



UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA

CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

DANIEL ESTEFANO PACHOLOK

**AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DO LASER
ULTRAVIOLETA NA USINAGEM DE MICROCANAIS
EM POLICARBONATO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

(Tcc2 - Nº de Inscrição - XX)

CURITIBA

2017

DANIEL ESTEFANO PACHOLOK

AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DO LASER ULTRAVIOLETA NA USINAGEM DE MICROCANAIS EM POLICARBONATO

Monografia do Projeto de Pesquisa apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso - Tcc2 do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para aprovação na disciplina.

Orientador: Prof^o.Dr. Daniel Hioki

Co-orientador: Prof^o.Dr. Arandi Ginane Bezerra Jr.

CURITIBA

2017

TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a monografia do Projeto de Pesquisa "Avaliação dos Parâmetros do Laser Ultravioleta na Usinagem de Microcanais em Policarbonato", realizado pelo aluno Daniel Estefano Pacholok, como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso - Tcc2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. Dr., Daniel Hioki

Departamento Acadêmico de Mecânica, UTFPR
Orientador

Prof. Dr., Walter Luís Mikos

Departamento Acadêmico de Mecânica, UTFPR
Avaliador

Prof. Dr., João Antônio Palma Setti

Departamento Acadêmico de Mecânica, UTFPR
Avaliador

Curitiba, 14 de dezembro de 2017.

RESUMO

PACHOLOK, Daniel Estefano. Avaliação dos Parâmetros do Laser Ultravioleta na Usinagem de Microcanais em Policarbonato. 2017. 75f. Monografia (Curso de Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

A tecnologia de usinagem com uso de *Laser* tem sido constantemente aprimorada para suprir a demanda de fabricação de estruturas nas escalas nano e micro. Uma importante aplicação do uso de lasers é no desenvolvimento de *chips* microfluídicos. A demanda destes *chips* vem crescendo nas áreas de biomedicina, química, engenharia mecânica. Com alguns esforços, laboratórios inteiros podem ser reduzidos à área de um *microchip*. Também chamados *lab-on-a-chip* ou micro-sistemas de análise total (μ -TAS), são dispositivos projetados para realizar mistura, pré-tratamento, separação e detecção de componentes na amostra de fluido de estudo. Este trabalho apresenta um estudo da influência de alguns parâmetros de usinagem com *laser* na fabricação de microcanais para microfluídica. A finalidade é avaliar a viabilidade do uso de laser de nitrogênio para usinagem de microcanais em policarbonato, e estudar como os parâmetros de usinagem influenciam na geometria dos microcanais. Utilizou-se um laser de comprimento de onda ultra-violeta (337,1nm) para a usinagem de policarbonato sob diferentes condições de energia do feixe *laser*, sobreposição de pulsos e número de passes de usinagem (isto é, o número de vezes que a trajetória do microcanal foi repetida). Para o controle da trajetória definida, da sobreposição de pulsos e número de passes foi utilizado uma mesa de numericamente comandada (CNC), com movimentação sobre os eixos "X" e "Y". A sobreposição atua com maior influência sobre a profundidade e a largura dos microcanais, de maneira que os outros parâmetros podem ser utilizados para ajustes de processo.

Palavras-chave: *laser* ultravioleta. microchips. policarbonato.

ABSTRACT

PACHOLOK, Daniel Estefano. Evaluation of Ultraviolet Laser Parameters in Machining of Microchannels in Polycarbonate. 2017. 75f. Monografia (Curso de Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

The laser machining technologies has been constantly upgraded to feed the manufacturing of micro-nano structures need. An important usage of the laser machining technology is the manufacturing of microfluidic chips, which ones are needed in fluidic analysis. The request of these chips is growing fast in the biomedical, chemistry and mechanic engineering fields. With some efforts, entire laboratories can be reduced to a microchip area. These also called *lab-on-a-chips*, or micro-Total Analysis System (μ -TAS), are devices design to mix, pre-treat, separation (DNA) and detection of elements in the fluid samples. This work presents a study of the influence of some laser milling parameters in the manufacturing of microchannels for microfluidics. The objective is to survey the feasibility of using a nitrogen laser to machining microchannels in polycarbonate, and study the interaction between the machining parameters and the shape of the microchannels. It was been used an ultraviolet wavelength LASER (337,1nm) for the milling of polycarbonate samples under different levels of power delivered to surface, pulses superposition and number of path repetitions. It was used a Computer Numerical Control (CNC) table that works at "XY" axis. The superposition has more effect over the depth and width acquired; the number of path repetitions and the beam energy play a second role in the process, being usable to adjustments.

Keywords: ultraviolet laser; microchips; polycarbonate.

DEDICATÓRIA

“Porque dEle e por Ele, e para Ele, são todas as coisas; glória, pois, a Ele eternamente. Amém.”

Romanos 11:36 – Bíblia Sagrada, Tradução João Ferreira de Almeida Revista e Atualizada.

Dedico este trabalho à minha família, com amor e respeito; e especialmente a meu pai, Angelo Pacholok, pois através de suas lutas meus estudos foram possíveis.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao Grandioso e Eterno Deus, pois nada há sobre o Universo que ocorra sem Sua Vontade;

Ao Prof. Daniel Hioki pelas orientações, paciência, pelas conversas, conselhos, amizade e palavras de apoio durante toda a pesquisa e desenvolvimento desde trabalho.

Ao Prof. Arandi pela oportunidade de uso do *laser*.

Ao Prof. Walter Mikos e à Blanceliz pela amizade e pelas medições realizadas no rugosímetro tridimensional.

Aos meus pais, Angelo e Neuza, pela paciência, amor, carinho e apoio durante a pesquisa.

Aos meus irmãos, Francisco, Fernando e Carolina, por serem inspiração e apoio.

À Anna Liao pela presença, paciência, carinho, companheirismo e amizade durante os dias mais difíceis.

Aos amigos Kaio Barros, Anderson Nascimento, Olavo David e Silvio Sausen pelas conversas e conselhos.

À dona Margarida pelas orações.

Aos colegas de graduação da UTFPR Millene Rizzetto, Caíque Pedroso e Leonardo Kozlinski.

“Bendito seja o Senhor, minha rocha, que treina minhas mãos para a guerra e os meus dedos para a batalha” – Sl 144:1

“Rogo-vos, pois, irmãos, pelas misericórdias de Deus, que se ofereçam em sacrifício vivo, santo e agradável a Deus; que é o vosso culto racional. E não sede conformados com este mundo, mas sede transformados pela renovação da vossa mente, para que experimenteis qual seja a boa, agradável e perfeita vontade de Deus” – Rm 12:1,2.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 - Representação esquemática do uso de um microcanal para avaliação da difusividade do betume.	3
Figura 2.1 – Fórmula Molecular do Policarbonato.	5
Figura 2.2 – Transmitância do PC sob forma de matérias-primas diversas.	6
Figura 2.3 – Fórmula Molecular do Poli(metil-metacrilato).	7
Figura 2.4 - Modos transversais de um feixe laser.	10
Figura 2.5- Fenômenos que ocorrem durante a ablação.	17
Figura 2.6 - Representação do perfil transversal de ablação obtido em um processo D-Scan, para determinação de Limiar de Ablação.	18
Figura 2.7 – Diferença entre níveis de sobreposição. a) Sobreposição de 50% entre os pulsos. b) Sobreposição de 90% entre os pulsos.	21
Figura 3.1 - Fluxograma de processos envolvidos na realização da pesquisa.	22
Figura 3.2 – Esquema do sistema de usinagem utilizado quando aplicado o menor nível de energia do feixe <i>laser</i> .	25
Figura 3.3 – Desenho esquemático das amostras.	26
Figura 3.4 - Mesa CNC-XY desenvolvida na UTFPR.	27
Figura 3.5 - <i>Laser</i> MNL - 100 da Lasertechnik Berlin.	27
Figura 3.6 - Rugosímetro de Interferometria Óptica da Taylor Hobson.	28
Figura 3.7 – Medições realizadas no rugosímetro. Visualização do padrão de referência para a altura. (a) Microcanal com profundidade de cerca de “14,5µm”. (b) Microcanal com profundidade de cerca de “-1,25µm”	29
Figura 4.1 – Resultado para influência da sobreposição sobre a largura do microcanal	33
Figura 4.2 Resultados para interação entre a Energia e o Número de Passes. Alteração da Energia para o mesmo Número de Passes	34
Figura 4.3 Erro de Largura. Usinagem com <i>laser</i> contínuo de CO ₂ .	35

Figura 4.4 Resultados para interação entre a Energia e o Número de Passes. Alteração do Número de Passes para a mesma Energia	35
Figura 4.5 Resultados para a interação dos três parâmetros. (a) Alteração do número de passes e sobreposição para uma mesma energia. (b) Alteração da energia e sobreposição para um mesmo número de passes.	36
Figura 4.6 Resultados para a variação da energia sobre a profundidade.	39
Figura 4.7 Resultados para a variação do número de passes sobre a profundidade.	40
Figura 4.8 Resultados para a variação da sobreposição sobre a profundidade.	41
Figura 4.9 Resultados para a variação da combinação dos fatores sobreposição e energia, para um mesmo número de passes.	41
Figura 4.10 Resultados para a variação da combinação dos fatores sobreposição e energia, para um mesmo número de passes.	42
Figura 4.11 Protuberância formada pela irradiação de UV à vácuo sobre amostras de PC.	43
Figura 4.12 Protuberância formada na usinagem com os parâmetros em nível inferior.	43
Figura 4.13 Microcanal formado com dois passes na condição de menor energia	44
Figura 4.14 Razão de Aspecto obtida por Qi pela variação da potência e velocidade de deslocamento.	46
Figura 4.15 Resultados para a variação da combinação dos fatores sobreposição e número de passes, para uma mesma energia.	47
Figura 4.16 Resultados para a variação da combinação dos fatores sobreposição e energia, para um mesmo número de passes	48
Figura 7.1 - Resultado apresentado por ensaio prévio do projeto de pesquisa.	56
Figura 7.2 Visão superior dos microcanais obtidos em a) Policarbonato e b) Acrílico.	57

Figura 7.3 Visão superior dos microcanais obtidos em a) Policarbonato e b) Acrílico.	57
Figura 7.4 Visão em perspectiva do microcanal em PMMA.	58
Figura 7.5 Visão em perspectiva do microcanal em PC.	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Uso de Laser na Indústria	1
Tabela 2.1 – Propriedades Comuns do Policarbonato.	6
Tabela 2.2 – Propriedades do PMMA.	7
Tabela 3.1 - Definição dos fatores de entrada e das respostas de saída.....	23
Tabela 3.2 - Definição das variáveis de entrada e das respostas de saída.	24
Tabela 3.3 - Esboço de um planejamento fatorial 2^3	24
Tabela 4.1 – Tabela ANOVA resumida da Largura dos microcanais.	32
Tabela 4.2 – Efeitos dos fatores sobre a Largura dos microcanais.	32
Tabela 4.3 – Tabela ANOVA resumida da Profundidade dos microcanais.	38
Tabela 4.4 – Tabela de Efeitos sobre a Profundidade.	38
Tabela 4.5 – Tabela ANOVA resumida para a Razão de Aspecto.	46
Tabela 4.6 – Efeitos quantificados dos parâmetros sobre a Razão de Aspecto.	48
Tabela 4.7 – Quadro resumo dos resultados	49
Tabela 7.1 – Resultados Amostra 1	59
Tabela 7.2 – Resultados Amostra 2	59
Tabela 7.3 – Resultados Amostra 3	59

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

- ANOVA – Analysis of variance (Análise de variância). Um teste estatístico.
- CNC - Comando Numérico Computadorizado;
- CO₂ - Dióxido de Carbono;
- D-Scan - Diagonal Scan (Escaneamento Diagonal);
- em - eletromagnética;
- fs - femtossegundo;
- IV - Infravermelho;
- Laser - light amplification by stimulated emission of radiation* (amplificação de luz por emissão estimulada de radiação);
- m - metro;
- MEMS - Micro Electro-Mechanical System (Sistema Micro Eletro-Mecânico);
- min - minuto;
- mm - milímetro;
- nd:YAG - Neodímio-dopado ítrio alumínio granada;
- nd:YFL – Neodímio-dopado fluoreto de ítrio-lítio;
- nm – nanômetro;
- ns - nanossegundo;
- N₂ – nitrogênio;
- ps - picossegundo;
- PC – policarbonato;
- PMMA – poli (metilmetacrilato), “acrílico”;
- PP – polipropileno;
- PS – poliestireno;
- TEM₀₀ - Transverse Electromagnetic Mode (Modo Eletromagnético Transversal);
- Ti:Sapphire – *laser* de safira dopada com titânio;

UTFPR - Universidade Tecnológica Federal do Paraná;

UV - Ultravioleta;

W/cm² - Watt por centímetro quadrado. Medida de fluência de luz sobre uma área.

μ-TAS - *micro-Total Analysis System* (micro Sistema de Análise Total);

μJ – micro Joule.

SUMÁRIO

RESUMO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SUMÁRIO

1	Introdução	1
1.1	Introdução.....	1
1.2	Aplicações	1
1.2.1	Microchips, <i>lab-on-a-chip</i> ou μ -TAS (<i>micro-Total Analysis System</i>)	2
1.3	Objetivos.....	4
1.4	Justificativa	4
2	Fundamentação Teórica	5
2.1	Polycarbonato.....	5
2.2	Poli(metil-metacrilato) PMMA.....	7
2.3	Tipos de <i>Laser's</i> e algumas aplicações	8
2.3.1	Propriedades dos feixes <i>laser</i>	9
2.3.2	Fluência.....	10
2.4	Métodos de Fabricação de Microchips.....	10
2.4.1	Prensagem a Quente	11
2.4.2	Gravação.....	11
2.4.3	Moldagem por Injeção.....	11
2.4.4	Microusinagem	12
2.4.5	Microusinagem à <i>Laser</i>	12
2.4.6	Ablação	15
2.4.7	As Variáveis de Entrada.....	19
3	Materiais e Métodos.....	22
3.1	Material de Estudo.....	22
3.2	Metodologia Experimental.....	23
3.2.1	Planejamento Fatorial	23
3.3	Preparação das Amostras	25
3.4	O Processo de Usinagem à <i>Laser</i>	26
3.5	Medição dos Microcanais	28
3.6	Análise dos Dados.....	29
4	Resultados e Discussões.....	31
4.1	Influência dos Parâmetros do <i>Laser</i> Sobre a Largura dos Microcanais	31
4.2	Influência dos Parâmetros do <i>Laser</i> Sobre a Profundidade dos Microcanais	37
4.3	Influência dos Parâmetros do <i>Laser</i> Sobre a Razão de Aspecto dos Microcanais	45
5	Conclusões	50
5.1	Viabilidade de usinagem do polycarbonato com <i>laser</i> de nitrogênio.....	50
5.2	Influência dos parâmetros sobre a Largura.....	50

5.3	Influência dos parâmetros sobre a Profundidade	51
5.4	Influência dos parâmetros sobre a Razão de Aspecto	51
5.5	Conclusões sobre o sistema de usinagem como um todo.....	51
6	Referências.....	53
7	Apêndice	56

1 INTRODUÇÃO

1.1 Introdução

Laser é uma sigla que vem do termo: *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, que significa amplificação de luz por emissão estimulada de radiação.

A tecnologia *laser* é utilizada na indústria como recurso para fabricação mecânica de componentes por meio de corte, soldagem, tratamentos térmicos e microusinagem, conforme é relatado na seção 1.2.

1.2 Aplicações

Devido as propriedades do feixe de luz *laser* esta tecnologia vem sendo utilizada em diversas aplicações e é encontrado bastante uso nas áreas de fabricação e técnicas de manufatura; dentre as quais, podem-se listar a conformação mecânica, tratamentos térmicos e a usinagem, conforme representado pela Tabela 1.1.

Tabela 1.1 - Uso de Laser na Indústria

Área de Fabricação	Aplicação da tecnologia <i>laser</i>
Moldagem	Estereolitografia à <i>laser</i>
Usinagem	Ablação à <i>laser</i>
Tratamentos Térmicos	Tratamentos superficiais à <i>laser</i>
Caldeiraria/Soldagem	Soldagem à <i>Laser</i>

Fonte: (Kaldos, 2004)

O fenômeno de ablação é aplicado à prática da usinagem com o uso de *laser*. Dentro desse ramo, a microusinagem à *laser* vem experimentando avanços nas últimas décadas.

O processo de fresamento à *laser* tem proporcionado avanços na miniaturização de componentes até às escalas nano e micro. Tal processo apresenta vantagens como baixo custo, rapidez, produz pouca sujeira e boa precisão. Isso implica em maior competitividade de mercado, em função de este processo de fabricação envolver menores riscos de projeto: tempo de fabricação de protótipos reduzido (Knowles, 2007).

1.2.1 Microchips, *lab-on-a-chip* ou μ -TAS (*micro-Total Analysis System*)

Dentre os componentes que têm sido miniaturizados, encontram-se dispositivos integrados que utilizam microcanais, do tipo *Lab-on-a-chip* (Machado, 2011).

Sistemas microfluídicos possuem seção transversal cujas dimensões de largura e profundidade são da ordem de 100 μ m. O fluxo é, em geral, caracterizado por baixos números de Reynolds (Re) para fluídos comuns, a pressões usuais utilizadas nestes sistemas (Stroock, 2002).

Estes dispositivos encontram sua finalidade na necessidade de manipulação de fluídos em pequenas quantidades (Lim, Daniel. 2003). As aplicações para microcanais podem ser classificadas, de forma geral, em três grandes áreas: química, biomédica e engenharia (microeletrônica e engenharia mecânica).

As primeiras aplicações para chips microfluídicos foram narizes de impressoras; mais tarde foram surgindo muitas outras aplicações (Prakash, 2014).

Na área Biomédica, exemplos de tais aplicações são analisadores de DNA, dispositivos para análise de fluídos corporais (Lim, Daniel. 2003);

Na Engenharia Mecânica, encontram-se dispositivos para avaliar a difusividade de betume em tubulações com injeção de gás carbônico (Fadei, 2011); a Figura 1.1 apresenta o esquema de *set up* deste ensaio.

Um exemplo de aplicação em Engenharia Eletrônica são microchips para resfriamento de células fotovoltaicas e dispositivos eletrônicos; finalidade para a qual os chips microfluídicos se mostraram mais eficientes que os dispositivos convencionais à base de circulação forçada de ar (Prakash, 2014).

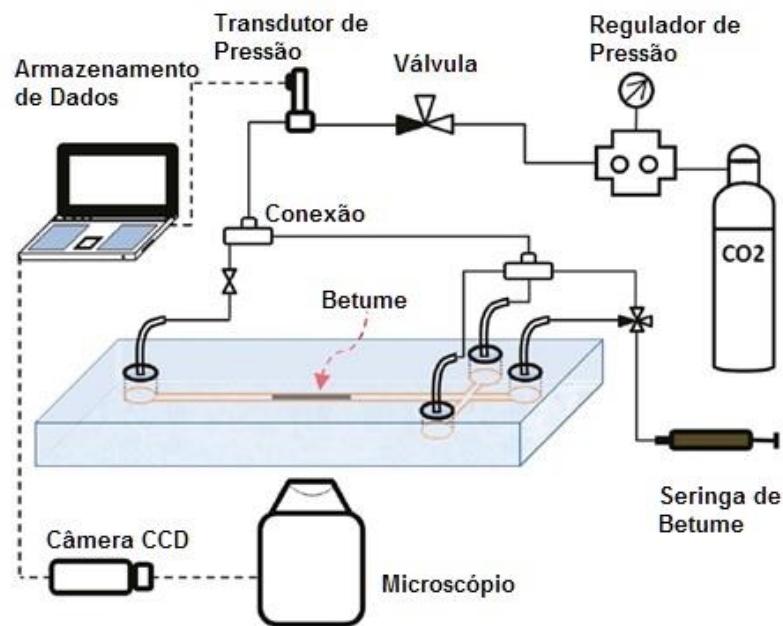


Figura 1.1 - Representação esquemática do uso de um microcanal para avaliação da difusividade do betume.

