

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

Enrico Ferro Demarchi

Microusinagem aplicada à fabricação de elementos ópticos difrativos

São Carlos

2019



Enrico Ferro Demarchi

Microusinagem aplicada à fabricação de elementos ópticos difrativos

Monografia apresentada ao curso de Engenharia de Materiais e Manufatura, da Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Engenheiro de Materiais e Manufatura.

Orientador: Prof. Titular Renato Goulart Jasinevicius

São Carlos

2019



AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

D372m Demarchi, Enrico  
Microusinagem aplicada à fabricação de elementos ópticos difrativos / Enrico Demarchi; orientador Renato Goulart Jazinevicius. São Carlos, 2019.

Monografia (Graduação em Engenharia de Materiais e Manufatura) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2019.

1. Microfresamento. 2. PMMA. 3. RSA 6061. 4. Lente fresnel. 5. Rugosidade superficial. 6. Manufatura. I. Título.

Eduardo Graziosi Silva - CRB - 8/8907




## FOLHA DE APROVAÇÃO

<b>Candidato:</b> Enrico Ferro Demarchi
<b>Título do TCC:</b> Microusinagem aplicada à fabricação de elementos ópticos difrativos
<b>Data de defesa:</b> 07/06/2019

<b>Comissão Julgadora</b>	<b>Resultado</b>
Professor Titular Renato Goulart Jasinevicius (orientador)	APROVADO
Instituição: EESC - SEM	
Professor Doutor Alessandro Roger Rodrigues	Aprovado
Instituição: EESC - SEM	
Professor Doutor Marcel Militão Dib	Aprovado
Instituição: IFSP - Araraquara -	

Presidente da Banca: **Professor Titular Renato Goulart Jasinevicius**

  
\_\_\_\_\_  
(assinatura)





## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos professores Renato e Roger, do departamento da Engenharia Mecânica, afinal, tive a oportunidade de realizar este trabalho graças à confiança e atenção de ambos, que me apoiaram desde o meu primeiro dia de trabalho nesse projeto.

Gostaria também de agradecer especialmente ao professor Dr Marcel Militão, como também aos demais alunos da pós graduação do IMEP-USP, por todo o suporte oferecido, as dicas valiosas, e companheirismo nesse tempo.

À minha família, em especial minha mãe, minha irmã, meu pai e minha avó, por terem me dado condições de chegar à universidade e de me manter, mesmo nas dificuldades.

E claro, aos meus amigos de graduação, que me ajudaram em todos os desafios desde o início do curso. Em especial, e principalmente pela amizade além sala de aula: Gaspar, Gustavo Bertoli, Gustavo Jane, Gustavo Tosi, João Pedro, Josué, Murilo, Raul, Rodolfo.



## RESUMO

DEMARCHI, E. **Microusinagem aplicada à fabricação de elementos ópticos difrativos.** 2019. 90 p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

Atualmente, com o desenvolvimento de pesquisas, estudos e experimentos, a usinagem de ultraprecisão se consolidou como processo para aplicações especiais, tal que seu campo de aplicação vem aumentando tanto quanto a melhoria dos acabamentos conseguidos. Nessa tendência está inserida a indústria de elementos ópticos difrativos, como é o caso das lentes Fresnel, objeto de estudo do referente trabalho. Tais lentes, constituídas de polímeros para aplicação óptica, possuem em geral duas vias de manufatura: A microusinagem diretamente no polímero, ou através do processo de micromoldagem, na qual microusina-se um molde metálico. O dado trabalho estuda ambas as vias de microusinagem, em que por meio do CAD (Autodesk Inventor) realizou-se a simulação da microusinagem (Autodesk Inventor CAM) de setes diferentes modelos de moldes de alumínio RSA 6061 e de suas respectivas lentes Fresnel em PMMA, tendo as amostras microusinadas em um CNC Romi D600. Os resultados obtidos de acabamento superficial, desgaste das ferramentas e formação de cavacos, foram obtidos via análise de perfilometria óptica e análise de imagens geradas no MEV, tendo sido comparados os resultados conseguidos em ambos materiais, a fim de se compreender melhor o comportamento das variáveis envolvidas durante o processo de microusinagem do PMMA e do RSA 6061.

Palavras chave: Microfresamento, PMMA, RSA 6061, lente Fresnel, rugosidade superficial, manufatura.



## ABSTRACT

DEMARCHI, E. **Micromachining applied to the manufacturing of diffractive optical elements**. 2019. 90 p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

Nowadays, due to development in researches, studies and experiments, the ultra-precision machining became a process for special applications, for this reason its application has been increasing as much as its surface conditions reached. In this context is present in the industry of diffractive optical elements, such as Fresnel lens, object of study in this research work. This lens, made by polymer for optical applications, are commonly manufactured by two main ways: The micromachining directly on polymer, or through micromolding process, which a metallic mold is machined. This research work studies both manufacture ways, wherein through CAD software (Autodesk Inventor) the simulation has been done through Autodesk Inventor CAM, of seven different mold models of Aluminum alloy RSA 6061 and its respective fresnel lenses made by PMMA, being manufactured using a CNC Romi D600. The results obtained of surface roughness, tool wear, and chip formation has been got with optical profilometry and images generated through SEM, being compared the results in both materials, in order to understand the behavior of the variables involved during the micromachining process to PMMA and RSA 6061.

Keywords: Micromachining. PMMA. RSA 6061. Fresnel lens. Surface roughness. Manufacturing.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Desenvolvimento dos processos de usinagem ao longo do século XX. ....	30
Figura 2 - Tipos de fresamento: 1) Faceamento. 2) Cantos a 90°. 3) Perfis. 4)Cavidades. 5)Canais. 6) Tornofresamento. 7) Roscas. 8) Cortes. 9) Com altos avanços. 10)Mergulho. 11) Rampa. 12) Interpolação helicoidal. 13) Interpolação circular. 14) Trocoidal. ....	32
Figura 3 - ap e ae na operação de fresamento de topo .....	33
Figura 4 - Componentes da força de usinagem durante processo de fresamento. ....	34
Figura 5 - Espessura e formação de cavaco em fresamento concordante.....	35
Figura 6 - Espessura e formação de cavaco em fresamento discordante.....	36
Figura 7 - Espessura e formação de cavaco em fresamento de topo. ....	36
Figura 8 - Representação esquemática de lente convergente refrativa e difrativa, respectivamente. ....	37
Figura 9 - Representação esquemática de colimação de feixes de luz. ....	38
Figura 10 - Representação esquemática de coleção de feixes de luz. ....	39
Figura 11 - Esquema de processo de moldagem por compressão a quente com único molde.....	40
Figura 12 - Processo de dosagem, início de injeção, e enchimento de microcavidades. ....	42
Figura 13 - Variação do volume específico com o aumento da temperatura para polímeros amorfos e semi cristalinos.....	45
Figura 14 - Curva do Módulo bulk x Temperatura de um polímero. ....	47
Figura 15 - Curva Tensão – Deformação para vários comportamentos de polímeros.....	48
Figura 16 - Modelo esquemático de uma fendilha próxima ao final de uma trinca em polímero vítreo. ....	49
Figura 17 - Representação esquemática sobre translucidez dos polímeros. ....	51
Figura 18 - Comportamento da luz nas interfaces das regiões cristalinas. ....	52
Figura 19 - Estrutura do monômero e do polímero de PMMA. ....	54
Figura 20 - ROMI D 600 acoplado com spindle de 50000 rpm. ....	57
Figura 21 - OLYMPUS LEXT OLS4100.....	57
Figura 22 - Amostras a serem microfresadas, de RSA e PMMA, respectivamente.....	58
Figura 23 - Suporte de fixação para microfresagem de amostras de RSA 6061. ....	58
Figura 24 - Amostras de RSA 6061 após polimento com pasta de diamante.....	59
Figura 25 - Polimento com Si coloidal. ....	60
Figura 26 - Estrutura dos grãos do RSA6061 em ataques comuns e com reagente de Weck.....	61
Figura 27 - Vista em meio corte dos modelos projetados de lente (PMMA) e seus moldes (Alumínio RSA 6061). ....	62
Figura 28 - Modelos das lentes fresnel. ....	62
Figura 29 - Ferramenta I e II – Ball nose de 0,4 mm de raio e Ball nose de 0,2 mm de raio, respectivamente.....	63
Figura 30 - Ferramenta III – topo reto de diâmetro 0,3 mm. ....	63
Figura 31 - Exemplo de simulação de microfresamento da lente 3, no ambiente CAM do Inventor. ..	64
Figura 32 - Exemplo do caminho percorrido pela ferramenta para operação de desbaste da lente 3. ...	65
Figura 33 - Amostra de RSA 6061 com moldes 1, 2, 3 e 5 microusinados. ....	68
Figura 34 - Amostra de RSA 6061 com moldes 4, 6, e 7 microusinados. ....	68
Figura 35 - Amostras de PMMA com as lentes microusinadas. ....	69
Figura 36 - Lente 4 - região central. ....	70

Figura 37 - Lente 4 - Região da borda.....	70
Figura 38 - Molde 7 – Região central.....	70
Figura 39 - Molde 7 – Região da borda.....	71
Figura 40 - Ra das lentes e moldes microfresados.....	75
Figura 41 - Rt das lentes e moldes microfresados. ....	75
Figura 42 - Lente modelo 2 em PMMA; região visualmente disforme por provável temperatura próxima à Tg durante o processo. ....	76
Figura 43 - Marcas no centro da peça, ao usar ferramentas Ball nose, no RSA.....	77
Figura 44 - Centro de lente, modelo 7, microusinada com ferramenta de topo reto.....	78
Figura 45 - Centro da lente 2, em PMMA, com emprego de ferramenta ball nose. ....	78
Figura 46 - Comparação entre rebarbas no RSA, à esquerda, e PMMA, à direita, ambas microusinadas com ferramenta de topo reto. ....	79
Figura 47 - Comparação entre rebarbação no RSA, à esquerda, e PMMA, à direita, ambas microusinadas com ferramenta ball nose. ....	79
Figura 48 - Vista geral dos cavacos de RSA, utilizando ferramenta Ball nose. ....	80
Figura 49 - Vista em detalhe dos cavacos de RSA, utilizando ferramenta Ball nose. ....	81
Figura 50 - Vista geral dos cavacos de RSA, utilizando ferramenta de topo reto. ....	81
Figura 51 - Vista em detalhe dos cavacos de RSA, utilizando ferramenta de topo reto. ....	82
Figura 52 - Vista geral dos cavacos de PMMA utilizando ferramenta Ball nose.....	82
Figura 53 - Vista em detalhe dos cavacos de PMMA utilizando ferramenta Ball nose. ....	83
Figura 54 - Vista geral dos cavacos formados de PMMA utilizando ferramenta de topo reto.....	83
Figura 55 - Vista detalhada dos cavacos de PMMA utilizando ferramenta de topo reto. ....	84
Figura 56 - Ferramenta de topo reto usada para RSA. ....	85
Figura 57 - Ferramenta de topo reto usada para PMMA. ....	85
Figura 58 - Fratura na ferramenta Ball nose de 0,4mm de diâmetro, usada no RSA. ....	86
Figura 59 - Desgaste em uma das arestas de corte da ferramenta Ball nose de diâmetro 0,4mm, usada no PMMA. ....	86
Figura 60 - Lascamento da ferramenta ball nose de 0,4mm de raio, usada para RSA e PMMA.....	87





## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Índice de refração de alguns polímeros usuais.....	51
Tabela 2 - Propriedades físicas do RSA 6061.....	55
Tabela 3 – Propriedades mecânicas do RSA 6061.....	55
Tabela 4 – Operações de desbaste e acabamento para lentes microfresadas em PMMA.....	65
Tabela 5 – Operações de desbaste e acabamento para moldes microfresados em RSA 6061.....	66
Tabela 6 – Ra e Rt de cada zona aferida para moldes em RSA 6061.....	72
Tabela 7 – Ra e Rt médio para cada modelo de molde em RSA 6061.....	73
Tabela 8 – Ra e Rt de cada zona aferida para lentes em PMMA.....	73
Tabela 9 – Ra e Rt médio para cada modelo de lente em PMMA.....	74



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

**PMMA** – Polimetilmetacrilato

**MEV** – Microscópio Eletrônico de Varredura

**LED** – *Light Emitting Diode* (Diodo emissor de luz)

**PC** – Policarbonato

**PS** – Poliestireno

**CAD** – *Computer-aided design* (Projeto assistido por computador)

**CAM** – *Computer-aided manufacturing* (Manufatura assistida por computador)

**CNC** – *Computer Numeric Control* (Comando numérico computadorizado)



## LISTA DE SÍMBOLOS

$f$  – Avanço

$a_p$  – Profundidade de usinagem

$f_z$  – Avanço por dente.

$F_a$  – Força Ativa.

$F_c$  – Força de Corte.

$F_f$  – Força de Avanço

$F_{fn}$  – Força de Apoio.

$v_e$  – Velocidade efetiva de corte

$v_f$  – Velocidade de avanço

$T_c$  – Temperatura de cristalização

$T_g$  – Temperatura de transição vítrea

$T_m$  – Temperatura de fusão

$M_w$  – Peso molar

$n$  – Índice de refração

$R_a$  – Rugosidade média

$R_t$  – Rugosidade média dos cinco maiores picos e cinco maiores vales

$R_{teórico}$  – Rugosidade teórica

$R_p$  – Raio da ponta da ferramenta

mm – Milímetro

um – Micrometro

nm – nanômetro



## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	26
<b>1.1. Objetivos</b> .....	27
1.1.1. Objetivos Específicos .....	27
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	29
<b>2.1 Usinagem de ultraprecisão</b> .....	29
<b>2.2. Técnica de Microfresamento</b> .....	31
2.2.1 Cinemática do processo .....	33
<b>2.3 Elementos ópticos difrativos</b> .....	37
2.3.1 Aplicações usuais das Lentes Fresnel .....	37
2.3.2 Manufatura via Moldagem por Compressão a Quente (Hot Embossing) .....	39
2.3.3 Manufatura via Moldagem por Microinjeção .....	41
<b>2.4 Polímeros</b> .....	43
2.4.1 Classificação .....	43
2.4.2 Dependência térmica .....	44
2.4.3 Propriedades Mecânicas .....	46
2.4.4 Propriedades Ópticas .....	50
<b>3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL</b> .....	54
<b>3.1. PMMA e RSA 6061</b> .....	54
<b>3.2 Máquinas e equipamentos</b> .....	56
<b>3.3 Preparação das amostras</b> .....	58
<b>3.4 Ferramentas e parâmetros dos experimentos</b> .....	62
<b>3.5 Avaliação de acabamento superficial e de avaria das ferramentas</b> .....	66
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	68
<b>4.1 Acabamento superficial</b> .....	69
<b>4.2. Formação de cavacos</b> .....	80
<b>4.3 Avaria das ferramentas</b> .....	84
<b>5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS</b> .....	88
REFERÊNCIAS .....	90





## 1. INTRODUÇÃO

Na indústria da manufatura, constantemente deve-se melhorar o desempenho de certos produtos, por meio de pesquisa e desenvolvimento de novos materiais e processos. Nesse quesito, a indústria de componentes ópticos é um dos setores de maior destaque, dado a dependência de processos de ultraprecisão, considerando que o acabamento de um número considerável de itens deve ser inferior a 5 nanômetros. (WILLS-MOREN, 1982; ABE, 1991).

