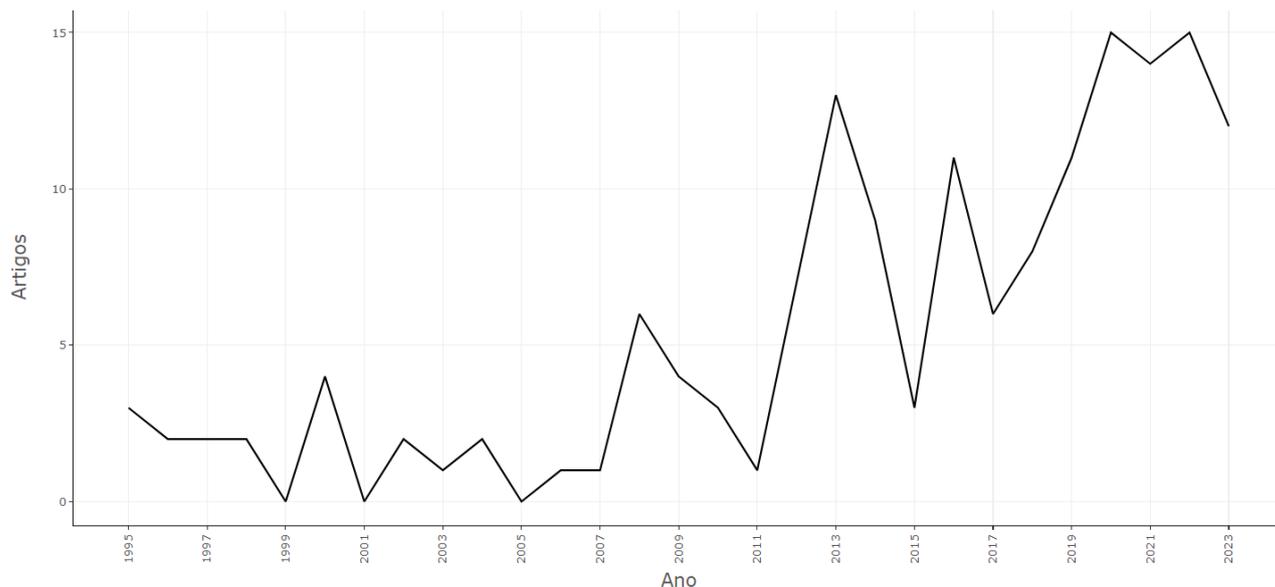
Primeiramente o resultado está relacionado à primeira questão de pesquisa abordada neste capítulo (QP1), que diz respeito à evolução da produção científica sobre análise da qualidade de superfície em peças de alumínio processadas por marcação e corte a laser. Para isso, a Figura 9 e Tabela 7 apresentados abaixo demonstra o número de publicações científicas no período de 1995 até o ano de 2023 seguido uma cronologia.

Tabela 7. Produção Científica Anual

| Ano  | Artigos | Ano  | Aritigos |
|------|---------|------|----------|
| 1995 | 3       | 2009 | 4        |
| 1996 | 2       | 2010 | 3        |
| 1997 | 2       | 2011 | 1        |
| 1998 | 2       | 2012 | 7        |
| 1999 | 0       | 2013 | 13       |
| 2000 | 4       | 2014 | 9        |
| 2001 | 0       | 2015 | 3        |
| 2002 | 2       | 2016 | 11       |
| 2003 | 1       | 2017 | 6        |
| 2004 | 2       | 2018 | 8        |
| 2005 | 0       | 2019 | 11       |
| 2006 | 1       | 2020 | 15       |
| 2007 | 1       | 2021 | 14       |
| 2008 | 6       | 2022 | 15       |
|      |         | 2023 | 12       |

Fonte. O autor, 2024

Figura 9. Produção Científica Anual



Fonte. O autor, 2024

Conforme Tabela 7 e Figura 9, a análise da qualidade de superfície em peças de alumínio processadas por marcação e corte a laser não teve grande representação nos anos 1995 a 2011, entretanto a partir do ano de 2012 obteve um pequeno aumento das publicações, já em 2014 é notável o interesse por parte acadêmica nos assuntos que envolvem o tema de estudo, e em 2020 e 2022 foi alcançando o patamar de 15 artigos publicados.

No total, foram encontrados 158 artigos publicados no período de vinte e oito anos considerado no estudo, ressaltando que o ano de 2023 considerado no estudo ainda se encontra em curso, considerando o dia 16 de agosto de 2023 a data que a pesquisa nas bases de dados foi realizada, o que pode ser um fator para justificar o baixo número de publicações levantados. A taxa de crescimento por ano de 5,08%, média anual de 5,6 artigos/ ano e média de citações por documentos de 15,35, podemos considerar uma média relevante, deve-se considerar o grande crescimento do número de publicações nos últimos anos, o que indica uma tendência de crescimento de pesquisa sobre o tema.

### 2.2.2 Colaboradores proeminentes

Na abordagem da segunda questão de pesquisa (QP2), são necessárias algumas análises, sendo a primeira delas a avaliação da produção científica com base em suas principais fontes. Essas fontes são apresentadas na Tabela 8 a seguir.

Tabela 8. Produção científica por fonte

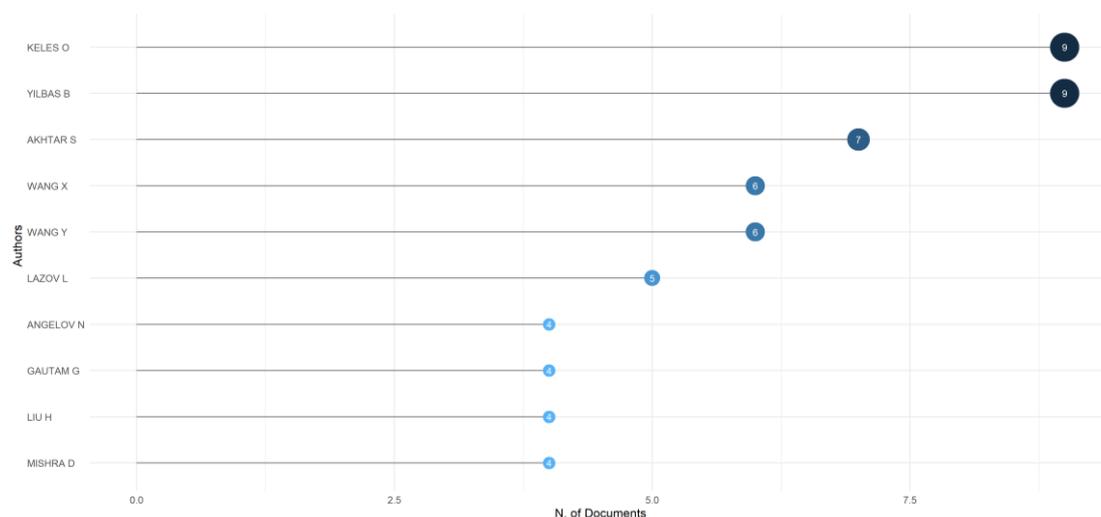
| Classificação | Fontes  | Artigos |
|---------------|---|---------|
| 1             | OPTICS AND LASER TECHNOLOGY                                   | 19      |
| 2             | INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED<br>MANUFACTURING TECHNOLOGY | 14      |
| 3             | JOURNAL OF LASER APPLICATION                                  | 10      |
| 4             | LASER PHYSICS   | 10      |
| 5             | JOURNAL OF MATERIALS PROCESSING TECHNOLOGY                    | 5       |
| 6             | LASERS IN ENGINEERING   | 5       |
| 7             | OPTICS AND LASERS IN ENGINEERING                              | 5       |
| 8             | APPLIED SCIENCES-BASE   | 4       |
| 9             | INTERNATIONAL JOURNAL OF MACHINE TOOLS &<br>MANUFACTURE       | 4       |
| 10            | MATERIALS   | 4       |

Fonte. O autor, 2024

A Tabela 8 revela que o periódico com maior número de publicações sobre o tema é o Optics and laser Technology (19), seguindo pelo International Journal of Advanced Manufacturing (14), Journal of laser Applications (10) e Manufatcturing Technology (10) e os demais da tabela na classificação manteve uma média a faixa de 5 a 4 artigos publicados. É importante destacar que a primeira principal fontes que publicou artigos sobre o assunto obteve um número maior se comparada com as demais fontes, considerando que classificamos apenas as 10 principais.

O segundo item analisado em relação aos principais contribuintes da produção científica sobre análise da qualidade de superfície em peças de alumínio processadas por marcação e corte a laser são os autores dos trabalhos encontrados na amostra analisada, demonstrados na Figura 10.

Figura 10. Autores mais relevantes



Fonte. O autor, 2024

Na Figura 10, são apresentados os 10 autores com maior número de artigos no conjunto selecionado na revisão sistemática. Os principais destaques são Keles O. com nove publicações, na sequência Yilbas B. também com nove artigos, posteriormente Akhtar S. com sete artigos, Wang Y. e Wang X. ambos com seis artigos, além do Lazov L. com cinco documentos e a partir do Angelov N. os autores se equilibram com quatro publicações cada.

O terceiro e último aspecto a ser analisado nesta seção diz respeito às principais afiliações dos autores que contribuíram com pesquisas sobre análise da qualidade de superfície em peças de alumínio processadas por marcação e corte a laser, conforme mostrado na Tabela 9.

Tabela 9. Produção científica por afiliação

| Classificação | Afiliação   | Artigos | País           |
|---------------|---|---------|----------------|
| 1             | JAYPEE UNIVERSITY OF ENGINEERING AND TECHNOLOGY     | 9       | Índia          |
| 2             | GAZI UNIVERSITY                                     | 8       | Turquia        |
| 3             | KING FAHD UNIVERSITY OF PETROLEUM AND MINERALS      | 8       | Arábia Saudita |
| 4             | UDICE-FRENCH RESEARCH UNIVERSITIES                  | 7       | França         |
| 5             | JADAVPUR UNIVERSITY                                 | 7       | Índia          |
| 6             | AEROSPACE MANUFACTURING TECHNOLOGY CENTRE           | 5       | Canadá         |
| 7             | THE MANUFACTURING TECHNOLOGY CENTRE                 | 5       | Reino Unido    |
| 8             | CHANGZHOU UNIVERSITY                                | 4       | China          |
| 9             | AEROSPACE MANUFACTURING TECHNOLOGY CENTER           | 4       | Canadá         |
| 10            | CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE (CNRS) | 4       | França         |

Fonte. O autor, 2024

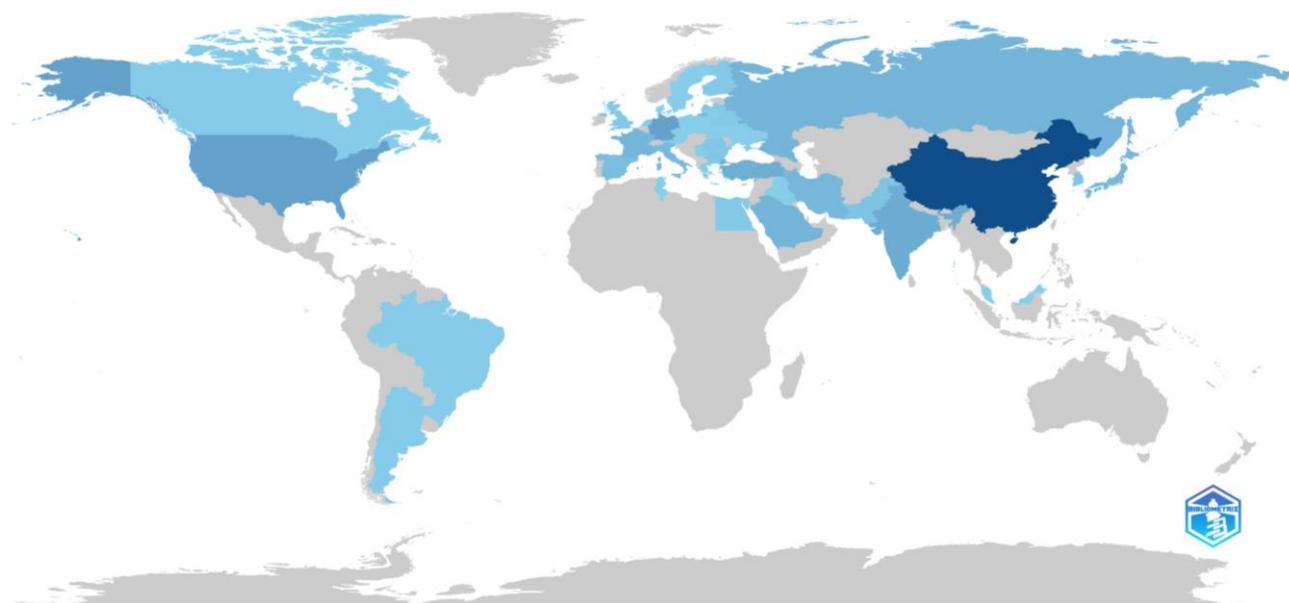
A Tabela 9 apresenta as principais afiliações destacadas, sendo a Jaypee University of Engineering and Technology a líder com 9 publicações, seguida pela Gazy University e King Fahd University of Petroleum and Minerals com 8 artigos, na sequência a Unide-French Research Universities e Universidade Jadavpur com 7 publicações, fazendo parte das cinco principais no ranking das três primeiras. Vale ressaltar que na classificação das 10 principais a maioria são universidades.

Outro aspecto relevante a se considerar é a origem dos países dessas organizações, destacam-se a China.

Afim de analisar melhor as informações dos países na literatura sobre análise da qualidade de superfície em peças de alumínio processadas por marcação e corte a laser e

considerando a importância e atenção dada ao tema em diferentes regiões pode ser refletida na Figura 11, que mostra o lançamento de artigos relacionados ao redor do mundo.

Figura 11. Produção científica dos países



Fonte. O autor, 2024

Quanto mais intensa a cor azul representa os países com maiores publicações, podemos assim, destacar a China com 71 documentos, além do EUA e Alemanha com 24 artigos. Nota-se que os países em desenvolvimento a cor de azul é mais clara e cinza o que pode concluir um baixo ou nulo nível de publicações.

No entanto, a lista em si é bastante diversificada, incluindo países de continentes diferentes, o que indica um interesse global por esse tema entre pesquisadores de diversas partes do mundo. O Brasil para o tema analisado no estudo encontra-se com pouca relevância nas produções dos artigos, apenas com dois documentos publicados, abrindo oportunidades para estudos como desta dissertação.

### 2.2.3 Estudos mais citados

Esta seção tem como objetivo fornecer uma visão dos estudos mais relevantes da base de dados analisada, em resposta à terceira questão de pesquisa (QP3). Para isso, a Tabela 10 apresenta uma lista dos quinze artigos mais citados pelos estudos analisados, tanto em termos de citações absolutas quanto em citações por ano. Na tabela 10 também possui o Digital Object Identifier (DOI), que pode ser consultado para obter mais detalhes.

Tabela 10. Artigos mais citados

| Classificação | Artigos                                 | DOI                                | Total citações | Citações/ano |
|---------------|---|------------------------------------|----------------|--------------|
| 1             | KOMANDURI R, 2000, WEAR                 | 10.1016/S0043-1648(00)00389-6      | 158            | 6,58         |
| 2             | SUGIHARA T, 2012, PRECIS ENG            | 10.1016/j.precisioneng.2011.10.002 | 125            | 10,42        |
| 3             | CHANG CW, 2007, INT J MACH TOOL MANU    | 10.1016/j.ijmachtools.2006.02.009  | 106            | 6,24         |
| 4             | WANG Y, 2002, J MATER PROCESS TECH      | 10.1016/S0924-0136(02)00616-7      | 85             | 3,86         |
| 5             | LI K, 1995, INT J MACH TOOL MANU        | 10.1016/0890-6955(94)00127-6       | 73             | 2,52         |
| 6             | UEHARA K, 2002, J MATER PROCESS TECH    | 10.1016/S0924-0136(02)00121-8      | 65             | 2,95         |
| 7             | WANDERA C, 2009, J LASER APPL           | 10.2351/1.3184429                  | 64             | 4,27         |
| 8             | ANTONCZAK AJ, 2014, APPL PHYS A-MATER   | 10.1007/s00339-013-7932-8          | 62             | 6,20         |
| 9             | PATELLA RF, 2000, WEAR                  | 10.1016/S0043-1648(00)00446-4      | 55             | 2,29         |
| 10            | XING YQ, 2016, J MANUF SCI E-T ASME     | 10.1115/1.4032263                  | 53             | 6,63         |
| 11            | DANDEKAR CR, 2013, INT J ADV MANUF TECH | 10.1007/s00170-012-4443-2          | 48             | 4,36         |
| 12            | LEE D, 2012, J POWER SOURCES            | 10.1016/j.jpowsour.2012.03.030     | 48             | 4,00         |
| 13            | SHARMA A, 2013, OPT LASER ENG           | 10.1016/j.optlaseng.2012.07.012    | 47             | 4,27         |
| 14            | OLSEN FO, 2009, J LASER APPL            | 10.2351/1.3184436                  | 41             | 2,73         |
| 15            | DHUPAL D, 2008, INT J ADV MANUF TECH    | 10.1007/s00170-006-0913-8          | 40             | 2,50         |

Fonte. O autor, 2024

Tabela 11. Os três artigos mais citados resumo

| Classificação | Artigos                              | Resumo  |
|---------------|--------------------------------------|---|
| 1             | KOMANDURI R, 2000, WEAR              | O estudo envolveu simulações de Dinâmica Molecular (MD) para cortes nanométricos em alumínio monocristalino, explorando diversas combinações de orientações cristalinas e direções de corte.  |
| 2             | SUGIHARA T, 2012, PRECIS ENG         | A demanda por compósitos de ligas de alumínio tem aumentado rapidamente na indústria de transporte, devido a vantagens como alta resistência em relação à massa e resistência à corrosão. O artigo analisa o uso de usinagem assistida por laser (LAM) como um processo economicamente viável para a fabricação de peças cerâmicas de óxido de alumínio de alta precisão. O LAM, que envolve o aquecimento localizado por um laser antes da remoção do material, demonstra taxas de remoção de material superiores e melhor controle sobre as propriedades e geometria da peça. |
| 3             | CHANG CW, 2007, INT J MACH TOOL MANU |   |

Fonte. O autor, 2024

Na Tabela 10, observa-se que a obra de maior número de citações totais e citações por ano é de Komanduri R, com 158 citações e uma média de 6,58 citações por ano, na sequência aparece o Sugihara T., com 125 citações e uma média de 10,42 citações por ano, na classificação apresenta os quinze mais citados. A Tabela 11, contém o resumo dos três artigos mais citados.

Apesar da relevância de todos os artigos mencionados na Tabela 10 dentro da base de dados analisada, os cinco primeiros podem ser considerados como centrais, uma vez que eles correspondem 51,1% do total de citações para os demais estudos mencionados. Na coluna três da Tabela 11 está apresentado um resumo dos três artigos mais citados na Tabela 10.

## **CAPÍTULO 3: METODOLOGIA**

Neste capítulo, será apresentado o método experimental adotado, utilizando os conceitos discutidos no segundo capítulo. O objetivo do processo de marcação estudado é abordá-lo de forma sistemática, buscando informações objetivas e científicas. A abordagem começa com uma reafirmação da dimensão de estudo e, em seguida, detalha o método experimental escolhido, juntamente com a descrição dos equipamentos utilizados.

### **3.1 Dimensão de estudo**

Este estudo encontra sua delimitação com base nas condições que seguem:

- No âmbito desta pesquisa, foram avaliados os seguintes elementos de processamento: potência da radiação, frequência do pulso e velocidade de aplicação do laser;
- O estudo abrangeu o processo de marcação mediante a utilização de um laser de fibra óptica com potência de 70 W, em chapas de Alumínio 1100-h14 (alumínio 99,6%, ferro 0,4%, cobre 0,2% e silício 0,2%). Nesse contexto, é importante ressaltar que os resultados alcançados não são generalizáveis para outros materiais ou métodos de processamento;
- A pesquisa investiga a influência dos parâmetros (velocidade, potência e frequência) para analisar a qualidade da superfície (rugosidade, geometria e microestrutura) de formas geométrica e código bidimensional para leitura com o celular (QRCode);
- Devido ao escopo desta pesquisa, não será realizada uma análise das propriedades químicas e algumas físicas como zona termicamente afetada (ZTA).

### **3.2 Método Experimental**

O presente estudo adotou um planejamento experimental baseado no método de Taguchi, visando investigar o efeito dos fatores de controle da velocidade, potência e frequência. Cada variável foi manipulada em três níveis: baixo, médio e alto, conforme Tabela 12, sendo considerado os limites de operação do equipamento e a mediana. O experimento foi conduzido seguindo um planejamento experimental, com uma repetição para garantir a robustez dos resultados.