Fonte: (Fadaei, 2011).

O uso de chips microfluídicos para realização de ensaios de laboratório representa uma redução acentuada em custos com equipamentos, espaço físico, volume de amostra utilizado e tempo de resultado. Segundo Fadaei, H., ensaios de laboratório que levam cerca de dias para se obter o resultado, podem ser realizados, analisados e coletados os resultados em cerca de 1 hora (Fadaei, 2011).

Há substancial desenvolvimento de Sistemas Micro-Eleto-Mecânicos (MEMS - Micro-Eleto-Mechanical Systems) nas áreas de química e biomedicina. Tais dispositivos são projetados com a finalidade de realizar misturas, separação, detecção, preparação e pré-tratamento de amostras através de circuitos integrados a microdispositivos (Lee, 2001).

Grandes esforços vêm ocorrendo para reduzir laboratórios inteiros ao tamanho de chips microfluídicos. São encontradas aplicações em bioanálises, genômica e desenvolvimento de drogas farmacêuticas (Lee, 2001).

Vêm-se desenvolvendo métodos diversos para fabricação de chips microfluídicos, aplicados a diferentes materiais. De maneira geral, os materiais mais utilizados são polímeros, vidros, silício e metais (Prakash, 2014).

Dependendo da aplicação do microchip, há preferência por um tipo específico de material (Prakash, 2014). Boa parte dos microchips voltados às áreas química e biomédica são fabricados a partir de matrizes de vidro ou sílica fundida. Essa abordagem, entretanto, não apresenta uma relação custo-eficiência tão boa quanto a de microchips de materiais poliméricos, pois estes últimos apresentam menor custo e maior facilidade de manipulação (Lee, 2001). Já os metais e materiais à base de silício são mais utilizados para produzir chips para as áreas de microeletrônica e engenharia mecânica (Prakash, 2014).

1.3 Objetivos

Este trabalho tem por objetivo geral avaliar as variáveis de usinagem de microcanais em policarbonato com uso de *laser* ultravioleta. Para tanto, estabeleceram-se objetivos específicos:

- Estudar a influência da sobreposição, da energia do feixe e do número de passes sobre a largura dos microcanais;
- Estudar a influência da sobreposição, da energia do feixe e do número de passes sobre a profundidade dos microcanais;
- Estudar a influência da sobreposição, da energia do feixe e do número de passes sobre a razão de aspecto dos microcanais.

Onde a razão de aspecto compreende um conceito introduzido no Capítulo 2.

1.4 Justificativa

Em função do vasto uso de chips microfluídicos, principalmente nas áreas médicas e biológicas, propõe-se a pesquisa de estudo da viabilidade da usinagem de policarbonato com *laser* ultravioleta para fabricação de biochips.

A escolha do policarbonato se dá em função de trabalhos já realizados (Gans et. al, 2010), onde é observada melhor resposta à usinagem a *laser* do polímero em comparação com a usinagem do polimetilmetacrilato (PMMA).

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo destina-se a apresentar os conceitos de base para a realização deste trabalho.

São abordados breves descrições sobre a matéria-prima utilizada na usinagem dos microcanais, bem como os principais tipos de *laser* e as propriedades deste equipamento. É realizado também um breve levantamento do estado da arte sobre o uso de *laser's* para microusinagem.

Explica-se também o fenômeno da ablação; importante para compreensão dos resultados obtidos e a definição das variáveis de entrada adotadas no procedimento experimental.

2.1 Policarbonato

Policarbonato é um polímero termoplástico cuja fórmula molecular de monômero é representada pela Figura 2.1

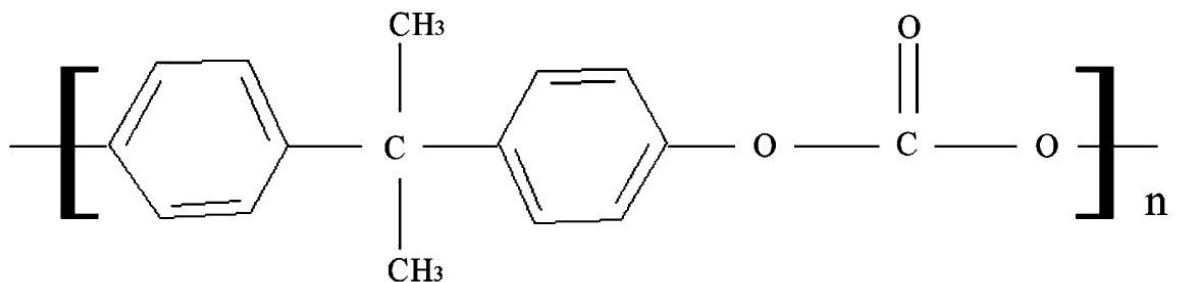


Figura 2.1 – Fórmula Molecular do Policarbonato.

Fonte: (Heng Qi, 2009)

A Figura 2.1 mostra que o monômero do PC contém anéis benzênicos, o que confere rigidez à cadeia desse material (Heng Qi, 2009).

Dentre as principais características, estão a boa transparência, excelente resistência e boa estabilidade dimensional (Xueye Chen, 2017). De acordo com Santos (2009), é observado que o policarbonato, na condição de material compacto e incolor, apresenta transmitância relativamente alta em praticamente todo o espectro luminoso, o que é visto na Figura 2.2.

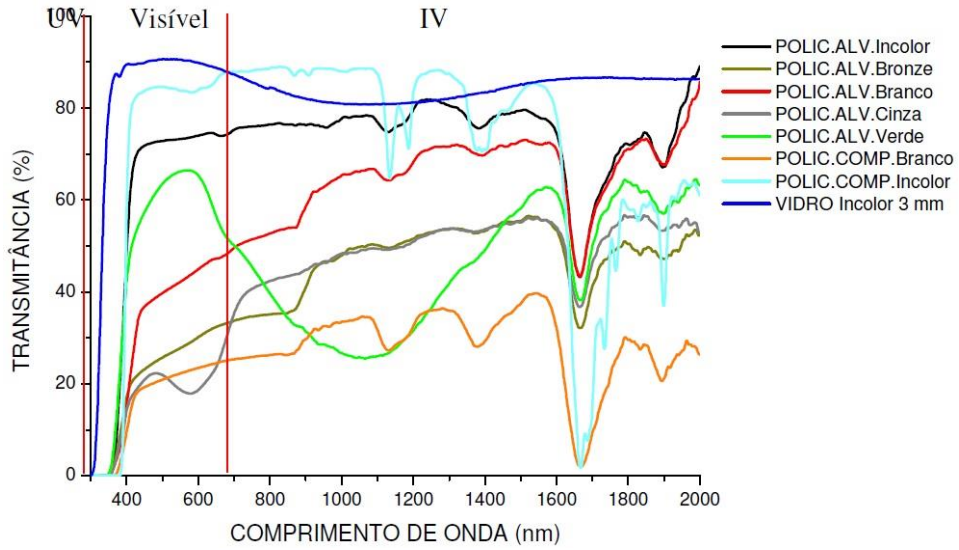


Figura 2.2 – Transmitância do PC sob forma de matérias-primas diversas.
 Fonte: (Santos, 2009)

Qi relata que o mecanismo de ablação predominante, quando utilizado *laser* de CO₂, é foto-térmico. Dessa forma, o PC primeiramente sofre fusão e então se decompõe termicamente por uma reação de quebra de cadeia, formando CO₂ gasoso, fenol e outros componentes.

As propriedades mais comuns do PC comercial são apresentadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Propriedades Comuns do Policarbonato.

Propriedades Comuns	Valor
Densidade [g/cm ³]	1,2
Coefficiente de Poisson	0,37
Módulo de Elasticidade [Gpa]	2,3 ~ 2,4
Coefficiente de Atrito	0,31
Tensão de Resistência à Tração [Mpa]	55 ~ 75
Calor Específico [J/kgK]	1200
Coefficiente de Expansão Térmica [x10 ⁻⁶ /K]	66 ~ 70
Condutividade Térmica [W/mK]	0,19 ~ 0,22

Fonte: (Heng Qi, 2009)

A temperatura de transição vítrea do PC é 148°C, maior que a do PMMA (105°C), o que faz do PC uma melhor escolha para uso em reações de elevada temperatura (Heng Qi, 2009).

2.2 Poli(metil-metacrilato) PMMA

O poli(metil-metacrilato) é um polímero amorfo (Romoli, 2010) e termoplástico considerado como um dos plásticos de engenharia, tecnicamente conhecido como PMMA (Vieira et al, 2006).

A Figura 2.3 apresenta o monômero que compõe este polímero.

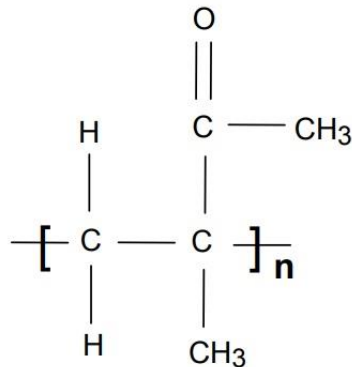


Figura 2.3 – Fórmula Molecular do Poli(metil-metacrilato).

Fonte: (Vieira et al, 2006)

O PMMA também apresenta intensa absorção do espectro luminoso na região ultra-violeta (Romoli, 2010); e dentre suas características, as principais são a excelente transparência, moldabilidade e estabilidade dimensional; diferindo do PC quanto à resistência ao impacto, onde este último sofre deformação plástica, ao passo que o PMMA sofre quebra.

O PMMA apresenta baixa resistência à temperatura, à fadiga e a solventes (GoodFellow, fornecedor internacional – www.goodfellow.com).

O PMMA e poliacetais são usinados à *laser* por vaporização.

A Tabela 2.2 apresenta algumas propriedades do PMMA.

Tabela 2.2 – Propriedades do PMMA.

Propriedades Comuns	Valor
Densidade [g/cm ³]	1,19
Coefficiente de Poisson	0,35 a 0,4
Módulo de Elasticidade [Gpa]	2,4 ~ 3,3
Tensão de Resistência à Tração [Mpa]	80
Calor Específico [J/kgK]	1400 a 1500
Coefficiente de Expansão Térmica [x10 ⁻⁶ /K]	70 ~ 77
Condutividade Térmica [W/mK]	0,17 ~ 0,19

Fonte: (GoodFellow, fornecedor internacional – www.goodfellow.com)

2.3 Tipos de Laser's e algumas aplicações

Os *laser's* se classificam em diferentes tipos segundo o meio ativo utilizado para gerar a emissão estimulada das ondas eletromagnéticas (Hecht, 1992), dentre os quais, o que será utilizado para o projeto de pesquisa encaixa-se no grupo dos *lasers* de cavidade ressonante gasosa (*laser's* de gás), visto tratar-se de um *laser* de nitrogênio. São os diferentes tipos:

- Estado-sólido: onde o meio ativo é um sólido, como o rubi, o neodímio-ítrio-alumínio-granada (nd:YAG);
- Diodo semicondutor;
- Gás: alguns gases utilizados são o hélio-neon, argônio, dióxido de carbono, nitrogênio, xenônio. A emissão estimulada ocorre através de uma corrente elétrica que atravessa o gás, ionizando o mesmo e fazendo com que emita radiação;
- Líquidos: a estimulação de emissão se dá pela irradiação de um laser proveniente de algum cabeçote de estado sólido no meio ativo líquido. Alguns líquidos utilizados são a rodamina vermelha (corante), cumarina, etc.;
- Excimer's: o meio ativo é um gás inerte, o qual é quimicamente instável, exceto quando em estado excitado. São formados por gases nobres (Hidrogênio, Argônio, Criptônio, Xenônio, Neônio) ligados a halogênios (Flúor, Bromo, Cloro e Iodo). A mistura utilizada apresenta gases inertes entre si; entretanto tais gases, quando excitados e sob determinadas condições de temperatura e pressão, tendem a unir-se. Mas separam-se em seguida, liberando bastante energia. A excitação responsável pela união temporária entre os gases se dá através de descargas elétricas ou feixes de elétrons (Hecht, 1992).

Geralmente os métodos de excitação da cavidade ressonante determinam se o feixe de laser produzido será pulsado ou contínuo.

Também se considera que é preciso certo tempo para que o laser opere com repetitividade: em termos de tempos de subida e quedas de energia dos pulsos. Tal repetitividade é afetada pela temperatura (lasers de gás dissipam temperatura mais

rápido que o fornecimento de energia é realizado); taxa de fornecimento de energia (caso dos pulsos de energia elétrica em lâmpadas de flash para excitação) e taxa de dissipação de calor.

Alguns dispositivos são capazes tanto de emitir feixes de *laser* pulsados quanto de emitir feixes de *laser* contínuos. Como mencionado, lasers pulsados apresentam maior energia em função dos dispositivos de Q-switching e Mode-locking (Muncheryan, 1980).

2.3.1 Propriedades dos feixes *laser*

2.3.1.1 Potência

A potência de saída do feixe de *laser* depende de:

- Variações no fornecimento de energia à máquina;
- Eficiência na conversão da energia empregada na excitação em energia empregada no *laser* (inversão de população, estimulação de emissão, etc);
- Métodos de excitação: o dispositivo de emissão de *laser* pode ser do tipo que emite feixes pulsados ou feixes contínuos;
- Tamanho do Laser.

A eficiência do laser está associada à eficiência de vários processos:

- Eficiência em depositar energia elétrica no meio ativo;
- Eficiência em excitação dos átomos/moléculas para a inversão de população;
- Fração de energia disponível para a transição *laser* (emissão estimulada);
- Fração de átomos que emitem radiação estimulada;
- Capacidade de extração de energia *laser* da cavidade ressonante.

Sendo a eficiência total um produto das eficiências citadas, o resultado é um baixo rendimento da energia entregue ao equipamento.

O rendimento comum de um *laser* é de cerca de 0% a 10%, ou até 30% para *lasers* de semicondutores, os quais são mais eficientes (Hecht, 1992).

Sendo o Laser uma radiação eletromagnética comum (ou seja, da mesma natureza que as dos espectros entre ultravioleta e infravermelho), possui em geral as mesmas propriedades que a luz visível. Logo, é possível o feixe de laser sofrer convergência, divergência, polarização, *splitting* (divisão) e refração.

2.3.1.2 Modos de um feixe laser

2.3.1.2.1 Modo transversal

É a distribuição de energia no sentido radial ao longo do feixe de laser (Hecht, 1992). A Figura 2.4 apresenta alguns dos modos transversais mais comuns para feixes *laser*.

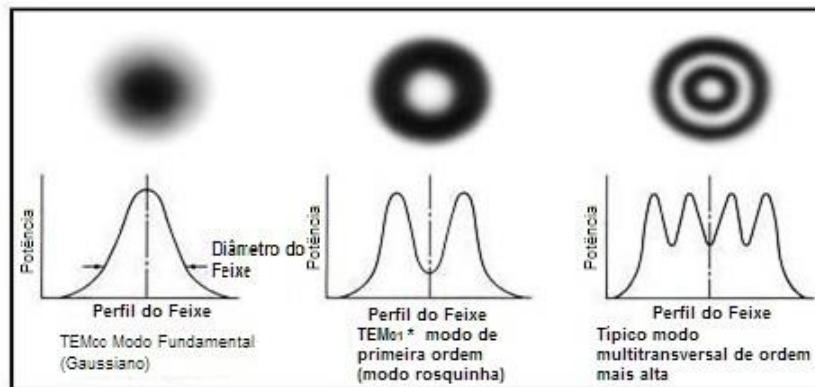


Figura 2.4 - Modos transversais de um feixe laser.

Fonte: <http://pt.laserto.com/laser-safety-knowledge>

Conforme mostra a Figura 2.4, observa-se o feixe chamado *Gaussiano*, ou *Fundamental*, o qual possui uma distribuição de energia com um único pico de energia ao centro, no eixo do feixe de laser, tal modo é o modo transversal TEM_{00} .

2.3.2 Fluência

A fluência de luz é a medida da densidade de energia de luz incidente sobre uma superfície. Mensurada em Joules por centímetro quadrado [J/cm^2].

É uma grandeza física chave na determinação dos processos de interação entre o feixe *laser* e o material usinado.

2.4 Métodos de Fabricação de Microchips

A grande demanda pela fabricação de microchips resultou no desenvolvimento de métodos alternativos de fabricação, como os métodos híbridos (associação de métodos já conhecidos). A lista de processos de fabricação desenvolvidos para produção de microcanais em diferentes tipos de materiais é grande, em função do intenso estudo realizado em torno desse assunto por pesquisadores em todo o globo. Além disso, em se tratando de alguns processos para microusinagem de polímeros, alguns métodos foram patenteados mas não foram publicados abertamente, não

vindo a serem de conhecimento público (Prakash, 2014). Os próximos tópicos abordam sobre alguns métodos largamente abordados na literatura.

2.4.1 Prensagem a Quente

O processo de prensagem quente consiste em utilizar uma matriz-mestre, feita em quartzo, com geometria inversa à geometria do microcanal a ser desenvolvido, e prensar tal matriz sobre uma amostra de material polimérico, sob condição de alta temperatura (isto é, uma temperatura acima da temperatura de transição do plástico).

Para fabricação de microcanais em metais, pode-se ser utilizada uma matriz de silício, microusinada, e fabrica-se, então, um microcanal em níquel. (Prakash, 2014).

Os parâmetros mais relevantes para prensagem à quente em materiais poliméricos são a temperatura, a força e o tempo de prensagem (Prakash, 2014).

2.4.2 Gravação

Muito utilizado, esse processo se resume na retirada de material da superfície de uma matriz, através do uso de gravação por meios químicos (corrosão) ou físicos (bombardeamento de íons).

A gravação química pode ocorrer através de gases e vapor (meio seco) ou através da combinação de ácidos e reagentes e eletricidade (gravação eletroquímica). A gravação eletroquímica depende da concentração da solução e do tempo de gravação.

A gravação em meio úmido mostra-se aplicável a materiais metálicos, ao passo que a gravação em meio seco é indicada para materiais poliméricos e vidros, em função de sua baixa reatividade (a qual é requerida para algumas aplicações de microcanais) (Prakash, 2014).

2.4.3 Moldagem por Injeção

É um processo que foi desenvolvido em função de seu baixo custo de fabricação. O maquinário para moldagem por injeção consiste em dispositivos como aquecedor, pistola de injeção, válvulas, rosca de extrusão, narizes de saída e entrada de material, dentre diversos componentes.

Este processo consiste na deposição de material para formação das microestruturas desejadas. Utilizado com polímeros, exige que o polímero utilizado apresente baixa viscosidade, bem como aderência à parede do substrato no qual o polímero é depositado. Os principais parâmetros que influenciam na realização da moldagem por injeção são a temperatura do molde de injeção e o comportamento de acomodação do polímero após a injeção (Prakash, 2014).

2.4.4 Microusinagem

A microusinagem é uma tecnologia que possibilita a usinagem de microcanais com formatos singulares. Consiste no uso de um sistema de usinagem que permita o corte de microestruturas, através do uso de ferramentas especiais, com grande precisão e altas velocidades de corte.

Essa tecnologia permite a fabricação de microcanais em metais como aço, alumínio e bronze, bem como em polímeros. Em comparação à microusinagem à *laser*, possui a vantagem de não demandar uma preparação de máquina tão complexa, tomando menor tempo de máquina e apresentando, assim, um menor custo.

As principais desvantagens desse processo são o desgaste da ferramenta, surgimento de trincas por tensões residuais e o longo tempo de processamento (Prakash, 2014).

2.4.5 Microusinagem à Laser

Os processos de usinagem de microcanais à *laser* têm sido alvo de recentes estudos em detrimento de sua praticidade. Em comparação a outros métodos, a usinagem a *laser* demanda menos gastos com preparação, uma vez que não exige o uso de ambientes esterilizados, nem a preparação de máscaras para ataque químico ou fotovoltaico (Prakash, 2014).