Ligas de alumínio, cobre e plásticos são geralmente os materiais mais aplicados na confecção de superfícies ópticas anesféricas. Tal tendência é essencialmente baseada no desenvolvimento que esses materiais trouxeram à fabricação de componentes ópticos adicionado à significativa redução nas dimensões e peso. (ASKEROV e MINAEV, 1981).

Juntamente a essa tendência, a usinagem de materiais poliméricos tem ganhado significativa importância para a engenharia de precisão. Os fatores que influenciam a rugosidade e os erros de forma da superfície, quando usina-se polímeros, requerem um estudo diferenciado, quando comparado à usinagem tradicional com metais, em virtude das particularidades do comportamento dos polímeros. Nesse caso, a classe pertencente ao polímero é fator de influência direta, além de propriedades intrínsecas de cada polímero, tal como a temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ), temperatura de fusão ( $T_m$ ), peso molecular ( $M_w$ ), viscosidade, e tempo de relaxação. Vale ressaltar que tais propriedades relacionam-se à cristalinidade do material, que influencia na transparência do polímero, característica essa fundamental para produtos com aplicação no campo óptico. (CARR e FEGER, 1993).

As tecnologias da manufatura, de suas máquinas e ferramentas, têm alcançado um alto nível de proficiência na indústria e na pesquisa. O aumento da demanda por micro componentes e produtos com superfícies ópticas funcionais requer aumento de produtividade, para novos componentes ou melhorias de manufaturas já existentes, assim permitindo uma produção mais rápida e confiável. (ARDILA et al, 2015)

Atualmente, com o desenvolvimento de pesquisas, estudos e experimentos, a microusinagem para manufatura de componentes de ultraprecisão se consolidou como processo para aplicações especiais.

As pesquisas referentes à aplicação da microusinagem em materiais considerados tipicamente frágeis têm aumentado consideravelmente. Materiais poliméricos, tal como o

PMMA encontram-se dentro desta classe e sua aplicação se concentra principalmente à área óptica de transmissão. Quanto à determinação de qual material dessa classe usinar, este deve ser determinado com base nas especificações técnicas do produto, como desempenho de propriedades mecânicas e ópticas, através das características e propriedades intrínsecas do polímero, juntamente às condições de corte, definidas pelos parâmetros de corte, como avanço (f), profundidade de usinagem (ap), largura de usinagem (ae), e propriedades reológicas do material. (PORTO, 2004)

Têm-se, portanto, o objetivo de se obter um produto aliando-se: rugosidade baixa, em geral na casa de unidades de nanômetros; otimização do gasto energético, relacionado com temperatura e forças de corte envolvidos no processo; e baixa avaria das ferramentas, proporcionando uma maior vida útil da ferramenta, de modo a tornar a técnica mais viável e atraente para o mercado.

## **1.1. Objetivos**

O objetivo principal do referido trabalho é avaliar o desempenho da técnica de microfresamento, aplicada à fabricação de micro estruturas que compõe microelementos ópticos difrativos, as chamadas lentes Fresnel, fabricadas diretamente em um polímero óptico, o Polimetilmetacrilato (PMMA), e comparar o desempenho desta técnica com as fabricações mais comuns das lentes, por meio da fabricação de micromoldes em liga de alumínio RSA 6061.

### **1.1.1. Objetivos Específicos**

Realização de testes experimentais para conhecimento dos efeitos dos parâmetros de corte sobre o acabamento e a integridade superficial e subsuperficial do PMMA e RSA 6061 microusinados, sob diferentes configurações de lentes Fresnel e seus moldes.

Definição dos diferentes modelos de lentes e moldes e das ferramentas empregadas em cada modelo, com consequente definição de estratégias de usinagem através de softwares CAD/CAM.

Avaliação por meio de perfilometria óptica e microscopia eletrônica de varredura (MEV), para obtenção de resultados de acabamento e integridade superficial, bem como a

aferição de avaria das ferramentas utilizadas e formação de cavacos, comparando os resultados dos dois materiais.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

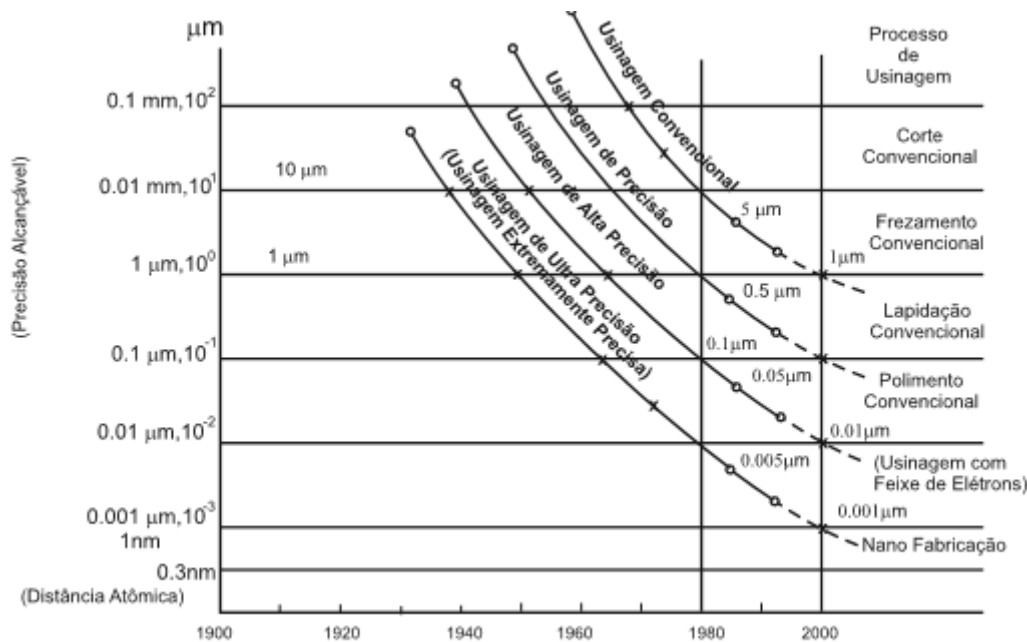
### **2.1 Usinagem de ultraprecisão**

A aplicação da usinagem de ultraprecisão permite produzir componentes com precisão de forma inferior a  $1\mu\text{m}$  e rugosidade final menor que  $10\text{ nm}$ , deste modo constituindo-se numa alternativa tecnológica para a fabricação de componentes avançados.

Na indústria óptica e eletrônica, lentes, espelhos e insertos para moldes de injeção de lentes plásticas são tradicionalmente fabricadas por múltiplos processos como: retificação, lapidação e polimento. Este processo de produção consome tempo e o custo é alto, e somente perfis esféricos e superfícies planas são possíveis (XIANDONG, 2000).

A usinagem de precisão se desenvolveu muito nas últimas décadas, e Tanigushi (1983) classificou as técnicas de usinagem em quatro grandes áreas, mostradas esquematicamente na figura 1, em que ilustra o desenvolvimento de cada uma delas no século XX, e suas respectivas precisões conseguidas, aliadas ao processo de usinagem correspondente. (GRANADO, 2006)

Figura 1 - Desenvolvimento dos processos de usinagem ao longo do século XX.



Fonte: TANIGUSHI, 1983.

O processo de usinagem de ultraprecisão permite o trabalho com parâmetros de corte e posicionamento que resultam em peças de dimensões menores que um micrômetro, por isso a denominação microusinagem. Tais medidas não são conseguidas por meio de adaptações a partir de técnicas convencionas, pelo contrário, integram o desenvolvimento de novas técnicas de processamento de materiais, envolvendo usinabilidade de novos materiais tecnológicos, como cerâmicas, plásticos, germânio e zirconium. (ASKEROV & MINAEV, 1988) Implicam também no desenvolvimento de dispositivos de posicionamento, como sensores, transdutores e atuadores compatíveis com a repetibilidade de posicionamento e exatidão do deslocamento exigido para cada eixo (GEE et al., 1988).

Necessita-se exatidão da máquina – ferramenta, ou seja, ter estrutura apropriada para essa função, dado que é a estrutura da máquina que realiza a ligação entre ferramenta e peça. Pode haver ocorrência de vibrações na estrutura, devido à aplicação das forças de usinagem, e essas vibrações podem ocasionar movimentos relativos que comprometam a integridade superficial da peça. Contudo, para se eliminar esse problema, deve-se usar materiais e arranjos estruturais que possuam alta rigidez, tanto estática quanto dinâmica, além é claro que o uso de amortecedores internos deve ser o mais alto quanto possível.

As tolerâncias de forma e acabamento superficial adequadas às redes de difração, podem ser obtidas pela técnica de microfresamento, em um menor tempo se comparado a outras

técnicas, reduzindo custos e aumentando a repetibilidade e exatidão.

A máquina e o ferramental utilizados possuem custo elevado, assim como os demais processos de ultraprecisão, dado a complexidade e exigência de tolerâncias dos produtos. Usa-se uma máquina geradora de superfícies anesféricas, para o caso de fabricação dos componentes ópticos difrativos, sendo equipado com comando numérico computadorizado. Necessita-se, portanto, realizar uma programação para confecção das peças. Após o processo, pode haver necessidade de retirada de eventuais rebarbas e da marca de centro deixada pela ferramenta, sendo tal procedimento geralmente efetuado com uma lixa sobre uma superfície lisa e plana, seguido de polimento numa politriz, com pasta de diamante, para retirada das marcas da lixa. (WORGUL, 2009)

## **2.2. Técnica de Microfresamento**

A demanda pelo aumento de produtividade e, ao mesmo tempo, pela manutenção do alto nível de precisão, culmina na necessidade de aplicar tecnologias como o microfresamento de alta velocidade de rotação e alta precisão. Também implica em desenvolvimento de novos processos, bem como em suas inovações, tecnologias específicas e métodos que desafiam as técnicas de usinagem em escala micro, afetando especialmente o planejamento do processo, as condições de corte e o controle de peças. (AURICH, et al., 2012). A usinagem de componentes microestruturais requer sua representação modelada por meio de softwares CAD.

Contudo, esses modelos devem seguir os requisitos referentes à demanda de precisão dos produtos microestruturais.. Para tanto, deve ser garantido que os sistemas CAD/CAM empregados forneçam funções e capacidades adequadas para o processo de microfresamento, incluindo módulos específicos para a cadeia de processo. (BIERMANN, et al., 2012).

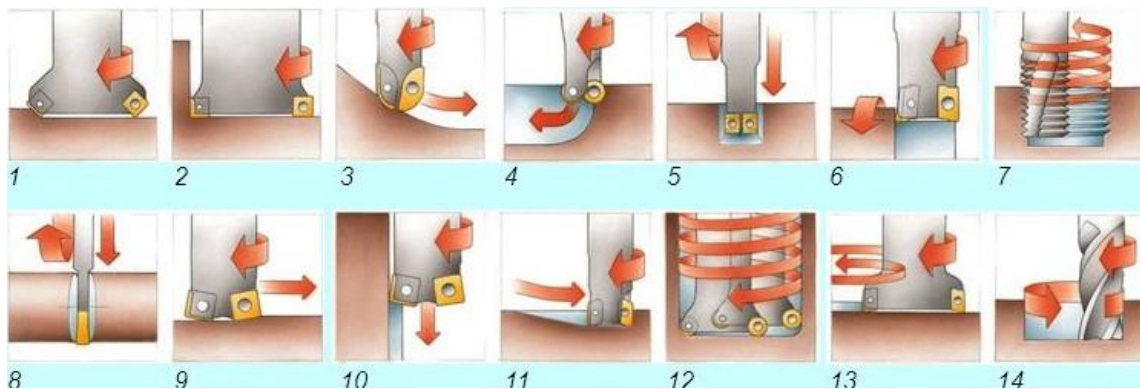
Dada a crescente demanda atual de microprodutos e microcomponentes, a área da microusinagem se expandiu, tendo o microfresamento como uma de suas principais vertentes, devido à grande versatilidade de operações possíveis através desse processo.

A operação de microfresamento, especificamente, se destaca na produção de peças para a indústria de eletrônicos, sensores e de moldes e matrizes. Comparada a processos químicos de manufatura, a microusinagem tem a vantagem de permitir a produção de peças pequenas com formas complexas em três dimensões. De modo mais específico, o microfresamento possui

uma ampla utilização para a produção de ferramental para microinjeção e estampagem a quente. Outras aplicações que dependem da manufatura de micropeças são relógios, carcaças para micromotores, alojamento para insertos de ferramentas para fabricação de microfiltros e as próprias microfresas (POPOV et al., 2010).

O processo de microfresamento é caracterizado como uma ferramenta provida de arestas cortantes dispostas simetricamente em torno de um eixo, de modo que o movimento de corte é proporcionado pela rotação da própria ferramenta (fresa) em torno de seu eixo. Com relação ao movimento de avanço, este é usualmente realizado pela própria peça a ser microusinada, a qual encontra-se fixada na mesa da máquina (COPPINI et al, 2006). Têm-se diferentes tipos de operações de fresamento, ilustrado na figura 2.

Figura 2 - Tipos de fresamento: 1) Faceamento. 2) Cantos a 90°. 3) Perfis. 4)Cavidades. 5)Canais. 6) Tornofresamento. 7) Roscas. 8) Cortes. 9) Com altos avanços. 10)Mergulho. 11) Rampa. 12) Interpolação helicoidal. 13) Interpolação circular. 14) Trocoidal.



Fonte: CARDOZO, 2014.

De modo geral, classifica-se o processo de fresamento em:

- Fresamento tangencial: Operação na qual os dentes ativos estão na superfície cilíndrica da ferramenta – o eixo da fresa é paralelo à superfície que está sendo gerada (item 2). As ferramentas usadas são denominadas fresas cilíndricas ou tangenciais.

- Fresamento frontal: Operação na qual os dentes ativos da fresa estão na superfície frontal da ferramenta – o eixo da fresa é perpendicular à superfície gerada (item 3). As ferramentas usadas são denominadas fresas frontais ou de topo, podendo ser do tipo Ball nose (item 4) ou de topo reto (item 5).

Os princípios do processo de fresamento convencional são semelhantes ao de microfresamento, tal que enquanto usualmente utiliza-se avanços de 100  $\mu\text{m}/\text{dente}$  e



profundidade de corte de 1 mm, no processo micro, os avanços empregados são por volta de 1  $\mu\text{m}$ /dente e profundidades de usinagem de 100  $\mu\text{m}$ . (PONCE, 2013).