Tabela 12. Matrizes ortogonais de Taguchi

| Fatores    | Unidade | Nível 1 | Nível 2 | Nível 3 |
|------------|---------|---------|---------|---------|
| Potência   | W       | 30      | 60      | 100     |
| Velocidade | mm/s    | 100     | 450     | 1000    |
| Frequência | KHz     | 50      | 75      | 100     |

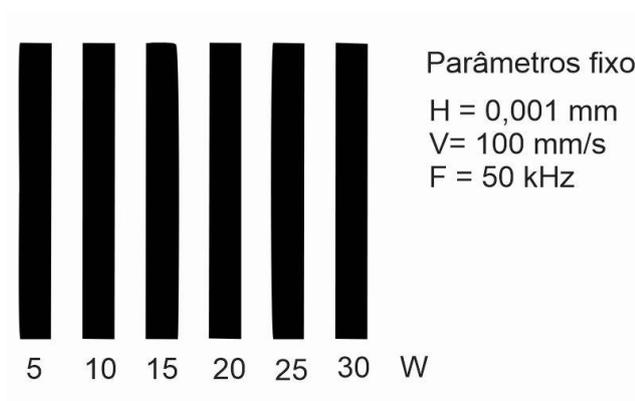
Fonte. Autor, 2024

Para garantir uma validação com melhores resultados do estudo, todas as condições experimentais foram aplicadas em um ambiente com temperatura controlada em 23 °C, minimizando o efeito da dilatação do material e outros fatores que pode influenciar.

A coleta de dados foi realizada por meio de instrumentos calibrados (INMETRO) e padronizados, com atenção especial para a precisão e confiabilidade das medidas.

O escopo deste estudo abrange a investigação experimental das variáveis de velocidade, potência e frequência do laser na saída. Cada uma dessas variáveis foi examinada em três diferentes níveis: inferior, médio e superior, mantendo -se dentro das limitações da faixa operacional da máquina, exceto o nível inferior que se realizou um teste preliminar para validação, conforme representado na Figura 12.

Figura 12. Teste para definição da potência mínima



Fonte. Autor, 2024

Foi estabelecida uma convenção para nomear as amostras provenientes dos testes. As letras iniciais correspondem às iniciais dos parâmetros de marcação especificados. Por exemplo, para parâmetro de potência, a letra inicial é P, seguida de uma letra minúscula que varia entre i (inferior), m (média) e s (superior). Os detalhes das diversas nomenclaturas empregadas neste estudo são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13. Nomenclatura para amostras de marcação

| Parâmetro de marcação | Nomenclatura | Parâmetro de marcação variável | Nomenclatura variável |
|-----------------------|--------------|--------------------------------|-----------------------|
| Potência              | P            | Potência superior              | Ps                    |
|                       |              | Potência média                 | Pm                    |
|                       |              | Potência inferior              | Pi                    |
| Velocidade            | V            | Velocidade superior            | Vs                    |
|                       |              | Velocidade média               | Vm                    |
|                       |              | Velocidade inferior            | Vi                    |
| Frequência            | F            | Frequência superior            | Fs                    |
|                       |              | Frequência média               | Fm                    |
|                       |              | Frequência inferior            | Fi                    |

Fonte. Autor, 2024

Enquanto a análise fatorial completa poderia resultar em 27 ( $3^3$ ) combinações possíveis para esse experimento, a estratégia adotada foi a utilização do método de Taguchi. Esse método proporcionou uma abordagem eficiente ao empregar uma matriz ortogonal L9, composto por 9 linhas de combinações, conforme detalhado na Tabela 14.

Tabela 14. Parâmetros dos ensaios

| Número do ensaio | Amostra | Potência (W) | Velocidade (mm/s) | Frequência (KHZ) |
|------------------|---------|--------------|-------------------|------------------|
| 1                | PiViFi  | 1            | 1                 | 1                |
| 2                | PiVmFm  | 1            | 2                 | 2                |
| 3                | PiVsFs  | 1            | 3                 | 3                |
| 4                | PmViFm  | 2            | 1                 | 2                |
| 5                | PmVmFs  | 2            | 2                 | 3                |
| 6                | PmVsFi  | 2            | 3                 | 1                |
| 7                | PsViFs  | 3            | 1                 | 3                |
| 8                | PsVmFi  | 3            | 2                 | 1                |
| 9                | PsVsFm  | 3            | 3                 | 2                |

Fonte. Autor, 2024

O tratamento dos dados será conduzido por meio de análise estatística, incluindo análise de variância. Espera-se que o planejamento experimental adotado neste estudo permita atingir os objetivos e obter resultados robustos e conclusões sólidas, contribuindo para o avanço do conhecimento na área de processamento de materiais e rastreabilidade.

No contexto do processo de marcação a laser, o procedimento experimental descreve minuciosamente como o processo de marcação a laser é executado, desde a preparação até a finalização.

Primeiramente, começa com a elaboração de um layout vetorial (descritos nos ANEXO I, II e III) que representa o padrão (desenho) desejado para marcação/gravação da

peça. Esse arranjo vetorial é então importado para um software (EzCad2) específico de controle da máquina a laser. Foram estabelecidos cinco cenários distintos de testes dos parâmetros por meio de desenhos vetoriais conforme representado nos anexos I, II e III. Esses cenários envolveram formas geométricas, como quadrados e círculos, nos quais se avaliou inicialmente apenas o contorno das formas, seguindo pela análise das áreas preenchidas. Além disso, o outro cenário envolveu a marcação de um código QR Code, considerando variações de dimensões de 15, 10 e 5 milímetros (mm) para o código QR, e 10, 5 e 2 mm para as formas geométricas.

No software, os parâmetros operacionais são configurados de acordo com as necessidades do experimento. Isso inclui definir a potência do laser, a velocidade, a taxa de repetição, a frequência e quaisquer outros ajustes relevantes para atingir o resultado desejado.

Após a configuração dos parâmetros, a peça de trabalho é posicionada com precisão sobre a mesa de trabalho. Uma etapa fundamental para a preparação dos testes é o alinhamento preciso do ponto focal do laser. Isso é alcançado por meio do alinhamento dos pontos de infravermelho emitidos (Figura 13). Esses pontos são visíveis através de sistemas de visualização especializados, permitindo que o operador ajuste a posição para garantir o correto posicionamento do ponto focal do laser (Figura 14). Esse alinhamento rigoroso é essencial para garantir que o laser seja direcionado com exatidão ao ponto desejado, evitando discrepâncias que possam comprometer a qualidade e eficácia do processo (Figura 15).

Figura 13. Desalinhamento

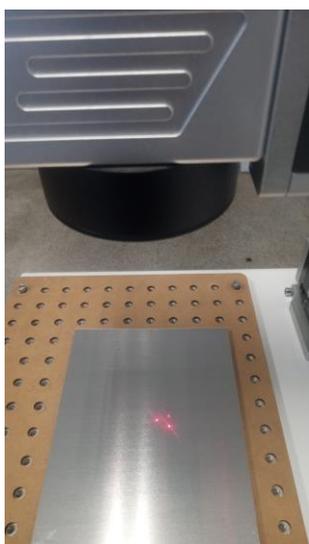
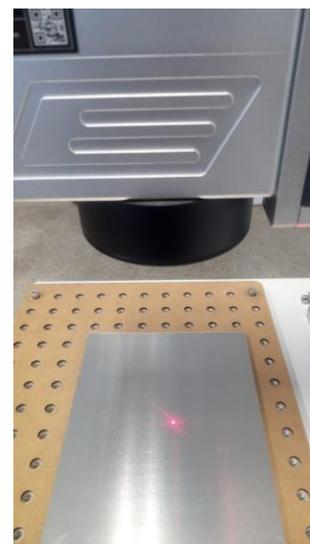


Figura 14. Ajuste da lente



Figura 15. Alinhamento



Fonte. Autor, 2024

A projeção da área de processamento futura é acionada através da tecla F1 do teclado, gerada pelo dispositivo de marcação a laser, auxiliando no posicionamento exato da peça, por meio visualização de um feixe do laser.

Com tudo pronto, o procedimento é iniciado pressionando o botão correspondente no software ou tecla F2 do teclado. A máquina emite o feixe de laser da fonte de energia para a peça de trabalho. Esse feixe é então direcionado para a cabeça de varredura, composta por dois espelhos móveis que controlam o movimento do feixe nos eixos X e Y.

Subsequente, o efeito térmico na camada superior é gerado quando o feixe laser incide sobre o material. A marcação resultante da intensidade desse efeito térmico, serão analisadas no próximo capítulo deste estudo.

A análise dos dados foi conduzida utilizando o software estatístico especializado Minitab. Este software oferece ferramentas poderosas para análise multivariada e interpretação de experimentos planejados, conforme Tabela 14. A utilização do software Minitab objetiva a aplicação de métodos estatísticos avançados, como análise de variância (ANOVA) e análise de respostas, afim de identificar os principais fatores que contribuem para as variações nos resultados observados.

A Tabela 15, demonstra cada etapa detalhadamente do procedimento experimental da marcação/ gravação a laser.

Tabela 15. Etapas do procedimento experimental

| Etapas | Descrição   | Observação   |
|--------|---|--|
| 1      | Preparou-se o vetor dos desenhos e importou-se para o software EzCAD2 | Utilizou-se para vetorizar o desenho o software Corel Draw             |
| 2      | Realizou-se os devidos ajustes no EzCAD2                              | Considerou-se para o preenchimento um "Hatch" com espaçamento de 0,001 |
| 3      | Ajustou-se o foco do laser conforme Figura 15                         | Verificou-se para cada chapa o foco adequado                           |
| 4      | Aplicou-se sistema de exaustão na execução das marcações              | O sistema de exaustão utilizado, fornecidos pelo fabricante da máquina |
| 5      | Executou-se as marcações conforme planejamento experimental           | Considerou-se apenas 1passe do laser para cada amostra                 |
| 6      | Analisou-se as rugosidades superficiais com rugosímetro               | Realizou-se três repetições da leituras do Ra e Rz                     |
| 7      | Analisou-se as rugosidades das amostras de 2 mm na Alicona            | Utilizou-se de parceria com a empresa Hanna Indústria Mecânica Ltda    |
| 8      | Analisou-se as superfícies com o MEV                                  | Utilizou-se de parceria com a escola SENAI Suíço-Brasileiro            |
| 9      | Analisou-se a geometria e tolerâncias com o microscópio optico        | Utilizou-se um suporte para adequada a dimensão da chapa               |
| 10     | Realizou-se a leitura dos códigos QR com o celular                    | Utilizou-se dois diferentes dispositivos móveis para leitura           |

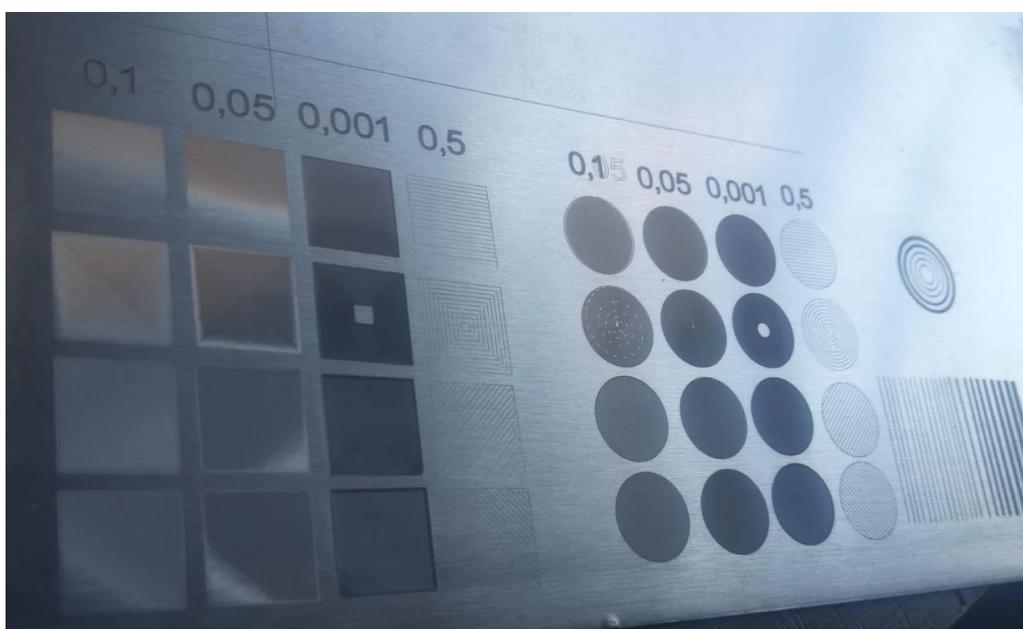
Fonte. Autor, 2024

A definição do percurso que o laser seguirá para preencher uma marcação específica é crucial, influenciando tanto o tempo de ciclo quanto a qualidade do resultado, dependendo do tipo de preenchimento escolhido, como ilustrado na Figura 16. O preenchimento bidirecional destaca-se por proporcionar uma velocidade de marcação mais eficiente. Além disso, no contexto do preenchimento, é viável ajustar os parâmetros relacionados ao espaçamento e ângulos das linhas. Esse parâmetro refere-se à distância entre as linhas que preenchem uma área específica, conforme representado na Figura 16. Quanto menor for o espaçamento, maior será o tempo de marcação, pois será necessário marcar mais

linhas para preencher completamente o espaço. Um aspecto crucial associado ao espaçamento entre linhas, que impacta diretamente na qualidade da marcação, é a sobreposição, devido ao seu efeito significativo na textura da superfície e na profundidade alcançada durante o processo de marcação.

Assim, procedeu-se a testes a fim de determinar o preenchimento a ser adotado no experimento, assim como o espaçamento entre as linhas e a sobreposição da marcação, conforme apresentados nas Figuras 16. Dessa forma, optou-se por manter esses parâmetros fixos, implementando um percurso contínuo, espaçamento de 0,001 mm e sobreposição com uma única passada de marcação nos eixos x e y das figuras geométricas.

Figura 16. Teste para definição da sobreposição e espaçamento do preenchimento

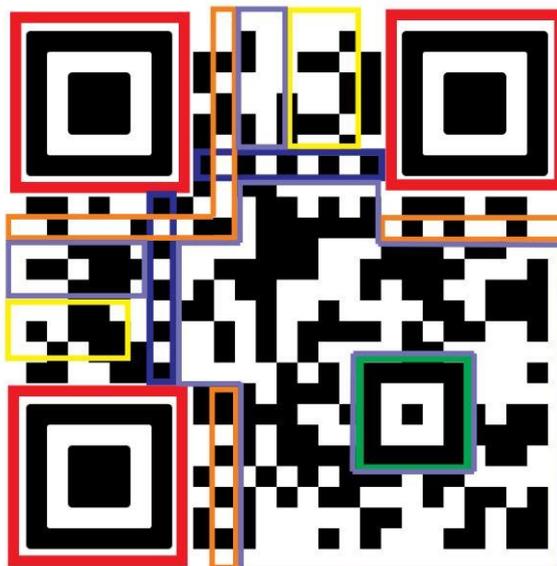


Fonte. Autor, 2024

Os códigos QR (Quick Responde) são códigos de barras bidimensionais que armazenam informações de forma rápida e legível por celulares. Eles são compostos por módulos (quadrados ou retângulos) disposto em uma matriz. Cada módulo representa um 1 e cada espaço em branco um 0 em código binário. Os códigos QR podem armazenar diversos tipos de informações, como URLs de sites, informações de contato, números, mensagens, entre outras informações.

Cada um dos quadrados e retângulos é, na realidade, um marcador com uma finalidade específica conforme representação na Figura 17.

Figura 17. Representação do Código QR Code.



Fonte. Autor, 2024

Seguindo as cores representadas na Figura 17. As cores em vermelho do Código QR Code os padrões de posicionamento estão localizados nos três cantos do código, desempenhando um papel crucial na capacidade do scanner de identificar e ler o código de maneira eficiente. Indicando a direção que o QR Code foi impresso e ajudando na sua identificação e orientação. A cor verde é empregada para corrigir distorções em QR Codes em superfícies curvas, os marcadores de alinhamento podem variar em tamanho e quantidade conforme a capacidade de armazenamento de informações no código. As cores azuis são a sequência de módulos pretos e brancos no QR que constitui o sistema de informações, conhecido como a grade de dados. Essa configuração ajuda o scanner a identificar o tamanho da matriz de informações. Nas cores amarelas mostra os marcadores que sinalizam a versão específica do QR Code em uso, geralmente variando entre versões 1 e 7. Já as cores laranjas incluem dados sobre a tolerância a erros e o padrão da máscara de dados aprimorando a digitalização do código. Temos também o que estão nas cores roxas que é o sistema de correção de erros do QR Code aloja informações junto aos módulos de correção, que possibilitam a recuperação de dados perdidos. Por fim, temos as margens brancas ao redor do QR Code, como o espaço em um design, fornecem estrutura e clareza.

Para a geração dos códigos QR Code, a URL selecionada foi: “<https://www2.fca.unicamp.br/portal/pt-br/>”, a qual redireciona para a página web da Faculdade de Ciências Aplicadas da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP).

### 3.3 Material e equipamentos

O material selecionado para o experimento foram chapas de alumínio 1100 – H14, uma liga de alumínio amplamente utilizada devido às suas propriedades mecânicas e versatilidade em várias aplicações, conforme detalhado na Tabela 16, das propriedades mecânicas conforme normas ABNT-NBR 7823 (laminados). A liga 1100 - H14 é composta principalmente por alumínio, com traços de outros elementos como cobre e ferro, resultando em uma estrutura cristalina que apresenta características específicas, na Tabela 17 que são apresentadas as propriedades químicas, fornecidas pelo fornecedor do material.

Tabela 16. Propriedades mecânicas da chapa de Al 1100-H14.

| Propriedades Mecânicas |              |
|------------------------|--------------|
| Limite de resistência  | 90 -142 Mpa  |
| Limite de escoamento   | 90 - 115 Mpa |
| Dureza                 | 32 Brinell   |

Fonte. ALELUIA ALUMÍNIO, 2023

Tabela 17. Propriedades químicas da chapa de Al 1100-H14

| Propriedades químicas |              |
|-----------------------|--------------|
| Cu                    | 0,05 - 0,20% |
| Mn                    | 0,05%        |
| Al                    | 99,00%       |
| Si + Fe               | 0,95%        |
| Zn                    | 0,10%        |
| Outros                | 0,05 - 0,15% |

Fonte. ALELUIA ALUMÍNIO, 2023

A designação “H14” indica que o material passou por um processo de endurecimento por encruamento a frio, conferindo-lhe uma combinação única de resistência mecânica e ductibilidade, Tabela 18. A chapa de alumínio 1100-H14 exibe uma microestrutura composta por grãos finos e uniformemente distribuídos, o que contribui para suas propriedades mecânicas aprimoradas.

Tabela 18. Propriedades físicas da chapa de Al 1100 - H14

| Propriedades Físicas     |                           |
|--------------------------|---------------------------|
| Condutibilidade Elétrica | 56% I.A.C.S.              |
| Condutibilidade Térmica  | 0,52 - 0,56 cal/cms°C     |
| Densidade                | 2,71 g/cm <sup>3</sup>    |
| Expansão Térmica         | 24x10 <sup>-6</sup> x1/°c |
| Ponto de Fusão           | 658°C                     |

Fonte. ALELUIA ALUMÍNIO, 2023

Devido à sua elevada maleabilidade, resistência à corrosão e facilidade de conformação, a chapa de alumínio 1100-H14 é amplamente empregada em setores como construção e indústria automotiva.

A chapa de alumínio possui dimensões específicas, com uma espessura de 1,5 mm, extensão longitudinal de 200 mm e largura transversal de 160 mm, como indicado na representação da Figura 18. Essas medidas dimensionais delineiam claramente a geometria do objeto em estudo.

Figura 18. Desenho 2D da chapa



Fonte. Autor, 2024

A superfície está com rugosidades conforme Tabela 19, e realizando um análise visual de operador a chapa não apresenta marcas visíveis ou evidências de tratamento químico, conforme Figura 19.