Também há o aspecto de que a usinagem à *laser* pode ser aplicada a praticamente todo tipo de material: polímeros, cerâmicos e metais; e podem ser geradas estruturas complexas. O que varia é como se dá o fenômeno de retirada de material, isto é, a ablação. O processo de ablação foi abordado na seção 2.3.3.

Existem disponíveis comercialmente equipamentos *laser* com emissão de ondas curtas (193, 266, 355nm) a ondas longas (1064nm até 10 μ m). Os fótons de ondas

curtas (UV - ultra-violeta) apresentam maior quantidade de energia que os fótons de ondas longas (IV - infra-vermelho). Em função disso, são mais utilizados os feixes de *laser* de ultra-violeta para usinagem de materiais transparentes (como o vidro), pois tais materiais absorvem mais a energia de ondas com curto comprimento (Prakash, 2014).

Para usinagem com feixes de UV, os equipamentos *laser* mais utilizados são os Nd:YAG (neodímio-dopado ítrio alumínio granada *laser*). Mesmo esse tipo de equipamento possuindo um comprimento natural de onda emitida de 1064nm, são utilizados cavidades harmônicas para emissão de feixes com comprimentos de 355nm (terceiro harmônico do feixe de 1064nm) (Prakash, 2014).

Tais *laser's* têm sido utilizados para a usinagem de polímeros. Em função das propriedades ópticas e estruturais destes materiais, apresentam grande sensibilidade ao calor e os comprimentos UV apresentam maior absorção e menor zona afetada pelo calor em relação a feixes *laser* de IV (Prakash, 2014).

Os *laser's* de feixe IV mais comuns são os equipamentos de CO₂ (classificado como médio-IV, com comprimento de onda de 10640nm) e também os equipamentos de Nd:YAG, os quais emitem ondas com comprimento natural de 1064nm. Tais feixes são mais utilizados para usinagem de metais e semicondutores, muito embora os *laser's* de CO₂ também sejam aplicados na usinagem de polímeros e materiais orgânicos, em detrimento da alta absorção destes materiais (Prakash, 2014).

Há também publicações na área cujos autores adotaram a mesma metodologia, como por exemplo Gans et. al.(2010) e Schneider(2010).

2.4.5.1 Laser's utilizados em Microusinagem

Para a aplicação em microusinagem de materiais diversos, são utilizados *laser's* de pulso curto e ultracurto obtidos principalmente de equipamentos com cavidade ressonante de estado sólido e gasosos. A maior parte dos *laser's* sólidos apresenta feixe com comprimento de onda na faixa do espectro infra-vermelho; enquanto que os *laser's* gasosos apresentam feixes com comprimento de onda ultra-violeta.

Para a microusinagem à *laser* de polímeros, o tipo de *laser* utilizado na literatura consultada é o de CO₂, que possui feixe com comprimento de onda de 10.600nm (Sanjay Mishra, 2015).

Xueye Chen (2017) apresenta um estudo no qual aplica a metodologia de Taguchi para desenvolver um método eficiente para fabricação de microcanais. Chen utiliza *laser* de CO₂ contínuo e uma mesa CNC para controle da trajetória usinada. Os parâmetros controlados do *laser* foram a potência, a velocidade de deslocamento da mesa e o comprimento do microcanal.

Tai-Chang Chen (2007) realiza ensaios com *laser's* UV e uma mesa CNC. Chen controla a frequência dos pulsos, a distância focal e a velocidade de deslocamento da mesa CNC a fim de monitorar a energia de usinagem.

Leonardo Schneider (2010) desenvolve, em seu trabalho, um chip microfluídico com simetria radial em PMMA. Schneider utiliza um *laser* contínuo de CO₂, o qual possui também mesa CNC.

Gans, Kobeling e Schneider (2010) realizam usinagem em acrílico (PMMA), policarbonato (PC) e poliestireno (PS), dos quais eles observam ablação inconstante (Schneider, 2010) nos polímeros, apontando que o PC apresenta a menor dispersão, sendo o mais indicado para uso em microfluídica. Nesse estudo, havia sete parâmetros geométricos avaliados, mas em função das dispersões nos resultados, novos ensaios foram realizados utilizando apenas policarbonato e avaliando dois parâmetros geométricos: a profundidade e a largura. Os novos resultados mostraram-se consistentes, porém ainda com grandes dispersões, as quais foram atribuídas à ablação não constante.

Choudhury (2009) usina polipropileno (PP), policarbonato (PC) e acrílico (PMMA) utilizando um *laser* de CO₂, no qual ele varia os parâmetros potência, velocidade de deslocamento da mesa e pressão do ar sobre as amostras. Choudhury avalia a zona afetada termicamente, a rugosidade de superfície e a precisão dimensional. Em seu trabalho é relatado que o PC apresenta menor dispersão dimensional.

Chen (2017) menciona que, após Heng Qi (2009), poucas pesquisas foram realizadas utilizando PC para dispositivos microfluídicos. Qi usina PC sob variadas condições de potência do *laser*, velocidade de deslocamento da mesa e número de passes de usinagem e estuda a influência destes parâmetros sobre a largura, a

profundidade e a razão de aspecto (razão entre a profundidade e a largura) dos microcanais obtidos.

Baudach aplica um *laser* sólido de safira (Ti:Sapphire), com pulso ultracurto, na usinagem de acrílico e PC e estuda o limiar de ablação em função do número de pulsos para cada material.

Mahmoud Moradi utiliza um planejamento experimental com cinco níveis, no qual ele varia a velocidade de deslocamento da mesa, a potência do *laser* e a distância focal entre a lente e a amostra. Moradi usa um *laser* de CO₂ de 60 Watts e amostras de policarbonato com 3,2mm de espessura.

Hisashi Tsuruta estuda a influência do número de pulsos e da fluência de cada pulso individual sobre o estímulo gerado na superfície e a geometria da cavidade ablacionada. Para tal, Tsuruta utiliza um *laser* sólido Nd:YLF com frequência de 1kHz, comprimento de onda de 1047nm e pulso de 10ns; e relata que o estímulo gerado na superfície não deve depender da capacidade de absorção do material, entretanto mostra que a geometria da cavidade depende do processo de ablação envolvido.

Neste trabalho, utilizou-se um *laser* gasoso de N₂, com comprimento de onda ultravioleta e pulso de 2,5ns. Observa-se que a literatura consultada monitora a energia entregue pelo *laser* à superfície controlando a potência do *laser*. Contudo, em função das características do equipamento utilizado, neste trabalho é mensurada a energia do feixe *laser* e controlada a energia entregue à superfície mediante uso de um filtro para a luz ultravioleta, como será detalhado no Capítulo 3. Esta é a razão porque a literatura mencionada neste trabalho apresenta valores da fluência e potência do *laser* mas este trabalho menciona diretamente a energia do feixe.

O *laser* utilizado difere dos equipamentos encontrados na literatura em tamanho e preço, o que justifica a escolha do mesmo. Os *laser's* de CO₂ e de estado sólido são equipamentos maiores e mais caros.

2.4.6 Ablação

A ablação à *laser* é o nome dado à interação explosiva entre a matéria e o feixe de luz *laser*. De modo geral, essa interação pode resultar em vaporização de matéria; ejeção de elétrons, íons e fragmentos; ondas de choque; formação de plasma e

outros processos. (Russo, 1995). A Figura 2.5 ilustra alguns fenômenos que ocorrem na ablação.

A interação entre os materiais sólidos em estudo e o feixe de *laser* é um fenômeno complicado, pois determinar detalhadamente o que ocorre no momento em que o feixe incide no material compreende abordar as propriedades ópticas e térmicas do material e suas influências na absorção e transmissão da energia provida pelo feixe laser. Existem estudos que determinam detalhadamente tal interação, entretanto são para materiais bem específicos (Russo, 1995).

Quando o *laser* utilizado possui duração temporal do feixe acima de alguns picossegundos, a ablação ocorre com predominância de fenômenos térmicos (Russo, 1995); porém, caso o equipamento utilizado forneça pulsos de luz ultra-curtos, isto é, com duração temporal menor que uma ordem de 0,1 picossegundos, então a ablação ocorre com predominância de repulsão Coulombiana (Machado, 2011) e praticamente inexistente uma zona afetada pelo calor.

Chen (2007) descreve que o tipo de interação entre o feixe *laser* e o material usinado depende dos parâmetros do *laser*, a saber: o comprimento de onda utilizado, duração do pulso e fluência; e das características do material (coeficiente de absorção, temperatura de fusão, gap da banda de energia dos elétrons, condutividade térmica, temperaturas de vaporização, etc.). Também menciona que, para *laser's* de nanossegundos, três fenômenos de interação podem ser classificados: foto-térmico (o qual associa-se à ablação térmica, vaporização), fotoquímico (o qual associa-se à ablação sem fenômenos térmicos) e o foto-físico, o qual inclui tanto processos químicos quanto térmicos.

Os fenômenos foto-térmicos ocorrem quando há ablação térmica. Nesse processo, há instantânea transformação de energia de excitação das partículas em calor, o que provoca retirada de material.

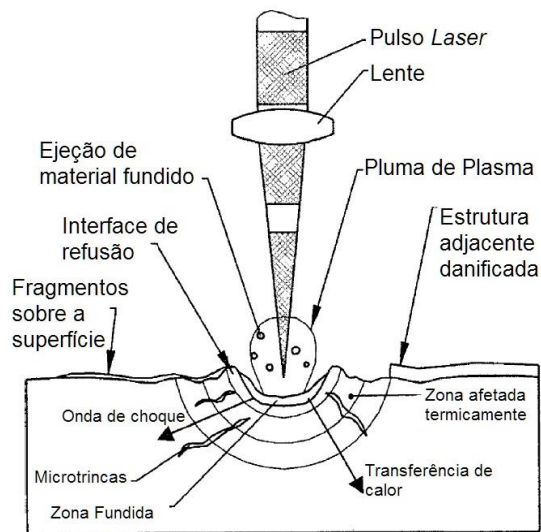


Figura 2.5- Fenômenos que ocorrem durante a ablação.

Fonte: (Kaldos, 2004).

Quando a energia de excitação e ionização são dissipadas em forma de calor, a superfície do material rapidamente aquece e sofre uma vaporização explosiva, com fusão de material sobre a superfície (Qi, 2009).

A vaporização é predominante quando o pulso tem duração de alguns microssegundos ou maior, e a densidade de energia está em torno de 10^6 a 10^9 W/cm² (Russo, 1995). Richard Russo explica que, como o tempo que um elétron excitado leva para transmitir energia para o resto da rede é da ordem de 0,1 picossegundos. Por isso *laser's* com pulsos cuja duração é acima dessa ordem de tempo realizam ablação predominantemente térmica.

Com o uso de *laser's* de nanossegundos, a ablação foto-térmica produz nanopartículas a partir da ejeção de material. Quando a irradiação do *laser* é maior que 10^{11} W/cm² e a temperatura na superfície é igual à temperatura crítica de mudança de fase, ocorre uma explosão de fase, onde passa-se de um estado onde predomina líquido superaquecido para uma mistura de vapor e gotas de líquido. Então uma pluma densa de plasma é criada ao final do pulso *laser* e gotas de material fundido são ejetadas. O líquido ejetado solidifica, alterando a rugosidade das regiões próximas (Sanjay Mishra, 2015).

Obviamente, a profundidade de absorção de energia e a quantidade de material retirado são influenciados pelas propriedades ópticas (reflexividade, absorvidade, transmissibilidade (USP, 2005)) e térmicas (coeficientes de calor específico, coeficientes de condução térmica, coeficientes de dilatação térmica (USP, 2005)).

Entretanto é importante ressaltar que as propriedades térmicas e ópticas dos materiais sofrem alterações durante o processo, resultando que modelos termodinâmicos simples não são suficientes para descrever o processo.

Tai-Chang Chen e Heng Qi citam que o uso de ondas ultravioleta para microusinagem de materiais oferece vantagens como a redução de efeitos de choque térmico (trincas, fusão de material, delaminação e deformações superficiais localizadas).

Para o PC, Xueye Chen (2017) aponta que, ao utilizar *laser* de CO₂, as propriedades do material sofrem mudanças devido à quebra de ligações químicas e a ablação ocorre pela formação de material fundido, decomposição e vaporização. O PC é decomposto em dióxido de carbono (CO₂), fenol e outros componentes.

Moradi (2017) utiliza um conceito para entrega de energia à superfície, onde relaciona a energia em forma de calor da usinagem à potência do *laser* e à velocidade de deslocamento da mesa. Tal relação é expressa pela Equação 2.1:

$$\text{Calor} = \text{Potência do Laser} / \text{Velocidade da Mesa} \quad \text{Eq.2.1}$$

2.4.6.1 Limiar de Ablação

A densidade de energia acima da qual ocorrem fenômenos térmicos em quantidade relevante é denominada *Limiar de Ablação*. Quando uma densidade muito alta de energia é utilizada, obtém-se muitos elétrons livres na banda de condução e isso faz com que esses elétrons voltem ao estado fundamental, transmitindo a energia para o resto da rede e causando processos térmicos. Estes processos térmicos, como mencionado, diminuem o controle de condução de energia, causando uma região afetada pelo calor muito grande, com pouca precisão de usinagem.

A Figura 2.6 ilustra o perfil obtido em um ensaio de Escaneamento Diagonal.

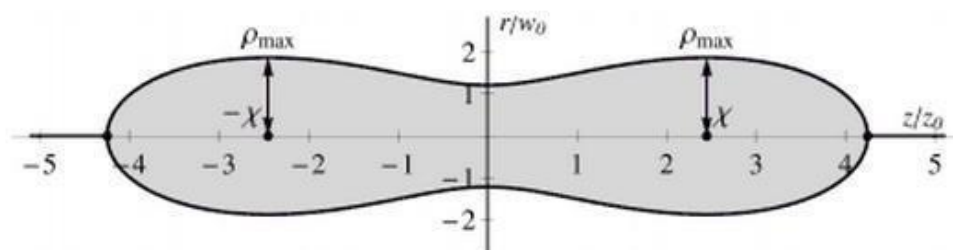


Figura 2.6 - Representação do perfil transversal de ablação obtido em um processo D-Scan, para determinação de Limiar de Ablação.

Fonte: (Machado, 2012)

A determinação do limiar de fluência pode ocorrer através de dois métodos:

- Método de Dano Zero: consiste em usar uma amostra com um feixe de laser TEM₀₀ (gaussiano) e com diâmetro variável (o que se faz variando a distância da amostra em relação à lente). Então associam-se os dados através de uma função exponencial da fluência. Entretanto este método apresenta muitas complicações: é preciso saber como se dá a propagação do feixe de *laser* (o quanto seu diâmetro aumenta à medida que se distancia do *laser*) para que se saiba qual o diâmetro do feixe ao atingir a amostra; também é preciso medir o diâmetro afetado pelo feixe para apenas então conectar os dados. Isso tudo demanda tempo de medições, equipamento sofisticado para medir a região afetada pelo *laser* (visto que o objetivo do ensaio é encontrar a densidade de energia que causa “dano zero”, é difícil medir a região afetada, uma vez que esta tende a ser cada vez menor), equipamento com alta precisão de posicionamento, etc.

- Método de Escaneamento em Diagonal: o método de escaneamento em diagonal consiste em usar a amostra realizando um movimento diagonal na direção “z” (distanciando ou aproximando a amostra da lente) e na direção “x” ou “y”, traçando uma linha de usinagem onde há diferentes diâmetros de foco. Tal ensaio permite observar o efeito dito ‘incubação’ e o maior diâmetro em que ainda ocorre usinagem (visto que no foco da lente, há alta densidade de energia, mas um diâmetro muito pequeno; e, distante do foco da lente, há um diâmetro grande, porém baixa densidade de energia). O efeito de ‘incubação’ é o fato de que em uma sobreposição de disparos o limiar de fluência é mais baixo. Isso se dá porque a região já usinada tem sua estrutura modificada, com elétrons excitados por centros de calor, facilitando a ejeção destes elétrons e, assim a realização de usinagem por um novo disparo. Como a energia para retirada dos elétrons é menor, a fluência exigida é menor (Machado, 2011).

2.4.7 As Variáveis de Entrada

Uma vez que a quantidade calor entregue pelo feixe do *laser* à superfície desempenha papel central no processo de usinagem à laser, os fatores a serem controlados são sobreposição entre os pulsos do *laser*, a energia do feixe *laser* e o número de passes de usinagem.

Os valores de cada nível foram especificados de maneira a obter expressiva diferença de condições de usinagem, conforme especificado no Capítulo 3.

É possível avaliar a diferença dos níveis de cada fator pela Equação 2.1. O aumento de sobreposição, S , implica num aumento de energia, E , medido em número de pulsos por ponto. Esse aumento é representado pela Equação 2.2, válida para os pontos entre o primeiro e o último pulso de cada linha.

$$E = 1 + 2 * \sum_{i=0}^N [S_{1+i} - (1 - S)] \quad \text{Eq. 2.2}$$

Onde:

- E é a quantidade de energia entregue a um ponto, medida em número de pulsos;
- S_{1+i} é a sobreposição do pulso que sucede ao dado no ponto. Se, por exemplo, a sobreposição programada é de 0,9, então após um pulso, o pulso sucessor terá 90% de sua área sobrepondo a área do primeiro. Por sua vez, o segundo pulso em sucessão terá 80% de sobreposição. Isso é ilustrado pela Figura 2.7;
- S é a sobreposição programada, um valor fixo;
- N é o número de vezes que os pulsos em sucessão terão parte de sua área sobrepondo um pulso anterior. Por exemplo: para uma sobreposição programada de 0,5 haverá apenas um pulso em sucessão que terá sobreposição. Isso também é ilustrado na Figura 2.7. N é calculado pela Equação 2.3.

$$N = \frac{1}{(1-S)} - 1 \quad \text{Eq. 2.3}$$

A Figura 2.7 ilustra o que é expresso pela Equação 2.2 e pela Equação 2.3.

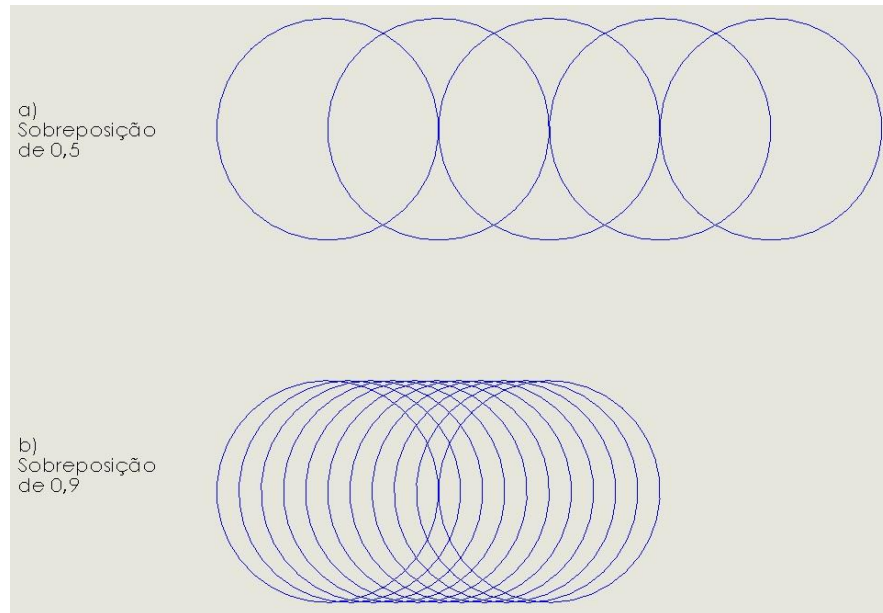


Figura 2.7 – Diferença entre níveis de sobreposição. a) Sobreposição de 50% entre os pulsos. b) Sobreposição de 90% entre os pulsos.
 Fonte: autoria própria.