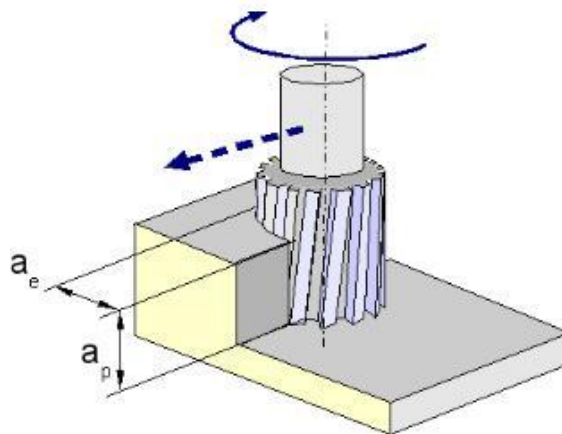
Quanto às ferramentas empregadas nos dois processos, o diâmetro usual das microfresas costuma variar de 20  $\mu\text{m}$  a até 1mm, com arredondamento da aresta de corte variando entre 5 a 20  $\mu\text{m}$  (PONCE, 2013).

Ao passo que, o fresamento convencional é efetuado em máquinas fresadoras (horizontais ou verticais), o microfresamento ocorre em centros de usinagem CNC. Portanto, as fresas convencionais, que por terem um maior diâmetro, são usualmente fabricadas de metal duro com corpo de aço carbono, justamente pelo fato de que essas fresas não necessitam de altas rotações para obterem as velocidades de corte necessárias. Já para as fresas de pequenos diâmetros, como o caso das microfresas, fresas inteiriças de metal duro vêm sendo produzidas, dado que os centros de usinagem possibilitam o emprego de altas rotações.

### 2.2.1 Cinemática do processo

No processo de microfresamento, assim como no convencional, os parâmetros de corte são basicamente os mesmos:  $a_e$ ,  $a_p$ ,  $f_z$  (avanço por dente),  $v_c$ , em m/min, e rotação, em rpm. A figura 3 mostra modelo esquemático de fresamento de topo, para efeito de visualização dos parâmetros  $a_p$  e  $a_e$ .

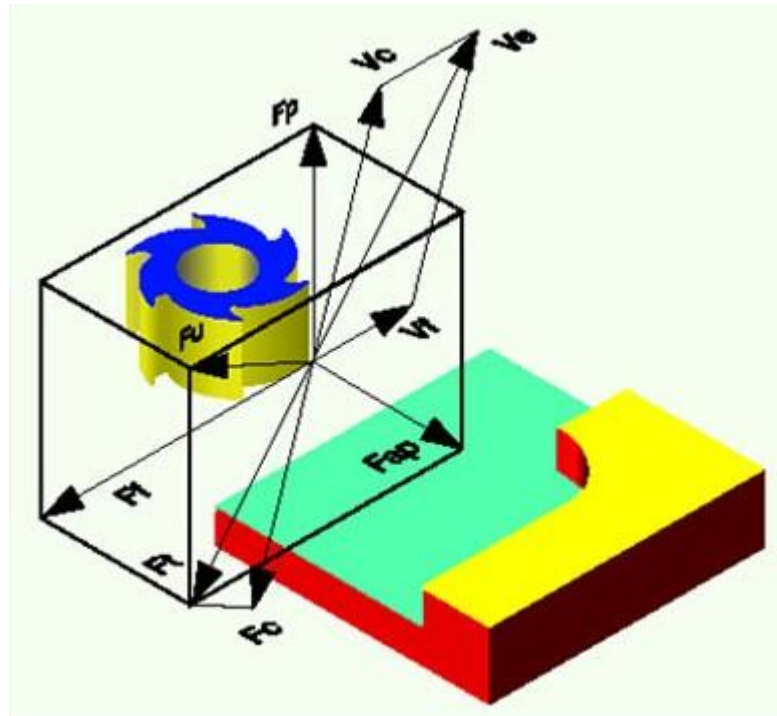
Figura 3 -  $a_p$  e  $a_e$  na operação de fresamento de topo



Fonte: CORREA.

E de acordo com os parâmetros de entrada escolhidos, têm-se influência direta quanto às forças requeridas para realização do processo, de modo que o esquema vetorial das forças e velocidades, decompostas, está representado na figura 4.

Figura 4 - Componentes da força de usinagem durante processo de fresamento.



Fonte: RIBEIRO, 2006

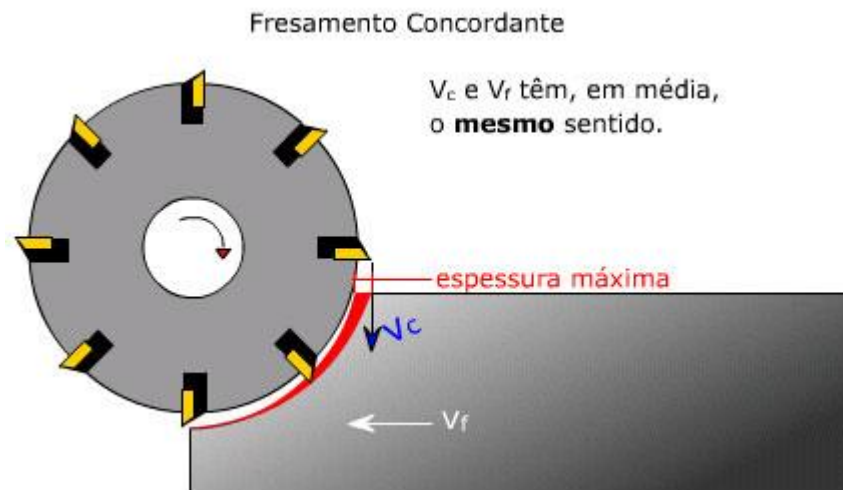
A força ativa ( $F_a$ ) contribui para o cálculo da potência de usinagem pelo fato de se posicionar no plano onde os movimentos de usinagem são realizados. Ela se decompõe, por sua vez, em força de corte ( $F_c$ ), que é a projeção da força de usinagem sobre a direção de corte, e em força de avanço ( $F_f$ ), que é a projeção da força de usinagem sobre a direção de avanço. Há ainda a força de apoio ( $F_{fn}$ ), que é a projeção da força de usinagem sobre a direção perpendicular à direção de avanço, situada no plano de trabalho. (RIBEIRO, 2006)

As velocidades envolvidas no processo são decorrentes da decomposição vetorial da velocidade efetiva de corte ( $v_e$ ), em velocidade de corte ( $v_c$ ) e velocidade de avanço ( $v_f$ ) (CIMM, 2010).

O sentido de corte é outro fator de importante relevância para o processo, não só pela relação direta com a vida da ferramenta, mas também pela formação de cavaco. Logo, o sentido de corte pode ser concordante ou discordante.

No fresamento tangencial, pode-se ter tanto corte concordante como discordante, de modo que em uma operação concordante, os sentidos das velocidades de corte e de avanço são, em média, os mesmos. A espessura do cavaco decresce durante a sua formação. Como mostrado na figura 5, a espessura do cavaco é máxima no início do corte e mínima no final (teoricamente zero). Assim, na saída da aresta cortante, ocorre o esmagamento de material e maior atrito entre a aresta e a superfície de corte.

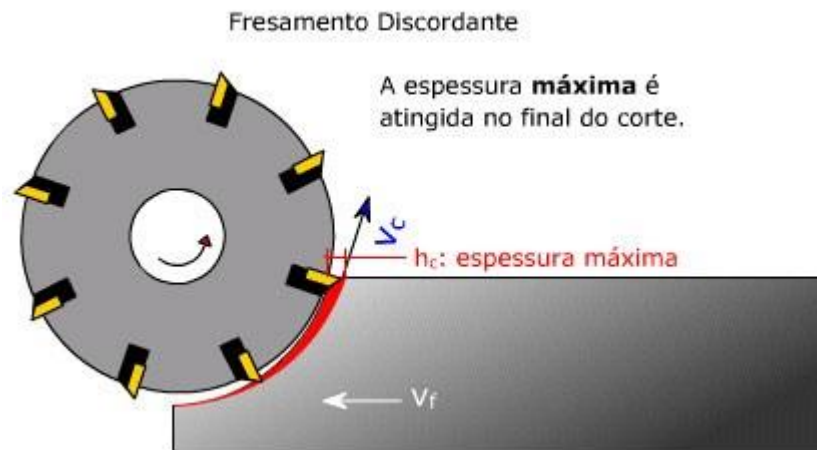
Figura 5 - Espessura e formação de cavaco em fresamento concordante.



Fonte: Portal Metalica.

Quando se trata do sentido discordante, ocorre o contrário. Os sentidos das velocidades de corte e de avanço são, em média, opostos. A espessura do cavaco cresce durante a sua formação. Neste caso, a espessura do cavaco é mínima no início do corte e máxima no final. Se ocorre fresamento discordante puro, como mostrado na figura 6, a espessura inicial é teoricamente zero. Assim, no momento da entrada da aresta cortante, não há corte, mas apenas o esmagamento de material. Conseqüentemente os esforços e a tendência a vibrações na ferramenta são maiores, sendo esse sentido mais prejudicial para desgaste e vida da ferramenta.

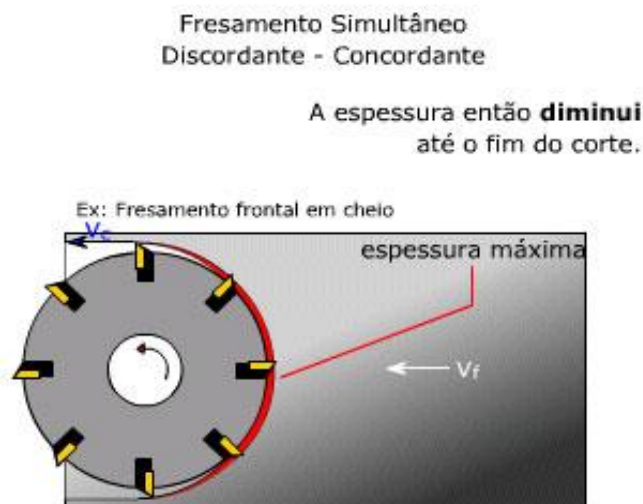
Figura 6 - Espessura e formação de cavaco em fresamento discordante.



Fonte: Portal Metalica.

Já para o caso de fresamento de topo, ocorrem simultaneamente fresamento concordante e discordante. Tomando um dente da fresa em particular, primeiro ele se engaja em fresamento discordante. A espessura do cavaco que se forma cresce até um valor máximo na linha que passa pelo centro da fresa e com direção igual à do avanço. A partir deste ponto o corte passa a ser concordante. A espessura do cavaco decresce até a aresta cortante sair da peça, tal como ilustrado na figura 7 (RIBEIRO, 2006)

Figura 7 - Espessura e formação de cavaco em fresamento de topo.

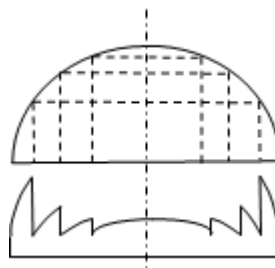


Fonte: Portal Metalica.

## 2.3 Elementos ópticos difrativos

Com a óptica difrativa, pode-se realizar, com relativa facilidade, muitas das funções que, para um sistema óptico refrativo convencional, seriam difíceis, ou mesmo impossíveis de serem realizados. A qualidade das imagens pelo dispositivo depende do grau de liberdade envolvido no projeto, a saber, qual a capacidade da mídia em armazenar somente a fase de uma frente de onda, ou somente sua amplitude, ou ambas as quantidades. A Figura 8, apresenta um desenho esquemático de uma lente convergente convencional, refrativa, e abaixo a mesma lente operando no regime difrativo (WORGUL, 2009).

Figura 8 - Representação esquemática de lente convergente refrativa e difrativa, respectivamente.



Fonte: WORGUL, 2009

As lentes Fresnel foram então projetadas com base no princípio que a direção de propagação da luz não se altera com o meio. Ao invés disso, os raios de luz são apenas desviados na superfície com o meio. E como resultado, esse corpo de material no centro da lente serve apenas para aumentar a quantidade de massa e absorção com o sistema (EDMUND, 2019).

As primeiras lentes Fresnel foram feitas por meio do polimento manual do vidro. Eventualmente, o vidro fundido era utilizado para fabricação em moldes, porém foi apenas com o desenvolvimento dos polímeros com alta qualidade óptica, em conjunto com o desenvolvimento dos processos de moldagem/injeção no século XX que o uso das lentes Fresnel se popularizou industrialmente e comercialmente em diversas aplicações, como por exemplo faróis de carro e lentes de celular. (EDMUND, 2019).

### 2.3.1 Aplicações usuais das Lentes Fresnel

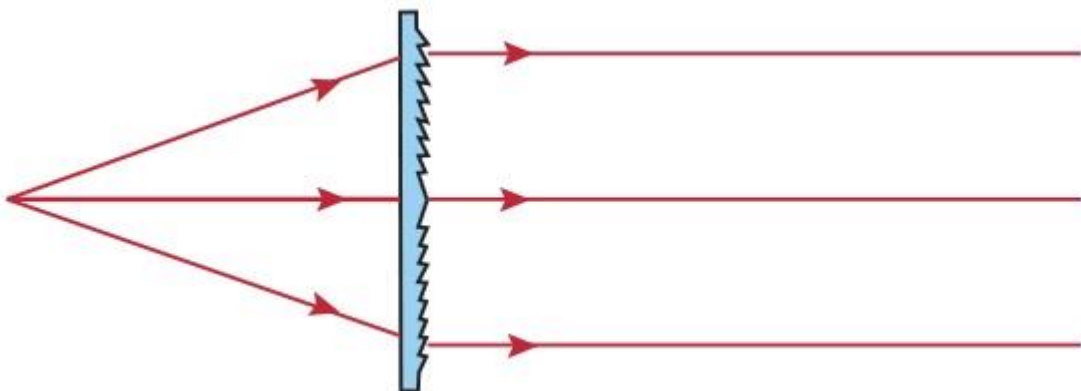
As lentes Fresnel são mais comumente empregadas em aplicações voltadas à captura de luz, como por exemplo em sistemas condensadores ou emissores/detectores. As lentes Fresnel

podem também ser utilizadas como lentes de aumento e/ou de projeção (EDMUND, 2019).

Uma aplicação comum para a lente Fresnel é em lentes de aumento, podendo ser usada como aumento ou projeção; contudo devido ao alto nível de distorção, não é recomendado. Também, a qualidade da imagem não se compara ao de um sistema de alta precisão dada a quantidade de distorção. Enquanto encontradas normalmente em aplicações solares, as lentes Fresnel são ideais para qualquer aplicação que requeira elementos de lente finos, de baixo custo, e leves. Lentes Fresnel não são uma tecnologia nova, porém sua penetração no mercado tem aumentado com melhorias dos materiais e nas técnicas de manufatura. as lentes Fresnel são as únicas lentes ópticas as quais a tornam uma ótima ferramenta para um range de interessantes e úteis designs ópticos (EDMUND, 2019).