Figura 19. Chapa utilizada no experimento



Fonte. Autor, 2024

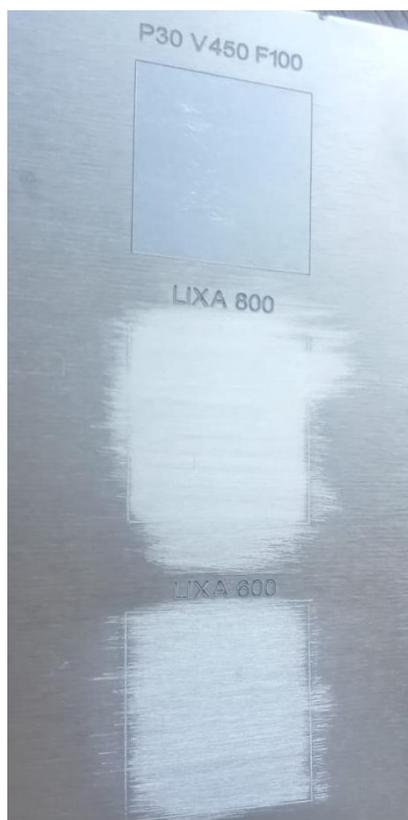
Tabela 19. Rugosidade superficial das chapas

| <b>Chapa Quadrados preenchidos</b> |            |            |            |            |            |
|------------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| <b>Ra1</b>                         | <b>Ra2</b> | <b>Ra3</b> | <b>Rz1</b> | <b>Rz2</b> | <b>Rz3</b> |
| 0,332                              | 0,312      | 0,277      | 2,012      | 2,277      | 1,533      |
| <b>Chapa Circulos preenchidos</b>  |            |            |            |            |            |
| <b>Ra1</b>                         | <b>Ra2</b> | <b>Ra3</b> | <b>Rz1</b> | <b>Rz2</b> | <b>Rz3</b> |
| 0,303                              | 0,224      | 0,315      | 2,24       | 1,465      | 1,952      |

Fonte. Autor, 2024

Para obter a rugosidade superficial das chapas empregadas como substrato nos experimentos, procedeu-se a um teste para uniformizar e replicar o procedimento. O acabamento superficial foi realizado manualmente com lixa de granulação 800 ou mecanicamente com os seguintes parâmetros: velocidade de 450 mm/s, frequência de 100 KHz e potência de 30 W. Ambos os métodos visaram atingir a mesma rugosidade inicial, estabelecendo assim as condições iniciais para a condução dos experimentos, conforme Figura 20.

Figura 20. Experimento para definição da Rugosidade Inicial da chapa.



Fonte. Autor, 2024

As marcações foram executadas na escola SENAI “Luiz Varga” localizada na cidade de Limeira- SP, utilizando a máquina de laser de fibra óptica, fornecida pela empresa parceira Fiber CNC, representado na Figura 21, descrito as especificações na Tabela 20.

Figura 21. Máquina a laser de Fibra Óptica



Fonte. Autor, 2024

Tabela 20. Especificações da máquina laser

| Especificação da máquina laser de fibra optica |                               |                                   |
|--|-------------------------------|-----------------------------------|
| item   | Descrição                     | Dados                             |
| 1  | Comprimento de onda do laser  | 1064 NM                           |
| 2  | Diâmetro do feixe / qualidade | M2<1,2                            |
| 3  | Repetibilidade                |                                   |
| 4  | Precisão de posicionamento    | 0,01 mm                           |
| 5  | Controle                      | EzCad2                            |
| 6  | Resfriamento                  | Resfriamento a ar                 |
| 7  | Fonte de energia              | AC 220 V, 50/60HZ, 1kVA           |
| 8  | Tipos de arquivos             | PLT, DXF, AI, DST, BMP, JPG e TIF |
| 9  | Dimensões                     | 100 X 150 X 150 cm                |
| 10   | área de trabalho              | 100 x 100 mm                      |
| 11   | Peso                          | 70 Kg                             |

Fonte. Manual da Fiber CNC, 2020

Na execução do processo de marcação a laser, empregou-se um sistema de exaustão (Figura 22) com o objetivo de mitigar a interferência dos resíduos e da fumaça do material emitidas durante as marcações/ gravações, de modo a não impactar os resultados dos parâmetros.

Figura 22. Sistema de exaustão



Fonte. Autor, 2024

O Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) é um equipamento de análise (Figura 23) que permite a observação de detalhes extremamente finos e estruturas na escala micro e nanométrica, fornecendo informações valiosas sobre a morfologia, composição e propriedades das amostras analisadas.

O funcionamento do MEV baseia-se na emissão de feixes de elétrons de alta energia a partir de uma fonte eletrônica, que são direcionados para a superfície da amostra. Quando os elétrons atingem a amostra. Esses sinais são detectados e convertidos em imagens de alta resolução, permitindo a visualização detalhada da topografia, textura da superfície da amostra.

Figura 23. Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)



Fonte. IST Santo Amaro, 2024

Tabela 21. Especificações do MEV

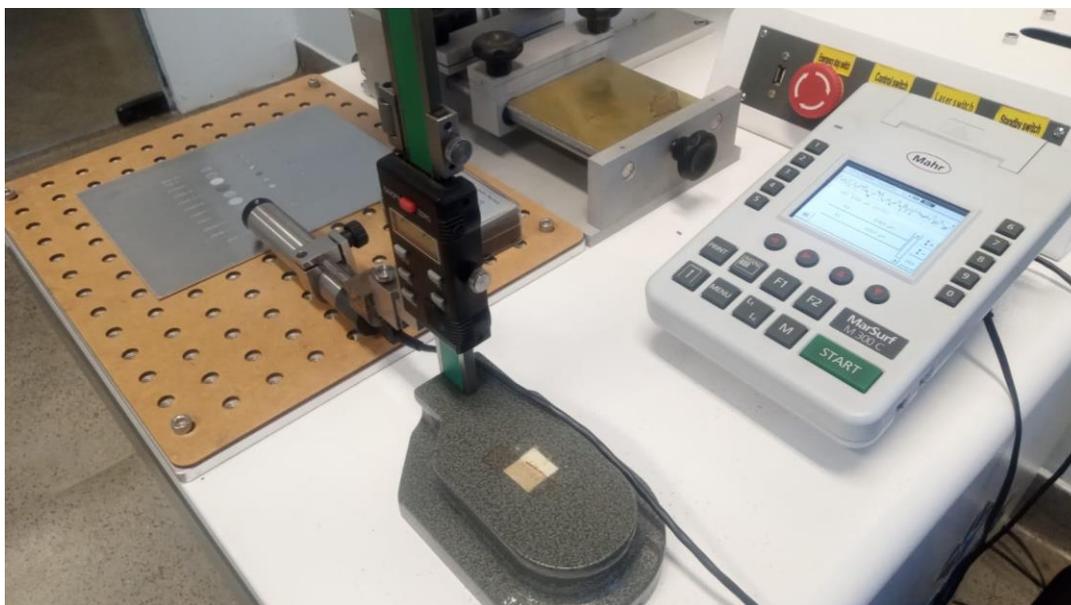
| Especificação do MEV de mesa Hitachi TM3000 |                             |                    |
|---|-----------------------------|--------------------|
| item  | Descrição                   | Dados              |
| 1   | Ampliação                   | 20 ~ 30.000x       |
| 2   | Tensão de aceleração duplas | 5kV e 15kV         |
| 3   | Tamanho máximo da amostra   | 70 mm de diâmetro  |
| 4   | Espessura máxima da amostra | 50 mm              |
| 5   | Curso de palco              | 35 mm x 35 mm (XY) |
| 6   | Formato de imagem           | BMP, TIF, JPG      |

Fonte. HITACHI, 2023

O rugosímetro (Figura 24) é um dispositivo de medição utilizado para avaliar a textura e as irregularidades de superfícies, permitindo quantificar parâmetros como rugosidade média, altura máxima e espaçamento entre as irregularidades.

Para as análises utilizou-se um rugosímetro portátil, sendo uma versão compacta e móvel do instrumento de medição de rugosidade, a especificações do dispositivo estão descritas na Tabela 22.

Figura 24. Rugosímetro



Fonte. Autor, 2024

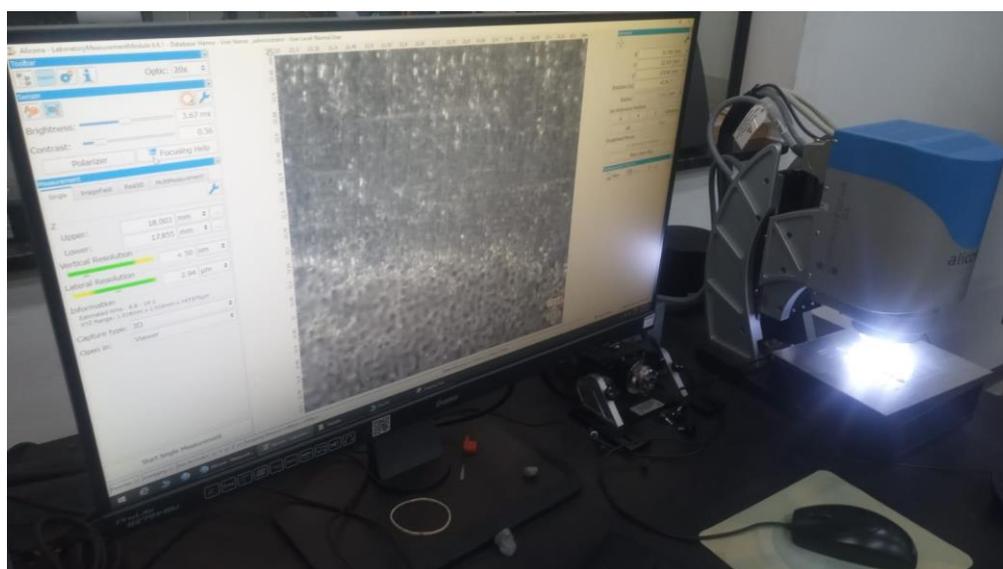
Tabela 22. Especificação do Rugosímetro

| Especificação do Rugosímetro |  |                             |
|------------------------------|--|-----------------------------|
| item                         | Descrição  | Dados                       |
| 1                            | Marca  | Mahr                        |
| 2                            | Parâmetros   | Ra, Rq, Rz, Rp, RpA         |
| 3                            | Unidade de medida                                    | $\mu\text{m}/\mu\text{pol}$ |
| 4                            | Faixa de medida                                      | 0,350                       |
| 5                            | Resolução de perfil                                  | 8 nm                        |
| 6                            | Velocidade de contato                                | 0,5 mm/s                    |
| 7                            | Força de medição                                     | 0,00075                     |
| 8                            | Ponta de apalpe                                      | 2 $\mu\text{m}$             |
| 9                            | Comprimento de deslocamento Lt de acordo com ISO/JIS | 1,75; 17,5 e 5,6 mm         |

Fonte. MAHR, 2024

Devido ao tamanho reduzido das amostras de 2 mm, a área de medição no rugosímetro foi menor que a resolução da ponteira. Portanto, para analisar a superfície após as marcações, optou-se pela utilização do Alicona para a análise das amostras e garantia da qualidade, esse equipamento é especializado em metrologia óptica 3D. Os sistemas Alicona empregam a tecnologia Focus-Variation (Variação de Foco), permitindo medições precisas e não destrutivas de dimensão, forma e rugosidade. Esses sistemas oferecem alta resolução e ampla profundidade de campo, adequando-se a componentes complexos de diferentes formatos e materiais (ALICONA, 2024). Essa técnica possibilitou a caracterização das superfícies em escalas micro e nanométricas, abrangendo a medição da topografia e a identificação da rugosidade, conforme ilustrado na Figura 25.

Figura 25. Sistema de Metrologia Óptica 3D Alicona



Fonte. Autor, 2024

Tabela 213. Especificação do Alicona

| Especificação do Alicona |                     |                 |
|--------------------------|---------------------|-----------------|
| item                     | Descrição           | Dados           |
| 1                        | Sistema de palpação | Óptica, a laser |
| 2                        | Curso X             | 50 mm           |
| 3                        | Curso Y             | 50 mm           |
| 4                        | Curso Z             | 155 mm          |

Fonte. Manual do equipamento, 2023

Para analisar as geometrias e dimensões das amostras marcadas, utilizou-se o microscópio óptico. Sua capacidade de gerar imagens das amostras com resolução micrométrica, não invasiva e com ampliação controlada possibilitou a obtenção de imagens de alta qualidade, permitindo uma análise precisa das características geométricas e dimensionais das estruturas marcadas, Figura 26.

Figura 26. Microscópio Óptico

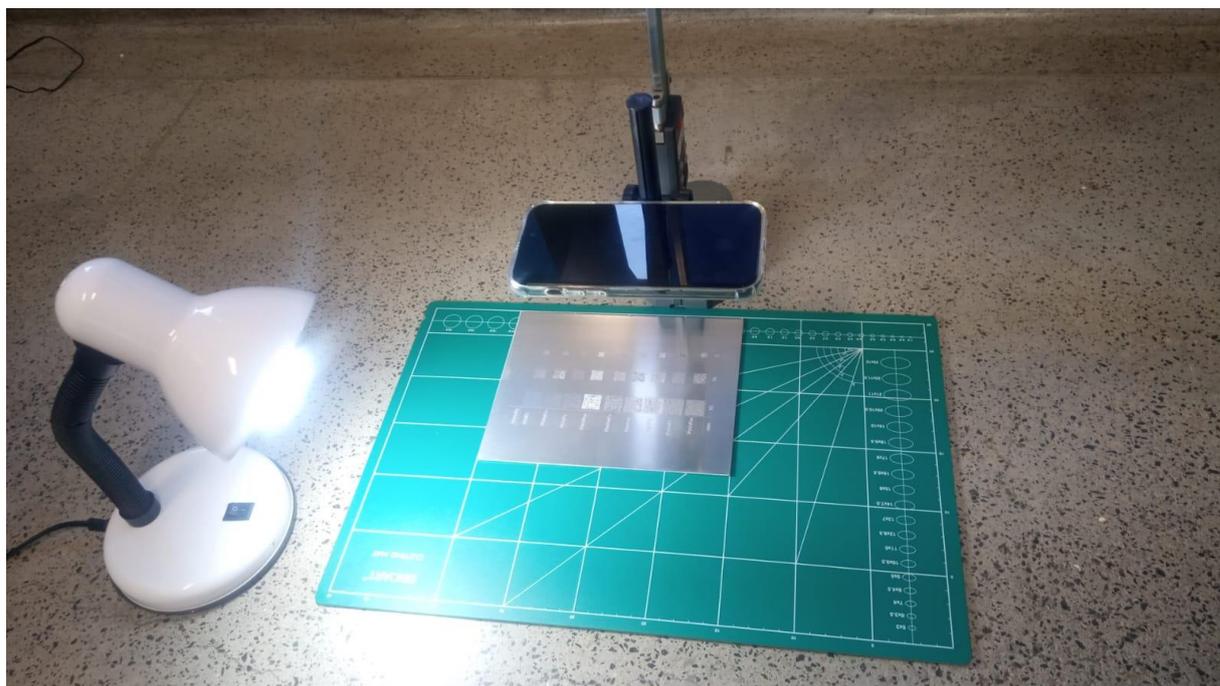


Fonte. Autor, 2024

Um experimento foi conduzido para avaliar a capacidade de reconhecimento de QR Code por meio de dispositivos celulares. Durante o experimento, várias marcações foram testadas para determinar qual delas era possível scanear pelo celular. Os resultados desta análise fornecem informações sobre a eficácia dos diferentes parâmetros de marcação na legibilidade do QR Code por dispositivos móveis.

Para evitar desvios na coleta dos resultados, foi adotado um dispositivo para padronizar a altura do celular (170 mm). Além disso, foi utilizada uma luminária para melhorar a luminosidade e o efeito do reflexo durante o processo, conforme representado na Figura 27.

Figura 27. Leitura com dispositivo móvel (celular)



Fonte. Autor, 2024

A metodologia utilizada nesta dissertação integrou técnicas avançadas e procedimentos para garantir a precisão e a validade dos resultados obtidos. A abordagem adotada permitiu uma análise detalhada as amostras das marcações do laser estudadas, assegurando que os dados coletados fossem confiáveis e alinhados com os objetivos da pesquisa.

## CAPÍTULO 4: RESULTADOS E DISCUSSÃO

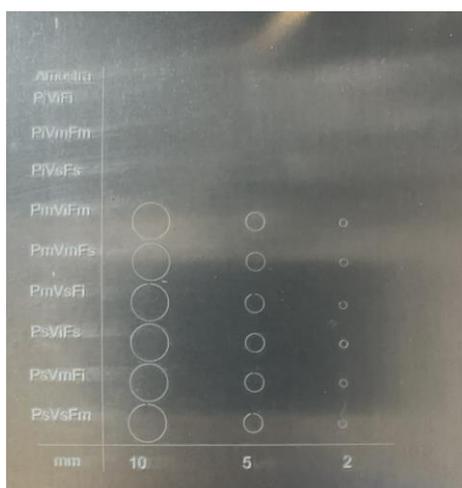
Neste capítulo dos resultados e discussão, efetuamos uma estruturação em seções com o propósito de proporcionar uma descrição detalhada das fases que englobam desde a condução do processamento das amostras até a avaliação da rugosidade por meio de instrumentação especializada, incluindo o rugosímetro, Alicona e o MEV. Além disso, conduzimos uma análise estatística utilizando o software Minitab para extrair informações relevantes a partir dos dados obtido.

### 4.1 Processamento das amostras

Com o objetivo de aprimorar os parâmetros de processamento de marcação a laser, buscamos identificar a combinação mais apropriada capaz de proporcionar a melhor qualidade de superfície possível. Neste contexto, conduzimos análises dos seguintes fatores de processamento: a velocidade de marcação, a frequência e a potência do laser de fibra óptica aplicada à chapa de alumínio.

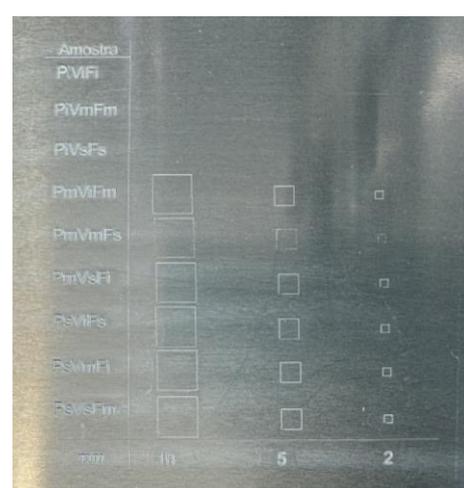
As Figuras 28 e 29 representam os resultados visuais das marcações, considerando exclusivamente os contornos das formas geométricas. Já nas Figuras 30 e 31, além dos contornos das formas, também incorporamos os seus preenchimentos, avaliando diversas configurações dos parâmetros de marcação, conforme descrito na metodologia. Na Figura 32, apresentamos as marcações dos códigos QR Code, completando a análise visual das marcações executados no estudo.

Figura 28. Contorno de formas – círculos



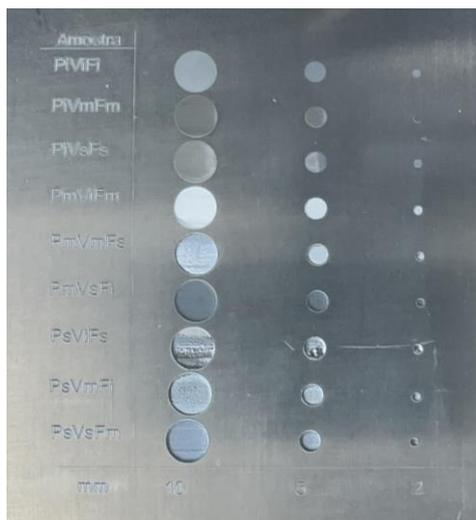
Fonte. Autor, 2024

Figura 29. Contorno de formas - quadrados

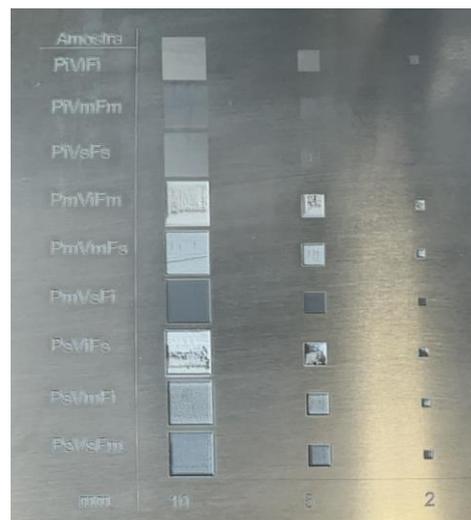


Fonte. Autor, 2024

Figura 30. preenchimento de formas – círculos      Figura 31. Preenchimento de formas – quadrados



Fonte. Autor, 2024



Fonte. Autor, 2024

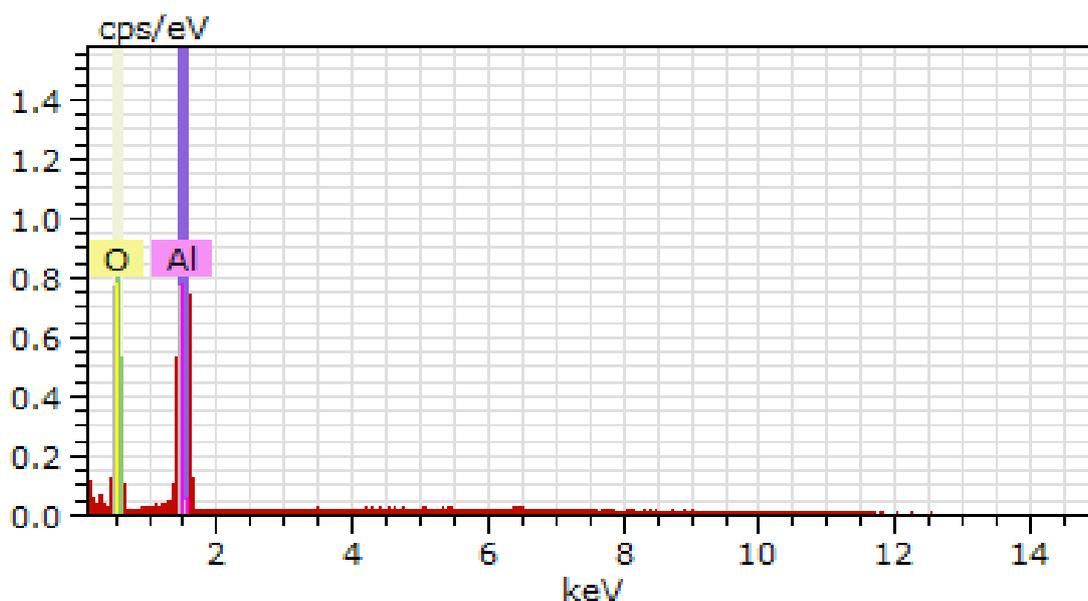
Figura 32. Contorno e preenchimento de código QR Code



Fonte. Autor, 2024

Conduziu-se uma análise na superfície marcada pelo laser para examinar os elementos, resultando nos seguintes dados conforme ilustrado na Figura 33.