É possível ver na Figura 2.7 que, para um feixe *laser* com perfil transversal TE_{00} com sobreposição programada de 0,5, após o primeiro pulso, o sucessor sobrepõe sua posição em 50% com relação ao primeiro pulso; e o segundo pulso em sucessão já não apresenta sobreposição. Assim é possível estimar a quantidade de energia entregue na usinagem de um determinado ponto.

A sobreposição é determinada pela frequência de pulsos programada no *laser*, pela geometria do feixe ao atingir a superfície (*dimple*) e pela velocidade de deslocamento da mesa CNC. A Equação 2.4 apresenta a relação entre estes valores:

$$S = 1 - \frac{V}{f*d} \quad \text{Eq. 2.4}$$

Onde:

- S é a sobreposição programada;
- V é a velocidade de deslocamento da mesa;
- d é a dimensão do feixe *laser*. Para o exemplo da Figura 2.7, d é o diâmetro.

A partir dos conceitos até aqui desenvolvidos; utilizaram-se os procedimentos experimentais para planejamento e execução de ensaios; coleta e análise de dados descritos no próximo capítulo.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A Figura 3.1 apresenta um fluxograma dos processos a serem realizados após o planejamento experimental, relacionando tais processos aos equipamentos necessários, descritos a partir da seção 3.1.



Figura 3.1 - Fluxograma de processos envolvidos na realização da pesquisa.

Fonte: autoria própria.

3.1 Material de Estudo

Tendo em vista os resultados da literatura consultada (Gans et al; Heng Qi; e Choudhury) sobre as propriedades do PC e do PMMA, decidiu-se por utilizar o PC

comercial, compacto e translúcido. O PC como apresenta menor dispersão na geometria dos microcanais usinados, bem como melhores propriedades em termos de resistência e temperatura de transição vítrea.

3.2 Metodologia Experimental

Os fatores de entrada e as respostas de saída foram definidos conforme apresentado na Tabela 3.1:

Tabela 3.1 - Definição dos fatores de entrada e das respostas de saída.

Fatores de Entrada (Variáveis de Entrada)			Respostas de Saída		
Sobreposição [%]	Número de Passes	Energia [μJ]	Largura (L) [μm]	Profundidade (P) [μm]	Razão de Aspecto (P/L) [μm]

Fonte: autoria própria.

3.2.1 Planejamento Fatorial

Para análise dos resultados foi utilizada uma técnica estatística denominada “planejamento fatorial”. Esta é uma metodologia de planejamento, execução e análise de experimentos que, partindo de um mapeamento de variáveis de entrada e respostas de saída, proporciona uma avaliação consistente sobre a influência individual de cada variável de entrada sobre uma resposta de saída e a influência da combinação de variáveis de entrada sobre uma resposta de saída.

Tal procedimento facilita a interpretação de dados e torna o processo experimental mais objetivo e claro.

Consiste na utilização de níveis para variação dos fatores de entrada, sejam tais fatores quantitativos ou qualitativos. Logo, se temos três fatores de entrada, variamos estes três fatores em níveis de máximo e mínimo. Os experimentos foram realizados de forma a testar todas as possíveis combinações dos fatores de entrada em seus níveis de avaliação.

O planejamento é chamado fatorial pois o número de ensaios realizados é o produto fatorial dos níveis dos fatores a serem estudados. No caso em questão, os níveis são classificados como "-1" e "1".

A Tabela 3.2 apresenta os valores correspondentes aos níveis de cada variável.

Tabela 3.2 - Definição das variáveis de entrada e das respostas de saída.

Variáveis	Nível	Valores
Sobreposição	1	0,9
	-1	0,5
Número de Passes	1	2
	-1	1
Energia	1	128 μ J
	-1	76 μ J

Fonte: autoria própria.

O *laser* permite utilizar uma frequência máxima de 30Hz e apresenta energia do feixe de *laser* de 128 μ J. O equipamento não dispõe de dispositivo para regulação da energia do feixe, de forma que isso foi feito utilizando uma lamínula de microscopia com 1mm de espessura; pois o vidro absorve parte da luz ultravioleta. Dessa forma atingiu-se o valor de 76 μ J para o nível inferior de energia.

Neste modelo de planejamento, quando utilizados vários fatores com mesmo número de níveis de variação, é representado pela expressão m^n , onde "n" é o número de fatores de entrada e "m" é o número de níveis em que este fator estará variando. Para o caso abordado neste trabalho, temos um planejamento fatorial completo 2^3 , o que implica em dois níveis de variação de três fatores de entrada (Barros Neto, 2001).

A Tabela 3.3 apresenta um esboço do planejamento fatorial 2^3 a ser utilizado neste trabalho. Observa-se que todos os fatores foram combinados em seus níveis de variação.

Tabela 3.3 - Esboço de um planejamento fatorial 2^3 .

Nº Ensaio	Sobreposição	Energia	Núm. Passes
1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1
3	-1	1	-1
4	1	1	-1
5	-1	-1	1
6	1	-1	1
7	-1	1	1
8	1	1	1
	X1	X2	X3

Fonte: autoria própria.

A Figura 3.2 apresenta um desenho esquemático do sistema de usinagem utilizado para filtrar a luz ultravioleta com o vidro e, assim, diminuir a energia do *laser* incidente sobre a amostra.

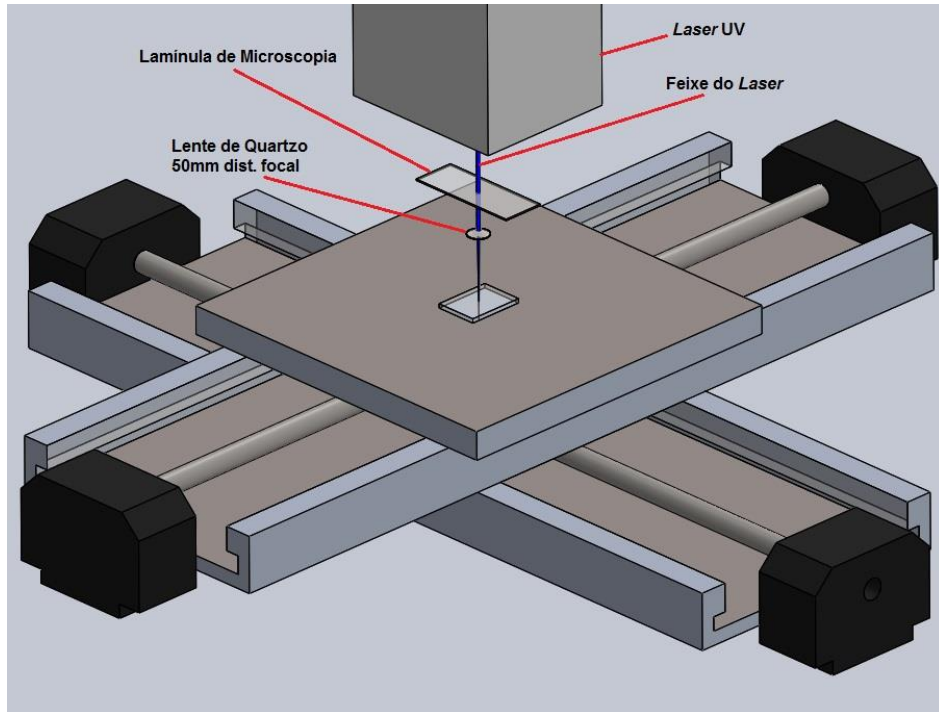


Figura 3.2 – Esquema do sistema de usinagem utilizado quando aplicado o menor nível de energia do feixe *laser*.

Fonte: autoria própria.

3.3 Preparação das Amostras

As amostras foram cortadas de uma chapa de policarbonato comercial, obtida no fornecedor de acrílicos e chapas de policarbonato “Brasflex”, em Curitiba.

As amostras de policarbonato têm formato retangular, com dimensões finais de 40mm de comprimento e 30mm de largura, onde os microcanais têm 20mm de comprimento e foram dispostos em sequência e com 5mm de distância entre cada microcanal.

Conforme é apresentado na Figura 3.1, após os processos de corte e usinagem das amostras, as mesmas foram limpas em um lavador ultrassônico.

A Figura 3.3 apresenta um desenho esquemático da amostra com os microcanais. Cada linha recebeu um código para identificação segundo os parâmetros de usinagem.

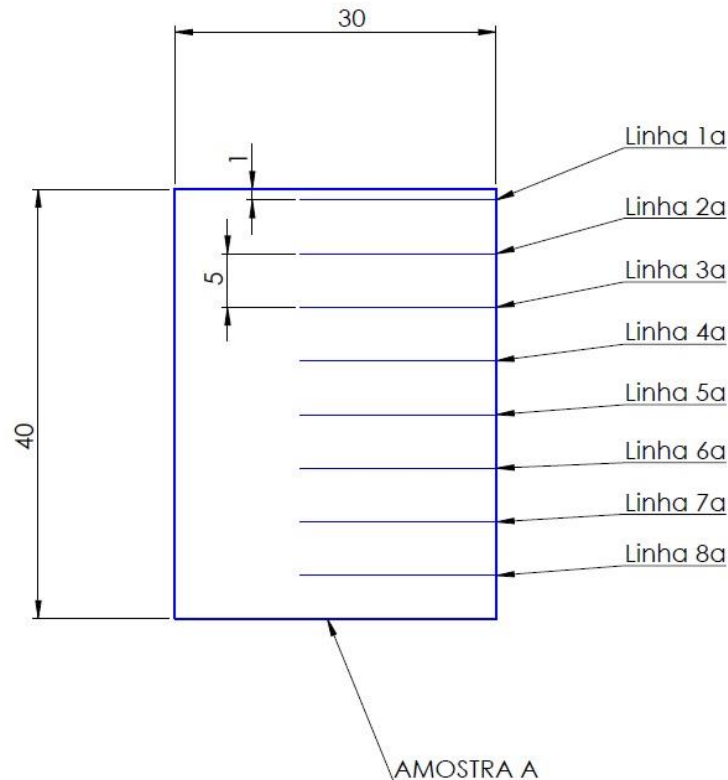


Figura 3.3 – Desenho esquemático das amostras.

Fonte: autoria própria.

3.4 O Processo de Usinagem à Laser

O processo central dos ensaios é a usinagem à *laser* das amostras, a qual foi realizada com o uso do *laser* de nitrogênio com feixe de ultravioleta e duração temporal de 2,5ns. Na usinagem foram variados os fatores segundo o planejamento experimental apresentado na Tabela 4.2.

Para a realização da usinagem, o equipamento utilizado foi um *laser* de nitrogênio MNL-100, da Lasertechnik Berlin, com potência de pico de 100kW e duração temporal do pulso de 2,5ns; e uma mesa com movimentação nos eixos "X" e "Y" controlada por comando numérico computadorizado, desenvolvida na UTFPR como projeto de conclusão de curso do aluno Charles Michalak. A parte de comando numérico foi implementada utilizando software Linux CNC EMC2, feito pelo aluno Adriano Gonçalves dos Passos. A mesa CNC-XY possui precisão de movimento de 0,01mm em ambos os eixos.

A Figura 3.4 mostra uma imagem da mesa CNC-XY utilizada. A Figura 3.5 apresenta uma foto do *laser*.



Figura 3.4 - Mesa CNC-XY desenvolvida na UTFPR.
Fonte: autoria própria.



Figura 3.5 - Laser MNL - 100 da Lasertechnik Berlin.
Fonte: autoria própria.

Para a focalização do feixe *laser* utilizou-se uma lente de quartzo com distância focal de 50mm, própria para luz ultravioleta.

A trajetória de usinagem foi programada no AXIS CNC, utilizando linguagem de programação *Fanuc*. Para cada microcanal há uma programação diferente, na qual

varia a velocidade de deslocamento da mesa e a numeração que o canal recebe (a qual corresponde ao número de ensaio mostrado na Tabela 3.3), a fim de identificar o mesmo no momento da medição com o rugosímetro.

Durante a usinagem dos microcanais, o posicionamento da amostra na mesa CNC é feito apenas uma vez. Depois, configura-se no programa CNC um deslocamento unitário de 5mm e movimenta-se essa distância no eixo “Y”, afastando um microcanal do outro (conforme apresentado na Figura 3.3). Dessa forma, cada microcanal foi usinado de forma individual e respeitando a aleatorização do processo.

3.5 Medição dos Microcanais

Realizou-se a coleta das medidas de profundidade e largura através do rugosímetro de interferometria óptica CCI Lite, da Taylor Hobson, com resolução vertical de 0,01nm, disponível no Laboratório de Qualidade e Metrologia da Universidade. Tal equipamento fornece um relatório de medição de rugosidade superficial; com o relatório, obtiveram-se as informações sobre os parâmetros geométricos das cavidades usinadas.

A Figura 3.6 apresenta uma foto do rugosímetro.

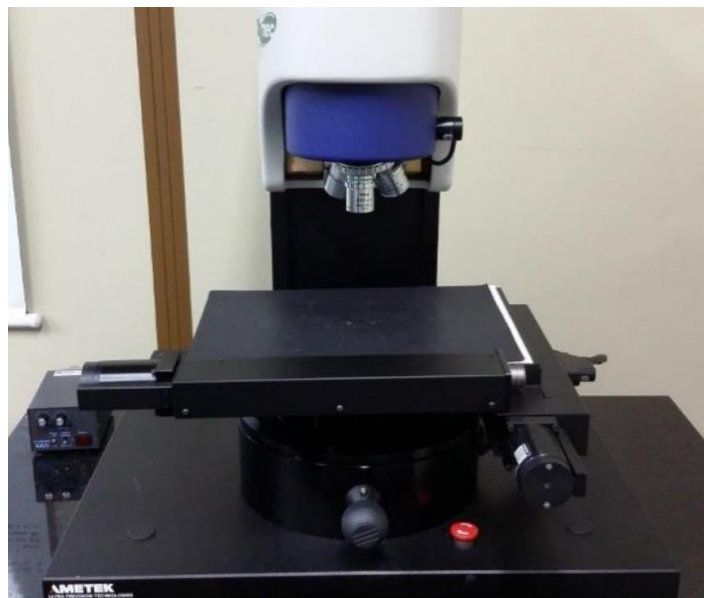


Figura 3.6 - Rugosímetro de Interferometria Óptica da Taylor Hobson.

Fonte: (Kouketsu, 2015).

As medições de profundidade e largura foram realizadas adotando-se um padrão de referência para medição, como mostrado na Figura 3.7.

Para a profundidade, a referência é a superfície plana adjacente ao microcanal e adotou-se como “positivo” o sentido abaixo da superfície de referência, invertendo-se assim o sinal no gráfico que o rugosímetro apresenta.

É possível verificar na que em alguns ensaios, o resultado obtido foi uma protuberância, e não um microcanal, mostrado na Figura 3.7 (a). Por tratar-se de mediçPara evitar confusão na avaliação dessas medições, o valor medido da profundidade para essa situação foi colocado como “negativo”; de forma que, se uma protuberância apresenta altura de “ $1\mu\text{m}$ ”, sua profundidade é avaliada em “ $-1\mu\text{m}$ ”.

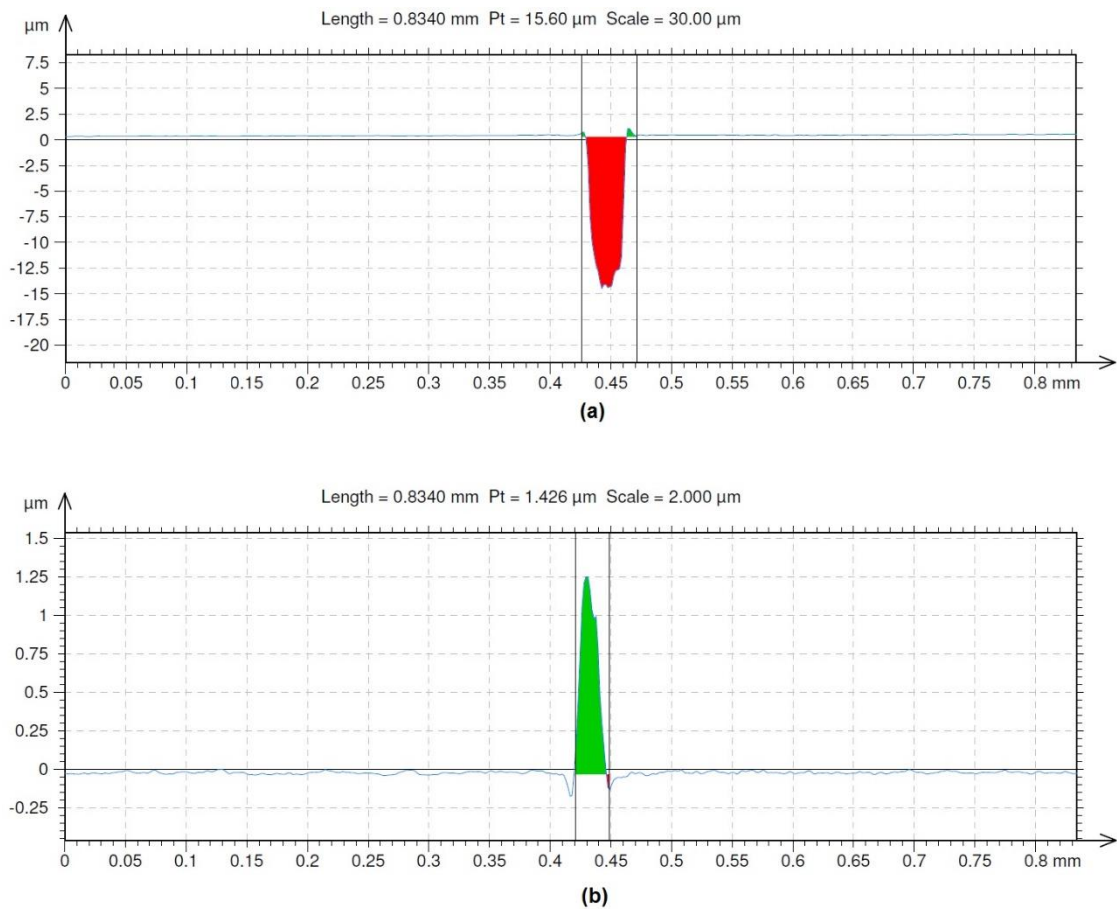


Figura 3.7 – Medições realizadas no rugosímetro. Visualização do padrão de referência para a altura. (a) Microcanal com profundidade de cerca de “ $14,5\mu\text{m}$ ”. (b) Microcanal com profundidade de cerca de “ $-1,25\mu\text{m}$ ”

Fonte: autoria própria.

3.6 Análise dos Dados

Os dados obtidos com o rugosímetro foram aplicados no programa Excel para ordenação e obtenção dos valores de Razão de Aspecto.

A análise dos dados, através de ferramentas estatísticas, foi realizada com auxílio do software *Statistica*, com o qual utilizou-se a análise de variância ANOVA e traçados os gráficos que apresentam as diferenças de médias amostrais juntamente com as dispersões dos resultados.

Tal análise permitiu compreender quais parâmetros do sistema de usinagem exerceram maior influência sobre cada resposta de saída em estudo e verificar a correlação com a literatura consultada.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As medições dos microcanais foram realizadas utilizando um rugosímetro tridimensional, como já mencionado. Tal escolha ocorreu em função da relevância estatística que o relatório do rugosímetro apresenta, visto que esse documento é produto de centenas de medições automatizadas realizadas pelo equipamento.

Os relatórios de medição apresentam uma imagem tridimensional do microcanal, da qual é possível obter o perfil da seção transversal do mesmo.

Realizaram-se ensaios preliminares em PMMA e policarbonato com o *laser* de nitrogênio, pulsado, afim de estudar a possibilidade de realizar ablação de maneira controlada. Entretanto, por meio dos ensaios foi possível confirmar grande dispersão ao usinar PMMA também com *laser* pulsado de nitrogênio. Já o policarbonato apresentou resultados positivos: microcanais com profundidade e largura visualmente constantes. As imagens de medições de ambos os ensaios se encontram no Apêndice.