Geralmente a lente fresnel é projetada de acordo com o perfil da superfície anesférica no sentido de minimizar o efeito da ‘aberração óptica’ da imagem. As lentes fazem, portanto, um excelente trabalho colimando uma fonte pontual idealizada. Na vida real nenhuma fonte é um ponto real, no entanto os emissores do estado sólido como os LEDs podem ser bem pequenos, então com uma distância suficiente entre a lente e o LED, pode ser aproximado como uma fonte pontual. As lentes Fresnel podem ser então utilizadas para colimar a saída dos LEDs, conforme esquematizado na figura 9 abaixo. Além disso, fontes incandescentes tradicionais geram muito calor irradiado, as quais tem limitado o uso de plásticos ópticos nas proximidades da fonte. Desde que a maioria do calor gerado pelo LED é condutor, é menos difícil aplicar as lentes plásticas (DAVIS, 2007).

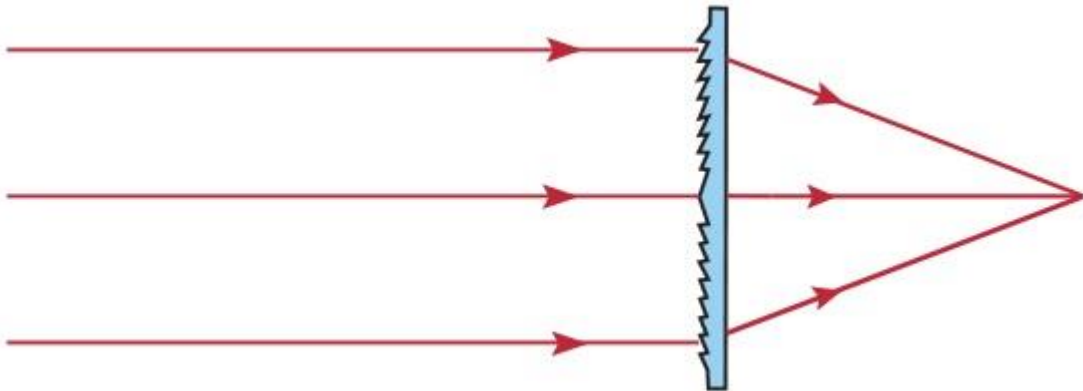
Figura 9 - Representação esquemática de colimação de feixes de luz.



Fonte: EDMUND, 2019

Outra aplicação bastante comum para a lente Fresnel é quanto à absorção da luz solar, a qual é considerada muito próxima de ser paralela (sistema infinito-conjugado). Utilizando uma lente Fresnel para coleção de luz é ideal para se concentrar a luz em uma célula fotovoltaica, ou para se esquentar a superfície, representado esquematicamente na figura 10. Por exemplo, a lente Fresnel pode ser usada na manutenção da casa, aquecendo-a ou até mesmo aquecendo a piscina. Nesses casos, toda a área superficial da lente determina a quantidade de luz coletada (EDMUND, 2019).

Figura 10 - Representação esquemática de coleção de feixes de luz.

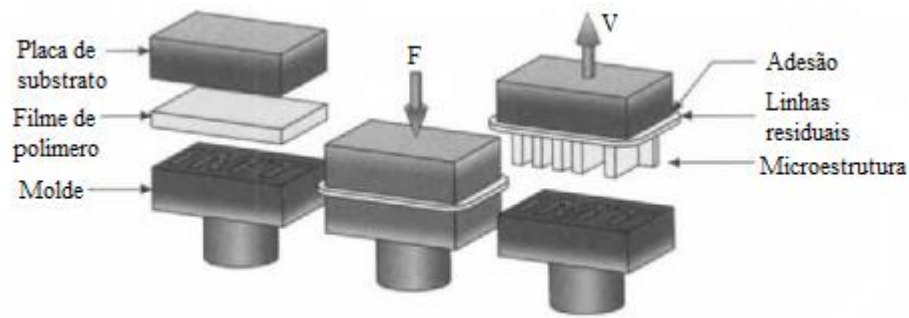


Fonte: EDMUND, 2019

### 2.3.2 Manufatura via Moldagem por Compressão a Quente (Hot Embossing)

O processo de moldagem por compressão a quente, do inglês, *hot embossing molding*, refere-se a um ciclo de moldagem em dois passos, em que o polímero fundido não é previamente injetado. Invés disso, o polímero na forma de um filme fino é usado. O filme é aquecido via condução de calor até as proximidades da temperatura de fusão do polímero, antes da etapa de enchimento por compressão das microcavidades. A figura 11 mostra esquematicamente o processo.

Figura 11 - Esquema de processo de moldagem por compressão a quente com único molde.



Fonte: WORGUL 2009

No processo, após o enchimento das microcavidades, linhas residuais são geradas, as quais são importantes pois são necessárias para ajudar na obtenção da pressão requerida para o enchimento satisfatório das microcavidades. O resfriamento do molde é realizado sob aplicação de força constante até se atingir a temperatura suficiente para desmoldagem do polímero.

Os polímeros termoplásticos amorfos e semicristalinos são os materiais mais indicados para utilização dessa técnica. Determinados polímeros são mais indicados, em função da espessura de filme que se consegue produzir. Uma outra alternativa é uso de polímeros na forma de pellets, e utilizando o próprio processo de moldagem por compressão a quente para conseguir a moldagem dos filmes de baixa espessura.

Os custos fixos desse processo são inerentes ao número de peças moldadas, sendo eles relativos a investimentos ao maquinário, à produção dos moldes microestruturais, e configuração do processo. A maior dificuldade do processo está na engenharia e design dos moldes, que requerem altíssima precisão. E conforme um maior número de peças diferentes são requeridas, tanto tempo como dinheiro aumentam linearmente, dificultando e por vezes inviabilizando o processo.

Devido a velocidade moderada de moldagem, cerca de 1mm/min, moderadas tensões de cisalhamento são geradas no polímero, resultando em baixa perda de tensão residual nos componentes moldados.

Dada a temperatura de moldagem usada, o tempo de relaxação influi no tempo de ciclo do processo. A tensão induzida da moldagem pode ser diminuída pelo processo de relaxação. Para tanto, é indispensável o conhecimento da dependência da temperatura no comportamento do polímero (WORGUL, 2009).



### 2.3.3 Manufatura via Moldagem por Microinjeção

A técnica de fabricação de elementos ópticos difrativos é beneficiada pela grande quantidade de máquinas comercialmente disponíveis, e grande número de fornecedores para essa tecnologia. A técnica não é recomendada para produções em baixo escala, dado o alto custo para obtenção das peças.

Diferentemente do processo convencional de moldagem por injeção, se o tamanho das cavidades diminui para ordem de micrômetros, a tecnologia do processo de moldagem convencional é limitada. As principais diferenças em comparação à injeção são:

- Grânulos de polímeros têm em média, massa de 20 a 30mg, mas devido ao tamanho das microcavidades, é requerido a fusão de um polímero homogêneo de baixa viscosidade, para enchimento satisfatório do molde.

- Se houver presença de qualquer quantidade de ar durante o processo de moldagem, o ar será comprimido a altas temperaturas, destruindo o polímero nas frentes de fluxo. Tal efeito é denotado de efeito diesel.

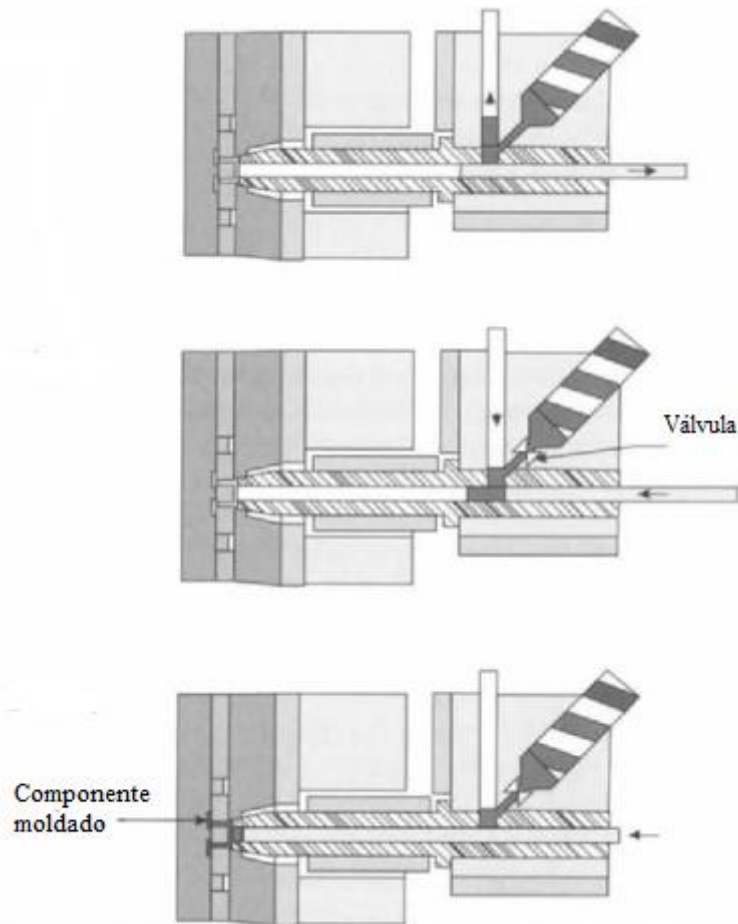
- No processo de injeção de polímeros fundido, este é resfriado e sua viscosidade cai, e especialmente quando com presença de finas cavidades e longos caminhos de fluxo, pode ocorrer um incompleto enchimento das microcavidades. Portanto, o polímero é resfriado abaixo da temperatura de desmoldagem, em que não haja ação de pressão. Há então modificação do ciclo, que se torna maior. Tal variação de aumento do ciclo de injeção, denomina-se em inglês de *variotherm process*.

- A fabricação de moldes microscópicos é caracterizado por diferentes processos. A integração entre ferramenta e microcavidade, resulta na integração do inserto do molde. Por isso, em casos especiais, uma ferramenta pode ser usada com diferentes insertos de moldes microestruturais.

O ferramental utilizado nesse processo é caracterizado por soluções individuais para cada design e classe de materiais. Os sistemas de moldagem e desmoldagem também precisam ser adaptados individualmente. No âmbito de materiais processáveis, há uma maior quantidade de materiais, em comparação ao *hot embossing molding*, pois permite a replicação de metais e

cerâmicas, sendo porém, mais indicado, o uso de termoplásticos amorfos e semicristalinos. Ilustrativamente, o processo se assemelha ao de injeção convencional, porém necessita-se válvulas precisas para correta dosagem da quantidade de polímero a ser injetado, conforme mostrado esquematicamente na Figura 12 (WORGUL, 2009).

Figura 12 - Processo de dosagem, início de injeção, e enchimento de microcavidades.



Fonte: WORGUL 2009.

Em resumo, o custo para utilização dessa técnica é altíssimo, dada a complexidade de fabricação dos moldes microestruturais, e adaptações tecnológicas necessárias do processo de injeção, para o de micro injeção, além da grande individualidade de ferramentas e moldes para cada tipo de produto. Em vista disso, é vantajoso tal uso devido à grande automatização do processo, e quando é destinado à produção de um mesmo tipo de peças em altas quantidades (WORGUL, 2009). Por isso o emprego do microfresamento torna-se vantajoso na produção de produtos com pequena escala e grande variedade de perfil.

## 2.4 Polímeros

O termo ‘polímero’ significa literalmente ‘muitas partes’. Um material polimérico pode ser considerado aquele que contém muitas partes quimicamente ligadas ou unidades que são ligadas para formar um sólido. Como existem muitos tipos de metais, há também muitos tipos de plásticos. A palavra plástico se refere a uma classe de material que pode ser moldado em formas, sendo essa uma classificação polimérica de acordo com o comportamento mecânico. E os plásticos podem ser divididos em duas classes: Termoplásticos e termofixos, dependendo de como são ligados quimicamente e estruturalmente. Já os elastômeros ou borrachas são polímeros que podem ser elasticamente deformados em grande quantidade quando uma força lhes é aplicado, podendo retornar à sua configuração inicial (ou quase sempre) quando esta força é retirada. (CANEVAROLO, 2006)

### 2.4.1 Classificação

Os polímeros aplicados na engenharia atual, são divididos em três grandes grupos, de acordo com algumas propriedades e comportamentos em comum: Termoplásticos, termofixos, e elastômeros.

Termoplásticos: Requerem calor para fazê-los moldáveis, e após o resfriamento, retêm a forma na qual foram modelados. Esses materiais podem ser reaquecidos e moldados novamente em novas formas, sucessivas vezes, sendo, portanto, recicláveis, de modo a haver pouca perda de propriedades mecânicas. Em sua maioria, consistem de uma cadeia longa principal de átomos de carbono por meio de ligações covalentes. E as cadeias moleculares são ligadas umas às outras por ligações secundárias. (SMITH e HASHEMI, 2012)

No estado viscoso eles são como borracha líquida e no estado sólido são vítreos ou parcialmente cristalinos. Existem onze classes de materiais termoplásticos que são: ABS, acetatos, acrílicos, celulose, fluocarbonos, poliamidas, policarbonatos, polietileno, polipropilenos, estirenos e vinis. (SAECHTLING, 1983)

Termofixos: Estes polímeros tornam-se sólidos após passarem de um estado líquido por aquecimento, por isso a denominação termofixo. O processo de solidificação chama-se cura. Durante a cura todas as pequenas moléculas são quimicamente unidas para formar uma grande cadeia molecular. A cura consiste da formação do cruzamento de moléculas adjacentes resultando de uma cadeia complexa interligada. Estes cruzamentos ligados evitam o

deslocamento de cadeias individuais prevenindo deste modo o fluxo plástico com o aquecimento. A troca do estado líquido para o estado sólido é irreversível, além disso, o aquecimento resulta somente em um desarranjo químico, não havendo fusão do material termofixo, de modo que ocorre degradação e/ou decomposição quando expostos a temperaturas muito altas. Portanto, não são recicláveis. Maioria dos termofixos consistem de uma rede de átomos de carbono ligados covalentemente formando um sólido rígido. Por vezes, átomos de oxigênio, nitrogênio, enxofre e outros, são também unidos por ligação covalente à estrutura de rede dos termofixos. Existem oito grandes classes de materiais termofixos que são: alquídios, alifícos, aminos, epóxis, fenólicos, poliésteres, silicones e uretanos. (SAECHTLING, 1983)