Figura 33. Gráfico dos elementos nas amostras



Fonte. Autor, 2024

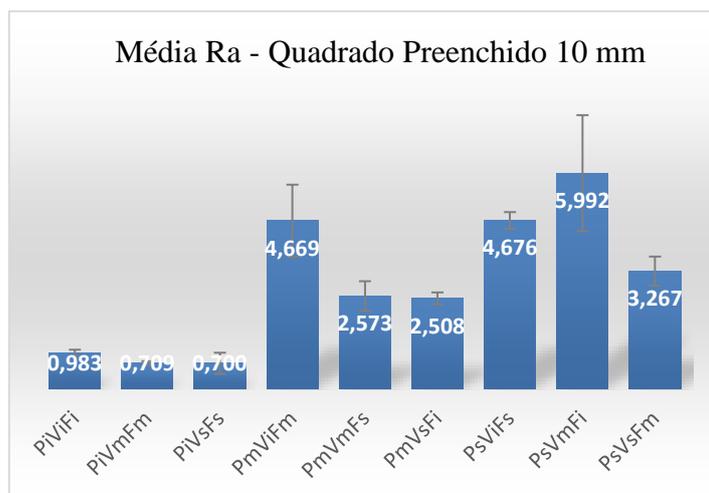
Conforme a análise realizada, foi constatado a presença de óxido de alumínio e alumínio, na região afetada pelo laser, com uma baixa concentração de outros elementos que não apresentaram uma significativa representatividade no gráfico. Com esses resultados, validamos a composição, bem como os efeitos no local das marcações a laser.

#### 4.2 Análise da Rugosidade Superficial

O anexo VII exibe os resultados da calibração para Ra e Rz no rugosímetro, juntamente com as correções aplicadas ao equipamento para garantir a fidedignidade dos resultados. Os resultados específicos para as superfícies preenchidas com quadrados e círculos estão apresentados no anexo VII, com três repetição de medição para cada amostra.

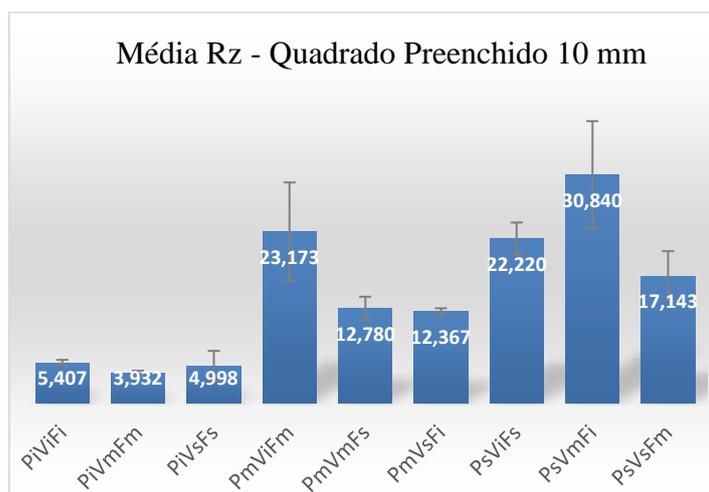
Com base nas medições de rugosidade realizadas, foram calculadas as médias de Ra e Rz, juntamente com seus desvios padrão, e os resultados foram plotados em gráficos para cada condições do experimento, conforme ilustrado nas Figuras 34 e 35.

Figura 34. Resultados Ra - Quadrado preenchido 10 mm



Fonte. Autor, 2024

Figura 35. Resultados Rz - Quadrado preenchido 10 mm

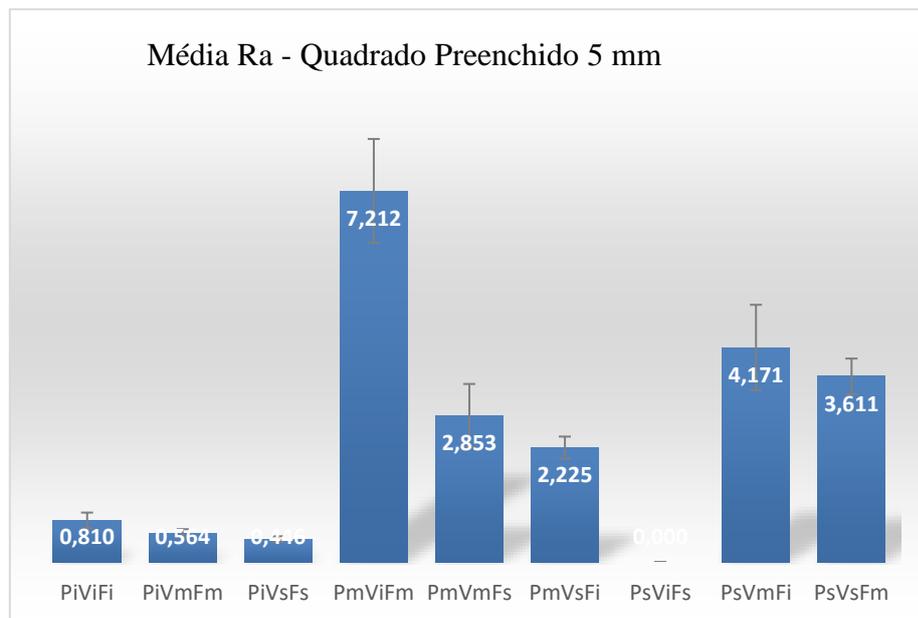


Fonte. Autor, 2024

Analisando as Figuras 34 e 35, observa-se que as amostras com potência inferior do laser apresentam valores menores de rugosidade, e os desvios padrões dessas amostras também foram menores comparados com os demais parâmetros de frequência e velocidade.

Ao analisar os resultados obtidos para as rugosidades Ra e Rz em ambas as amostras semelhantes, observamos uma variação mínima entre os resultados. Portanto, optamos por plotar apenas os gráficos para o quadrado preenchido de 5 mm, o círculo preenchido de 10 mm e 5 mm, com as medidas de Ra, representados nas Figuras 36, 37 e 38 os resultados das amostras respectivamente.

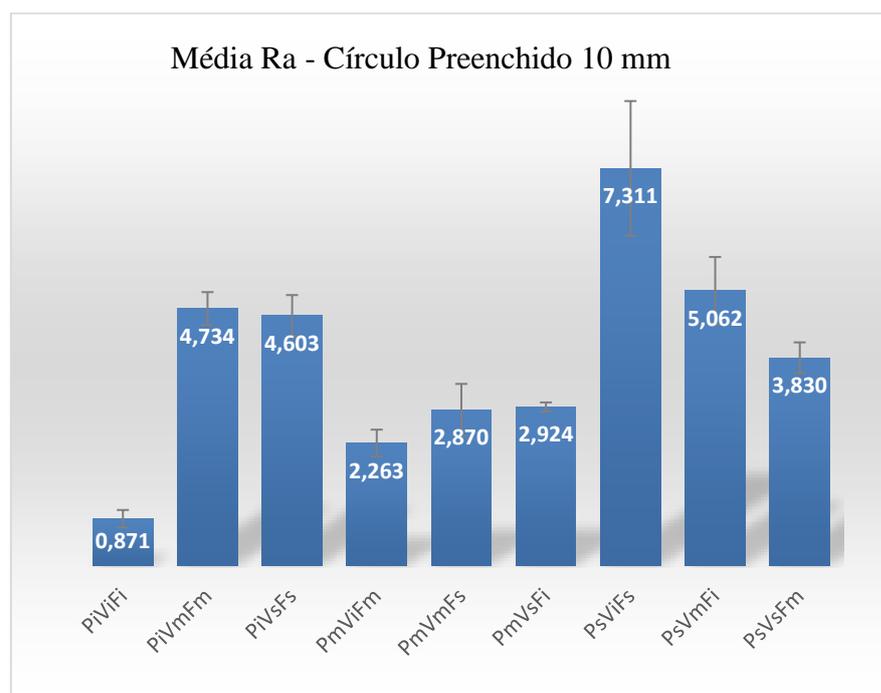
Figura 36. Resultados Ra - Quadrado preenchido 5 mm



Fonte. Autor, 2024

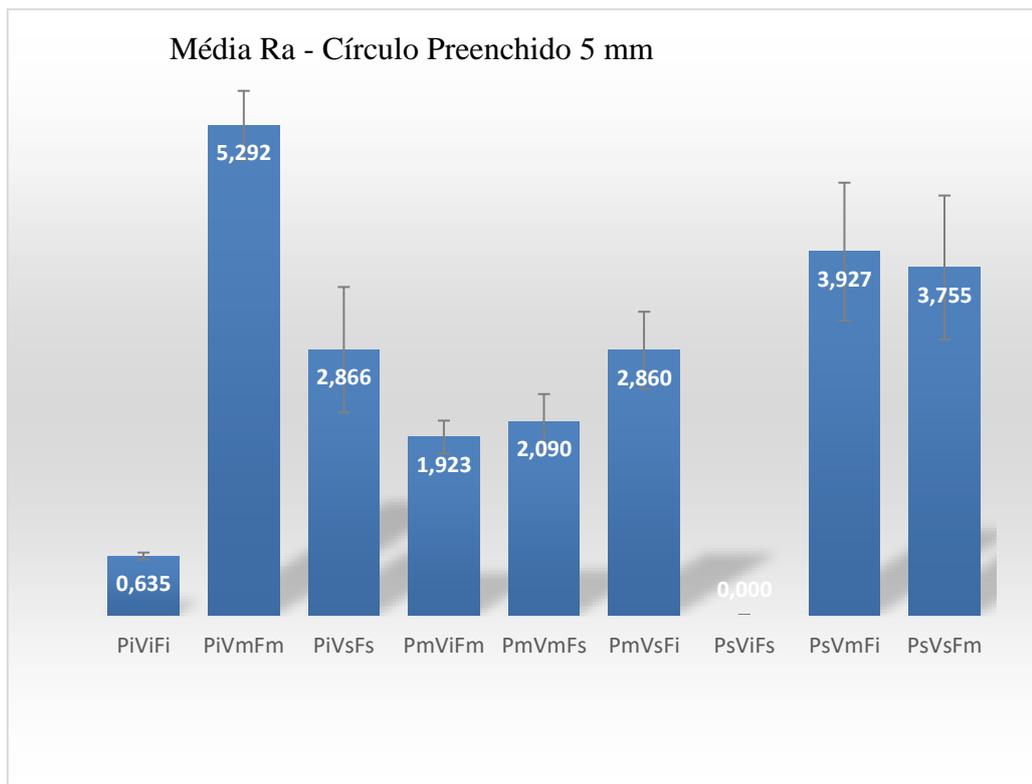
Observa-se no gráfico da Figura 36 que, em relação o parâmetro de potência, os valores de rugosidade superficial permaneceram menores comparados com os demais, conforme descrito na análise realizada na Figura 35.

Figura 37. Resultados Ra - Círculo preenchido 10 mm



Fonte. Autor, 2024

Figura 38. Resultados Ra - Círculo preenchido 5 mm

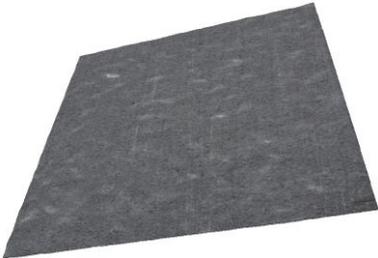
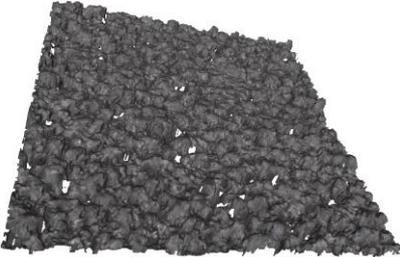


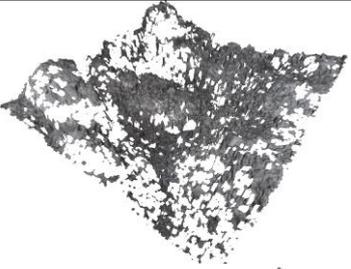
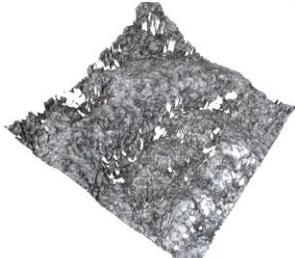
Fonte. Autor, 2024

Nas Figuras 37 e 38 apresentam os gráficos da amostra de círculos preenchidos em duas dimensões diferentes. Em comparação com as amostras das Figura 35 e 36, observa-se uma variação nos resultados em relação ao parâmetro de potência. Notavelmente, para a potência inferior, foi registrada uma maior rugosidade superficial. No entanto, ao analisar as médias das rugosidades de todos os gráficos, a potência média, observa-se uma constância nos resultados da rugosidade superficial.

As amostras PsViFs com formas preenchidas do quadrado e círculo, ambas com dimensões de 5mm, atingiram um limite inferior saturado, impossibilitando a obtenção de resultados a um erro de leitura no apalpador do rugosímetro. Além disso, para as amostras de ambas as formas geométricas com dimensão de 2 mm, a análise por meio do rugosímetro não foi viável, sendo necessário recorrer a um microscópio Alicona para obtenção dos dados, os quais estão representados na Tabela 24.

Tabela 224. Resultados obtidos no microscópio - Metrologia optica 3D.

| Círculos preenchidos - 2mm |                      |                      |   |
|----------------------------|----------------------|----------------------|---|
| Amostras                   | Ra ( $\mu\text{m}$ ) | Rz ( $\mu\text{m}$ ) | Imagens da superfície   |
| PiViFi                     | 0,587                | 3,458                |     |
| PiVmFm                     | 5,435                | 6,969                |     |
| PiVsFs                     | 0,379                | 2,631                |    |
| PmViFm                     | 1,26                 | 7,523                |   |
| PmVmFs                     | 4,124                | 24,628               |  |
| PmVsFi                     | 3,263                | 19,577               |  |

|        |       |        |   |
|--------|-------|--------|---|
| PsViFs | 6,582 | 36,261 |   |
| PsVmFi | 3,814 | 24,184 |  |
| PsVsFm | 6,383 | 36,105 |  |

Fonte. Autor, 2024

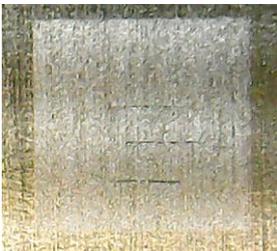
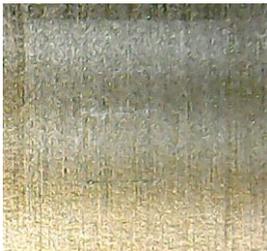
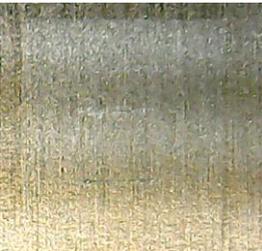
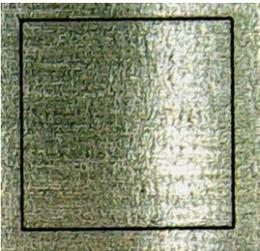
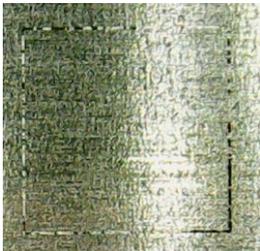
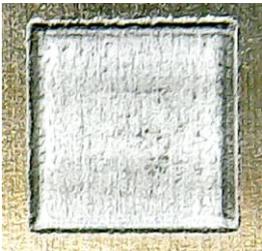
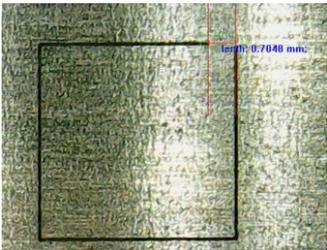
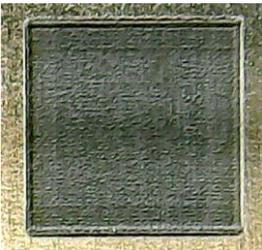
Através da análise no microscópio Alicona, foi possível obter não apenas os valores de Ra e Rz das amostras, mas também imagens detalhadas da textura da superfície marcada pelo laser. É importante destacar que nas imagens onde se observam pontos brancos e falhas, correspondem às amostras mais danificadas.

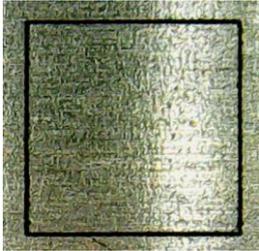
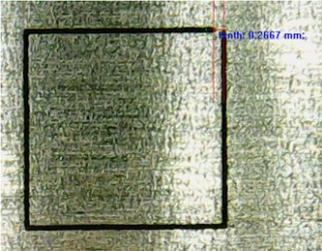
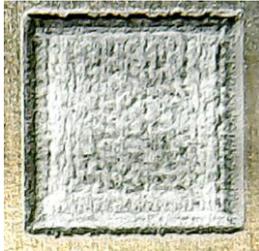
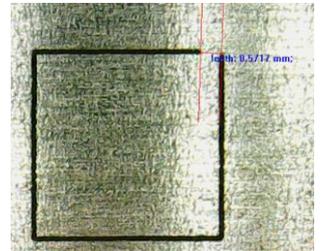
Observa-se que, à medida que a potência diminuiu e a velocidade aumentou, a superfície da amostra torna-se mais homogênea. Por outro lado, ao aumentar a potência e reduzir a velocidade, observa-se uma maior incidência de queima, bem como a formação de picos e vales mais evidentes nas amostras.

### 4.3 Análise por Microscopia Óptica

As imagens adquiridas por meio do microscópio óptico para análise dos contornos dos quadrados e círculos estão apresentadas nas Tabelas 25 e anexo V. A primeira coluna dessas tabelas contém a descrição das amostras, seguindo a convenção estipulada na metodologia. A segunda coluna exibe os contornos identificados, enquanto a terceira coluna apresenta representações visuais das amostras preenchidas, proporcionando uma visualização facilitada da textura. Na quarta e última coluna, são fornecidos os dados obtidos por meio da análise qualitativa e quantitativa realizada em cada amostra.