Continuando a pesquisa, após os ensaios de usinagem em PC e obtenção dos valores para a profundidade e largura dos microcanais, os dados foram aplicados em um *software* para análise estatística e estimação dos efeitos dos parâmetros do *laser* sobre as geometrias estudadas.

4.1 Influência dos Parâmetros do Laser Sobre a Largura dos Microcanais

Os resultados obtidos para os níveis experimentais das amostras encontram-se no Apêndice. A análise obtida através do programa *Statistica* mostra que os efeitos mais significativos sobre a largura dos microcanais foram provocados pela variação da sobreposição, pela interação entre a energia e o número de passes e pela interação conjunta dos três fatores; conforme mostra a Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Tabela ANOVA resumida da Largura dos microcanais.

ANOVA; Var.:Largura; R-sqr=,74548; Adj., 2**(3-0) design; MS Residual=21,25 DV: Largura					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Sobreposição	600,000	1	600,000	28,2352	0,000070
(2)Energia	2,667	1	2,6667	0,1254	0,727780
(3)Nº Passes	8,167	1	8,1667	0,3843	0,544032
1 by 2	20,167	1	20,1667	0,9490	0,344468
1 by 3	24,000	1	24,0000	1,1294	0,303679
2 by 3	112,667	1	112,6667	5,3019	0,035066
1*2*3	228,167	1	228,1667	10,7372	0,004746
Error	340,000	16	21,2500		
Total SS	1335,833	23			

Fonte: autoria própria

A Tabela 4.2 apresenta a quantificação dos efeitos dos fatores, onde se verifica mediante consideração da significância estatística dada pelo p-valor de cada variável que o efeito da sobreposição e da combinação das variáveis de entrada mencionadas desempenha maior papel na largura obtida; uma vez que o p-valor de tais variáveis é mais próximo de zero.

Tabela 4.2 – Efeitos dos fatores sobre a Largura dos microcanais.

Effect Estimates; Var.:Largura; R-sqr=,74548; Adj.,63412 (2**(3-0) design; MS Residual=21,25 DV: Largura						
Factor	Effect	Std.Err.	t(16)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt
Mean/Interc.	33,41667	0,940966	35,51316	0,000000	31,4219	35,41143
(1)Sobreposição	10,00000	1,881932	5,31369	0,000070	6,0105	13,98952
(2)Energia	0,66667	1,881932	0,35425	0,727780	-3,3229	4,65618
(3)Nº Passes	1,16667	1,881932	0,61993	0,544032	-2,8229	5,15618
1 by 2	1,83333	1,881932	0,97418	0,344468	-2,1562	5,82285
1 by 3	2,00000	1,881932	1,06274	0,303679	-1,9895	5,98952
2 by 3	4,33333	1,881932	2,30260	0,035066	0,3438	8,32285
1*2*3	-6,16667	1,881932	-3,27678	0,004746	-10,1562	-2,17715

Fonte: autoria própria

Os valores apresentados pela Tabela 4.2 são resultado do contraste da média entre os níveis dos fatores em questão. Os resultados desta tabela, bem como os resultados da Tabela 4.1 indicam que há evidente diferença entre as médias das medições de largura quando se altera o nível de sobreposição, isoladamente, e

também quando se alteram os níveis de energia e número de passes em conjunto e ainda quando alteram-se os níveis dos três fatores em conjunto.

Observa-se que para a variação de sobreposição do menor para o maior nível, o ganho médio de largura é estimado em $10 \pm 1,88 \mu\text{m}$. O erro padrão desse resultado é pequeno o suficiente para considerar o efeito da sobreposição realmente significativo, pois a distribuição das médias amostrais não permite confundir o resultado com erro aleatório do ensaio, a diferença entre as médias dos níveis é evidente.

Já para o efeito de interação entre os fatores “energia” e “sobreposição”, representado pela Figura 4.2 o erro padrão apresenta um intervalo quase da mesma magnitude que a diferença de médias observada.

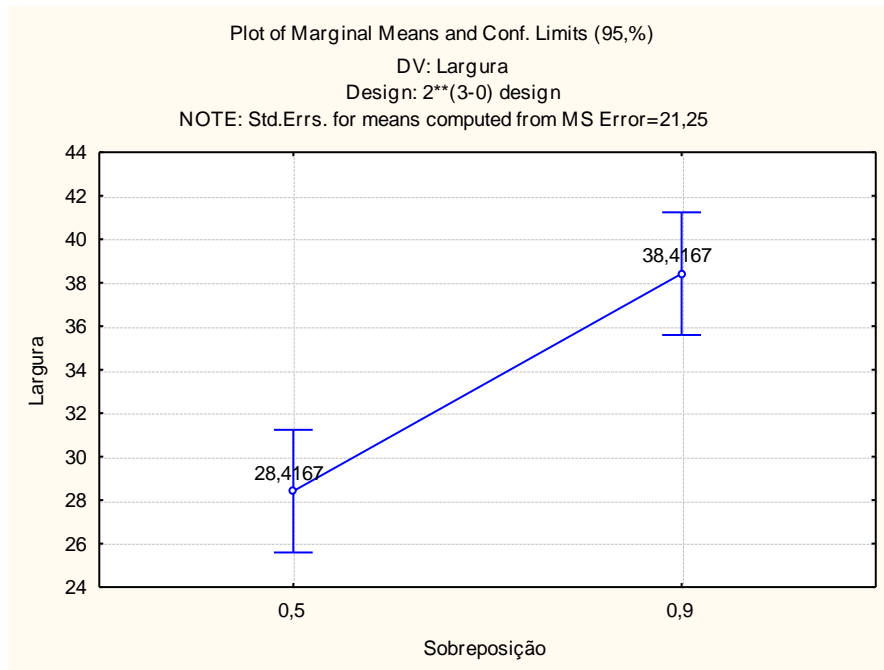


Figura 4.1 – Resultado para influência da sobreposição sobre a largura do microcanal

Fonte: autoria própria

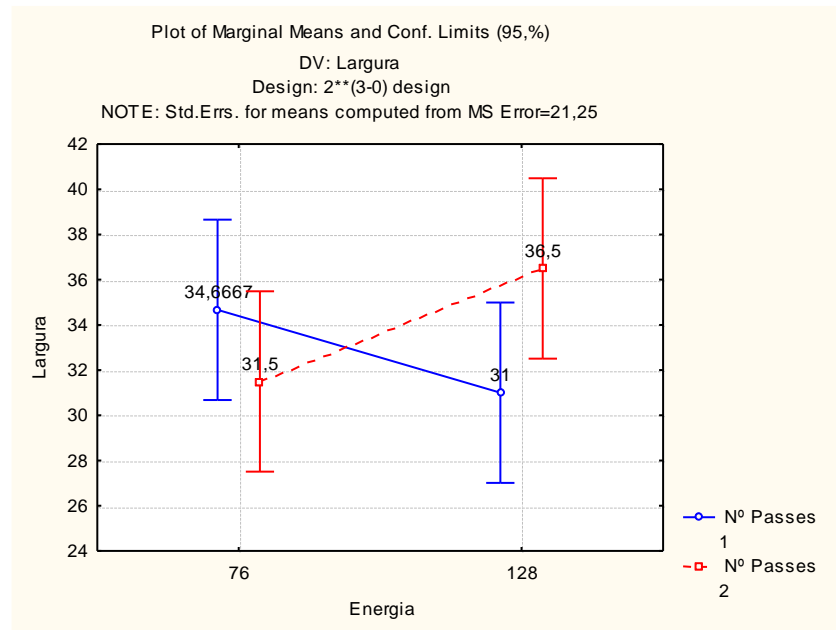


Figura 4.2 Resultados para interação entre a Energia e o Número de Passes. Alteração da Energia para o mesmo Número de Passes

Fonte: autoria própria

Na Figura 4.2 nota-se que, para o número de passes do nível inferior, a alteração da energia apresenta uma diferença entre médias amostrais pouco expressiva, de maneira que tal diferença é menor que o intervalo de larguras observadas para esse parâmetro de usinagem (intervalo dado pelo erro padrão do efeito de interação “Energia x Número de Passes”). Tal dado não permite concluir que esse efeito de interação é significativo.

Um aspecto que chama a atenção para este resultado foi a aparente redução de largura, quando aumentada a energia. Entretanto, uma vez que o efeito em questão não desempenha um papel representativo sobre a largura, não se pode dizer que essa observação é sempre válida. O que explica isso é a elevada dispersão obtida nas respostas referentes à largura. Chen (2017) apresenta um estudo sobre a usinagem do policarbonato com *laser* contínuo de CO₂, no qual menciona o mesmo problema de erro (isto é, grande dispersão) na largura dos microcanais. Esse erro é apresentado na Figura 4.3. Chen aplica um arranjo experimental ortogonal segundo a metodologia de Taguchi para determinar qual a condição ideal de usinagem em função da largura. Ou seja: quais parâmetros de usinagem resultam na menor variação nas medições de largura.

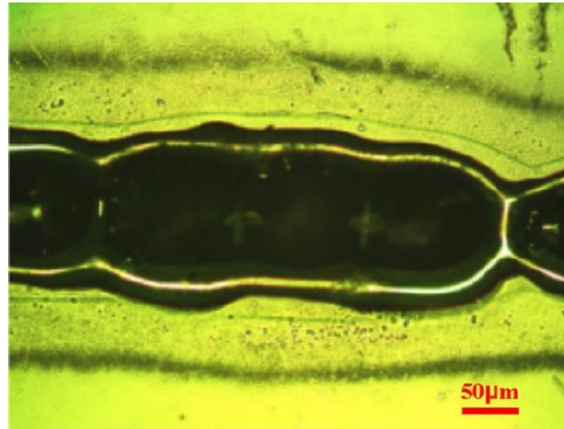


Figura 4.3 Erro de Largura. Usinagem com *laser* contínuo de CO₂.
 Fonte: Chen (2017).

Para o nível superior de número de passes, observa-se que a alteração da energia apresenta uma diferença de médias amostrais ligeiramente superior ao intervalo de larguras observadas para este parâmetro de usinagem. Mas ainda assim o efeito é pouco significativo em comparação ao efeito principal de sobreposição.

A Figura 4.4 apresenta o mesmo resultado sob a perspectiva da energia: como a largura varia quando se mantém a energia constante e altera-se o número de passes.

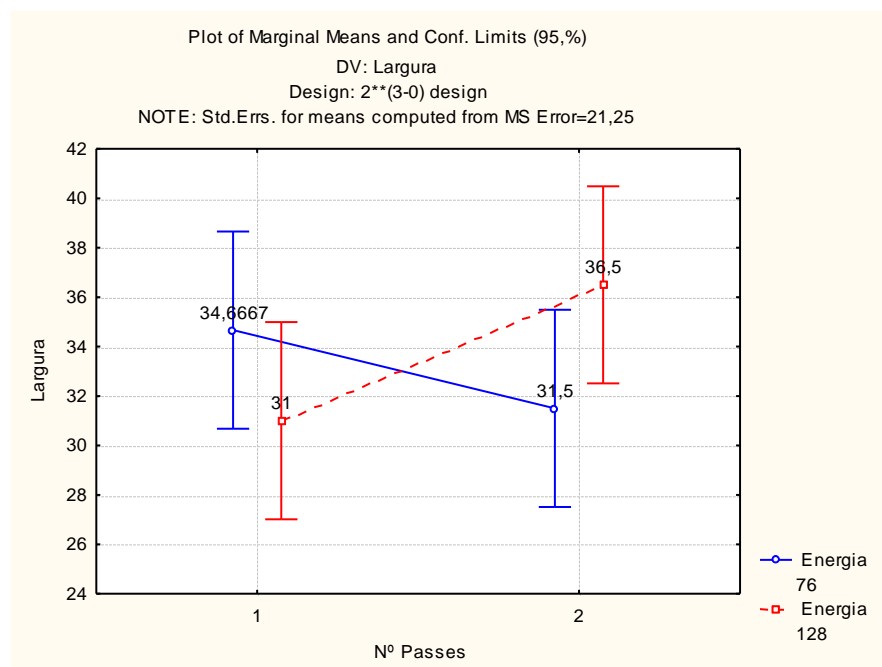


Figura 4.4 Resultados para interação entre a Energia e o Número de Passes. Alteração do Número de Passes para a mesma Energia
 Fonte: autoria própria

Conforme visto na Figura 4.4, para o nível inferior de energia ($76\mu\text{J}$), a diferença das médias amostrais não permite concluir que a alteração no número de passes exerce um efeito significativo sobre a largura, pois tal diferença é menor que o erro padrão do efeito de interação “Energia x Número de Passes”.

A Figura 4.5 apresenta os resultados obtidos pela variação dos três parâmetros em conjunto. Novamente tem-se uma redução da largura do microcanal quando se altera o número de passes para uma energia e sobreposição em níveis inferiores ($76\mu\text{J}$ e 50%, respectivamente) e o mesmo ocorre quando altera-se a energia para um número de passes e sobreposição nos níveis inferiores (1 passe e 50%, respectivamente).

Contudo, tal redução é ilusória. O que se observa, na realidade, é a formação de uma protuberância quando realizada a usinagem com menor entrega de energia na superfície e, quando aumentada a energia através do número de passes ou através da energia do feixe *laser*, a formação de um microcanal com largura menor que a da protuberância. Tal fenômeno é novamente mencionado quando abordados os efeitos sobre a profundidade do microcanal.

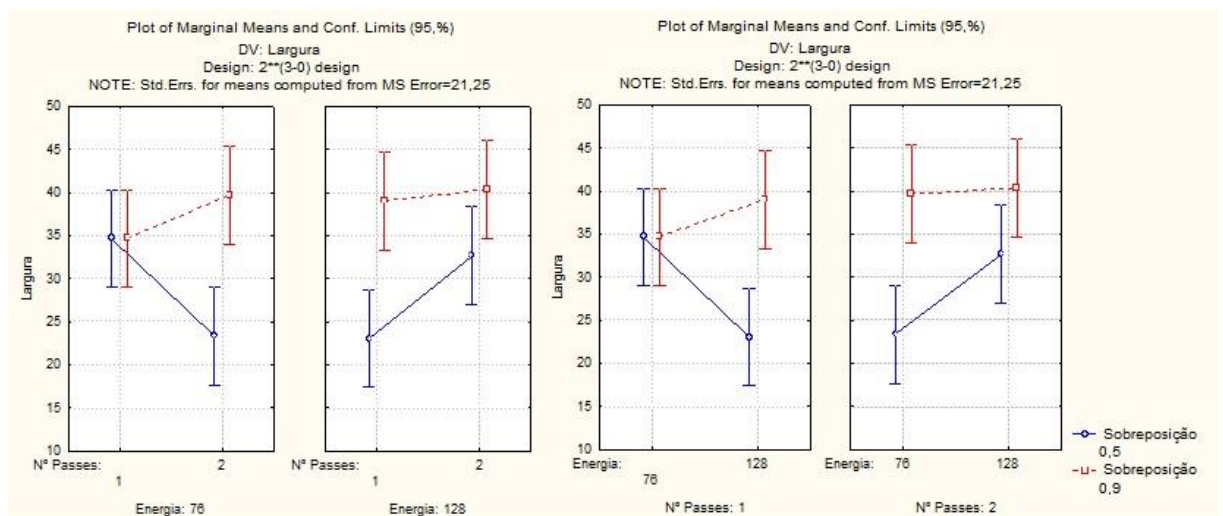


Figura 4.5 Resultados para a interação dos três parâmetros. (a) Alteração do número de passes e sobreposição para uma mesma energia. (b) Alteração da energia e sobreposição para um mesmo número de passes.

Fonte: autoria própria

Por meio da Figura 4.5 também é possível concluir que a sobreposição é o parâmetro de maior influência sobre a largura dos microcanais. Isso é evidenciado pelo fato de que, para o nível superior de sobreposição, os parâmetros “número de

passes” e “energia” apresentam influência não relevante sobre as médias amostrais, uma vez que as dispersões em torno da média se sobrepõem.

Possíveis explicações para a dispersão nos valores obtidos para a largura dos microcanais para um aumento do número de passes e da energia são a forma pela qual ocorre a ablação no policarbonato, já apresentada no Capítulo 2; e o perfil transversal do *laser*, o qual tem geometria próxima de um trapézio, conforme pode ser visualizado na imagem do ensaio preliminar de pontos, no Apêndice.

Como já discutido, os efeitos de interação dos fatores não apresentam valores expressivos, o que, aliado à elevada dispersão das medições de largura, não permite considerar tais efeitos realmente significativos.

A influência dos parâmetros de usinagem sobre a largura dos microcanais é abordada novamente no tópico 4.3, quando se discute a razão de aspecto.

4.2 Influência dos Parâmetros do *Laser* Sobre a Profundidade dos Microcanais

A análise de variância (ANOVA), apresentada na Tabela 4.3, realizada com os resultados obtidos mostra que a sobreposição, a energia e o número de passes exercem influência sobre a profundidade dos microcanais.

Observa-se também que, embora a energia seja um parâmetro cujo efeito principal é significativo, os efeitos de interação da energia com os demais fatores não o são. Isso se dá porque o efeito principal da energia, como mostra a Tabela 4.4, ainda que significativo, é pequeno em comparação aos efeitos principais dos fatores sobreposição e número de passes. Dessa forma, quando avaliado o efeito de interação entre energia e qualquer outro fator, o efeito da energia é “absorvido” pelo efeito principal do outro fator, de forma que a interação do fator energia não é observada, apenas o efeito principal do outro fator envolvido.

Tabela 4.3 – Tabela ANOVA resumida da Profundidade dos microcanais.

ANOVA; Var.:Profundidade; R-sqr=,97753 2**(3-0) design; MS Residual=6,707604 DV: Profundidade					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Sobreposição	3113,343	1	3113,343	464,1512	0,000000
(2)Energia	194,655	1	194,655	29,0201	0,000060
(3)Nº Passes	1042,143	1	1042,143	155,3673	0,000000
1 by 2	8,461	1	8,461	1,2614	0,277958
1 by 3	297,158	1	297,158	44,3017	0,000006
2 by 3	1,788	1	1,788	0,2665	0,612747
1*2*3	10,600	1	10,600	1,5803	0,226757
Error	107,322	16	6,708		
Total SS	4775,469	23			

Fonte: autoria própria

A Tabela 4.4 apresenta a quantificação dos efeitos principais e de interação de cada fator, bem como os erros padrão dos efeitos e da média global.

Tabela 4.4 – Tabela de Efeitos sobre a Profundidade.

Effect Estimates; Var.:Profundidade; R-sqr=,97753; Adj:,96 2**(3-0) design; MS Residual=6,707604 DV: Profundidade						
Factor	Effect	Std.Err.	t(16)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt
Mean/Interc.	14,66875	0,528662	27,74693	0,000000	13,54804	15,78946
(1)Sobreposição	22,77917	1,057324	21,54417	0,000000	20,53774	25,02059
(2)Energia	5,69583	1,057324	5,38703	0,000060	3,45441	7,93726
(3)Nº Passes	13,17917	1,057324	12,46464	0,000000	10,93774	15,42059
1 by 2	1,18750	1,057324	1,12312	0,277958	-1,05393	3,42893
1 by 3	7,03750	1,057324	6,65595	0,000006	4,79607	9,27893
2 by 3	-0,54583	1,057324	-0,51624	0,612747	-2,78726	1,69559
1*2*3	1,32917	1,057324	1,25710	0,226757	-0,91226	3,57059

Fonte: autoria própria

A Figura 4.6 apresenta os resultados obtidos pela variação da energia do feixe laser. A diferença entre as médias amostrais é grande o suficiente para que se considere o efeito principal relevante, pois as dispersões em torno das médias não se sobrepõem. Contudo, esse efeito não exerce tão importante papel quanto o efeito da sobreposição porque, como apresentado na Tabela 4.4, o nível de significância estatística desta última variável é maior.