Elastômeros: São os polímeros que à temperatura ambiente podem deformar-se no mínimo duas vezes o seu comprimento inicial, retomando ao comprimento original rapidamente depois de retirado o esforço. Para apresentar estas características, os elastômeros normalmente possuem cadeias flexíveis amarradas umas as outras, com uma baixa densidade de ligação cruzada. Possuem então as seguintes propriedades: Aceitação de grandes deformações, mantendo boa resistência mecânica e módulo de elasticidade; recuperação rápida da deformação, quando retirado a solitação mecânica sobre o material; recuperação total da deformação. O exemplo mais didático é a borracha vulcanizada (CARR e FEGER, 1993; SMITH e HASHEMI, 2012)

#### **2.4.2 Dependência térmica**

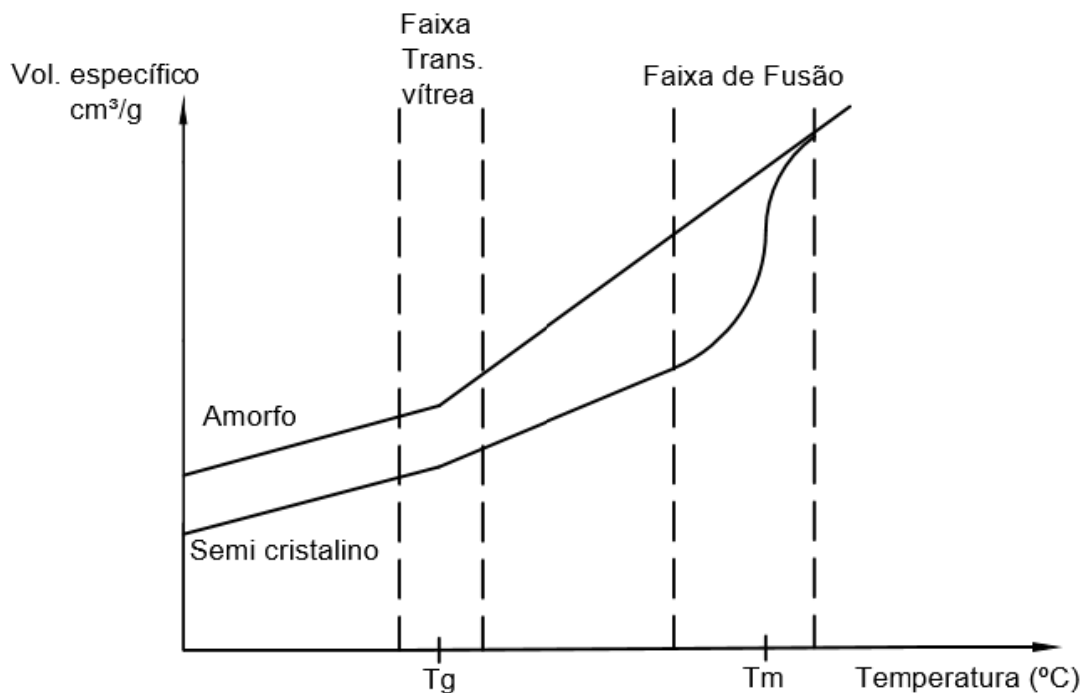
As características físicas de um polímero, seja ele qual for, são diretamente determinadas pela mobilidade de suas cadeias, que nada mais é do que uma função de agitação dos átomos da molécula, que é proporcional à temperatura. A variabilidade de comportamento de um polímero quando processado deve ser cuidadosamente analisada para se selecionar corretamente o polímero a se usar, dada a aplicação do produto em questão. (GRANADO, 2006). Os polímeros podem então, apresentar até três faixas de temperatura:

Temperatura de transição vítrea (T<sub>g</sub>): Esta temperatura é o valor médio da faixa de temperatura que, durante o aquecimento de um material polimérico de uma temperatura muito baixa para valores mais altos, permite que as cadeias poliméricas da fase amorfa adquiram mobilidade, ou seja, adquiram possibilidade de mudança de conformação. Abaixo de T<sub>g</sub> o polímero não tem energia interna suficiente para permitir o deslocamento de uma cadeia com

relação a outra por mudanças conformacionais. Ele está no estado vítreo caracterizado por se apresentar duro, rígido e quebradiço como um vidro, por isto g, do inglês 'glass'. Tg trata-se de uma transição termodinâmica de segunda ordem, isto é, que afeta as variáveis termodinâmicas secundárias. Algumas propriedades mudam com Tg e, portanto, podem ser utilizadas para a sua determinação: módulo de elasticidade, coeficiente de expansão, índice de refração, e calor específico (CANEVAROLO, 2006).

Temperatura de fusão (Tm): Esta temperatura é o valor médio da faixa de temperatura em que, durante o aquecimento, desaparecem as regiões cristalinas com a fusão dos cristalitos (m do inglês "melt"). Neste ponto, a energia do sistema atinge o nível necessário para vencer as forças intermoleculares secundárias entre as cadeias da fase cristalina, destruindo a estrutura regular de empacotamento, mudando do estado borrachoso para o estado viscoso (fundido). Esta transição só ocorre na fase cristalina, portanto, só tem sentido se aplicada para polímeros semicristalinos. Trata-se de uma mudança termodinâmica de primeira ordem, afetando variáveis, tais como volume específico, e entalpia. (CANEVAROLO, 2006) A Figura 13 mostra como a temperatura influencia no volume específico do polímero, comparando-se amorfos e semi cristalinos:

Figura 13 - Variação do volume específico com o aumento da temperatura para polímeros amorfos e semi cristalinos.



Fonte: Adaptado de CANEVAROLO, 2006.

Temperatura de cristalização ( $T_c$ ): Durante o resfriamento de um polímero semicristalino a partir de seu estado fundido, isto é, de uma temperatura acima de  $T_m$ , ele atingirá uma temperatura baixa o suficiente para que, em um dado ponto dentro da massa polimérica fundida, um número grande de cadeias poliméricas se organize espacialmente de forma regular. Esta ordenação espacial permite a formação de uma estrutura cristalina naquele ponto. Cadeias em outros pontos também estarão aptas para se ordenarem formando novos cristais. Isto se reflete em toda a massa polimérica produzindo-se a cristalização da massa fundida. A cristalização pode ocorrer de duas formas: isotérmica, quando a temperatura é rapidamente abaixada até um dado valor ( $T_c$ ), estabilizada e mantida constante até que toda a cristalização ocorra. Ou de forma dinâmica, quando a temperatura é reduzida continuamente (normalmente a uma taxa constante) e a cristalização ocorre dentro de uma faixa de temperatura. (CANEVAROLO, 2006)

### **2.4.3 Propriedades Macênicas**

Um dos princípios mais importantes para descrever como o caráter viscoelástico do polímero influencia na resposta à perturbação, é o princípio de Superposição Tempo – Temperatura, o qual é usado para aplicação da usinagem polimérica. E a análise dessa resposta do polímero, pode ser feita por ‘frame’ do tempo, ou temperatura. A uma dada temperatura, cada polímero tem uma resposta fixa de tempo, que relaciona a somatória dos movimentos vibracionais, rotacionais e translacionais. Este tempo característico é chamado de tempo de relaxação (CARR e FEGER, 1993)

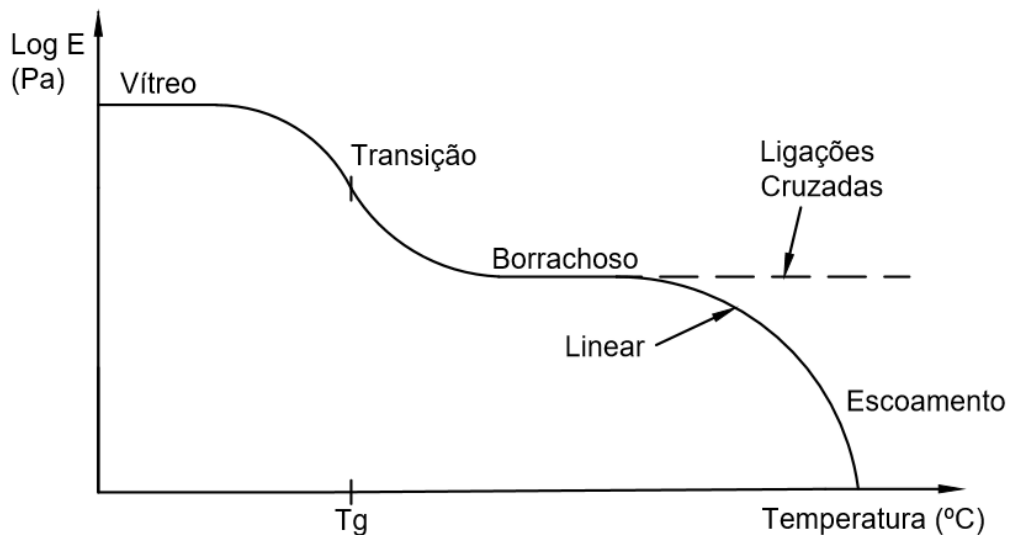
Se a taxa de perturbação for alta, o material polimérico apresentará resposta elástica e comportamento sólido. Já se a perturbação aplicada for mais lenta do que o tempo de relaxação, o polímero apresentará deformação plástica. Por sua vez, para tempos intermediários, o polímero exibe os dois tipos de comportamento em variados graus. E essa resposta é devida ao comportamento viscoelástico. Com isso, decorre que, diminuir a velocidade com que a perturbação é aplicada, dá ao polímero mais tempo para relaxar, de modo que se tornará mais dúctil ao ser usinado. (CARR e FEGER, 1993)

No caso da análise de ‘frames’ de temperatura, em que o tempo de perturbação aplicado é mantido constante, tem-se que o aumento da temperatura, causa um aumento nos movimentos (vibracionais, translacionais e rotacionais) ocorrentes no polímero. Ou seja, o tempo de

relaxação diminui conforme a temperatura aumenta. Nesse caso, o resultado é análogo à situação de diminuição da velocidade de perturbação, em que o material torna-se mais dúctil no processo de usinagem, devido ao aumento de temperatura. (CARR e FEGGER, 1993)

Entretanto, mantendo-se constante o tempo, a mudança do módulo de um polímero, relacionado à mudança de temperatura, é considerado. Os polímeros amorfos lineares exibem três comportamentos distintos: Podem estar no estado vítreo, no platô borrachoso, e no regime de escoamento, conforme ilustrado pela figura 14 abaixo:

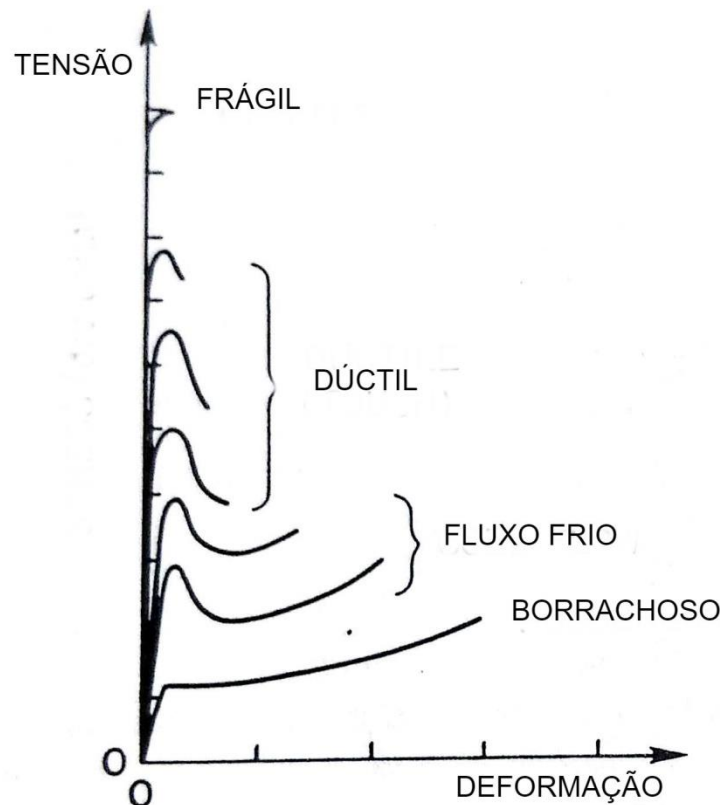
Figura 14 - Curva do Módulo bulk x Temperatura de um polímero.



Fonte: Adaptado de CARR e FEGGER, 1993.

Abaixo da temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ), todos os polímeros apresentam comportamento vítreo, independentemente se tiverem ligações cruzadas, forem lineares, amorfos ou semicristalinos. E tal comportamento vítreo é caracterizado pela fratura frágil, baixa alongação, e alto módulo. A melhor forma de caracterizar um polímero vítreo é por meio da estabilização da curva tensão – deformação, em que taxa de deformação é mantida constante. De acordo com o Princípio de Superposição Tempo – Temperatura, segue-se que iguais diferenças nas curvas são obtidas mudando a taxa de deformação e mantendo a temperatura constante, bem como ilustrado nas curvas apresentadas na figura 15. Analisando-se a figura, observa-se que há vários diferentes possíveis comportamentos para polímeros: Frágil, dúctil, fluxo frio e borrachoso. (CARR e FEGGER, 1993; SMITH e HASHEMI, 2012)

Figura 15 - Curva Tensão – Deformação para vários comportamentos de polímeros.



Fonte: CARR e FEGER, 1993.