Tabela 235. Dados do microscópio óptico - Quadrado

| Marcações de contorno e preenchimento no microscópio óptico |   |  |  |
|---|---|--|--|
| Amostras  | Quadrado contorno   | Quadrado preenchimento   | Dados coletados  |
| <b>PiViFi</b>   |    |    | <p>O contorno não se apresentou claramente definido.</p> <p>O preenchimento não evidenciou contraste com o substrato.</p>  |
| <b>PiVmFm</b>   |    |    | <p>O contorno não se apresentou claramente definido.</p> <p>O preenchimento não evidenciou contraste com o substrato.</p>  |
| <b>PiVsFs</b>   |   |   | <p>O contorno não se apresentou claramente definido.</p> <p>O preenchimento não evidenciou contraste com o substrato.</p>  |
| <b>PmViFm</b>   |  |  | <p>O contorno apresenta uma definição nítida, com o fechamento total da forma.</p> <p>Observa-se o preenchimento completo da amostra com pontos caracterizados por queima.</p>                   |
| <b>PmVmFs</b>   |  |  | <p>O contorno apresenta deficiência ao longo de toda a forma.</p> <p>Observa-se o preenchimento completo da amostra</p>  |
| <b>PmVsFi</b>   |  |  | <p>O contorno apresenta uma definição nítida, com o fechamento parcial da forma. (0,7mm)</p> <p>Observa-se o preenchimento completo da amostra, com contraste mais evidente com o substrato.</p> |

|               |  |   |   |
|---------------|--|---|---|
| <b>PsViFs</b> |   |   | <p>O contorno apresenta uma definição nítida, com o fechamento total da forma.</p> <p>Observa-se o preenchimento completo da amostra com diversos pontos caracterizados por queima.</p> |
| <b>PsVmFi</b> |   |   | <p>O contorno apresenta uma definição nítida, com o fechamento parcial da forma. (0,27mm)</p> <p>Observa-se o preenchimento completo da amostra</p>                                     |
| <b>PsVsFm</b> |  |  | <p>O contorno apresenta uma definição nítida, com o fechamento parcial da forma. (0,57mm)</p> <p>Observa-se o preenchimento completo da amostra.</p>                                    |

Fonte. Autor, 2024

Na análise dos contornos das amostras, além de avaliar o fechamento da forma, foi realizada a medição das dimensões, resultando em valores precisos conforme estipulado no vetor. Contudo, nas amostras preenchidas que apresentaram uma queima mais profunda na superfície, observou-se o surgimento de rebarbas em alguns pontos da forma.

O microscópio utilizado para as análises foi com ampliação de 50x.

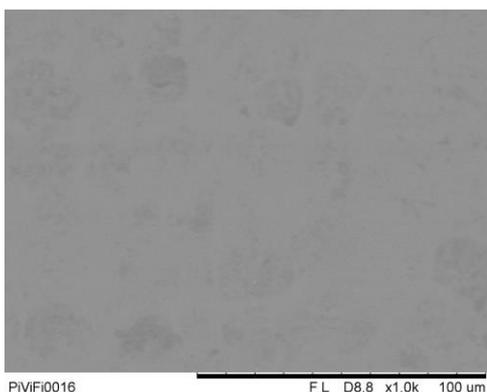
As amostras PiViFi, PiVmFm, PiVsFs do contorno dos círculos e quadrados a distinção entre a área superficial marcada não marcada não é muito clara, já que a potência aplicada não foi alta o suficiente para provocar mudanças notáveis, resultando em uma marcação pouco visível. Por outro lado, a amostra PmVmFs do quadrado exibiu falhas em vários pontos do contorno. Nas amostras PmVsFi, PsVmFi, PsVsFm de ambas as formas, observou-se que o contorno não foi completamente preenchido, resultando em uma fenda, que o valor foi especificado entre parênteses na coluna quatro, a amostra PmVsFs do círculo, também foi observada essa mesma falha.

Nas amostras PmViFm e PsViFs, tanto as amostras das formas preenchidas quanto os contornos foram marcados completamente. Esses dois parâmetros foram identificados como os mais recomendados para a execução de contornos em peças.

#### 4.4 Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

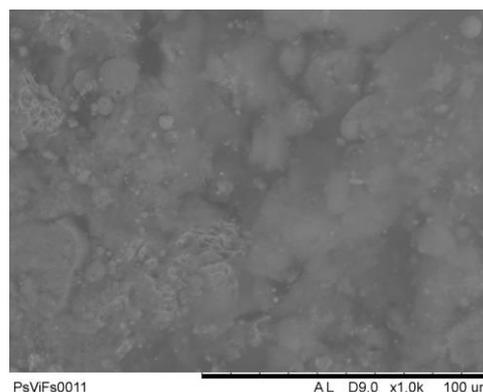
A análise da textura e microestrutura da superfície das amostras de alumínio após o processamento da marcação do laser foi conduzida por meio de imagens de MEV em diferentes aumentos (anexo IV). Este estudo visou analisar qualitativamente a interação entre a ablação e as características estruturais resultantes.

Figura 39. MEV amostra PiViFi



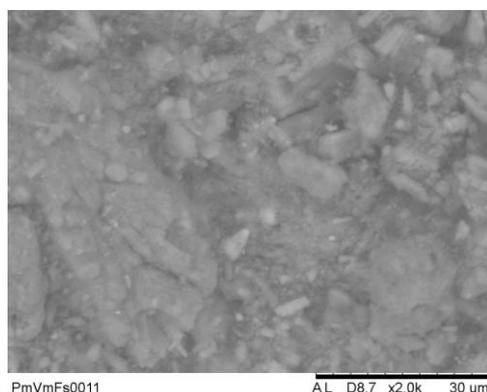
Fonte. Autor, 2024

Figura 40. MEV amostra PsViFs



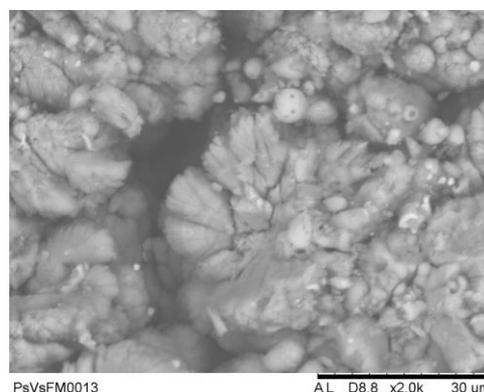
Fonte. Autor, 2024

Figura 41. MEV amostra PmVmFs



Fonte. Autor, 2024

Figura 42. MEV amostra PsVsFm



Fonte. Autor, 2024

As imagens de MEV revelam que, à medida que a potência aumenta, as superfícies exibem uma textura tridimensional composta por protuberâncias e recessos de variadas dimensões e formas. Essa observação confere à superfície uma textura complexa e heterogênea. Observa-se que a superfície fundida pelo laser, resultou na formação de óxidos de alumínio (Figura 33) analisada por meio da Espectroscopia de Dispersão de Energia, juntamente com a geração de partículas solidificadas, conforme ilustrada na Figura 42. Nas amostras com potência inferior (Figura 39) a superfície ficou mais homogênea e com menores reincidentes de partículas. A medida que os parâmetros de potência foram aumentando, a velocidade diminuindo e a frequência aumentando, notamos que a textura da

amostra sofreu alterações devido à queima, resultando em uma superfície heterogênea com picos e vales mais pronunciados, além de partículas solidificadas.

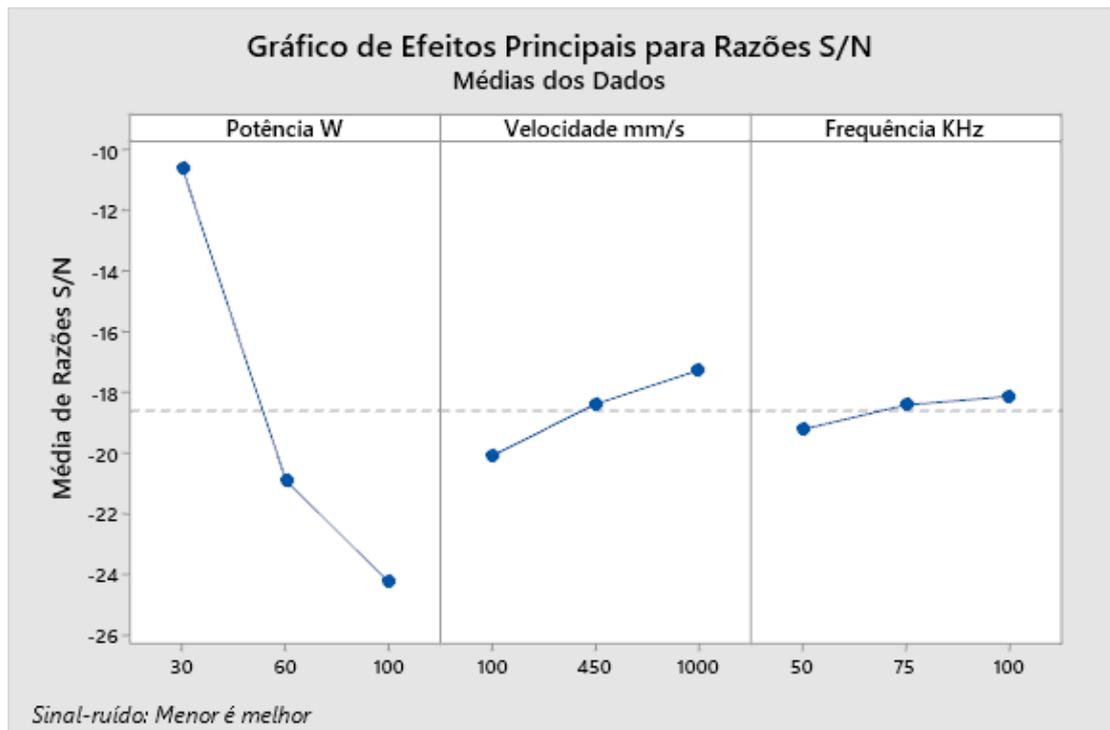
#### 4.5 Análise Estatística com o Software Minitab

A aplicação do planejamento de experimento de Taguchi, em conjunto com a análise dos resultados pelo software Minitab, oferece uma abordagem estatística para examinar e comparar os parâmetros de marcação a laser em duas condições de resultado. Viabilizando não apenas análises visuais, mas também avaliações numéricas, permitindo identificar o conjunto mais eficaz de parâmetros para a marcação a laser.

##### 4.5.1 Quadrado preenchido 10 mm

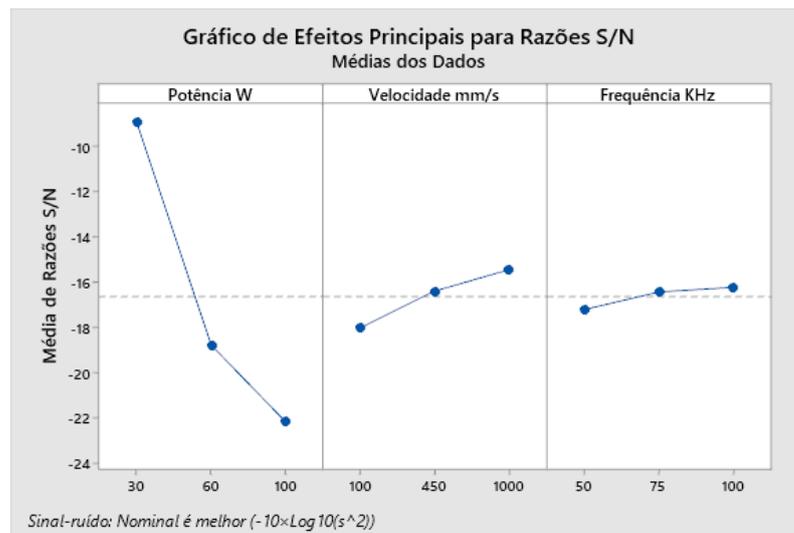
Na Figura 43, são apresentados os parâmetros melhores definidos com o menor valor de rugosidade, enquanto na Figura 44, determinou-se que o melhor resultado seja o parâmetro com rugosidade definida pela Normal ( $-10 \cdot \log_{10}(s^2)$ ).

Figura 43. Gráfico dos melhores parâmetros para rugosidade menor



Fonte. Autor, 2024

Figura 44. Gráfico dos melhores parâmetros para rugosidade normal



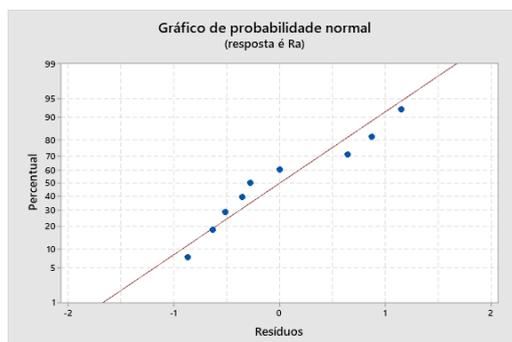
Fonte. Autor, 2024

Com base nos resultados evidenciados nas Figuras 43 e 44, foi observada uma mínima variação nos pontos identificados como ótimos nas duas condições analisadas. Na plotagem os melhores os parâmetros: potência de 30W, velocidade de 1000 mm/s e frequência de 100 KHz – destaca-se que a inclinação da linha referente à potência tornou-se mais pronunciada, demonstrando sua influência significativa. Por outro lado, as linhas de velocidade e frequência apresentaram inclinação levemente menos acentuadas, indicando uma influência menor desses parâmetros.

A análise de variância, apresentando um gráfico de linha de tendência acompanhado de uma avaliação do valor -p, que destaca a importância de cada parâmetro nos diversos resultados obtidos.

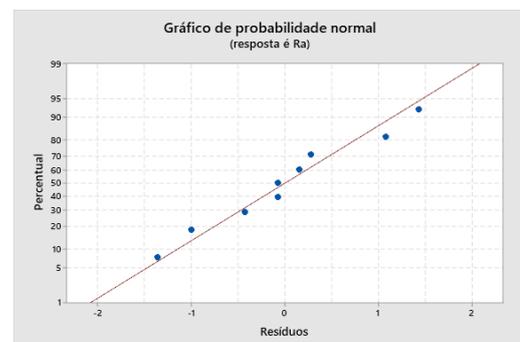
Nas Figuras 45 e 46 está a linha de tendência de potência, velocidade e frequência. Observa-se que alguns valores se encontram afastados da linha média, o que afeta o  $R^2$ , que é cerca de 85,98% e 78,36% respectivamente para Figura 45 e 46.

Figura 45. ANOVA



Fonte. Autor, 2024

Figura 46. ANOVA



Fonte. Autor, 2024

Na tabela 26, observa-se que o parâmetro de potência, com valores de 0,024 e 0,048 abaixo de 0,5, é o principal contribuinte para a o modelo, seguindo pela velocidade e, por último, pela frequência.

Tabela 246. Análise estatística do Quadrado preenchido de 10 mm

| <i>Parâmetro</i>  | <i>Valor - p</i> | <i>R<sup>2</sup></i> |
|-------------------|------------------|----------------------|
| Potência (W)      | 0,024/0,048      | 85,98/78,36          |
| Velocidade (mm/s) | 0,373            | 85,98                |
| Frequência (kHz)  | 0,88             | 78,36                |

Fonte. Autor, 2024

#### 4.5.2 Quadrado preenchido 5 mm

Na Figura 47, são exibidos os parâmetros ótimos identificados com o menor valor de rugosidade. No âmbito do estudo abordado na seção 4.5.1, foram analisadas duas condições distintas. Entretanto, ao traçar os gráficos correspondentes, observou-se uma consistência na inclinação das linhas. Como resultado, decidimos forçar nossa comparação e análise exclusivamente na condição que apresentou a menor rugosidade.

Figura 47. Gráfico dos melhores parâmetros para rugosidade menor



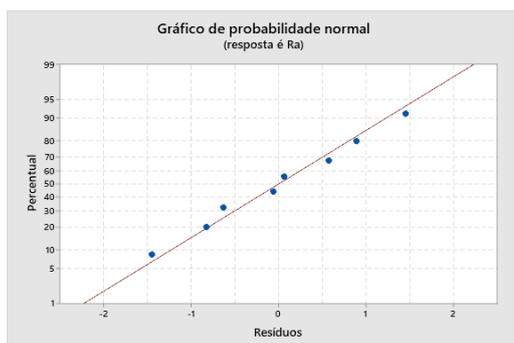
Fonte. Autor, 2024

Com base nos resultados evidenciados nas Figuras 47, ao determinar os parâmetros ideais – potência de 30 W, velocidade de 1000 mm/s e frequência de 100 KHz – destaca-se a inclinação da linha referente à potência, seguida pela frequência, tornou-se mais pronunciada, demonstrando sua influencia significativa. Por outro lado, a linha de velocidade

apresentou inclinação levemente acentuada, sugerindo uma influência menor desse parâmetro.

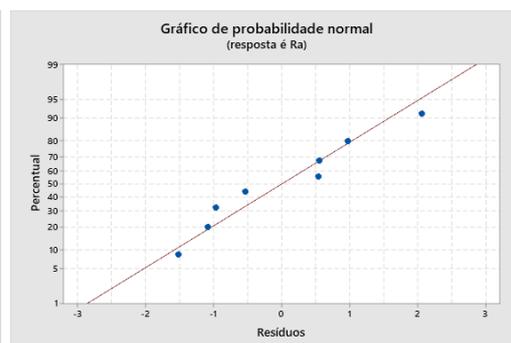
Nas Figuras 48 e 49 está a linha de tendência dos parâmetros para os quadrados preenchidos de 5 mm. Observa-se que alguns valores se encontram afastados da linha média, o que afeta o  $R^2$ , que é cerca de 82,51% e 71,23%, observa-se que houve pouca variação nos valores de  $R^2$  em ambas as amostras dos quadrados preenchidos.

Figura 48. ANOVA



Fonte. Autor, 2024

Figura 49. ANOVA



Fonte. Autor, 2024

Na tabela 27, é evidente que os valores de valor -p para os parâmetros de potência, velocidade e frequência ficaram acima de 0,5, indicando assim uma baixa contribuição para o modelo.

Tabela 257. Análise estatística do Quadrado preenchido de 5 mm

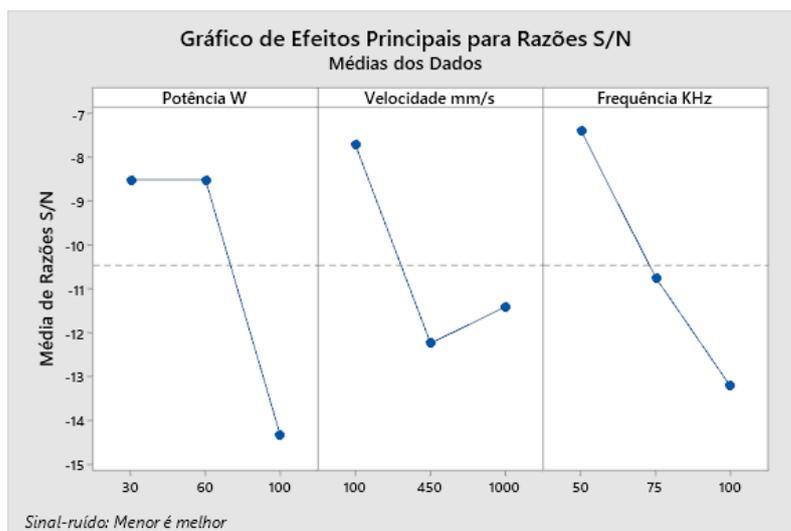
| <i>Parâmetro</i>  | <i>Valor - p</i> | <i>R<sup>2</sup></i> |
|-------------------|------------------|----------------------|
| Potência (W)      | 0,089/0,202      | 82,51/71,23          |
| Velocidade (mm/s) | 0,282            | 82,51                |
| Frequência (kHz)  | 0,594            | 71,23                |

Fonte. Autor, 2024

### 4.5.3 Círculo preenchido 10 mm

Na Figura 50, são exibidos os parâmetros ótimos identificados com o menor valor de rugosidade.

Figura 50. Gráfico dos melhores parâmetros para rugosidade menor

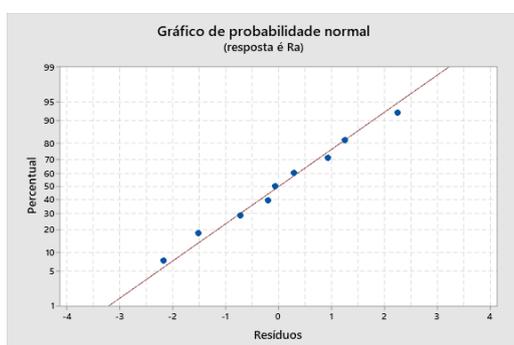


Fonte. Autor, 2024

Com base nos resultados apresentados nas Figuras 50, na identificação dos parâmetros ideais: potência de 60 W, velocidade de 100 mm/s e frequência de 50 KHz – destaca-se a inclinação mais pronunciada das linhas que representam esses três parâmetros, evidenciando suas influências significativas. Além disso, é importante notar que houve uma alteração nos parâmetros ótimos de velocidade e frequência em comparação com os do quadrado, bem como a potência inferior e média a linha encontra-se com inclinação baixa.