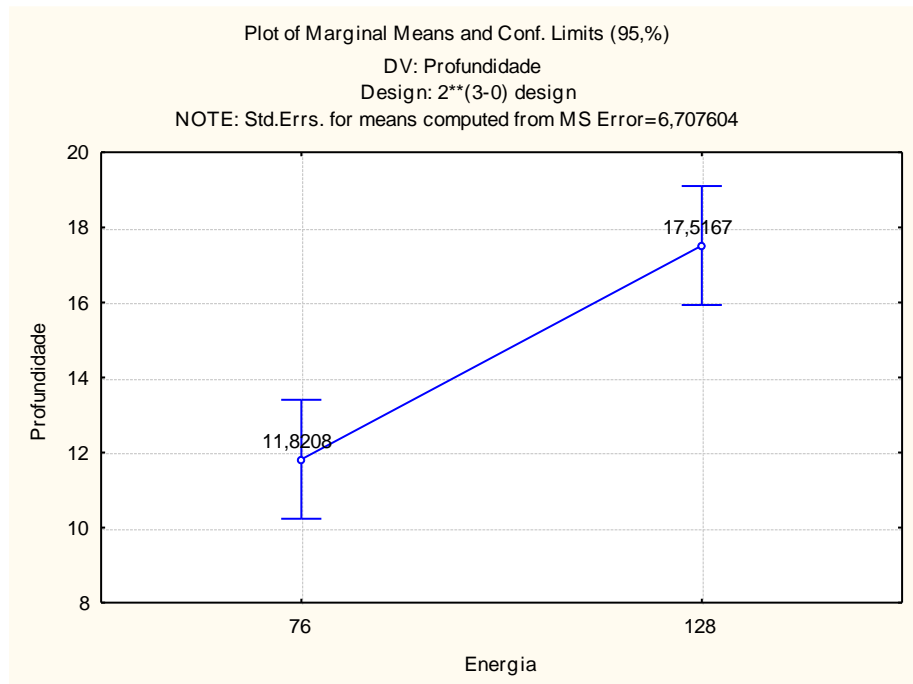


Figura 4.6 Resultados para a variação da energia sobre a profundidade.

Fonte: autoria própria

Heng Qi (2009) dirigiu estudos de usinagem de policarbonato com laser de CO₂, contínuo, nos quais estudou a influência da velocidade de deslocamento da amostra e da potência sobre a profundidade, a largura e a razão de aspecto dos microcanais.

Mediante os resultados obtidos por Qi, pode-se concluir que a taxa de remoção de material está atrelada à energia entregue à superfície, visto que as maiores profundidades e larguras ocorreram quando a velocidade de deslocamento era menor e a potência, maior. O controle da potência aplicado por Qi, tal como explicado no Capítulo 2, é semelhante ao controle da energia do feixe *laser* aplicado nesse trabalho.

O parâmetro “energia” não exerce tanta influência quantos os demais parâmetros porque um aumento desta não acarreta num aumento de energia de usinagem tão significativo quanto um aumento no número de passes, por exemplo. Por isso, a partir dos resultados obtidos, observa-se na Figura 4.7 que o aumento médio da profundidade dos microcanais é maior quando se aumenta o número de passes que quando se aumenta a energia do feixe.

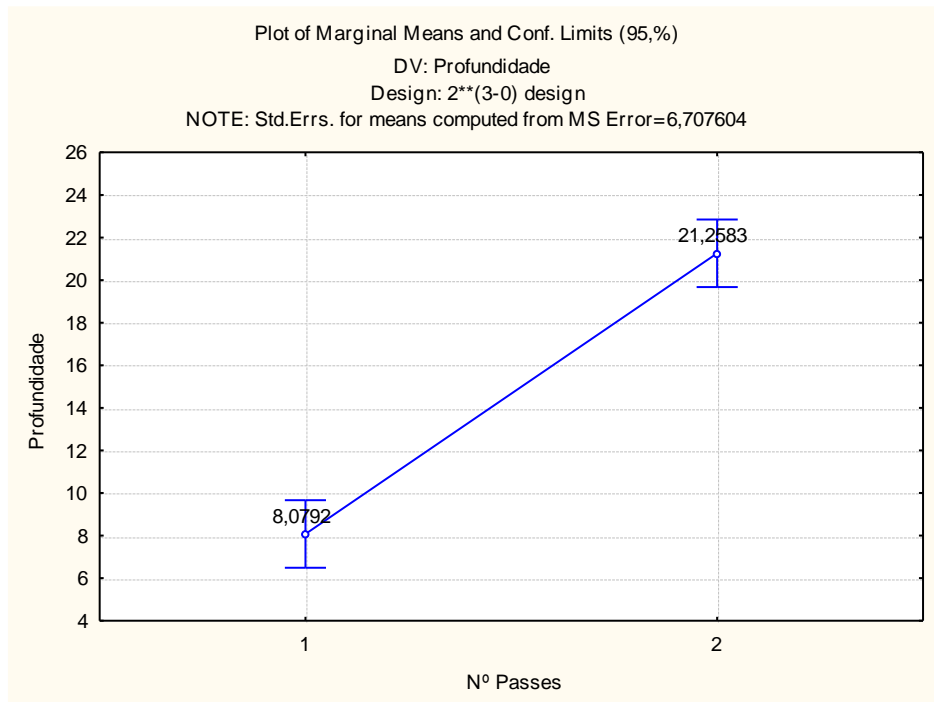


Figura 4.7 Resultados para a variação do número de passes sobre a profundidade.

Fonte: autoria própria

Conforme mostra a Figura 4.7, aumentando-se o número de passes, a média amostral das profundidades aumentou cerca de $13\mu\text{m}$. Já na Figura 4.6, observa-se que o aumento de energia causa um ganho de aproximadamente $5,7\mu\text{m}$ de profundidade.

Para a variação de sobreposição, o aumento de energia entregue à superfície é ainda maior. Como visto na tabela ANOVA resumida (Tabela 4.3), a soma dos quadrados dos desvios mostra que a sobreposição é o parâmetro de maior influência. A Figura 4.8 mostra as profundidades nos dois níveis. O aumento médio de profundidade é de $22,7\mu\text{m}$ quando aumentada a sobreposição.

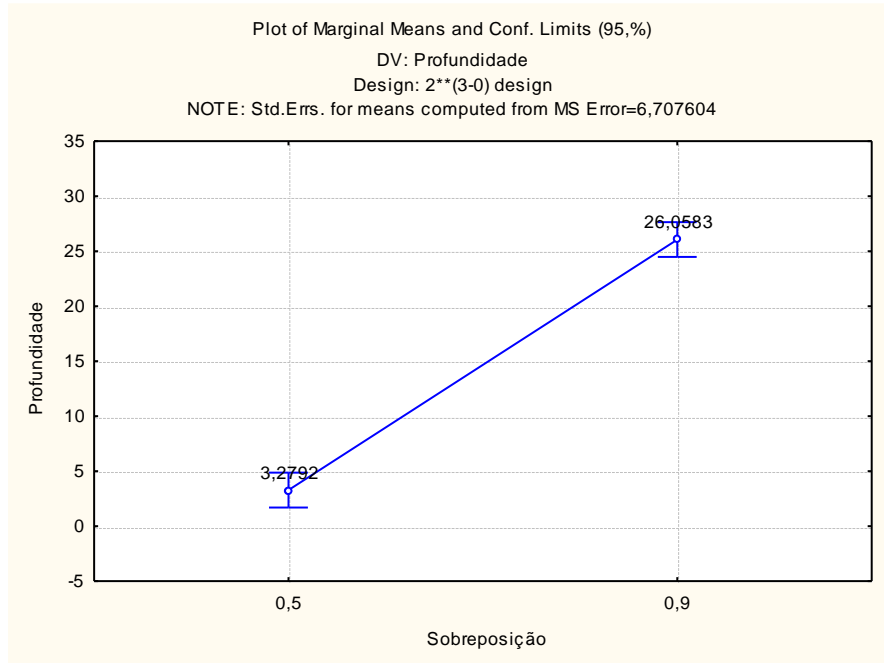


Figura 4.8 Resultados para a variação da sobreposição sobre a profundidade.

Fonte: autoria própria

A Figura 4.9 mostra como a influência da sobreposição sobrepõe à da energia. E a Figura 4.10 mostra o mesmo, para o número de passes.

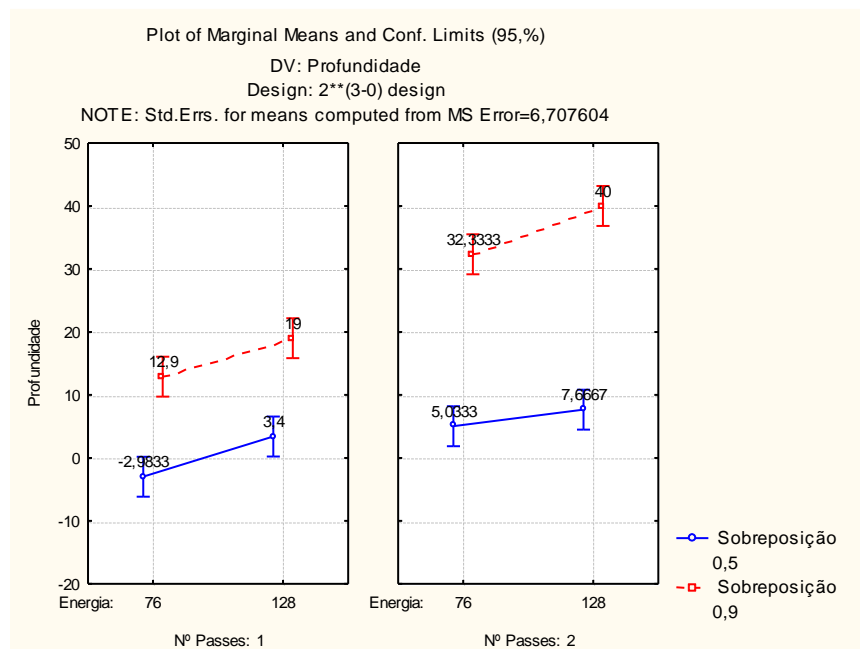


Figura 4.9 Resultados para a variação da combinação dos fatores sobreposição e energia, para um mesmo número de passes.

Fonte: autoria própria

Nota-se, na Figura 4.9, que para um mesmo número de passes, a mudança de energia não altera tanto as profundidades médias quanto a mudança de sobreposição.

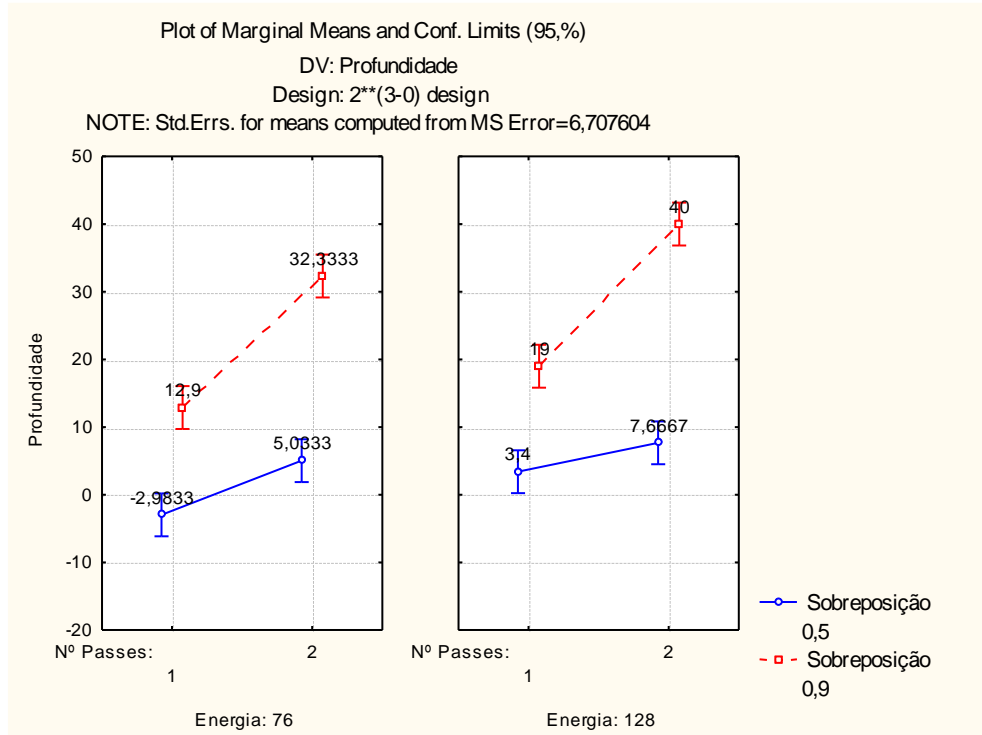


Figura 4.10 Resultados para a variação da combinação dos fatores sobreposição e energia, para um mesmo número de passes.

Fonte: autoria própria

Semelhante à Figura 4.9, é possível verificar na Figura 4.10 que para uma mesma energia, a mudança do número de passes não altera tanto as profundidades médias quanto a mudança de sobreposição.

Um fenômeno observado nos resultados obtidos, quando definidos todos os parâmetros em seu menor nível (1 passe, 76µJ de energia e 50% de sobreposição), é a formação de uma pequena protuberância na superfície do material. Tal fenômeno também é observado por Qi e explicado pelo fato de que não há tempo suficiente para o calor irradiado sobre a superfície produzir material fundido na quantidade necessária para formar um microcanal (Heng Qi, 2009). Hashimoto (2017) realiza um estudo de colagem de PC com uso de lâmpada de luz ultra-violeta, à vácuo, e também relata que, para determinada fluência irradiada, há formação de protuberâncias que elevam a rugosidade superficial das amostras, conforme mostra a Figura 4.11.

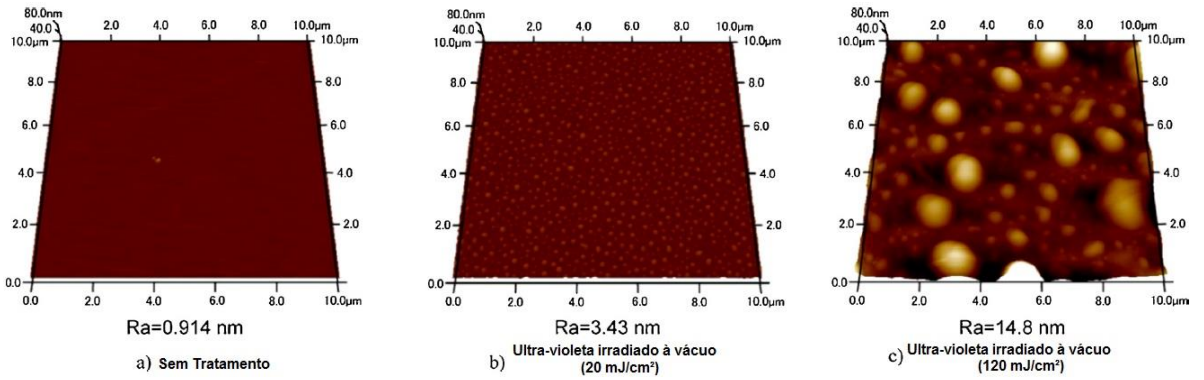


Figura 4.11 Protuberância formada pela irradiação de UV à vácuo sobre amostras de PC.

Fonte: autoria própria

A Figura 4.12 apresenta a medição de uma amostra na qual ocorreu a protuberância na superfície.

Conforme explicado por Qi (2009), para uma combinação dos parâmetros de usinagem onde pouca energia é irradiada sobre a superfície, em função dos fenômenos de transferência de calor, não há tempo suficiente para o calor produzir material fundido em quantidade bastante para gerar um microcanal.

Então uma possível explicação para a formação da protuberância é a consequência da vaporização, fusão e resfriamento rápido do material. O aquecimento rápido, ejeção de material por vaporização e fusão do material provocam a deposição de material sobre a superfície.

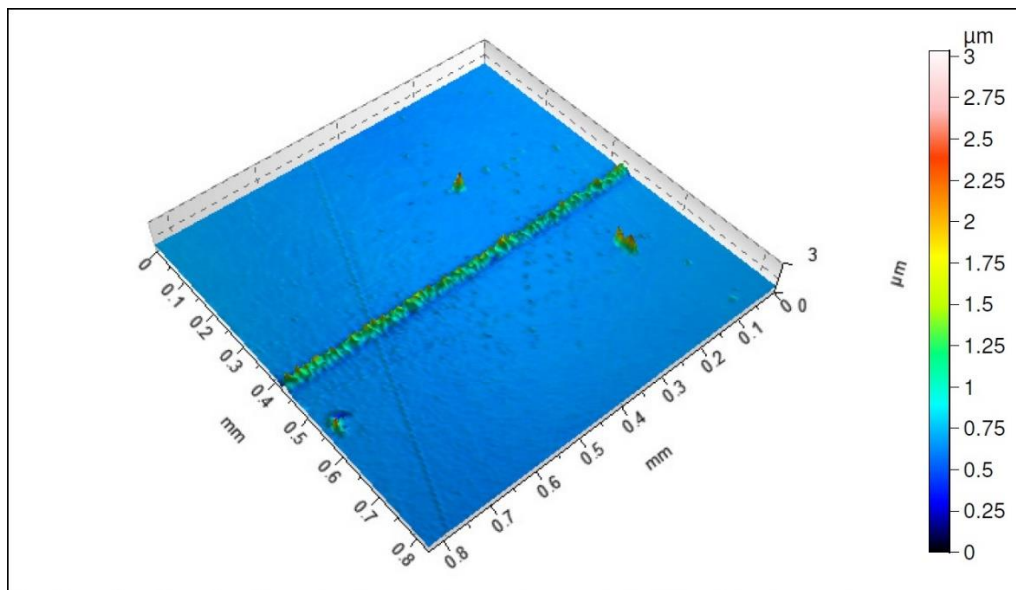


Figura 4.12 Protuberância formada na usinagem com os parâmetros em nível inferior.

Fonte: autoria própria

Por outro lado, quando irradiado calor o suficiente na superfície do policarbonato, o calor permanece no local tempo suficiente para que o material fundido produza um microcanal, aliado aos mecanismos fotoquímicos e foto-térmicos que produzem quebra de ligações do polímero.

A formação da protuberância, quando utilizada uma combinação com baixa irradiação de energia, é uma possível explicação para a redução da largura quando aumentada a potência para uma baixa sobreposição e baixo número de passes, observada no tópico 4.1. Logo, a hipótese levantada é que os processos de ablação foto-térmica e fotoquímica contribuem para deposição de material na lateral do microcanal formado.

Observou-se, mediante resultados obtidos nos ensaios, que quando se acrescenta um passe de usinagem o resultado obtido é um microcanal. Portanto, admitindo que um primeiro passe na condição de menor entrega de energia à superfície resulta na formação de uma protuberância, tem-se que o segundo passe incide sobre essa protuberância e causa a usinagem da mesma, através dos fenômenos termofísicos mencionados, e resulta em um microcanal com pequena profundidade e menor largura que os microcanais obtidos nas demais condições. A Figura 4.13 mostra o microcanal obtido.