No comportamento frágil o polímero suporta altos níveis de tensão, exibindo pequena alongação sem atingir tensão de escoamento, pois a fratura ocorre antes de se atingir tal valor de tensão. Quando apresenta comportamento dúctil, há limite de escoamento, de forma que tal tensão é alcançada antes da ocorrência da fratura. Tais materiais são capazes de suportar altos níveis de tensão. Já os materiais que exibem comportamento de fluxo frio possuem uma extensiva deformação, sendo capazes de suportar altos níveis de tensão e deformação. E logo acima da  $T_g$ , os polímeros entram na região borrachosa, em que os materiais borrachosos suportam apenas baixos níveis de tensão quando submetidos a pequenos e médios valores de deformação, porém quando em altas deformações, a tensão suportada é considerável. (CARR e FEGER, 1993)

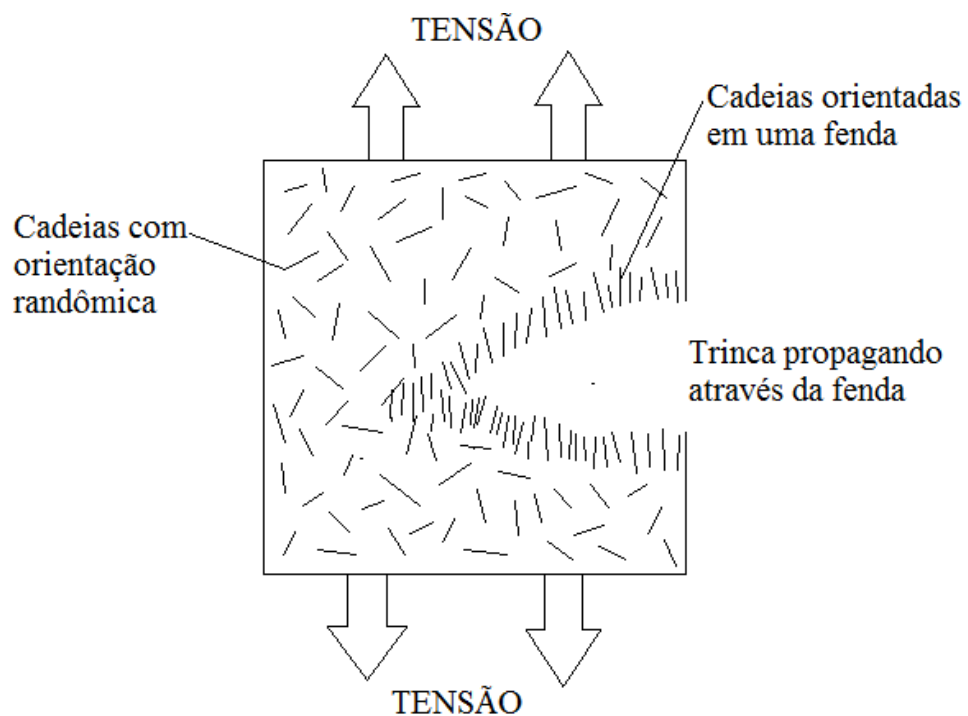
Quanto à fratura frágil de um polímero, a energia superficial envolvida, para o caso do PMMA ou outro polímero vítreo, é cerca de 1000 vezes maior que necessário do que para a simples quebra de ligações entre carbonos. Logo, tais polímeros são muito mais tenazes que



vidros inorgânicos. Essa grande quantidade de energia se deve às regiões distorcidas localizadas, chamadas de *fendilhas*, que se formam antes que a fratura frágil ocorra, como representada na Figura 16. A *fendilha* num termoplástico vítreo se forma numa região de alta tensão do material e consiste de um alinhamento de cadeias moleculares combinadas com uma alta densidade de vazios intercalados. (SMITH e HASHEMI, 2012)

Se a tensão aplicada for grande o suficiente, uma trinca se forma por meio da *fendilha*, e conforme a trinca se propaga ao longo da *fendilha*, a concentração de tensão na ponta da trinca se estende ao longo de seu comprimento. O trabalho necessário para se alinhar as moléculas no interior da *fendilha* é o motivo da quantidade alta de energia requerida para a ocorrência da fratura frágil em materiais poliméricos. (SMITH e HASHEMI, 2012)

Figura 16 - Modelo esquemático de uma fendilha próxima ao final de uma trinca em polímero vítreo.



Fonte: Adaptado de SMITH e HASHEMI, 2012.

Entretanto, se os termoplásticos forem aquecidos acima de sua  $T_g$ , podem exibir escoamento plástico antes da fratura. Durante o escoamento plástico, as cadeias moleculares lineares se desenrolam deslizando uma sobre a outra, alinhando-se gradativamente, na direção da tensão aplicada. Em geral, quando a tensão aplicada for muito alta e a extensão das cadeias forem bastante grandes, as ligações covalentes das cadeias principais se quebram, ocorrendo a fratura do polímero. (SMITH e HASHEMI, 2012)

Pode-se reforçar os termoplásticos por meio de alguns fatores, cada um dos quais têm relação na resistência do polímero. Os dois principais são: a) massa molecular média da cadeia, e b) a cristalinidade do polímero. Quanto à massa molecular média da cadeia, o polímero com massa acima do valor crítico ( $M_c$ ) passa pelo platô borrachoso antes de entrar na região de escoamento. Na região borrachosa, acima da  $T_g$ , o polímero acima da  $M_c$  não escoou, pois o movimento das cadeias uma sobre a outra é lento. Isso implica em certo tempo requerido para as cadeias emaranhadas se desemaranharem, pois a viscosidade do material polimérico aumenta consideravelmente. (CARR e FEGER, 1993; SMITH e HASHEMI, 2012)

A cristalinidade afeta fortemente a resistência à tração, pois aumentando a cristalinidade, há aumento de densidade, módulo de elasticidade e resistência à tração. De modo geral, o ganho de resistência do material mais cristalizado é devido ao maior empacotamento das cadeias, o que leva a uma maior força de ligação intermolecular entre as cadeias. (SMITH e HASHEMI, 2012)

#### 2.4.4 Propriedades Ópticas

Os materiais mais comumente usados para produção de lentes ópticas, são os vidros minerais e polímeros ópticos, como caso do PC, PMMA e acrilatos. A grande vantagem do uso dos polímeros é a baixa massa específica, que em geral é em torno de  $1300\text{Kg/m}^3$ , que é metade em relação aos vidros minerais. As propriedades ópticas dos materiais desempenham papel importante na alta tecnologia. (SMITH e HASHEMI, 2012)

Refração da Luz: Quando fótons de luz são transmitidos através de um material transparente, ocorre perda de parte de sua energia, e por consequência, a velocidade da luz é reduzida e o feixe de luz muda de direção. (SMITH e HASHEMI, 2012) Portanto, um feixe de luz vindo do ar é desacelerado ao penetrar em um meio mais denso, como vidro ou um polímero óptico. E a velocidade relativa da luz que atravessa um meio é expressa pela propriedade denotada “Índice de Refração ( $n$ )”. O valor de  $n$  em um meio é calculado como a razão entre as velocidades da luz, e do meio considerado, respectivamente. A Tabela 1 abaixo apresenta alguns valores do índice de refração de alguns polímeros ópticos. (GRANADO, 2006)

Tabela 1: Índice de refração de alguns polímeros usuais.

Plásticos Ópticos	Índice de refração
Poliestireno (PS)	1,59-1,60
Polietileno (PE)	1,50-1,54
Poli Metil Metacrilato (PMMA)	1,48-1,50
Politetrafluoretileno (PTFE)	1,30-1,40

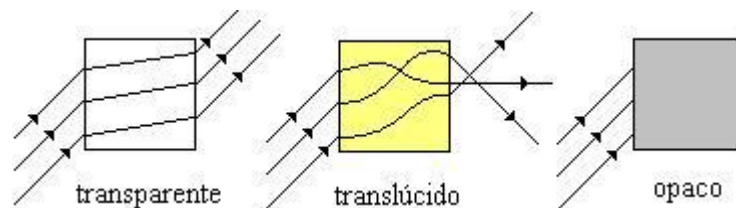
Fonte: Autor.

Deve-se também observar que, quando a luz passa de um meio com alto índice de refração para outro com baixo índice de refração, há um ângulo crítico de incidência  $\theta_c$ , que se ultrapassado, resulta na reflexão interna total da luz.

Absorção, transmissão e reflexão da luz: Todos os materiais absorvem a luz até certo ponto, devido às interações dos fótons com a estrutura e as ligações dos átomos dos materiais. Logo, a fração de luz transmitida por um material é dependente da quantidade de luz refletida e absorvida. Para um comprimento de onda  $\lambda$ , a soma das frações, da luz refletida, absorvida e transmitida, é igual a 1. (SMITH e HASHEMI, 2012)

A transparência a luz visível é apresentada por polímeros amorfos ou com baixo grau de cristalinidade. A presença de cristalitos ou imperfeições, tornam o material semitransparente, pois estas inclusões espalham a luz. Portanto, materiais muito cristalinos são translúcidos ou semicristalinos, ou até mesmo opacos, dependendo quanto maior for o grau de cristalinidade. A Figura 17 apresenta esquema ilustrativo quanto a transparência dos polímeros, devido à forma como ocorre ou não passagem dos feixes de luz no material. (GRANADO, 2006; SMITH e HASHEMI, 2012)

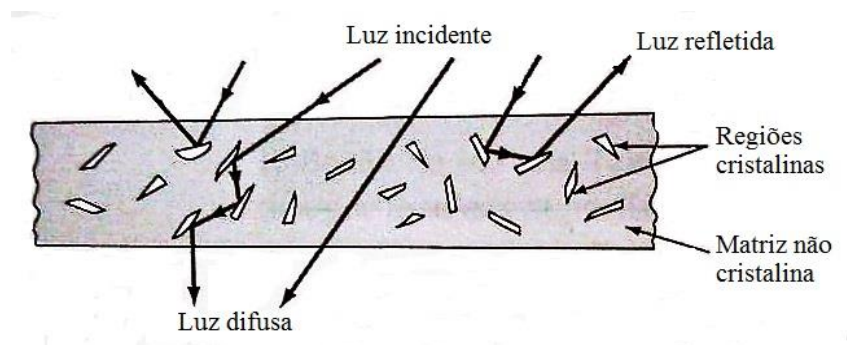
Figura 17 - Representação esquemática sobre translucidez dos polímeros.



Fonte: SMITH e HASHEMI, 2012.

Polímeros como PS, PMMA e PC possuem excelente transparência, pois não são cristalinos. Porém, alguns materiais plásticos possuem algumas regiões com cristallitos com índice de refração mais alto que da matriz não cristalina. Se tais regiões forem maiores que o comprimento de onda da luz incidente, as ondas luminosas sofrem espalhamento por reflexão e refração, diminuindo a transparência do polímero, bem como esquematizado na figura 18, a qual mostra como a luz se comporta em polímeros que contenham regiões cristalinas (SMITH e HASHEMI, 2012)

Figura 18 - Comportamento da luz nas interfaces das regiões cristalinas.



Fonte: Adaptado de SMITH e HASHEMI, 2012.

Embora o índice de refração dos plásticos ópticos seja próximo do padrão dos vidros ópticos, a variação do índice em função da temperatura ( $dn/dt$ ) é cerca de 50 vezes maior que dos vidros ópticos. Isto faz o desempenho dos plásticos ópticos serem menos estáveis termicamente (KAROW, 1993).

A maior limitação para os sistemas ópticos está relacionada com a alteração do índice de refração e influência da temperatura ( $dn/dT$ ). Em algumas aplicações isto pode criar indesejáveis aberrações e/ou mudanças no comprimento focal. Pode-se dizer que isto é devido em parte a absorção de umidade, baixa temperatura de transição vítrea e variação da expansão térmica, geralmente maior que o vidro, embora muitos polímeros operem na faixa de 200°C (TOLLEY, 2003).

**Birrefringência:** Também conhecido como dupla refração, sendo observada quando uma radiação luminosa incide sobre um meio não isótropo (em que a velocidade da luz e demais propriedades ópticas dependem da direção em que é efetuada a medição), e a onda se decompõe em duas, que se propagam em diferentes direções sendo uma componente chamada ordenada e um raio extraordinário. No caso dos plásticos ópticos isso ocorre quando eles são submetidos a

forças externas como compressão e tração. Quando se observa esses materiais com luz branca polarizada um padrão de franjas aparece como uma série de contínuas e sucessivas faixas de diferentes cores. Cada uma dessas faixas representa um diferente grau de birrefringência. Em componentes plásticos essas tensões internas são introduzidas durante o processo de fabricação, entretanto, lentes plásticas têm sido confeccionadas com reduzida birrefringência. Em aplicações muito críticas a birrefringência precisa ser analisada, entretanto para algumas aplicações ópticas essa condição pode ser desprezada. (SILVA, 2002)

### 3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

#### 3.1. PMMA e RSA 6061

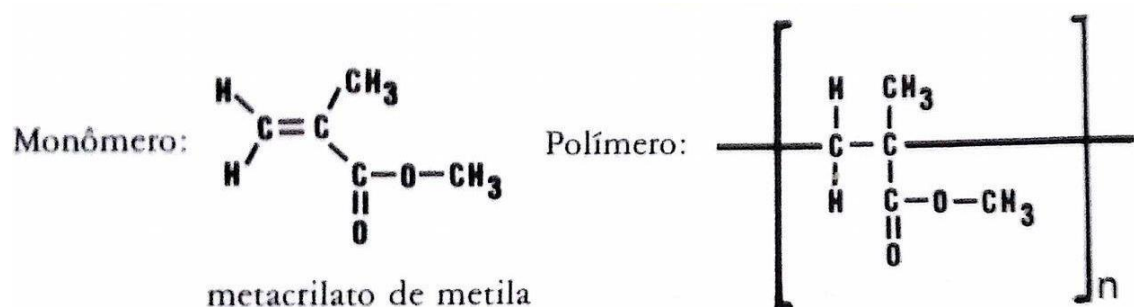
As lentes fresnel foram produzidas a partir de um polímero óptico já amplamente difundido no campo óptico difrativo: O PMMA.

O Poli(metacrilato) ou PMMA, também conhecido popularmente por ‘plástico acrílico’ é um polímero termoplástico muito usado para aplicações ópticas, devido principalmente às seguintes propriedades:

- Semelhança com o vidro
- Boa resistência química
- Alta resistência às intempéries
- Resistência ao impacto
- Transparência
- Capacidade de refletir a luz

A estrutura do monômero que compõem o PMMA, bem como sua estrutura polimérica são mostrados na Figura 19.

Figura 19 - Estrutura do monômero e do polímero de PMMA.



As características do PMMA são:

- Peso molecular: 500.000-1.000.000
- Densidade (g/cm<sup>3</sup>): 1,18
- Índice de refração: 1,49
- Tg: 105° e Tm: 160°
- Cristalinidade: Muito baixa
- Incolor e transparente

Além da aplicação na área óptica, o PMMA possui vasta gama de aplicabilidade, sendo que tipicamente é empregado também em placas de sinalização de tráfego em estradas; calotas e janelas de aviões; lanternas de carros; protetores de chuva em janelas de carros; letreiros de casas comerciais; luminárias; lentes de grandes dimensões para retroprojetores, decorações de lojas comerciais; painéis; fibras ópticas; redomas de instrumentos; placas transparentes para tetos. (MANO, 2001)

Já para a fabricação dos moldes das lentes fresnel, foi utilizado como material o RSA 6061, uma liga de alumínio com grãos ultrafinos, de composição: 98,2% Al, 0,3% Si e 0,5% Mg. As propriedades físicas e mecânicas do RSA 6061 são mostradas nas tabelas 2 e 3 abaixo:

Tabela 2: Propriedades físicas do Alumínio RSA 6061.

Densidade [g/cm <sup>3</sup> ]	Dilatação térmica [10 <sup>-6</sup> /K]	Mód.Elasticidade [GPa]	Cond. Térmica [W/mK]
2,7	23	70	160

Fonte: Autor.

Tabela 3: Propriedades mecânicas do Alumínio RSA 6061.

Lim. Resistência [MPa]	Lim. Escoamento [MPa]	Alongamento [%]	Dureza [HB]
304	277	16	95

Fonte: Autor.

A usinabilidade do alumínio é alta, devido à sua alta maleabilidade, possibilitando sua moldagem e usinagem em diferentes formatos. Além disso, o consumo energético durante a usinagem é baixo, havendo impacto ambiental baixo. Em vista das propriedades e características apresentadas, tal liga de alumínio é amplamente empregada em construções navais, veículos, equipamentos elétricos, rebites e peças de precisão, sendo, portanto, aplicável em estruturas submetidas a elevadas tensões.