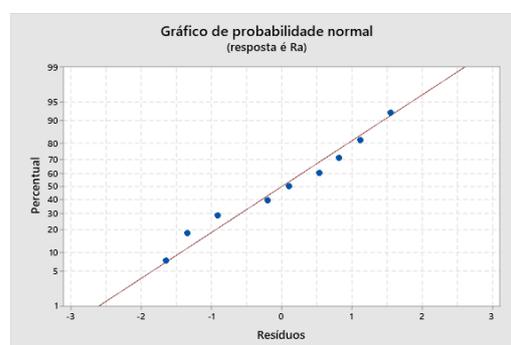
Nas Figuras 51 e 52 está a linha de tendência dos parâmetros para os círculos preenchidos de 10 mm. Observa-se que alguns valores se encontram afastados da linha média, o que afeta o  $R^2$ , que é cerca de 45,40% e 61,12%, observando um resultado inferior se comparado com as amostras de quadrados preenchidos.

Figura 51. ANOVA



Fonte. Autor, 2024

Figura 52. ANOVA



Fonte. Autor, 2024

Na tabela 28, é evidente que os valores de valor -p para os parâmetros de potência, velocidade e frequência ficaram acima de 0,5, indicando assim uma baixa contribuição para o modelo.

Tabela 268. Análise estatística do Círculo preenchido de 10 mm

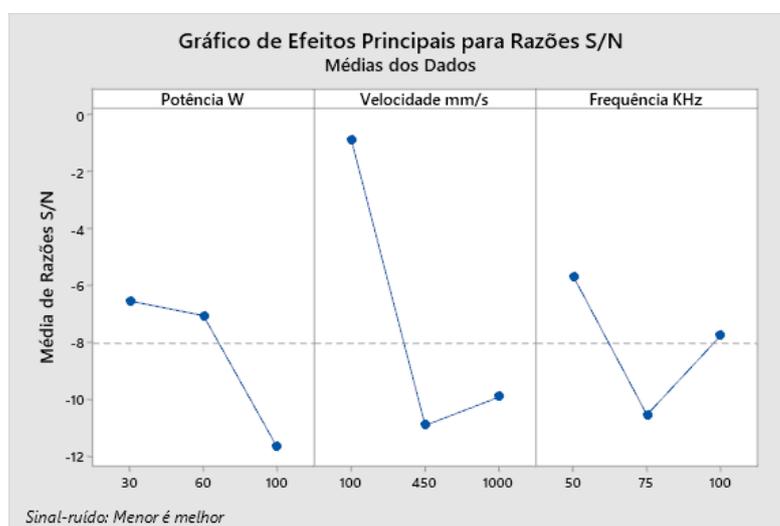
| <i>Parâmetro</i>  | <i>Valor - p</i> | <i>R<sup>2</sup></i> |
|-------------------|------------------|----------------------|
| Potência (W)      | 0,317/0,210      | 45,40/61,12          |
| Velocidade (mm/s) | 0,9              | 45,4                 |
| Frequência (kHz)  | 0,388            | 61,12                |

Fonte. Autor, 2024

#### 4.5.4 Círculo preenchido 5 mm

Na Figura 53, são exibidos os parâmetros ótimos identificados com o menor valor de rugosidade.

Figura 53. Gráfico dos melhores parâmetros para rugosidade menor

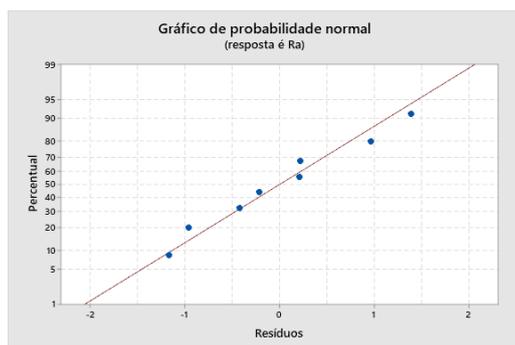


Fonte. Autor, 2024

De acordo com os resultados apresentados nas Figuras 53, ao identificar os parâmetros ideais: potência de 30 W, velocidade de 100 mm/s e frequência de 50 KHz – destaca-se a inclinação mais pronunciada das linhas que representam esses três parâmetros, evidenciando suas influências significativas. Além disso, é importante notar que houve uma alteração nos parâmetros ótimos de velocidade e frequência em comparação com os do quadrado, tal como os dados demonstrados no item anterior.

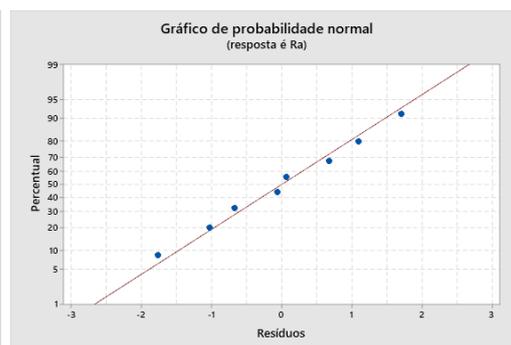
Nas Figuras 54 e 55, apresenta-se a linha de tendência dos parâmetros para os círculos preenchidos de 5 mm. É perceptível que alguns valores estão distantes da linha média, impactando o  $R^2$ , o qual é aproximadamente 61,50% e 35,34%, respectivamente. Esses valores são inferiores em comparação com as amostras de quadrados preenchidos. Entretanto, ambas as amostras dos círculos preenchidos apresentam resultados próximos.

Figura 54. ANOVA



Fonte. Autor, 2024

Figura 55. ANOVA



Fonte. Autor, 2024

Na Tabela 29, é evidente que os valores de valor -p para os parâmetros de potência, velocidade e frequência ficaram acima de 0,5, indicando assim uma baixa contribuição para o modelo.

Tabela 279. Análise estatística do Círculo preenchido de 5 mm

| <i>Parâmetro</i>  | <i>Valor - p</i> | <i>R<sup>2</sup></i> |
|-------------------|------------------|----------------------|
| Potência (W)      | 0,771/0,705      | 61,50/35,34          |
| Velocidade (mm/s) | 0,33             | 61,5                 |
| Frequência (kHz)  | 0,73             | 35,34                |

Fonte. Autor, 2024

Na Tabela 30 são exibidos os dados obtidos nas análises realizadas, fornecendo uma visão abrangente de todos os parâmetros ótimos identificados.

Tabela 28. Parâmetros recomendados - preenchimento

| Item  | Parâmetros recomendados na análise do preenchimento |                   |                  |
|-------|---|-------------------|------------------|
|       | Potência (W)  | Velocidade (mm/s) | Frequência (KHz) |
| 4.5.1 | 30  | 1000              | 100              |
| 4.5.2 | 30  | 1000              | 100              |
| 4.5.3 | 60  | 100               | 50               |
| 4.5.4 | 30  | 100               | 50               |

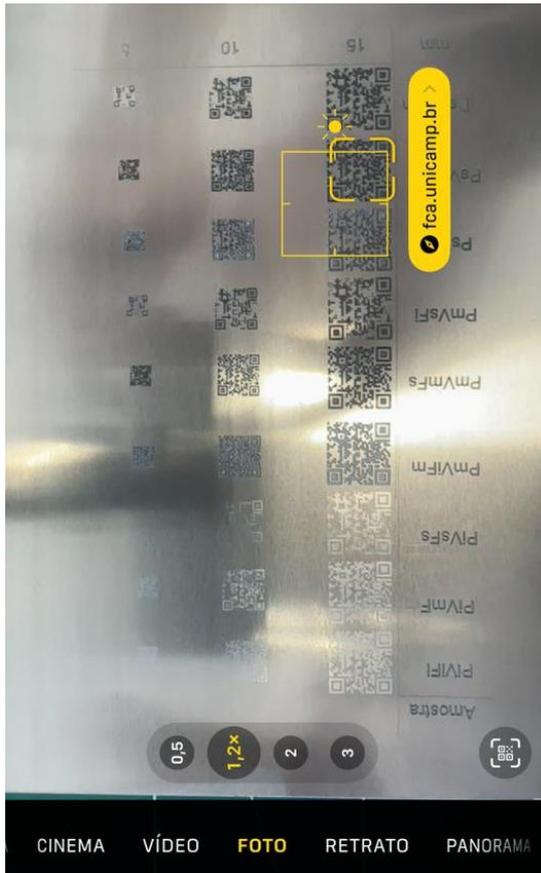
Fonte. Autor, 2024

Observa-se que os valores dos parâmetros velocidade e frequência para as formas quadradas e circulares foram diferentes, permanecendo semelhantes apenas dentro da mesma forma. Por outro lado, o parâmetro de potência em ambas as análises coincidiu, sendo os mesmos valores, exceto no item 4.5.3 a potência 60 W.

#### 4.6 Análise de reconhecimento do QR Code

Os resultados da análise dos códigos QR Code (Figura 32) demonstraram que houve uma leitura satisfatória para as amostras PsVmFi e PmVmFs (ambas com dimensão de 15 mm) e PmViFm (com dimensão de 10 mm) direcionando para o site da FCA, conforme Figuras 56 e 57. No entanto, para as amostras de 5 mm, nenhum dos códigos QR foi capaz de ser lido.

Figura 56. Leitura do QR Code



Fonte. Autor, 2024

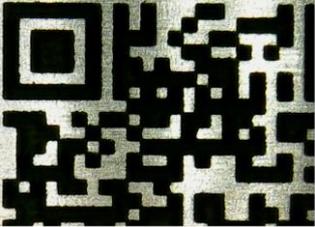
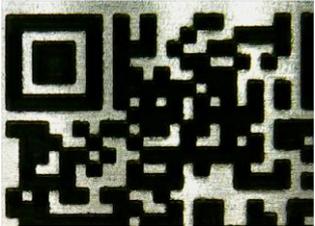
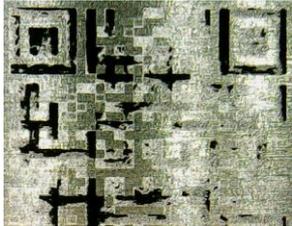
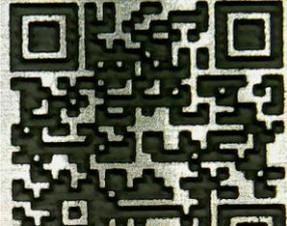
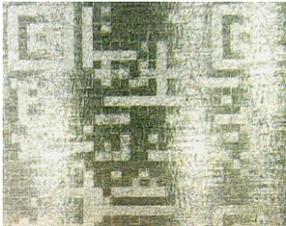
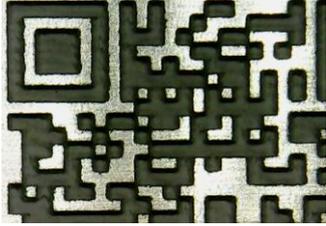
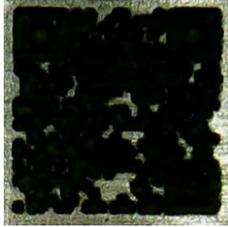
Figura 57. Leitura do QR Code



Fonte. Autor, 2024

Na Tabela 31, a primeira coluna apresenta o vetor gerado do código QR, enquanto a segunda coluna exibe as imagens capturadas pelo microscópio óptico dos códigos que foram capazes de direcionar para o site após a leitura. Na terceira coluna, são mostradas as imagens que representam as diversas variações de problemas que podem ter afetado a leitura dos códigos QR aos outros parâmetros da máquina laser de fibra óptica. O anexo VI apresenta detalhamento a representação de cada código marcado.

Tabela 291. Análise das marcações no código QR

| Vetor  | Realizou a leitura   |   |
|--|--|---|
|  | <i>Sim</i>   | <i>Não</i>  |
|  |  <p data-bbox="756 584 900 618">(PmVmFs)</p>    |  <p data-bbox="1187 584 1321 618">(PsVsFm)</p>     |
|  |  <p data-bbox="756 848 900 882">(PsVmFi)</p>    |  <p data-bbox="1187 848 1326 882">(PiVmFm)</p>     |
|  |  <p data-bbox="756 1133 900 1167">(PmViFm)</p> |  <p data-bbox="1187 1113 1315 1146">(PiVsFs)</p>  |
|  |  |  <p data-bbox="1187 1420 1321 1453">(PmViFs)</p> |
|  |  |  <p data-bbox="1187 1684 1315 1718">(PsViFs)</p> |

Fonte. Autor, 2024

Ao examinar os códigos QR Code que foram escaneados, observou-se que algumas das características identificadas nos tópicos anteriores deste estudo incluem contornos das formas bem definidos, preenchimento sem excesso queima na superfície e contraste com o substrato (que não foi analisado neste estudo).

Nos códigos que não foram scaneados (Tabela 31), identificaram-se vários problemas com a marcação a laser, tais como queima da superfície, baixo contraste com o substrato, contornos das formas incompletos e baixa definição. Além disso, constatou-se que a dimensão do código tem impacto significativo na qualidade da marcação na superfície de alumínio que é um substrato complexo de marcação. Notavelmente, os códigos de 5 mm não puderam ser lidos, e ao examinar as imagens no microscópio óptico, os defeitos na marcação com os mesmos parâmetros do QR Code de 10 mm e 15 mm se tornaram mais evidentes. Também é importante destacar que para marcação do código QR a menor rugosidade não é ideal, nem a maior rugosidade, pois a qualidade é influenciada pelos parâmetros utilizados, observando que os parâmetros de potência que de acordo com os resultados obteve uma influência maior na marcação.

Assim, a partir dos resultados obtidos e das análises realizadas, foi estabelecido que os melhores parâmetros para a marcação de códigos QR Code são PsVmFi, PmVmFs e PmViFm, com dimensões a partir de 10 mm.

Ao concluir a definição dos parâmetros recomendados para a marcação a laser, nota-se que a especificidade das necessidades do vetor a ser marcado determina os parâmetros ideais. Por exemplo, ao marcar um circuito impresso com contorno que devem ser completamente preenchidos para isolar a área, são recomendados os parâmetros PmViFm e PsViFs descritos no tópico 4.3. Já para um acabamento superficial com menor rugosidade, para textura ou encaixe em um conjunto, os parâmetros do item 4.5 da Tabela 30 são mais indicados. Quanto à marcação de códigos QR Code, os parâmetros do item 4.6 são recomendados, conforme analisado.

Observa-se que os parâmetros podem variar de acordo com a especificidade do projeto do vetor. No entanto, de maneira geral, os parâmetros de potência média, combinados com velocidade superior e/ ou média e frequência média e/ ou superior, são mais adequados. Analisamos que os parâmetros de frequência e a velocidade resultaram em menor influência comparando com os parâmetros de potência.

## CAPÍTULO 5: CONCLUSÃO

Por fim, a potência da radiação do laser, a velocidade de marcação e a frequência do pulso são os principais fatores que frequentemente sofrem ajustes por parte dos operadores dos dispositivos laser, e, conseqüentemente, foram os escolhidos para a investigação a serem conduzidas. Em resposta a essa observação, optou-se por realizar ensaios utilizando um equipamento com fonte laser de fibra óptica. Esses ensaios foram conduzidos com uma variedade de valores para os diversos tipos de parâmetros, empregando um material específico, o Alumínio 1100. Este material é conhecido por sua alta refletividade, o que representa um desafio para a marcação a laser.

Diante da crescente complexidade dos processos de produtos nas empresas, torna-se essencial a adoção de metodologias e ferramentas, como planejamento fatorial, para conduzir experimentos de maneira estruturada, analisar dados de forma precisa e tomar decisões fundamentadas.

A realização desses estudos as análises resultaram em uma avaliação da viabilidade de marcação a laser de códigos QR Code para rastreabilidade de produtos em substrato de alumínio. Identificou-se que o melhor conjunto de parâmetros consiste em potência média ( $P_m$ ), velocidade média ( $V_m$ ) e frequência superior ( $F_s$ ), embora o valor recomendado de velocidade e frequência possa variar entre médio e superior, devido à baixa influência observada no estudo. A potência do laser foi identificada como o principal fator influenciador nos resultados.

Além disso, constatou-se que o tamanho do vetor tem uma influência significativa no sucesso do escaneamento do código QR Code. Recomenda-se, portanto, que os códigos tenham dimensões a partir de 10 mm para este equipamento específico estudado.

Os parâmetros que permitam a qualificação e otimização da marcação a laser em contornos e preenchimentos de formas foram analisados, revelando uma variação de acordo com o objetivo esperado pelo operador. Verificou-se que, se o objetivo for obter uma menor rugosidade na marcação do preenchimento, é recomendado um parâmetro de potência inferior. No entanto, quando se trata da marcação de contornos, esse mesmo parâmetro não produz resultados satisfatórios, sendo mais indicado o uso de potência média.

Foram analisadas as microestruturas das amostras após a marcação a laser. Foi identificado que, em termos microestruturais, não foram identificadas mudanças significativas nos elementos da superfície. No entanto, à medida que os parâmetros de potência foram aumentando, a velocidade diminuindo e a frequência aumentando, observou-

se que a textura da amostra sofreu alterações devido à queima, resultando em uma superfície heterogênea com picos e vales mais pronunciados, além de partículas solidificadas.

Com base nos resultados apresentados, pode-se concluir que as marcações a laser em superfície de alumínio, utilizando planejamento fatorial de Taguchi definadas neste estudo:

- Os parâmetros que combinaram potência de radiação média ( $P_m$ ), velocidade média ( $V_m$ ), frequência superior ( $F_s$ ); potência de radiação média ( $P_m$ ), velocidade inferior ( $V_i$ ), frequência média ( $F_m$ ) e potência superior ( $P_s$ ), velocidade média ( $V_m$ ), frequência inferior ( $F_i$ ), apresentaram uma melhor leitura no scaneamento do QR Code, bem como vetor com dimensões a partir de 10 mm;
- Os parâmetros recomendados para melhores acabamentos superficiais em preenchimento, foram evidenciados quando se houve a combinação de menores potência de radiação ( $P_i$ ).
- Os parâmetros recomendados para marcação de contorno de formas, foram evidenciadas duas combinações potência média ( $P_m$ ), velocidade inferior ( $V_i$ ), frequência média ( $F_m$ ) e potência superior ( $P_s$ ), velocidade inferior ( $V_i$ ), frequência média ( $F_m$ ).

### **5.1 Proposta para trabalhos futuros**

Nesta dissertação, foi empregado um Design of Experiments fatorial de Taguchi, com três parâmetros de marcação a laser, cada um com três níveis distintos. Utilizou-se um equipamento a laser de fibra óptica e um material considerado intrincado devido a problemas de marcação existentes. Sugestões para trabalhos futuros incluem:

- Aplicar a metodologia Design of Experiments em diferentes equipamentos a laser e em matérias diversos, a fim de verificar se os resultados são consistentes;
- Conduzir ensaios com outros parâmetros de marcação a laser, considerando outros Hatch e diferentes sobreposições;
- Realizar testes com outros tipos de marcação, como logotipos, figuras orgânicas e fotos, visando ampliar a abrangência dos estudos.

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

**ABAL**, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ALUMÍNIO. 2023. Disponível em: <http://www.abal.org.br>. Acesso em: 01 ago. 2023.

**ALICONA**. Metrology solutions for 3D optical measurement. 2024. Disponível em: <https://www.alicon.com>. Acesso em: 02 fev. 2024.

**ALELUIA ALUMÍNIO**. Descrição e aplicação de chapas de alumínio. *Website*. Disponível em: <https://www.aleluiaaluminio.com.br/produtos/ligas/1100>. Acesso em: 02 set. 2023.

**ALBERTO, Diego Márcio**. *Rastreabilidade de materiais submetidos a altas temperaturas na indústria automobilística*. 2019. 33 f.: il. Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Departamento de Engenharia de Controle e Automação e Técnicas Fundamentais. Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Karla Boaventura Pimenta Palmieri.

**ALVES, Guilherme José Turcatel**. NANOCOLORING OF ALUMINUM ALLOYS. 2012. 94 f. Dissertação (Mestrado em Química) - UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA, Ponta Grossa, 2012.

**AMARAL, Ivo Almeida**. *Influência dos parâmetros de corte LASER na qualidade da superfície cortada*. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, PT.

**ARAI, A.; XU, J.; SOHN, J.; CHO, G. C.** Applications of femtosecond fiber lasers in material processing. In: *CLEO/Europe and EQEC 2011 Conference Digest, OSA Technical Digest (CD)*. Washington: Optica Publishing Group, 2011. Paper TF1\_1.

**ASHBY, M.; JOHNSON, K.** Material Selection. In: *ASHBY, M.; JOHNSON, K. Materials and Design*. Butterworth-Heinemann, 2014. p. 128-154. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978008098205200007X>. Acesso em: 24 jul. 2023.

**ASSOCIATION TA**. Aluminum. *The Aluminum Association website*. Disponível em: <http://www.aluminum.org>. Publicado em: 2016. Acesso em: 02 ago. 2023.