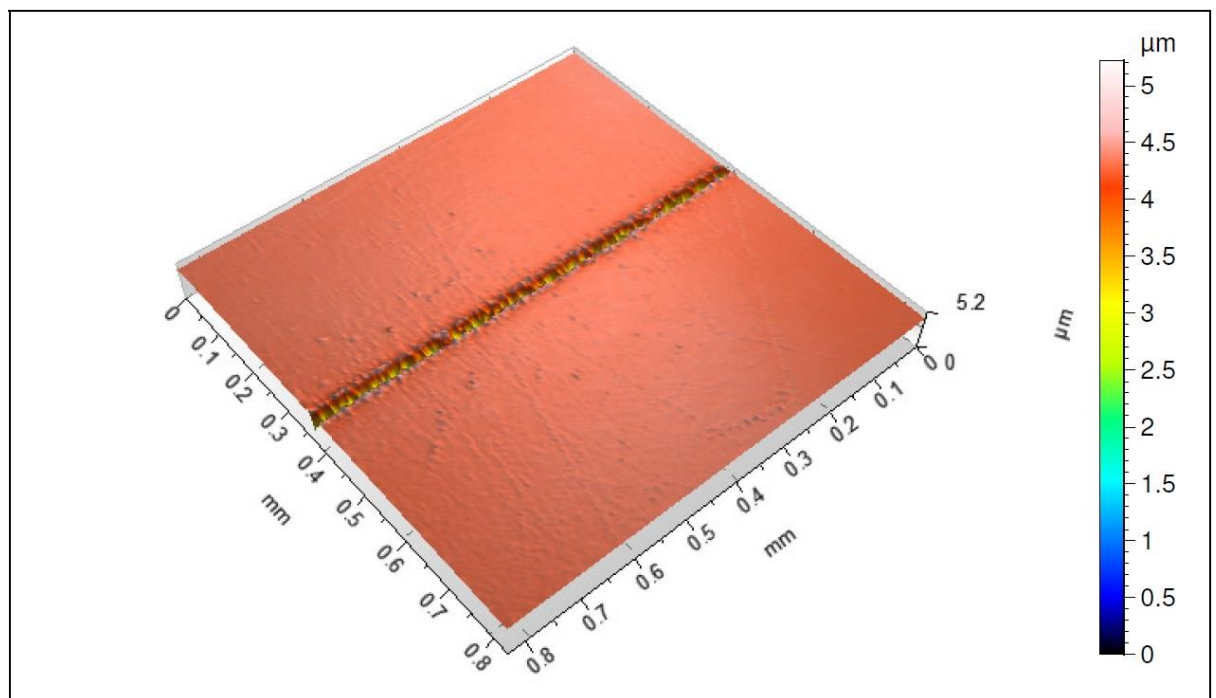


Figura 4.13 Microcanal formado com dois passes na condição de menor energia

Fonte: autoria própria

A partir dessa observação, percebe-se que a redução de largura abordada no tópico 4.1 é, como mencionado, ilusória. Pois a largura medida na condição de menor energia é referente à largura da protuberância, e não de um microcanal. Logo, o que ocorre ao se realizar um pequeno aumento de energia através do número de passes ou da potência, é a formação de um microcanal cuja largura é menor que a da protuberância.

Dos resultados apresentados, levanta-se a hipótese de que é possível utilizar um feixe *laser* com baixa energia e conseguir uma taxa de remoção de material mais alta através de uma grande sobreposição; entretanto a consequência é um maior tempo de usinagem. Ainda seria possível utilizar uma sobreposição menor (maior velocidade de usinagem) e utilizar um número maior de passes, para manter a taxa de remoção de material.

Tal hipótese é importante porque viabiliza o planejamento de futuros estudos com finalidade de especificar os parâmetros de usinagem em função da geometria desejada para o microcanal e do tempo de processo.

4.3 Influência dos Parâmetros do Laser Sobre a Razão de Aspecto dos Microcanais

Outra característica importante a ser analisada é a razão de aspecto, definida pela razão da profundidade pela largura do microcanal.

O estudo da razão de aspecto permite avaliar o quão profundo um microcanal é em termos de largura, isto é, se um microcanal possui dimensões de profundidade maiores que as dimensões de largura;

Os ensaios realizados por Qi (2009) mostram que, para velocidades de deslocamento menores e maior potência, a profundidade do microcanal é maior, assim como a razão de aspecto. Isso indica que uma condição de usinagem com maior deposição de energia sobre a superfície resulta em maior remoção de material. Como a razão de aspecto aumenta, significa que a profundidade aumenta mais que a largura. Porém Qi observa que para cada nível de velocidade de deslocamento, a razão de aspecto chega a uma assíntota à medida que a potência aumenta, o que é ilustrado na Figura 4.14. A explicação proposta por Qi é que a partir de determinado nível de potência utilizada, o fenômeno de fusão do material causa mais impacto nas laterais do microcanal que na profundidade.

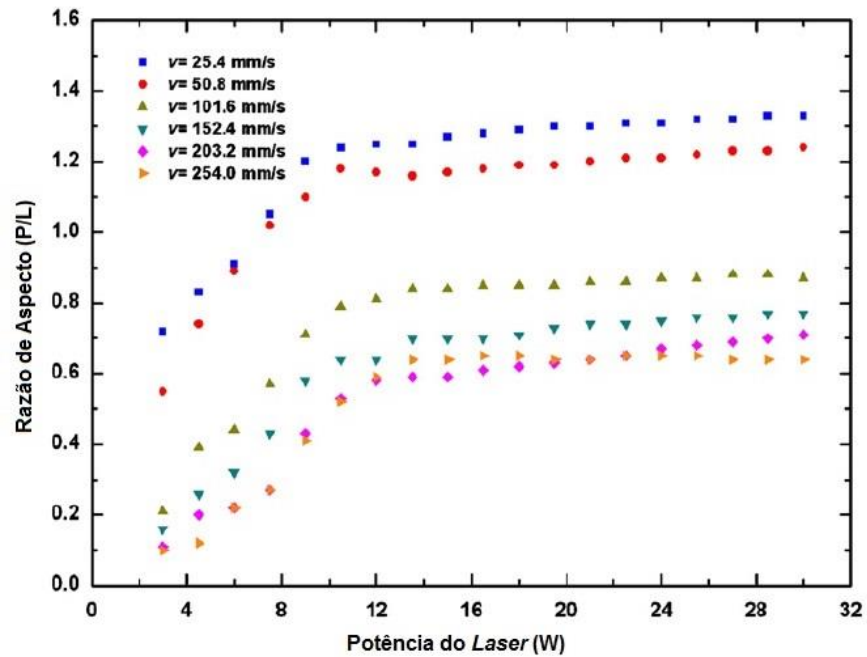


Figura 4.14 Razão de Aspecto obtida por Qi pela variação da potência e velocidade de deslocamento.

Fonte: Heng Qi (2009).

Os resultados obtidos com a usinagem por *laser* UV mostram que: de maneira semelhante à profundidade, os parâmetros que influenciaram os resultados da razão de aspecto foram a sobreposição, a energia e o número de passes, de forma independente; e a combinação da sobreposição com o número de passes.

A Tabela 4.5 apresenta a análise de variância dos resultados obtidos, a partir dos quais inferiu-se qual a influência dos parâmetros de usinagem sobre a razão de aspecto.

Tabela 4.5 – Tabela ANOVA resumida para a Razão de Aspecto.

ANOVA; Var.:Razao Aspecto [P/L]; R-sqr= 2**(3-0) design; MS Residual=,0085523 DV: Razao Aspecto [P/L]					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Sobreposição	1,514791	1	1,514791	177,1211	0,000000
(2)Energia	0,060996	1	0,060996	7,1321	0,016750
(3)Nº Passes	0,537901	1	0,537901	62,8956	0,000001
1 by 2	0,019525	1	0,019525	2,2830	0,150293
1 by 3	0,222158	1	0,222158	25,9764	0,000108
2 by 3	0,000611	1	0,000611	0,0714	0,792724
1*2*3	0,006725	1	0,006725	0,7864	0,388333
Error	0,136837	16	0,008552		
Total SS	2,499543	23			

Fonte: autoria própria

Conforme pode-se ver na Tabela 4.5, dentre os parâmetros mencionados, a sobreposição desempenha o papel mais importante, pois apresenta menor nível de significância estatística (menor p-valor).

A Figura 4.15 apresenta as médias amostrais das razões de aspecto obtidas pela variação conjunta dos três fatores de forma a avaliar a influência da alteração da sobreposição e do número de passes para um nível fixo de energia.

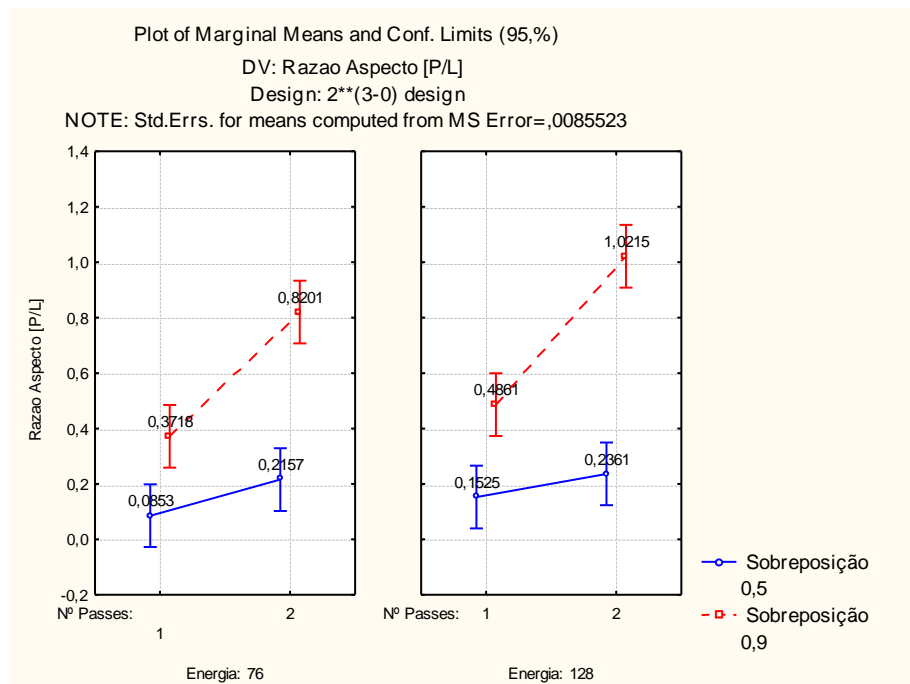


Figura 4.15 Resultados para a variação da combinação dos fatores sobreposição e número de passes, para uma mesma energia.

Fonte: autoria própria

É possível concluir, através da Figura 4.15, que o número de passes apenas influencia na razão de aspecto quando a sobreposição está no nível superior.

A Figura 4.16 apresenta as médias amostrais das razões de aspecto obtidas pela variação conjunta da sobreposição e da energia para um mesmo número de passes.

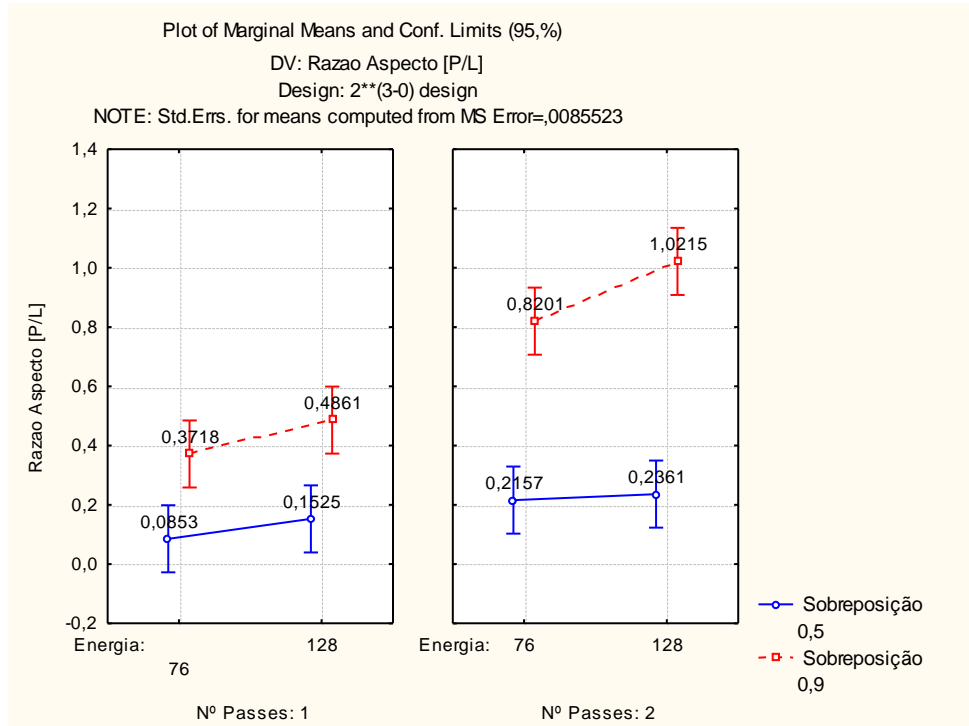


Figura 4.16 Resultados para a variação da combinação dos fatores sobreposição e energia, para um mesmo número de passes
 Fonte: autoria própria

Da mesma maneira, pela Figura 4.16 conclui-se que a energia apenas influencia na razão de aspecto quando os outros dois fatores estão nos níveis superiores.

A Tabela 4.6 dispõe a quantificação dos efeitos principais e de interação dos parâmetros de usinagem sobre a razão de aspecto.

Tabela 4.6 – Efeitos quantificados dos parâmetros sobre a Razão de Aspecto.

Factor	Effect Estimates; Var.:Razao Aspecto [P/L]; R-sqr=,94526; A 2**(3-0) design; MS Residual=,0085523 DV: Razao Aspecto [P/L]					
	Effect	Std.Err.	t(16)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt
Mean/Interc.	0,42364	0,01887	22,4424	0,00000	0,38363	0,46366
(1)Sobreposição	0,50245	0,03775	13,3086	0,00000	0,42242	0,58249
(2)Energia	0,10082	0,03775	2,6706	0,01675	0,02079	0,18086
(3)Nº Passes	0,29941	0,03775	7,9306	0,00000	0,21938	0,37945
1 by 2	0,05704	0,03775	1,5109	0,15029	-0,02299	0,13708
1 by 3	0,19242	0,03775	5,0967	0,00010	0,11238	0,27245
2 by 3	0,01008	0,03775	0,2672	0,79272	-0,06994	0,09012
1*2*3	0,03348	0,03775	0,8867	0,38833	-0,04655	0,11351

Fonte: autoria própria

A Tabela 4.7 apresenta um quadro que resume os resultados apresentados.

Tabela 4.7 – Quadro resumo dos resultados

Variável de Entrada	Profundidade	Largura	Razão de Aspecto
Sobreposição	↑↑↑	↑↑↑	↑↑↑
Número de Passes	↑↑	—	↑↑
Energia	↑	—	↑
Sobrep. X N ^o Passes	↑	—	↑
Sobrep. X Energia	—	—	—
Energia x N ^o de Passes	—	—	—

↑↑↑	Influência principal na resposta de saída
↑↑	Influência secundária na resposta de saída
↑	Pouca influência na resposta de saída
—	Sem influência na resposta de saída

Fonte: autoria própria

5 CONCLUSÕES

Para avaliar o uso de *laser* ultravioleta para usinagem de policarbonato realizaram-se ensaios preliminares em acrílico (PMMA) e policarbonato (PC) e compararam-se os resultados. Posteriormente, realizaram-se ensaios de usinagem no PC seguindo o planejamento fatorial completo definido, a fim de identificar a influência dos parâmetros de usinagem no processo.

Do estudo feito, comprovou-se que o conceito de entrega de energia na superfície usinada apresentado pela Equação 2.1 e conceito de quantificação do calor de usinagem proposto pela Equação 2.2 podem ser aplicados aos resultados obtidos. Verificando-se que valores maiores de sobreposição, número de passes e energia do feixe utilizados produziram microcanais com maior profundidade e largura, conhecendo que tais parâmetros compreendem um processo de usinagem com maior energia entregue à superfície (resultando em maior calor durante a ablação).

Para compreensão facilitada, os apontamentos seguintes obedecem à sequência da discussão dos resultados:

5.1 Viabilidade de usinagem do policarbonato com *laser* de nitrogênio

- Em comparação ao sistema de usinagem encontrado com mais frequência na literatura (uso de *laser* de CO₂, com feixe contínuo, no comprimento de onda na região de infravermelho), a usinagem de microcanais em amostras de policarbonato com uso de *laser* de N₂, pulsado, com comprimento de onda na região do ultra-violeta, é viável. Os microcanais obtidos apresentam pouca dispersão nas medições de profundidade em comparação aos obtidos em PMMA, e o sistema de usinagem é mais barato que o da literatura;

5.2 Influência dos parâmetros sobre a Largura

- Por meio dos gráficos apresentados, verifica-se que a sobreposição é o parâmetro de maior influência sobre a largura dos microcanais. O que indica maior largura quando aplicada mais energia à usinagem e, portanto, maior remoção de material;
- Os fatores “energia” e “número de passes” apenas apresentaram influência sobre a largura dos microcanais quando combinados entre si ou quando

combinados os três fatores principais; o que permite ajustar a largura através do controle da sobreposição, apenas, com maior remoção de material, ou então dos demais fatores, com menor remoção;

5.3 Influência dos parâmetros sobre a Profundidade

- A sobreposição é o fator de maior influência também sobre a profundidade dos microcanais; portanto o aumento da sobreposição dos pulsos tem maior capacidade de aumentar a quantidade de energia por área (portanto, mais fluência) que o aumento de energia do feixe ou aumento de número de passes;
- O número de passes é o fator que apareceu com segunda maior influência sobre a profundidade dos microcanais, o que significa que tal parâmetro apresenta também importante influência na quantidade de calor da usinagem, podendo ser utilizado como método de ajuste em um planejamento de usinagem com *laser*;
- A energia do feixe *laser* também apresentou impacto nas médias amostrais de profundidade, porém os efeitos de interação entre a energia e demais fatores não se mostraram significantes, o que indica que a energia não influencia tanto quanto os demais parâmetros, sendo um fator com menor peso quando aplicado na Equação 2.1;

5.4 Influência dos parâmetros sobre a Razão de Aspecto

- Mediante a análise da razão de aspecto, observa-se que, para os níveis de energia de usinagem adotados, a sobreposição exerce maior influência sobre a profundidade do microcanal que sobre a largura.
- Observando que os efeitos principais do número de passes e da energia influenciam a profundidade, porém não a largura; e observando-se também a influência da variação combinada da sobreposição e número de passes sobre as respostas obtidas para a razão de aspecto, verifica-se que é possível utilizar o número de passes como recurso de ajuste da razão de aspecto, uma vez que permite aumentar mais a profundidade que a largura;

5.5 Conclusões sobre o sistema de usinagem como um todo

Conclui-se que a usinagem dos microcanais é regida pela quantidade de energia transmitida pelo feixe *laser* à superfície. Tal energia, como descrito no processo de

ablação, é transformada em calor, ou absorvida num processo de excitação de elétrons e quebra de ligações químicas.

Sugestão para estudos futuros:

- Há diferença entre utilizar a mesma quantidade de energia de usinagem aplicada mediante sobreposição ou número de passes?
- Por meio do aumento da razão de aspecto, verificou-se que a quantidade de energia, nos níveis experimentais adotados, influencia mais na profundidade que na largura. Para as condições do sistema de usinagem proposto, tal hipótese é sempre válida ou há um valor assintótico para o aumento da razão de aspecto, conforme apresentado por Qi (2009)?

6 REFERÊNCIAS

BARROS NETO, Benício de. **Como Fazer Experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**. Editora da Unicamp. 2001. Campinas, SP.

BAUDACH, S. **Ultrashort pulse laser ablation of polycarbonate and polymethylmethacrylate**. Elsevier, 1999.

CHEN, Tai-Chang. **Laser micromachining of the materials using in microfluidics by high precision pulsed near and mid-ultraviolet Nd:YAG lasers**. Elsevier, 2008.

CHEN, Xueye. **An effective method for fabricating microchannels on the polycarbonate (PC) substrate with CO2 laser**. Elsevier, 2017.

CHOUDHURY, I.A. **Laser cutting of polymeric materials: An experimental investigation**. Elsevier, 2010.