### **3.2 Máquinas e equipamentos**

Para a fabricação das lentes em PMMA e dos moldes em Alumínio RSA 6061, utilizou-se um centro de usinagem vertical, com comando numérico computadorizado (figura 20). A máquina é da marca ROMI, modelo D 600, sendo que é equipada com o CNC Fanuc Oi - MD. Utilizou-se também um cabeçote com motor spindle para obtenção de rotação de 50000 rpm. A figura 20 ilustra o sistema montado com o centro de usinagem acoplado ao spindle.

Para a microusinagem, utilizou-se como fluido de corte para o PMMA, o Alkalisol 900, ao passo que, para o RSA 6061, o álcool isopropílico.



Figura 20 - ROMI D 600 acoplado com spindle de 50000 rpm.



Fonte: Autor.

Para efeito de análise do acabamento superficial das amostras microfresadas, utilizou-se da técnica de perfilometria óptica, através de um microscópio confocal OLYMPUS LEXT OLS4100, ilustrado na figura 21.

Figura 21 - OLYMPUS LEXT OLS4100.



Fonte: OLYMPUS OPTICAL CO

Para avaliação da avaria das ferramentas utilizadas, de formação de cavacos, e aferição das condições das faces microfresadas, gerou-se as imagens através de um microscópio eletrônico de varredura (MEV) marca LEO, modelo 440, operado sob potência de 20kW.

### 3.3 Preparação das amostras

As lentes e os moldes foram usinados a partir de amostras cilíndricas de Alumínio RSA 6061 e PMMA (figura 22), em que a fixação das peças de RSA foram feitas por meio de uso de um parafuso M3, enquanto que as amostras de PMMA foram fixadas no centro de usinagem, utilizando-se um dispositivo, ilustrado na figura 23.

Figura 22 - Amostras a serem microfresadas, de RSA e PMMA, respectivamente.



Fonte: Autor.

Figura 23 - Suporte de fixação para microfresagem de amostras de RSA 6061.



Fonte: Autor.

Partindo-se de uma barra cilíndrica, o RSA foi cortado em uma serra de fita em amostras de 35mm de diâmetro e 20mm de altura. Em seguida o material foi polido, não só para limpeza e rebarbação da superfície da amostra para a microusinagem, como também para efeito de caracterização do material por microscopia eletrônica de varredura (MEV), tendo sido dividido o processo nas seguintes etapas:

Utilizando-se as lixas de 400, 600, 800 e 1200, todas em água; sendo posteriormente polidas numa politriz com pasta de diamante com granulometria de 1um. Porém, as amostras polidas, por mais que fossem espelhadas e aparentemente polidas (figura 24), continham ainda pequenos e numerosos riscos na superfície, sendo impossível a caracterização no MEV. Pelo fato de se trabalhar com o alumínio quase puro (98,2% de Al no RSA 6061) há uma grande dificuldade de polimento do material para análise metalográfica, dado que se trata de um metal dúctil, além do fato de que o alumínio reage espontaneamente com o oxigênio presente no ar ambiente, formando uma fina camada de óxido na superfície.

Figura 24 - Amostras de RSA 6061 após polimento com pasta de diamante.



Fonte: Autor.

Por isso, para refinar o polimento do RSA, realizou-se polimento com sílica coloidal em uma amostra de RSA embutida (figura 25), que eliminou os riscos remanescentes na superfície do alumínio já previamente polido.

Figura 25 - Polimento com Si coloidal.



Fonte: Autor.

Após o polimento em Si coloidal foi realizado ataque químico com Kellers por 20s porém ao se colocar a amostra atacada no MEV, não se conseguiu visualizar os contornos de grão do material, tendo apenas uma imagem acinzentada sem identificação de grãos. Refez-se então todo o processo de lixamento, polimento com pasta de diamante e com sílica coloidal, a fim de se testar outro reagente. Foi feito tal procedimento testando-se mais dois reagentes (Kroll, NaF-NaOH), porém em ambos não foi possível caracterizar o material no MEV.

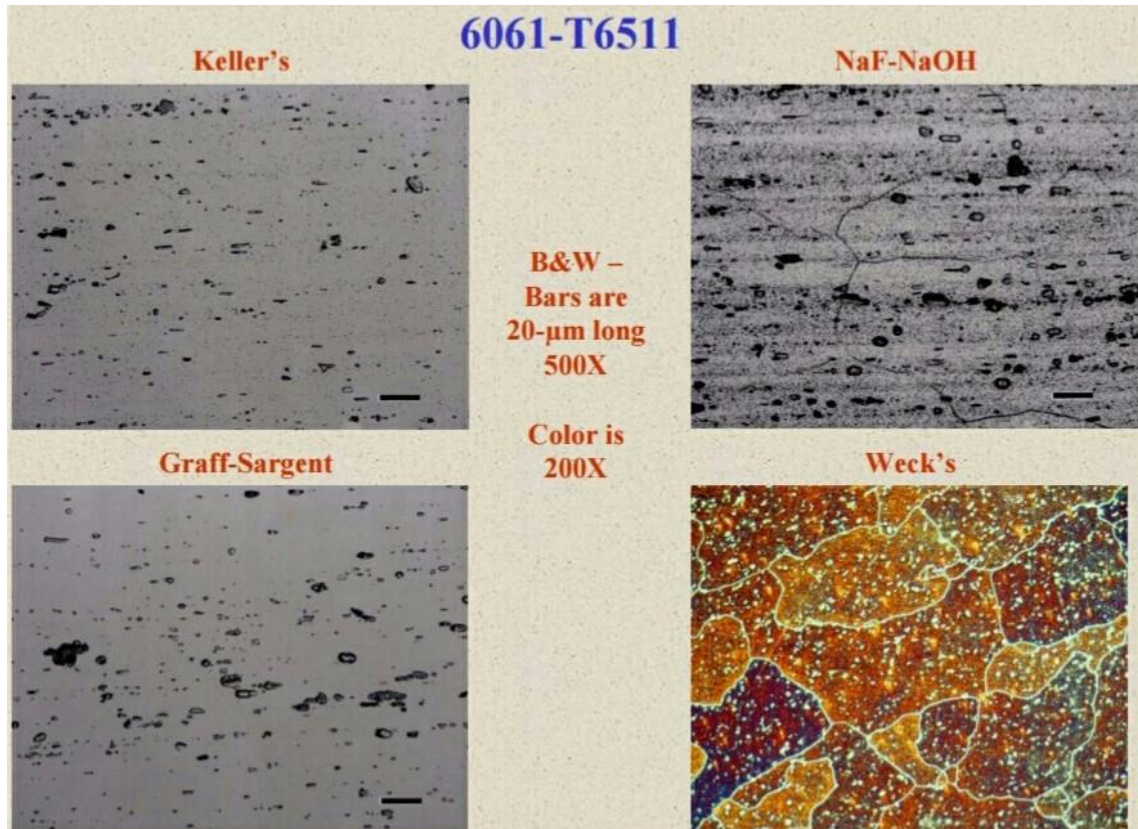
Pesquisou-se mais a fundo a respeito do polimento de alumínio e suas ligas, de modo que obteve-se em literatura o processo da metalografia colorida como necessário para quando trata-se de alumínio quase puro, dada a questão da espontaneidade na formação de óxido, quando o material é exposto ao ar atmosférico. Nesse procedimento, a superfície reage com um composto químico, o qual, para um dado tempo específico de reação, tingem a superfície da amostra de RSA 6061, tornando possível sua análise metalográfica no microscópio de varredura.

Têm-se dois métodos de metalografia colorida: Reagente de Barker, e reagente de Weck. O primeiro é de difícil manuseio, uma vez que o reagente é composto de ácido fluobórico ( $\text{HF}_3\text{B}_4$ ), ácido esse que é altamente perigoso, exalando voláteis tóxicos, de modo que tal método foi inviabilizado.

O segundo método é por meio do reagente de Weck, composto de uma reação entre 4g de  $\text{KMnO}_4$  e 1g de  $\text{NaOH}$  em 100ml de água, sendo portanto, de fácil manuseio para realização

do composto, sem produção de subprodutos perigosos e/ou tóxicos. Com a realização da mistura, emerge-se, à temperatura ambiente, a superfície da amostra no composto, por cerca de 20 segundos, até que a superfície fique colorida. Tal método permite a revelação de segregações e da estrutura dos grãos, conforme ilustrado na figura 26, em que mostra-se a diferença de visualização do RSA 6061 comparando-se as técnicas de ataque comuns com o reagente de Weck.

Figura 26 - Estrutura dos grãos do RSA6061 em ataques comuns e com reagente de Weck.



Fonte: VANDER VOORT, 2004.

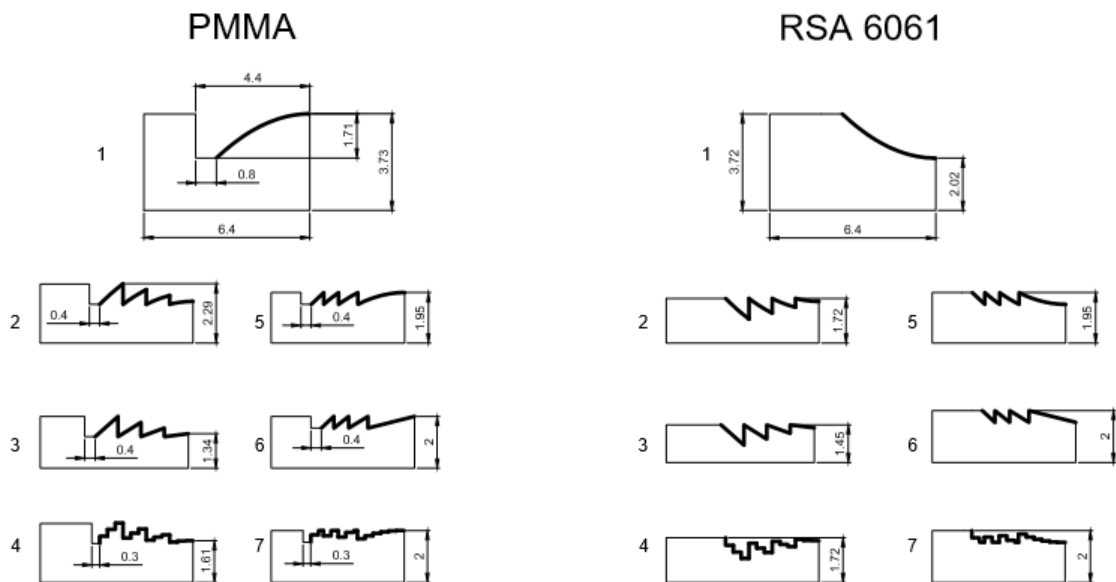
Entretanto, não foi possível realizar a metalografia colorida por reagente de Weck, pois houve problemas técnicos com o microscópio eletrônico, impossibilitando que a análise fosse feita em tempo hábil.

Quanto às amostras de PMMA, foram cortados várias amostras de 16mm de diâmetro e 5mm de altura, sendo as amostras devidamente polidas com álcool isopropílico antes de serem usinadas.

### 3.4 Ferramentas e parâmetros dos experimentos

Os ensaios foram divididos em duas etapas: Microfresamento de sete diferentes moldes em Alumínio RSA 6061, e microfresamento de 7 diferentes modelos de lentes em PMMA (figura 27), a partir de diferentes tipos de lentes fresnel (figura 28), projetadas em 2D através do software AutoCAD.

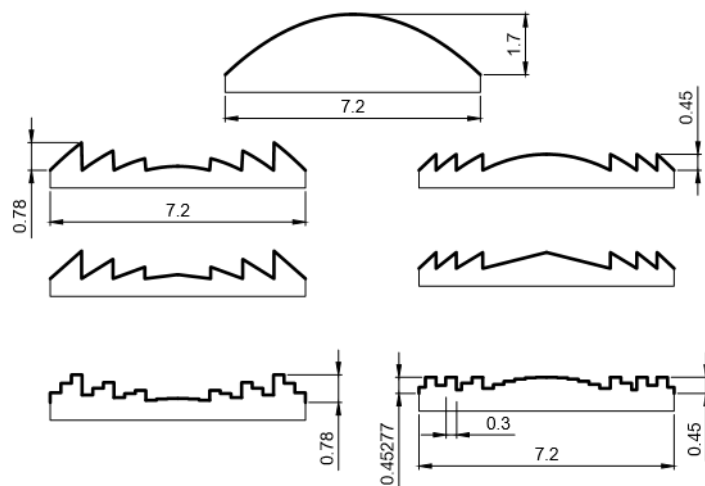
Figura 27 - Vista em meio corte dos modelos projetados de lente (PMMA) e seus moldes (Alumínio RSA 6061).



Fonte: Autor.

Figura 28 - Modelos das lentes fresnel.

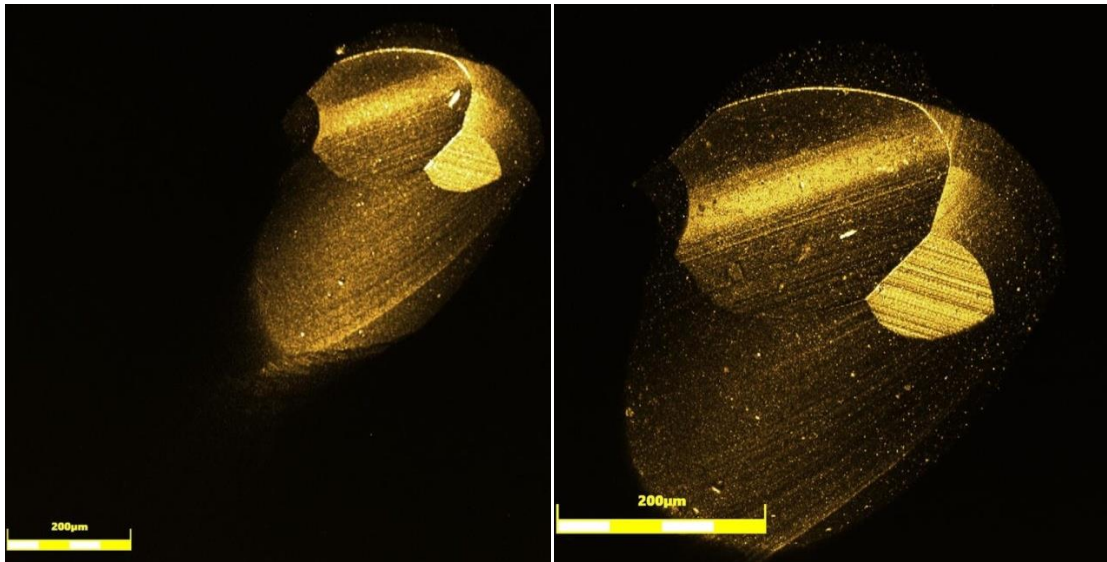
## Lentes Fresnel



Fonte: Autor.