**BALLUFF**. *Traceability in Manufacturing: Industrial identification to improve your process chain*. Florence, Kentucky: Balluff, 2014.

**BAGNATO, Vanderlei S.** Os Fundamentos da luz LASER. *Física na Escola*, v. 2, n. 2, 2001. São Carlos: Instituto de Física de São Carlos. Disponível em: [www.sbfisica.org.br/fne/Vol2/Num2/a02.pdf](http://www.sbfisica.org.br/fne/Vol2/Num2/a02.pdf). Acesso em: 07 ago. 2023.

**CARPINETTI, L. C. FILHO; PORTO, A. V.; JASINEVICIUS, R. G.** *Rugosidade Superficial – conceitos e princípios de medição*. São Carlos: Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, EESC - USP, 2020.

**ÇAYDAS, U., & HASÇALIK, A.** (2008). Use of the grey relational analysis to determine optimum LASER cutting parameters with multi-performance characteristics. *Optics and LASER Technology*, 40(7), 987–994. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2008.01.004>.

**CORRÊA, João Carlos; CARDOSO, Álvaro Azevedo; CHAVES, Carlos Alberto.** Os benefícios de um sistema de rastreabilidade em uma empresa de autopeças. In: XXVII SIMPEP SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 2006, Baurú. Anais do XXVII SIMPEP. Baurú: UNESP, 2006.

**DUTRA, Manoel Kolling.** Otimização de processo de marcação a LASER aplicado em rastreabilidade de componentes [DIS] / Manoel Kolling Dutra; orientação de Milton Pereira; coordenação de Maurício Edgar Stivanello – Florianópolis, 2017.

**HECHT, Jeff.** Fiber LASERS: The state of the art. *Laser Focus World Magazine*, 2012. Disponível em: [FIBER LASERS: Fiber lasers: The state of the art | Laser Focus World]. Acesso em: 08 ago. 2023.

**HITZ, C. B.; EWING, J. J.; HECHT, J.** *Introduction to LASER Technology*. 4. ed. Piscataway: Wiley-IEEE Press, 2012. 312 p.

**HUANG, Huan; YANG, Lih-Mei; LIU, Jian.** Micro-hole drilling and cutting using femtosecond fiber laser. *Optical Engineering*, v. 53, n. 5, p. 051513, 13 fev. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1117/1.OE.53.5.051513>.

**INJEYAN, H., GOODNO, G. D.** *High-Power LASER Handbook*. 1.ed. [New York]: Mc Graw-Hill, 2011. 618 p.

**IZAWA, Yasukazu; MIYANAGA, Noriaki; KAWANAKA, Junji; YAMAKAWA, Koichi.** High power lasers and their new applications. *Journal of Optical Society of Korea*, v. 12, p. 178-185, 2008.

**KANNATEY-ASIBU, Elijah Jr.** *Principles of LASER materials processing*. Wiley, 2009. ISBN 978-0-470-17798-3.

**KEIKHOSRAVY, M.; HASHEMI OSKOUEI, R.; SOLTANI, P.; ATAS, A.; SOUTIS, C.** Effect of geometric parameters on the stress distribution in Al 2024-T3 single-lap bolted joints. *International Journal of Structural Integrity*, v. 3, n. 1, p. 79-93, 2012. <https://doi.org/10.1108/17579861211210018>.

**LIBERATI, A.; ALTMAN, D. G.; TETZLAFF, J.; MULROW, C.; GÖTZSCHE, P. C.; IOANNIDIS, J. P. A.; CLARKE, M.; DEVEREAUX, P. J.; KLEIJNEN, J.; MOHER, D.** The PRISMA statement for reporting systematic reviews and meta-analyses of studies that evaluate health care interventions: Explanation and elaboration. *PLoS Medicine*, v. 6, n. 7, e1000100, 2009. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000100>.

**MAHR.** *Metrology Mahr*. 2024. Disponível em: <https://metrology.mahr.com/pt-br/produtos/article/6910235-mobiles-rauheitsmessgeraet-marsurf-ps-10-c2/>. Acesso em: 04 fev. 2024

**MORANDI, Maria Isabel W. Motta; CAMARGO, Luis F. Rihs.** Revisão sistemática da literatura. In: DRESCH, Aline; LACERDA, Daniel P.; ANTUNES JR, José A. Valle. Design science research: método e pesquisa para avanço da ciência e da tecnologia. Porto Alegre: Bookman, 2015.

**NAGELS, E.; DUFLOU, J. R.; HUMBECK, J. V.** The influence of sulfur content on the quality of laser cutting of steel. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 194, n. 1-3, p. 159-162, 2007.

**PIRES, Larissa do Nascimento.** LASERs, as ferramentas de luz: Prêmio Nobel de 2018. *Física na Escola*, v. 18, n. 1, p. 200-204, 2020. Santa Catarina: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina. Disponível em: <http://www1.fisica.org.br/fne/phocadownload/Vol18-Num1/FnE-18-1-200204.pdf>. Acesso em: 07 ago. 2023.

**RAPID DIRECT.** Corte a LASER de alumínio transformando o alumínio em perfeição. *Website*. Disponível em: <https://www.rapiddirect.com/pt/blog/corte-a-LASER-alum%C3%ADnio/>. Acesso em: 02 ago. 2023.

**RAUCH, A.** Oportunidades e ameaças na revisão da teoria e prática do empreendedorismo. *Teoria e Prática do Empreendedorismo*, v. 44, n. 5, p. 847-860, 2020.

**RIBEIRO, Vitor Manuel da Costa.** *Determinação dos parâmetros ótimos na operação de acabamento superficial do alumínio EM AW-6082*. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, PT.

**RICHARTZ, Tiago de Souza.** Aplicação de uma LASER de fibra de alta potência para soldagem autógena de juntas espessas / Tiago de Souza Richartz; orientador, Walter Lindolfo Weingaertner, coorientador, Milton Pereira, 2017. 119 p.

**SCINTILLA, Leonardo Daniele.** Continuous-wave fiber laser cutting of aluminum thin sheets: effect of process parameters and optimization. *Optical Engineering*, v. 53, n. 6, p. 066113, 27 jun. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1117/1.OE.53.6.066113>.

**SEREBRYAKOV, V. A.; BOIKO, É. V.; PETRISHCHEV, N. N.; YAN, A. V.** Medical applications of mid-IR lasers. Problems and prospects. *Journal of Optical Technology*, v. 77, p. 6-17, 2010.

**STAEHR, R.; BLUEMEL, S.; JAESCHKE, P.; SUTTMANN, O.; OVERMEYER, L.** Laser cutting of composites—Two approaches toward an industrial establishment. *Journal of Laser Applications*, v. 28, n. 2, p. 022203, 2016. DOI: <https://doi.org/10.2351/1.4943754>.

**SOUZA, José Raelson Pereira de.** Efeito da sinterização e da moagem de alta energia na microestrutura e nas propriedades mecânicas em ligas de alumínio recicladas a partir de latas de bebidas. 2017. 70f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

**SOUZA, Paulo Henrique Moura; CAVALLARI JUNIOR, Silvio José; DELGADO NETO, Geraldo Gonçalves.** Indústria 4.0: contribuições para o setor produtivo moderno. Joinville, SC. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 37, 2017.

**STREEK, A.; REGENFUSS, P.; EXNER, H.** Fundamentals of Energy Conversion and Dissipation in Powder Layers during Laser Micro Sintering. *Physica Procedia*, v. 41, p. 858-869, 2013.

**YIN, X.; WANG, R.; WANG, S.; WANG, Y.; JIN, C.; CAO, Z.; XUAN, L.** Evaluation of the communication quality of free-space laser communication based on the power-in-the-bucket method. *Applied Optics*, v. 57, n. 4, p. 573-581, 1 fev. 2018. DOI: 10.1364/AO.57.000573.

**YU, L. M.** Three-dimensional finite element modeling of laser cutting. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 63, p. 637-639, 1997.

## APÊNDICES

### Software EzCad

Os avanços tecnológicos têm impulsionado o desenvolvimento de softwares especializados para máquinas de corte e marcação a laser, permitindo uma ampla gama de funcionalidades para os usuários. Neste contexto, destaca-se o software EzCad2, um poderoso programa utilizado em máquinas de marcação a laser de diferentes tecnologias como CO2 e laser de fibra, ele tem uma interface muito intuitiva e simples.

O programa foi projetado para operar em sistemas com requisitos mínimos de hardware, tornando-o acessível em computadores com CPU de 900Mz e 256MB de RAM. No entanto, para melhor desempenho, é recomendável um computador mais rápido. O EzCad2 foi desenvolvido para funcionar em ambiente Microsoft Windows.

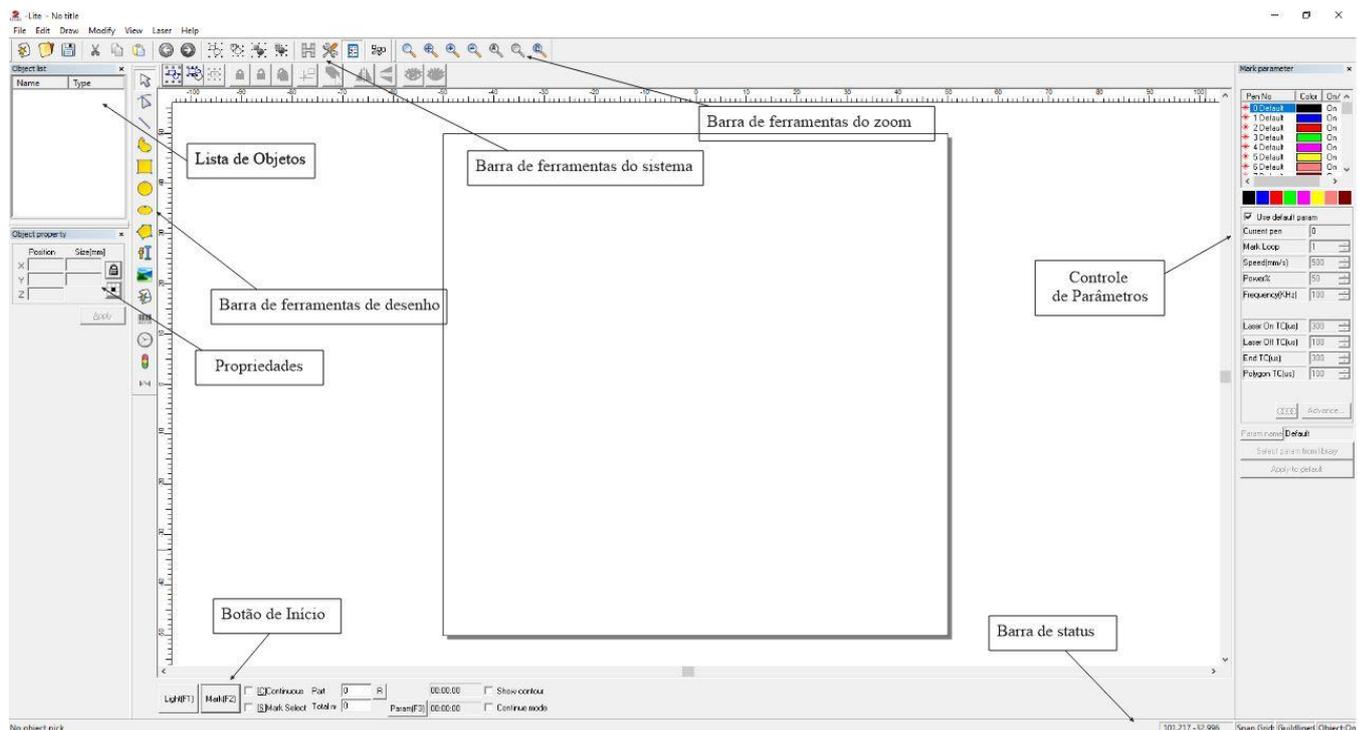
As principais funções do software EzCad2 são notáveis, proporcionando aos usuários uma experiência versátil e criativa. Os usuários podem projetar gráficos livremente e trabalhar com diferentes tipos de fontes, códigos de barras unidimensionais e bidimensionais, imagens e vetores. Além disso, o EzCad2 oferece flexibilidade no texto variável em tempo real durante o processo a laser, bem como a leitura direta de dados de texto por meio de portas seriais ou rede. Com uma função de edição, as modificações de curvas são facilitadas, e a ferramenta suporta múltiplas ferramentas para desenhar linhas com diferentes parâmetros de processamento.

Outra característica importante é a compatibilidade com sistemas de processamento de três eixos e o suporte a diversos lasers de fibra. O software também oferece funções eficazes de sombreamento e operações de “Input/ Output” (IO) convenientes para harmonizar os equipamentos auxiliares. Ainda, sua linguagem de abertura permite sua execução em várias plataformas de idiomas.

Com todas essas funcionalidades, o EzCad2 se apresenta como um programa amplamente utilizado para máquinas de marcação e corte a laser, proporcionando aos usuários eficiência em suas aplicações.

O software é estruturado em diferentes áreas de escolhas, características e parâmetros. Na Figura 9, realizaremos uma análise das principais funcionalidades para uma melhor compreensão, mostrando uma visão geral das diversas ferramentas possíveis.

## Interface do software EzCad2



Fonte. O autor, 2024

## Dados do MEV 50X

```

Version=02-03
InstructName=TM3000
SerialNumber=113165-02
DataNumber=PiViFi0013
SampleName=
Format=JPG
ImageName=PiViFi0002(x50).jpg
Directory=C:\Users\TM-3000\Desktop\SENAI
SUICO\Fernanda_ISI\A1_texturizado_CFP_505\09_PiViFi\
SaveMode=2
Date=19/01/2024
Time=15:22:41
DateCheck=No
TimeCheck=No
NumberCheck=Yes
CommentCheck=No
DigitalZoom=No
Media=Drive_C
DataSize=1280x1100
DPI=192,38
PixelSize=1320,31
SignalName=BSE COMPO
AcceleratingVoltage=5000 Volt
DecelerationVoltage=
Magnification=100
WorkingDistance=10300 um
EmissionCurrent=11200 nA
FilamentCurrent=1650 mA
ObservationCondition=Surface
  
```

Brightness=2216  
Contrast=4095  
Rotation=0  
LensMode=  
PhotoSize=  
Vacuum=Low  
MicronMarker=1000000  
SubMagnification=  
SubSignalName=  
SpecimenBias=  
Condencer2=753  
ScanSpeed=Slow3  
CalibrationScanSpeed=  
ColorMode=Grayscale  
ColorPalette=  
ScreenMode=  
Comment=[]  
KeyWord1=  
KeyWord2=  
Condition=Vacc=5,0kV    Mag=x100    WD=10,30mm  
DataDisplayCombine=  
StageType=2  
StagePositionX=19237475  
StagePositionY=16317000  
StagePositionR=  
StagePositionZ=  
StagePositionT=

## 100X

Version=02-03  
InstructName=TM3000  
SerialNumber=113165-02  
DataNumber=PiViFi0017  
SampleName=  
Format=JPG  
ImageName=PiViFi0017(x100).jpg  
Directory=C:\Users\TM-3000\Desktop\SENAI  
SUICO\Fernanda\_ISI\A1\_texturizado\_CFP\_505\09\_PiViFi\  
SaveMode=2  
Date=19/01/2024  
Time=15:31:33  
DateCheck=No  
TimeCheck=No  
NumberCheck=Yes  
CommentCheck=No  
DigitalZoom=No  
Media=Drive\_C  
DataSize=1280x1100  
DPI=192,38  
PixelSize=1320,31  
SignalName=BSE COMPO  
AcceleratingVoltage=5000 Volt  
DecelerationVoltage=  
Magnification=100  
WorkingDistance=10200 um  
EmissionCurrent=10700 nA  
FilamentCurrent=1650 mA

ObservationCondition=Surface  
Brightness=2216  
Contrast=4095  
Rotation=0  
LensMode=  
PhotoSize=  
Vacuum=Low  
MicronMarker=1000000  
SubMagnification=  
SubSignalName=  
SpecimenBias=  
Condencer2=753  
ScanSpeed=Slow3  
CalibrationScanSpeed=  
ColorMode=Grayscale  
ColorPalette=  
ScreenMode=  
Comment=[]  
KeyWord1=  
KeyWord2=  
Condition=Vacc=5,0kV    Mag=x100    WD=10,20mm  
DataDisplayCombine=  
StageType=2  
StagePositionX=18625725  
StagePositionY=15181450  
StagePositionR=  
StagePositionZ=  
StagePositionT=

## 500X

Version=02-03  
InstructName=TM3000  
SerialNumber=113165-02  
DataNumber=PiViFi0019  
SampleName=  
Format=JPG  
ImageName=PiViFi0019(x500).jpg  
Directory=C:\Users\TM-3000\Desktop\SENAI  
SUICO\Fernanda\_ISI\A1\_texturizado\_CFP\_505\09\_PiViFi\  
SaveMode=2  
Date=19/01/2024  
Time=15:33:58  
DateCheck=No  
TimeCheck=No  
NumberCheck=Yes  
CommentCheck=No  
DigitalZoom=No  
Media=Drive\_C  
DataSize=1280x1100  
DPI=192,38  
PixelSize=264,06  
SignalName=BSE COMPO  
AcceleratingVoltage=5000 Volt  
DecelerationVoltage=  
Magnification=500  
WorkingDistance=10200 um  
EmissionCurrent=10700 nA

FilamentCurrent=1650 mA  
ObservationCondition=Surface  
Brightness=2216  
Contrast=4095  
Rotation=0  
LensMode=  
PhotoSize=  
Vacuum=Low  
MicronMarker=200000  
SubMagnification=  
SubSignalName=  
SpecimenBias=  
Condencer2=753  
ScanSpeed=Slow3  
CalibrationScanSpeed=  
ColorMode=Grayscale  
ColorPalette=  
ScreenMode=  
Comment=[]  
KeyWord1=  
KeyWord2=  
Condition=Vacc=5,0kV    Mag=x500    WD=10,20mm  
DataDisplayCombine=  
StageType=2  
StagePositionX=18625725  
StagePositionY=15181450  
StagePositionR=  
StagePositionZ=  
StagePositionT=

## ANEXOS

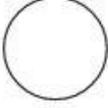
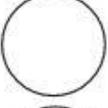
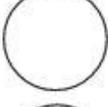
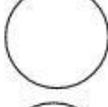
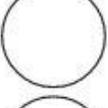
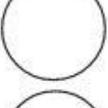
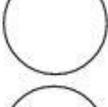
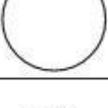
## ANEXO I

Vetor para o experimento das formas geométricas – Quadrado.

| Amostra | 10  | 5   | 2   |
|---------|---|---|---|
| PiViFi  |    |    |    |
| PiVmFm  |    |    |    |
| PiVsFs  |    |    |    |
| PmViFm  |    |    |    |
| PmVmFs  |    |    |    |
| PmVsFi  |   |   |   |
| PsViFs  |  |  |  |
| PsVmFi  |  |  |  |
| PsVsFm  |  |  |  |
| mm      | 10  | 5   | 2   |

**ANEXO II**

Vetor para o experimento das formas geométricas – Círculos.

| Amostra | 10  | 5  | 2   |
|---------|---|--|---|
| PiViFi  |    |    |    |
| PiVmFm  |    |    |    |
| PiVsFs  |    |    |    |
| PmViFm  |    |    |    |
| PmVmFs  |    |    |    |
| PmVsFi  |   |   |   |
| PsViFs  |  |  |  |
| PsVmFi  |  |  |  |
| PsVsFm  |  |  |  |
| mm      | 10  | 5  | 2   |

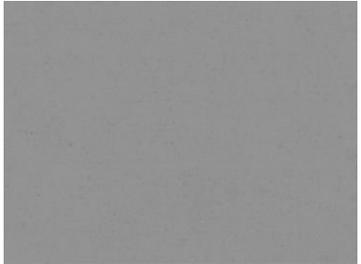
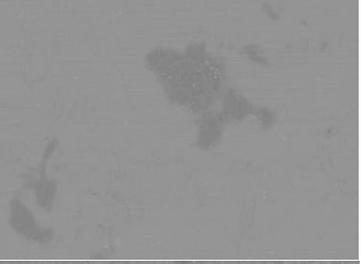
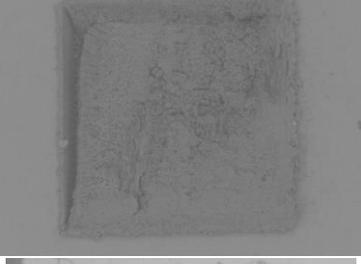
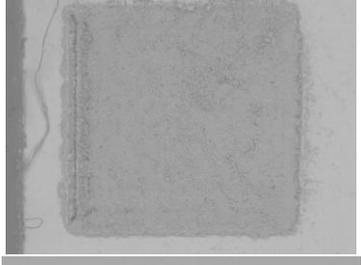
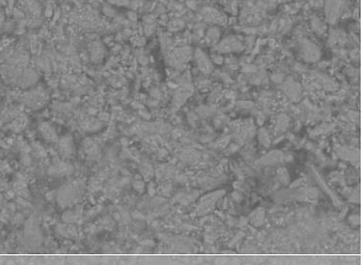
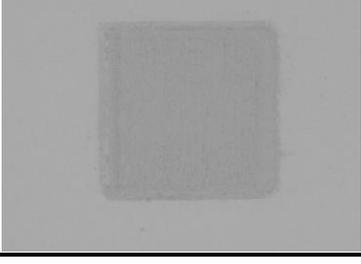
### ANEXO III