D. W. Ball, **Field Guide to Spectroscopy**, SPIE Press, Bellingham, WA (2006). Disponível em <http://spie.org/x32409.xml>. Acesso: 24 de outubro de 2014;

FADAEI, Hossein. **Rapid Microfluidics-Based Measurement of CO2 Diffusivity in Bitumen**. Energy&Fuels, 2011.

GALETI, José Henrique. **Medição Interferométrica de Fase Óptica através do Método de Segmentação do Sinal Amostrado**. Unesp, 2012. Disponível em: http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/pos-graduacao/323-dissertacao_josehgaleti.pdf . Acesso: 24 de outubro de 2014;

GANS, Fabrício A; Kobeling, Tatiana M. **Usinagem A Laser Em Materiais Poliméricos Para Produção De Biochips**. Sicite, 2010.

GLENN JR., Roberts. "An Impressive and Growing Array of Lasers at SLAC".2013. Disponível em: <http://www6.slac.stanford.edu/news/2013-02-27-slac-lasers-group.aspx>. Acesso: 24 de outubro de 2014;

GOODFELLOW – Fornecedor de materiais para pesquisas e desenvolvimento. www.goodfellow.com, Acessado em novembro de 2017.

HASHIMOTO, Yuki. **Solid state direct bonding of polymers by vacuum ultraviolet lightbelow 160 nm**. Elsevier, 2017.

HECHT, Jeff. **Understanding Lasers: An Entry-Level Guide**. IEEE PRESS Marketing, 1992. USA.

KALDOS, A. **Laser machining in die making—a modern rapid tooling process**. Elsevier, 2004.

- KNOWLES, M.R.H. **Micro-machining of metals, ceramics and polymers using nanosecond lasers**. Springer-Verlag London Limited, 2007.
- KOUKETSU, Fernanda. **Caracterização de Revestimentos Submetidos ao Desgaste por Movimento Recíproco Utilizando a Técnica de Interferometria**. UTFPR, 2015.
- LASERTO. **Laser Conhecimento Segurança**. Disponível em: <http://pt.laserto.com/laser-safety-knowledge/>. Acesso: 24 de outubro de 2014;
- LEE, Gwo-Bin. **Microfabricated plastic chips by hot embossing methods and their applications for DNA separation and detection**. Elsevier, 2001.
- LIM, Daniel. **Fabrication of microfluidic mixers and artificial vasculatures using a high-brightness diode-pumped Nd:YAG laser direct write method**. The Royal Society of Chemistry, 2003.
- LIU, Kan. **PMMA microfluidic chip fabrication using laser ablation and low temperature bonding with OCA film and LOCA**. Springer, 2016.
- MACHADO, Leandro M. **D-Scan measurement of ablation threshold incubation effects for ultrashort laser pulses**. Optics Express, 2012
- MACHADO, Leandro M. **Usinagem Microcanais para uso em MicroFluídica**. Cobef, 2011.
- MISHRA, Sanjay. **Laser Beam MicroMachining (LBMM) – A Review**. Elsevier, 2015.
- MORADI, Mahmoud. **Enhancement of low power CO₂ laser cutting process for injection molded polycarbonate**. Elsevier, 2017.
- MUNCHERYAN, Hrand M. **Lasers Technology**. 1980. Howard W. Sams & Co, Inc. Indianápolis, Indiana.
- PRAKASH, Shashi. **Fabrication of microchannels: A review**. Journal of Engineering Manufacture, 2014.
- QI, Heng. **Micromachining of microchannel on the polycarbonate substrate with CO₂ laser direct-writing ablation**. Elsevier, 2009.
- RUSSO, Richard E. **Laser Ablation**. Lawrence Berkley National Laboratory. Berkley, California 1995.
- SANTOS, Joaquim C. Pizzutti dos. **Comportamento ótico dos policarbonatos translúcidos frente à radiação solar**. X Encontro Nacional e VI Encontro Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído, 2009.
- SCHNEIDER, Leonardo B. **Desenvolvimento de um Chip Microfluídico para Diagnósticos em Saúde Pública: Prova de Conceito**. UFPR, 2010.
- STROOCK, Abraham. **Chaotic Mixer for Microchannels**. Science, 2002.

TSURUTA, Hisashi. **Ablation spot area and impulse characteristics of polymers induced by burst irradiation of 1 μm laser pulses**. Elsevier, 2017.

USP. **Propriedades Térmicas e Ópticas do Materiais**. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. 2005.

Vieira, Áquila. **Polimetilmetacrilato**. Faculdade de Aracruz, 2006.
Disponível em
<http://www.faacz.com.br/revistaeletronica/links/edicoes/2006_02/edutec_aquila_polimetilmetacrilato_2006_2.pdf>, acessado em novembro de 2017.

7 APÊNDICE

A Figura 7.1 apresenta um ensaio prévio da pesquisa proposta, mostrando a capacidade do sistema de usinagem a *laser* a ser utilizado e o resultado obtido com o equipamento de coleta de dados.

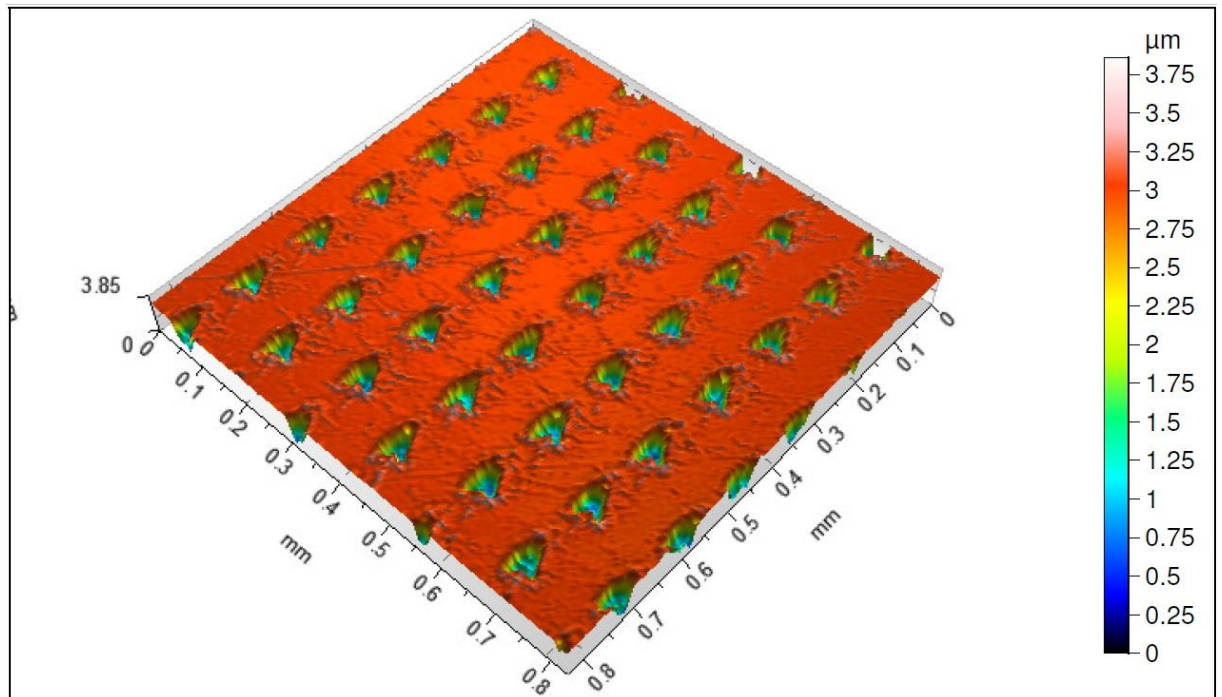


Figura 7.1 - Resultado apresentado por ensaio prévio do projeto de pesquisa.

Fonte: autoria própria.

A Figura 7.2 e a Figura 7.3 mostram um comparativo dos resultados de usinagem em policarbonato e em acrílico para algumas condições. O acrílico, na maioria das condições de usinagem, praticamente não se obtém um microcanal (Figura 8.2b); e quando é gerado um microcanal neste material, nota-se que a dispersão de largura e profundidade é grande.

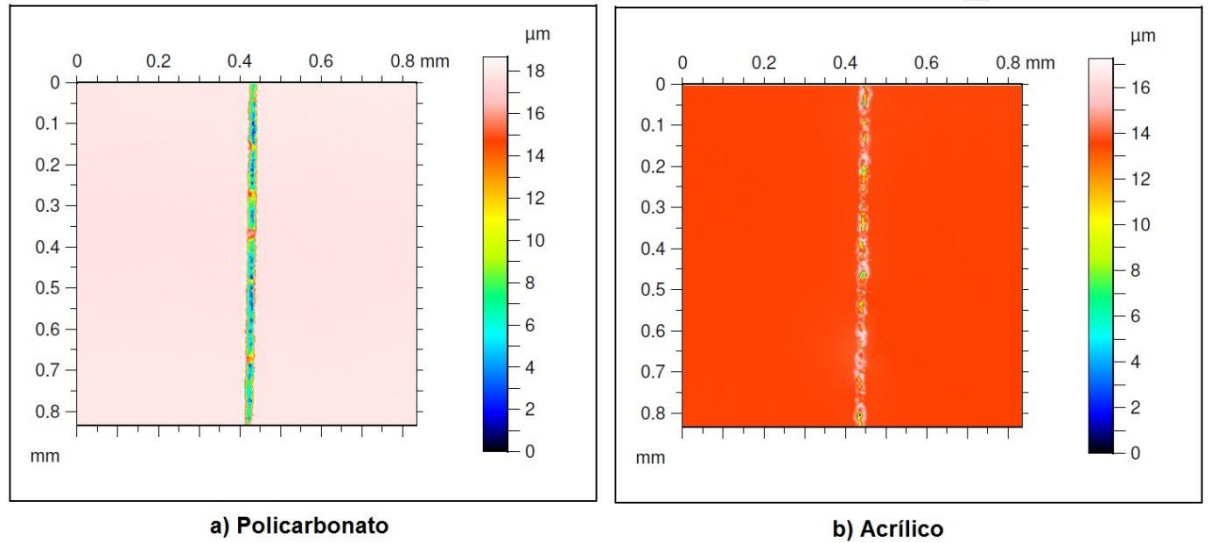


Figura 7.2 Visão superior dos microcanais obtidos em a) Polycarbonato e b) Acrílico.

Fonte: autoria própria

Observa-se que praticamente não há formação de microcanal no acrílico, em razão de ablação irregular.

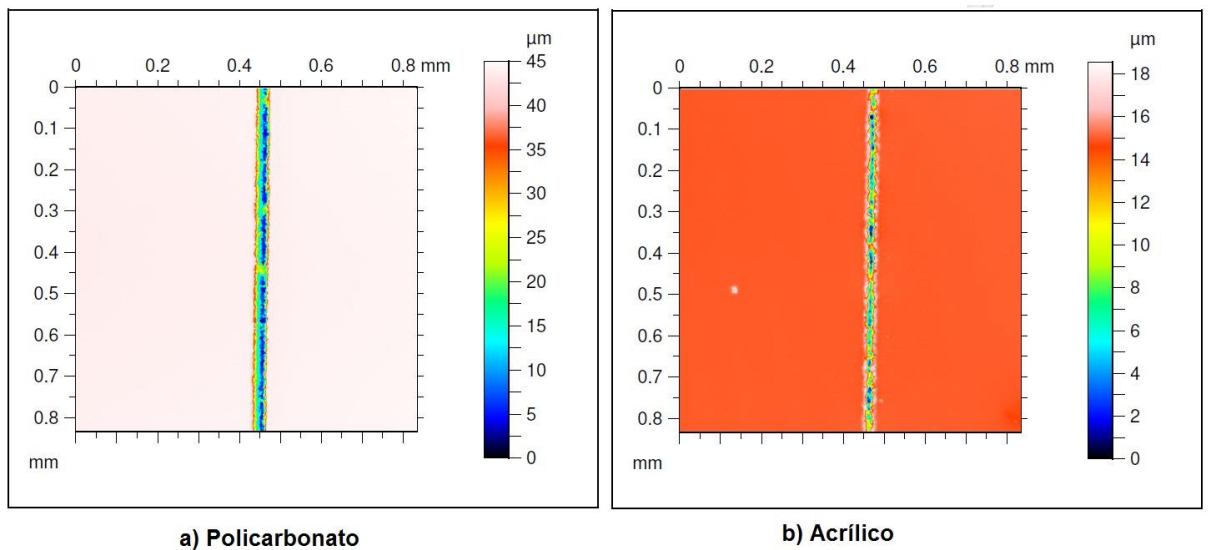


Figura 7.3 Visão superior dos microcanais obtidos em a) Polycarbonato e b) Acrílico.

Fonte: autoria própria

A Figura 7.3 apresenta uma visão em perspectiva da usinagem em PMMA e a Figura 7.4 apresenta a perspectiva da usinagem em PC; ambas apresentadas na Figura 7.2.

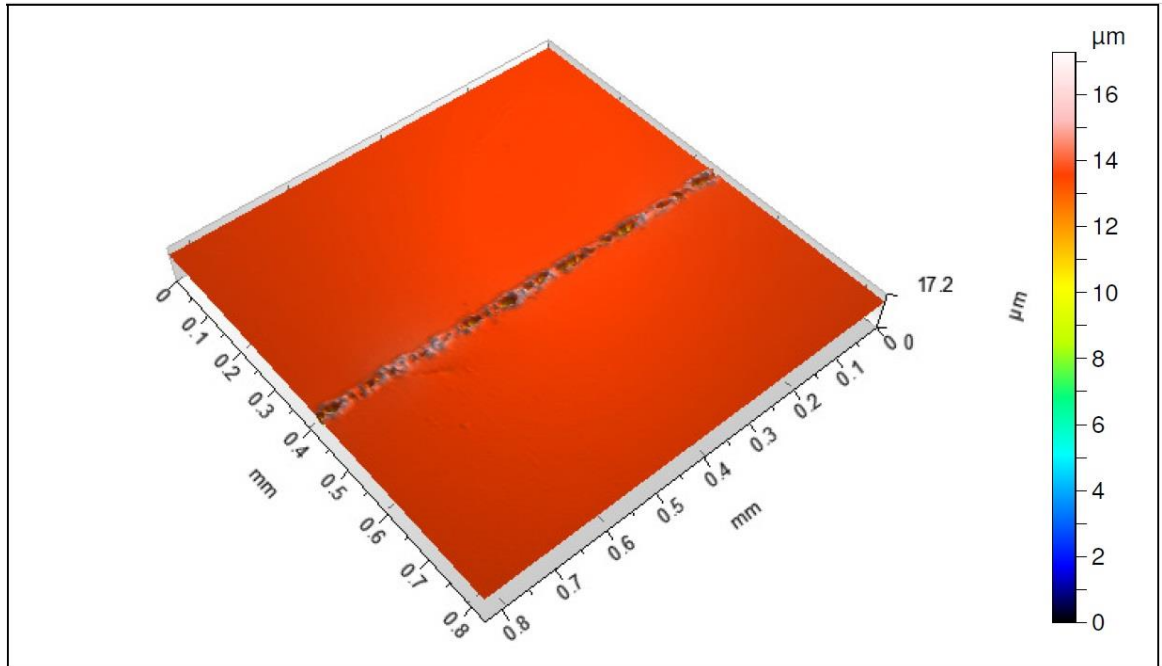


Figura 7.4 Visão em perspectiva do microcanal em PMMA.
 Fonte: autoria própria

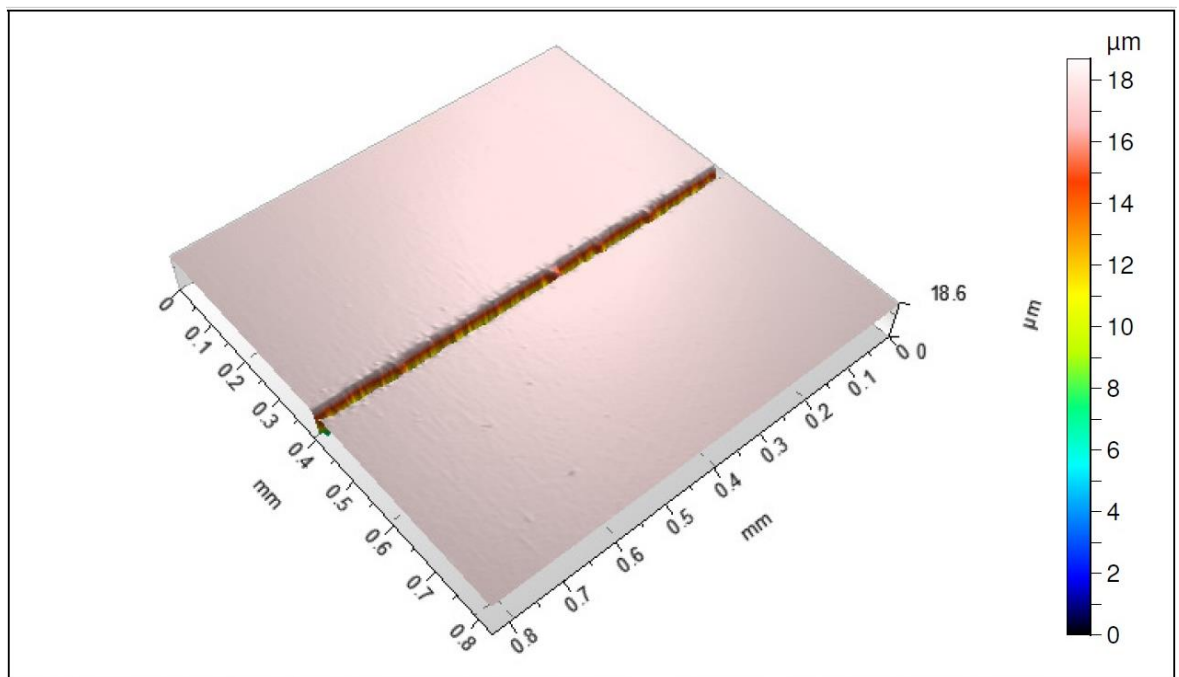


Figura 7.5 Visão em perspectiva do microcanal em PC.
 Fonte: autoria própria

A Tabela 7.1, a Tabela 7.2 e a Tabela 7.3 mostram os resultados obtidos pelas medições realizadas com o rugosímetro.

Tabela 7.1 – Resultados Amostra 1

	Amostra 1							
Exp. Número	1	2	3	4	5	6	7	8
Sobreposição	0,5	0,9	0,5	0,9	0,5	0,9	0,5	0,9
Nº Passes	1	1	1	1	2	2	2	2
Potência	76	76	128	128	76	76	128	128
Largura	35	33	26	40	27	36	36	30
Profundidade	-1	13,2	2,4	17	5,3	32	7,5	37
Razão de Aspecto	0,0285	0,400	0,0923	0,4250	0,1962	0,8889	0,2083	1,2333

Fonte: autoria própria

Tabela 7.2 – Resultados Amostra 2

	Amostra 2							
Exp. Número	1	2	3	4	5	6	7	8
Sobreposição	0,5	0,9	0,5	0,9	0,5	0,9	0,5	0,9
Nº Passes	1	1	1	1	2	2	2	2
Potência	76	76	128	128	76	76	128	128
Largura	35	34	23	35	20	38	31	41
Profundidade	-7,6	11	3,8	17	3,8	31	5,5	39
Razão de Aspecto	0,2171	0,3235	0,1652	0,4857	0,1900	0,8157	0,1774	0,9512

Fonte: autoria própria

Tabela 7.3 – Resultados Amostra 3

	Amostra 3							
Exp. Número	1	2	3	4	5	6	7	8
Sobreposição	0,5	0,9	0,5	0,9	0,5	0,9	0,5	0,9
Nº Passes	1	1	1	1	2	2	2	2
Potência	76	76	128	128	76	76	128	128
Largura	34	37	20	42	23	45	31	50
Profundidade	-0,35	14,5	4	23	6	34	10	44
Razão de Aspecto	0,0102	0,3918	0,200	0,5476	0,2608	0,7556	0,3225	0,880

Fonte: autoria própria