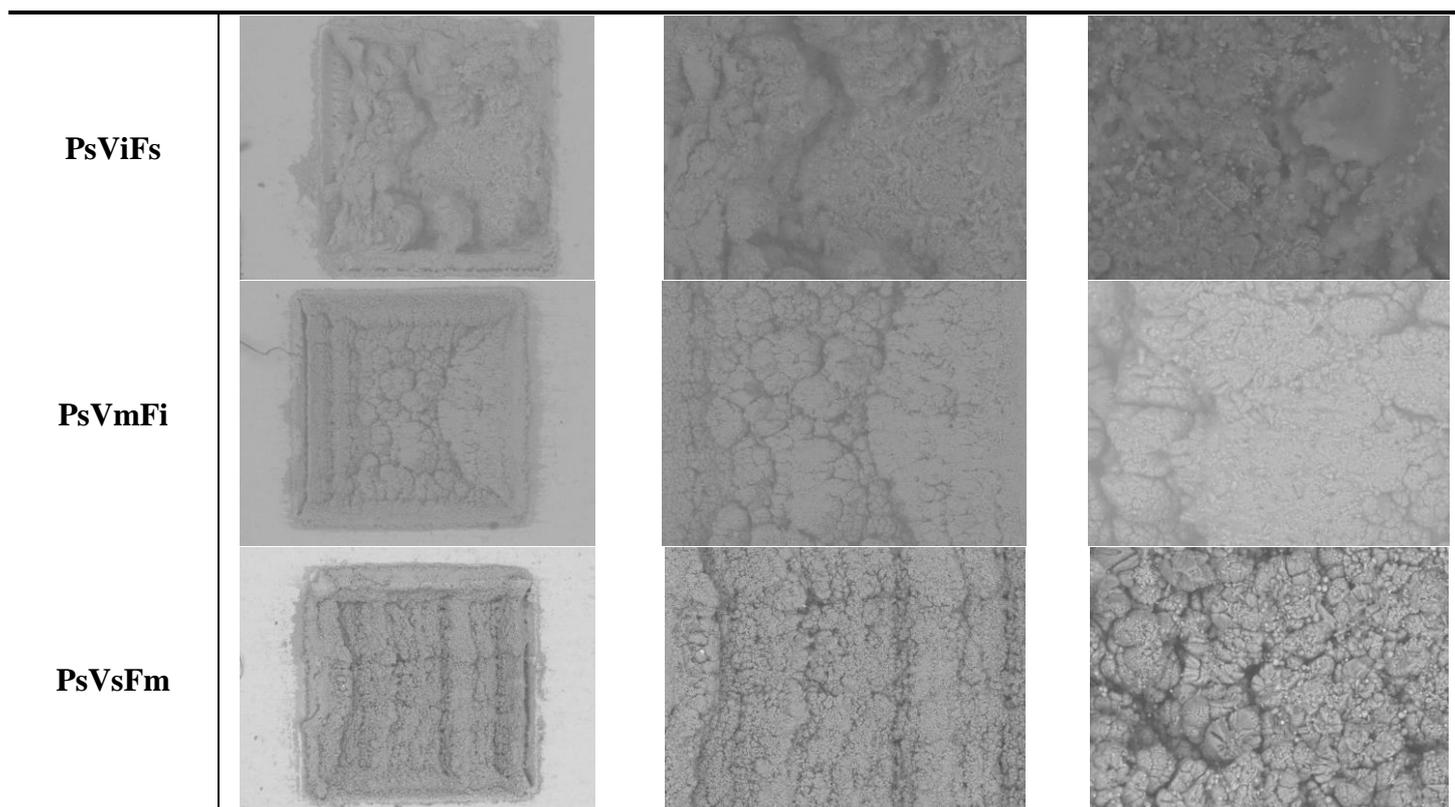
Vetor para o experimento rastreabilidade – Código QR Code.

| Amostra |   |  |   |
|---------|---|--|---|
| PiViFi  |    |    |    |
| PiVmFm  |    |    |    |
| PiVsFs  |    |    |    |
| PmViFm  |    |    |    |
| PmVmFs  |   |   |   |
| PmVsFi  |  |  |  |
| PsViFs  |  |  |  |
| PsVmFi  |  |  |  |
| PsVsFm  |  |  |  |
| mm      | 15  | 10   | 5   |

**ANEXO IV**

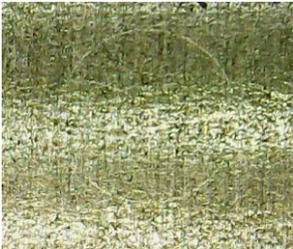
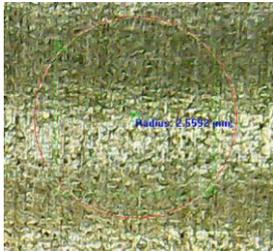
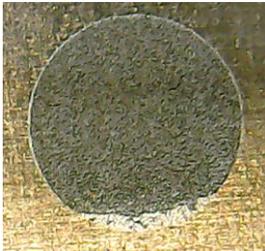
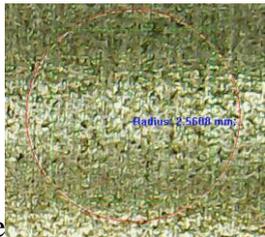
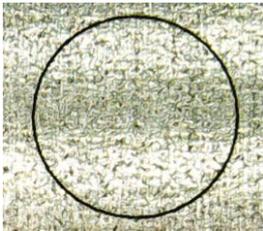
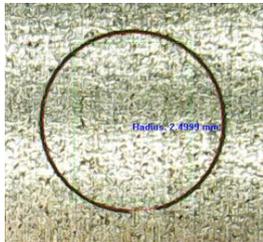
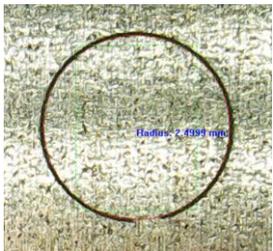
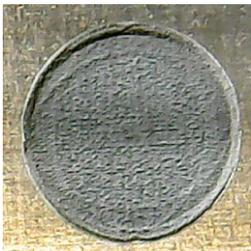
Tabela dos resultados do MEV para todas as amostras

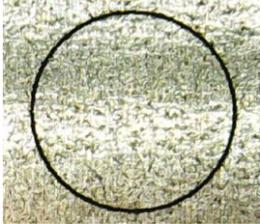
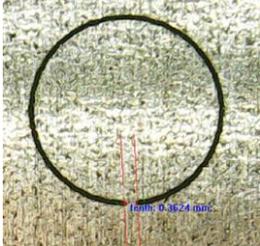
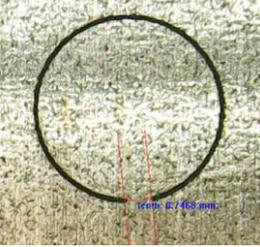
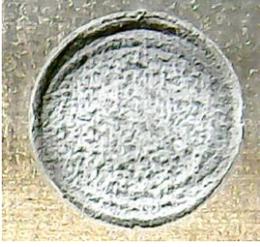
| Análise da Microscopia Eletrônica de Varredura |   |  |   |
|--|---|--|---|
| Amostras                                       | 50x   | 100x   | 500x  |
| <b>PiViFi</b>                                  |    |    |    |
| <b>PiVmFm</b>                                  |    |    |    |
| <b>PiVsFs</b>                                  |   |   |   |
| <b>PmViFm</b>                                  |  |  |  |
| <b>PmVmFs</b>                                  |  |  |  |
| <b>PmVsFi</b>                                  |  |  |  |



## ANEXO V

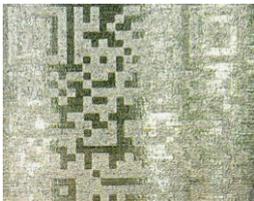
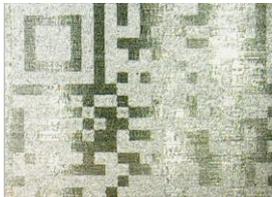
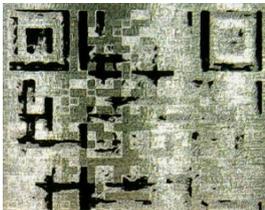
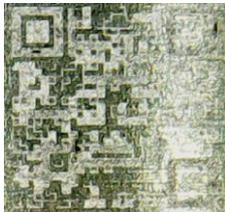
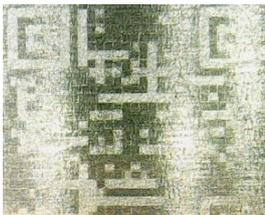
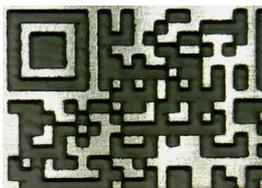
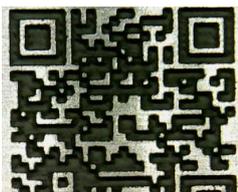
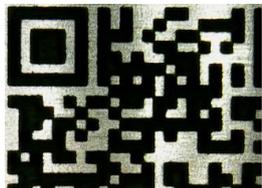
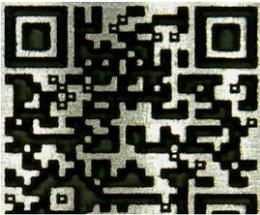
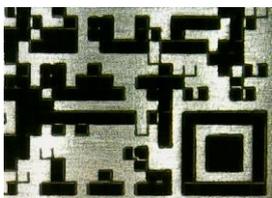
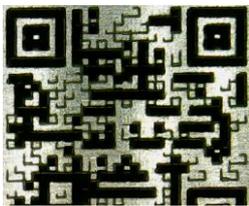
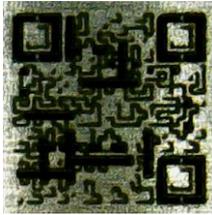
Tabela dos dados do microscópio óptico - Circulo

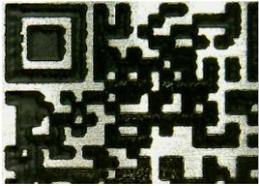
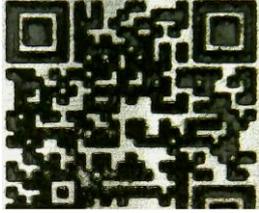
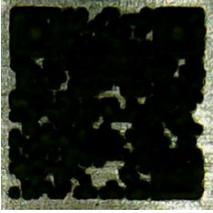
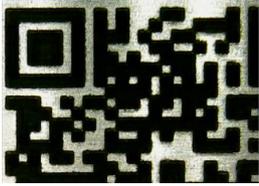
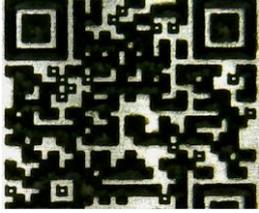
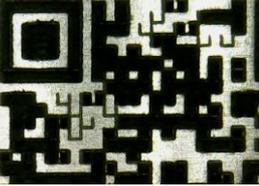
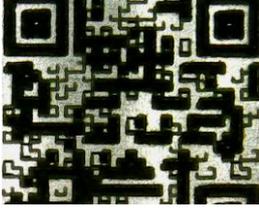
| Marcações de contorno e preenchimento no microscópio óptico |   |  |   |
|---|---|--|---|
| Amostras  | Círculo contorno  | Círculo preenchimento  | Dados coletados   |
| <b>PiViFi</b>   |    |     | <p>O contorno não se apresentou claramente definido.</p> <p>O preenchimento não evidenciou contraste com o substrato.</p>   |
| <b>PiVmFm</b>   |    |    | <p>O contorno não se apresentou claramente definido.</p> <p>O preenchimento não evidenciou contraste com o substrato.</p>   |
| <b>PiVsFs</b>   |   |  | <p>O contorno não se apresentou claramente definido.</p> <p>O preenchimento não evidenciou contraste com o substrato.</p>   |
| <b>PmViFm</b>   |  |   | <p>O contorno apresenta uma definição nítida, com o fechamento total da forma.</p> <p>Observa-se o preenchimento completo da amostra.</p>   |
| <b>PmVmFs</b>   |  |  | <p>O contorno apresenta uma definição nítida, com o fechamento parcial da forma. (0,27mm)</p> <p>Observa-se o preenchimento completo da amostra.</p>  |
| <b>PmVsFi</b>   |  |   | <p>O contorno apresenta uma definição nítida, com o fechamento parcial da forma. (0,75mm)</p> <p>Observa-se o preenchimento completo da amostra, com contraste mais evidente com o substrato.</p> |

|               |  |   |   |
|---------------|--|---|---|
| <b>PsViEs</b> |   |   | <p>O contorno apresenta uma definição nítida, com o fechamento total da forma.<br/>         Observa-se o preenchimento completo da amostra com diversos pontos caracterizados por queima.</p> |
| <b>PsVmFi</b> |   |   | <p>O contorno apresenta uma definição nítida, com o fechamento parcial da forma. (0,36mm)<br/>         Observa-se o preenchimento completo da amostra</p>                                     |
| <b>PsVsFm</b> |  |  | <p>O contorno apresenta uma definição nítida, com o fechamento parcial da forma. (0,25mm)<br/>         Observa-se o preenchimento completo da amostra.</p>                                    |

## ANEXO VI

Tabela dos dados do microscópio óptico - Circulo

| Marcações de códigos QR Code no microscópio óptico |   |  |   |
|--|---|--|---|
| Amostras   | 15 mm   | 10 mm  | 5 mm  |
| <b>PiViFi</b>                                      |    |     |    |
| <b>PiVmFm</b>                                      |    |    |    |
| <b>PiVsFs</b>                                      |  |  |  |
| <b>PmViFm</b>                                      |  |   |  |
| <b>PmVmFs</b>                                      |  |  |  |
| <b>PmVsFi</b>                                      |  |   |  |

|               |   |  |   |
|---------------|---|--|---|
| <b>PsViEs</b> |  |  |  |
| <b>PsVmFi</b> |  |  |  |
| <b>PsVsFm</b> |  |  |  |

## ANEXO VII

## Calibração para Ra.

| Calibração    |            |               |            |
|---------------|------------|---------------|------------|
| Data          | 27/09/2023 | Data          | 27/09/2023 |
| Nominal       | 2,4µm      | Nominal       | 9,6µm      |
| Ra            |            | Rz            |            |
| Lt = 1,750 mm | 0,250 * 5  | Lt = 1,750 mm | 0,250 * 5  |
| Ra            | 2,28       | Rz            | 8,83       |
| Ra            | 2,28       | Rz            | 8,83       |
| Ra            | 2,28       | Rz            | 8,84       |
| Correção      | 5,10%      | Correção      | 8,70%      |

Fonte. Autor, 2024

## Resultados das rugosidades para os quadrados preenchidos

| Amostra | Quadrado - preenchimento 10 mm |       |       |        |        |        |
|---------|--------------------------------|-------|-------|--------|--------|--------|
|         | Ra1                            | Ra2   | Ra3   | Rz1    | Rz2    | Rz3    |
| PiViFi  | 0,909                          | 0,950 | 1,090 | 5,276  | 5,100  | 5,846  |
| PiVmFm  | 0,695                          | 0,671 | 0,762 | 3,557  | 3,878  | 4,362  |
| PiVsFs  | 0,425                          | 0,665 | 1,010 | 3,058  | 4,860  | 7,077  |
| PmViFm  | 3,925                          | 4,270 | 5,811 | 17,970 | 20,880 | 30,670 |
| PmVmFs  | 2,737                          | 2,878 | 2,104 | 13,560 | 13,800 | 10,980 |
| PmVsFi  | 2,440                          | 2,696 | 2,387 | 12,210 | 12,840 | 12,050 |
| PsViFs  | 4,906                          | 4,438 | 4,684 | 23,870 | 19,750 | 23,040 |
| PsVmFi  | 5,961                          | 7,623 | 4,392 | 33,390 | 36,510 | 22,620 |
| PsVsFm  | 3,175                          | 3,709 | 2,917 | 14,810 | 21,010 | 15,610 |
| Amostra | Quadrado - preenchimento 5 mm  |       |       |        |        |        |
|         | Ra1                            | Ra2   | Ra3   | Rz1    | Rz2    | Rz3    |
| PiViFi  | 0,642                          | 0,855 | 0,934 | 3,903  | 5,775  | 5,728  |
| PiVmFm  | 0,494                          | 0,556 | 0,643 | 3,211  | 3,265  | 3,839  |
| PiVsFs  | 0,405                          | 0,425 | 0,508 | 3,008  | 2,378  | 2,877  |
| PmViFm  | 6,700                          | 8,379 | 6,558 | 28,980 | 34,620 | 29,700 |
| PmVmFs  | 2,711                          | 3,521 | 2,327 | 13,100 | 16,530 | 12,200 |
| PmVsFi  | 2,067                          | 2,138 | 2,469 | 11,180 | 10,190 | 11,920 |
| PsViFs  | Limite inferior saturado       |       |       |        |        |        |
| PsVmFi  | 4,223                          | 4,974 | 3,316 | 24,090 | 23,520 | 15,080 |
| PsVsFm  | 3,830                          | 3,213 | 3,790 | 20,040 | 18,850 | 18,250 |

Fonte. Autor, 2024

## Resultados das rugosidades para os círculos preenchidos

| Amostra | Circulo - preenchimento 10 mm |       |       |        |        |        |
|---------|-------------------------------|-------|-------|--------|--------|--------|
|         | Ra1                           | Ra2   | Ra3   | Rz1    | Rz2    | Rz3    |
| PiViFi  | 0,973                         | 0,687 | 0,954 | 4,922  | 4,133  | 4,634  |
| PiVmFm  | 4,387                         | 4,871 | 4,943 | 22,780 | 23,960 | 24,790 |
| PiVsFs  | 4,452                         | 5,034 | 4,322 | 20,950 | 24,980 | 22,610 |
| PmViFm  | 2,517                         | 2,244 | 2,028 | 12,300 | 12,220 | 12,500 |

|                                     |                          |            |            |            |            |            |
|-------------------------------------|--------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| <b>PmVmFs</b>                       | 2,962                    | 3,296      | 2,351      | 13,580     | 17,340     | 12,670     |
| <b>PmVsFi</b>                       | 2,864                    | 3,021      | 2,886      | 16,460     | 14,090     | 16,280     |
| <b>PsViFs</b>                       | 8,737                    | 6,530      | 6,667      | 38,290     | 28,040     | 32,640     |
| <b>PsVmFi</b>                       | 5,563                    | 5,254      | 4,369      | 26,880     | 24,290     | 22,220     |
| <b>PsVsFm</b>                       | 3,597                    | 4,144      | 3,749      | 17,820     | 16,940     | 19,040     |
| <b>Circulo - preenchimento 5 mm</b> |                          |            |            |            |            |            |
|                                     | <b>Ra1</b>               | <b>Ra2</b> | <b>Ra3</b> | <b>Rz1</b> | <b>Rz2</b> | <b>Rz3</b> |
| <b>PiViFi</b>                       | 0,622                    | 0,677      | 0,605      | 3,478      | 4,390      | 3,498      |
| <b>PiVmFm</b>                       | 5,313                    | 5,654      | 4,909      | 24,200     | 27,980     | 23,840     |
| <b>PiVsFs</b>                       | 2,134                    | 3,471      | 2,994      | 13,010     | 17,100     | 15,390     |
| <b>PmViFm</b>                       | 2,110                    | 1,760      | 1,899      | 11,390     | 9,748      | 11,620     |
| <b>PmVmFs</b>                       | 1,856                    | 2,423      | 1,990      | 10,220     | 14,040     | 10,230     |
| <b>PmVsFi</b>                       | 2,873                    | 3,270      | 2,437      | 16,350     | 15,610     | 13,180     |
| <b>PsViFs</b>                       | Limite inferior saturado |            |            |            |            |            |
| <b>PsVmFi</b>                       | 4,787                    | 3,508      | 3,486      | 21,030     | 38,530     | 18,930     |
| <b>PsVsFm</b>                       | 4,502                    | 2,949      | 3,814      | 22,510     | 13,080     | 17,200     |

Fonte. Autor, 2024