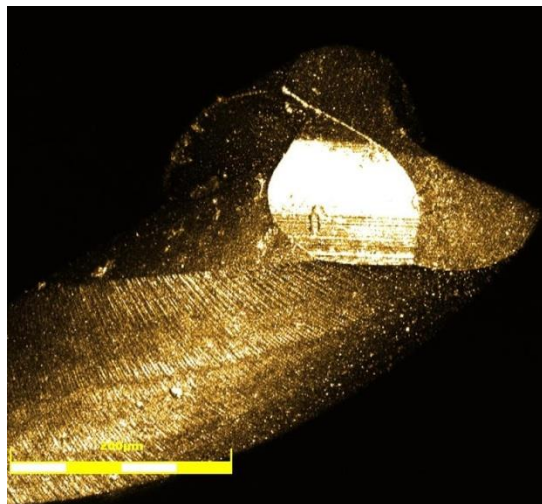
Para tanto, foi definido o uso de três diferentes ferramentas. Todas as ferramentas utilizadas são da marca Mitsubishi, feitas de carbeto de Kobe. A ferramenta I (figura 29) foi utilizada para a microusinagem do molde e da lente tipo 1, enquanto que a ferramenta II (figura 29) foi utilizada para fabricação dos moldes e lentes 2, 3, 5 e 6; de modo que a ferramenta III (figura 30) foi a responsável pelo microfresamento dos moldes e lentes 4 e 7.

Figura 29 - Ferramenta I e II – Ball nose de 0,4 mm de raio e Ball nose de 0,2 mm de raio, respectivamente.



Fonte: Autor.

Figura 30 - Ferramenta III – topo reto de diâmetro 0,3 mm.

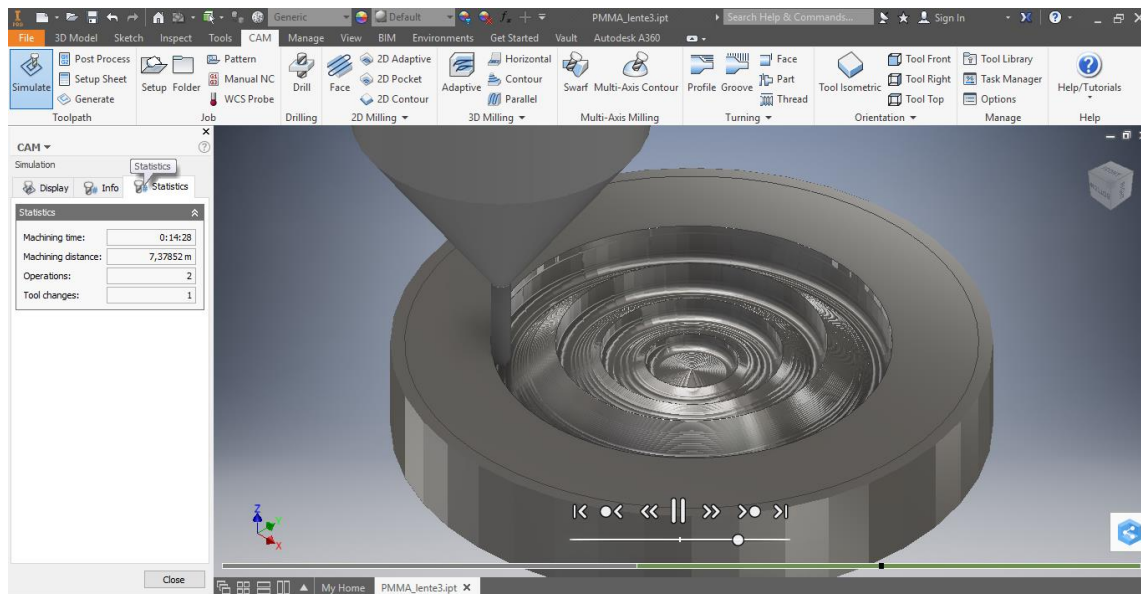


Fonte: Autor.

Definidas as geometrias das lentes e moldes, e as ferramentas para microfresamento de cada uma, utilizou-se o software “Autodesk Inventor”, de modo a através do sistema CAD-

CAM, gerar a modelagem 3D das peças, e obter sua simulação de usinagem por meio da definição dos parâmetros de corte (figura 31). Realizada a simulação das peças, o programa gera o código G a ser inserido no CNC do centro de usinagem.

Figura 31 - Exemplo de simulação de microfresamento da lente 3, no ambiente CAM do Inventor.

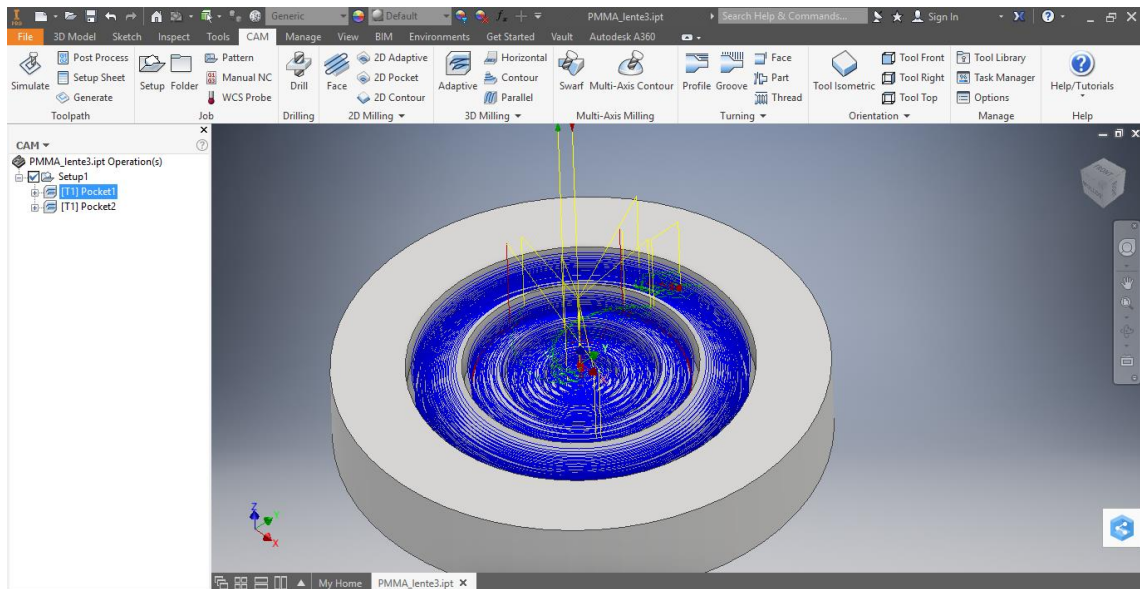


Fonte: Autor.

Para realização da simulação, adotou-se estratégias de usinagem, para realização das operações de desbaste e acabamento. Na figura 32 tem-se ilustrado o exemplo, mostrado pelo software, do caminho percorrido pela ferramenta, em azul, durante a operação de desbaste da lente 3. Além disso, os parâmetros de entrada foram definidos através de pesquisa da influência dos mesmos no microfresamento, tanto de polímeros vítreos, quanto de ligas de Al.



Figura 32 - Exemplo do caminho percorrido pela ferramenta para operação de desbaste da lente 3.



Fonte: Autor.

Os ensaios, tanto em PMMA quanto em RSA 6061, foram realizados sob avanço programado de 500 mm/min, avanço por dente de 2,5  $\mu\text{m}/\text{rev}$ , com rotação de 50000 rpm e tolerância de 1  $\mu\text{m}$ .

Com isso, as operações e demais parâmetros que ditaram a fabricação de cada lente em PMMA, estão mostradas na tabela 4. Vale ressaltar que para a lente 2, foi adotado estratégia diferenciada, usinando-se desbaste e acabamento isoladamente para cada uma das 4 zonas que compõem a lente. Além disso, na tabela a lente tipo 1 é discriminada duas vezes, pelo fato de ter sido a única a ser replicada.

Tabela 4: Operações para desbaste e acabamento, para lentes microfresadas em PMMA.

Nº	Desbaste	Max. ap[mm]	Max. ae[mm]	Sobremetal [mm]	Acabamento	Max. ap[mm]	Max. ae[mm/º]
1	Pocket	0,1	0,38	0,03	Radial	0,03	1 grau
1	Pocket	0,1	0,38	0,03	Radial	0,03	1 grau
2	Pocket variável	0,1	0,18	0,005/0,01/ 0,015/0,02	Pocket	0,005/0,01/ 0,015/0,02	0,18
3	Pocket	0,05	0,18	0,005	Pocket shallow areas	mín=0,005 máx=0,025	0,18
4	Pocket	0,05	0,25	0,005	Pocket	0,005	0,25
5	Pocket	0,05	0,18	0,02	Spiral	0,02	0,0075
6	Pocket	0,03	0,18	0,005	Spiral	0,005	0,0075
7	Pocket	0,05	0,3	Axial:0,02	Pocket	0,002	0,3

Fonte: Autor.

Ao empregar-se a estratégia de acabamento *Radial* o software apresenta o parâmetro *Max. ae* sob a opção de grau, pois nessa técnica o passe da ferramenta varia radialmente, conforme o grau definido, que no caso utilizou-se valor de 1 grau. Optou-se por manter o nome das estratégias de desbaste e acabamento em inglês, utilizando assim a mesma nomenclatura trazida pelo software.

Para o microfresamento dos respectivos modelos dos moldes, em RSA 6061, foram produzidos 2 moldes de cada um dos sete modelos, resultando, portanto, em 14 moldes a serem simulados. A tabela 5 discrimina dois moldes do modelo 1 e dois do modelo 5, dado que apenas para esses modelos de molde houve variação de estratégia para fabricação da réplica, em que, no modelo 1, primeiro optou-se pelo acabamento radial em todo interior do molde, ao passo que na réplica, fez-se acabamento com pocket, seguido de radial somente na região central do molde. Já para o modelo 3, optou-se por replicar utilizando acabamento radial na região central, juntamente com o pocket. Logo, como para os demais cinco tipos de moldes, manteve-se a estratégia para replicação, só há uma discriminação para cada modelo na tabela.

Tabela 5: Operações para desbaste e acabamento, para moldes microfresadas em RSA 6061.

Nº	Desbaste	Max. ap[mm]	Max. ae[mm]	Sobremetal [mm]	Acabamento	Max. ap[mm]	Max. ae[mm/º]
1	Pocket	0,2	0,37	0,03	Radial	0,03	1 grau
1	Pocket	0,1	0,16	0,03	Pocket	0,03	0,16
					Radial-região central	0,03	1 grau
2	Pocket	0,05	0,17	0,015	Pocket	0,015	0,17
					Radial	0,015	1 grau
3	Pocket	0,05	0,16	0,015	Pocket	0,015	0,16
					Radial-região central	0,015	1 grau
3	Pocket	0,05	0,25	0,015	Pocket	0,015	0,16
4	Pocket	0,03	0,24	0,01	Pocket	0,015	0,22
5	Pocket	0,05	0,17	0,015	Pocket	0,015	0,16
6	Pocket	0,06	0,15	0,03	Pocket	0,03	0,15
					Radial – todo interior	0,03	1 grau
7	Pocket	0,03	0,24	0,01	Pocket	0,15	0,22

Fonte: Autor.

### 3.5 Avaliação de acabamento superficial e de avaria das ferramentas

Após a microusinagem dos moldes e lentes, foi verificado se as faces foram totalmente usinadas, e observado como ficaram as superfícies microusinadas. Para tanto, utilizou-se a técnica de microscopia eletrônica por varredura (MEV) num microscópio marca LEO, modelo

440, que operou sob 20kW, no CAQI (Centro de Análise Química) do Instituto de Química da USP.

No mesmo MEV acima mencionado, foi feita a análise quanto à identificação de formação real ou não de cavacos de PMMA e RSA, e sua natureza (dúctil ou frágil), tendo sido as amostras metalizadas antes da análise.

Além disso, aferiu-se, através das imagens obtidas via MEV, o nível de avaria sofrido por cada uma das ferramentas empregadas no microfresamento das amostras, de modo a analisar se as ferramentas estariam aptas a serem reutilizadas, e caso contrário, avaliar quais os possíveis impactos dessas avarias sofridas nos resultados obtidos de acabamento superficial.

A avaliação do acabamento superficial das amostras microusinadas foram aferidas utilizando-se o microscópio confocal OLYMPUS LEXT OLS4100, medindo-se diferentes zonas de cada amostra, tal que em cada zona analisada, realizou-se cinco aferições. Os parâmetros analisados de rugosidade foram Ra, o qual afere a amplitude média do perfil em relação ao comprimento do perfil em análise, e Rt, que corresponde à média dos cinco maiores picos e vales ao longo do comprimento do perfil, sendo que:

$$Ra = \frac{Y_1+Y_2+\dots+Y_n}{n} \quad (1)$$

Em que, Y representa os pontos discretos ao longo do perfil, e n o número de pontos.

$$Rt = \frac{(P_1+P_2+\dots+P_5)(V_1V_2\dots V_5)}{10} \quad (2)$$

Em que, P representa os picos, ao passo que V representa os vales.

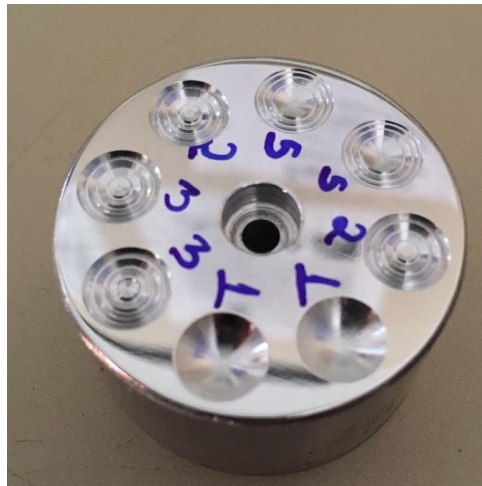
A rugosidade teórica é dada em função do avanço (f) e do raio de ponta da ferramenta (Rp), sendo:

$$R \text{ teórico} = \frac{f^2}{8 \cdot R_p} \quad (3)$$

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a simulação CAM das lentes e moldes, o código G foi gerado pelo software Autodesk INVENTOR CAM, tendo sido inserido na máquina CNC Romi D600, a qual, posterior à etapa de set-up, realizou o microfresamento dos dados modelos projetados, conforme mostrado nas figuras 33, 34 e 35 abaixo:

Figura 33 - Amostra de RSA 6061 com moldes 1, 2, 3 e 5 microusinados.



Fonte: Autor.

Figura 34 - Amostra de RSA 6061 com moldes 4, 6, e 7 microusinados.



Fonte: Autor.

Figura 35 - Amostras de PMMA com as lentes microusinadas.



Fonte: Autor.

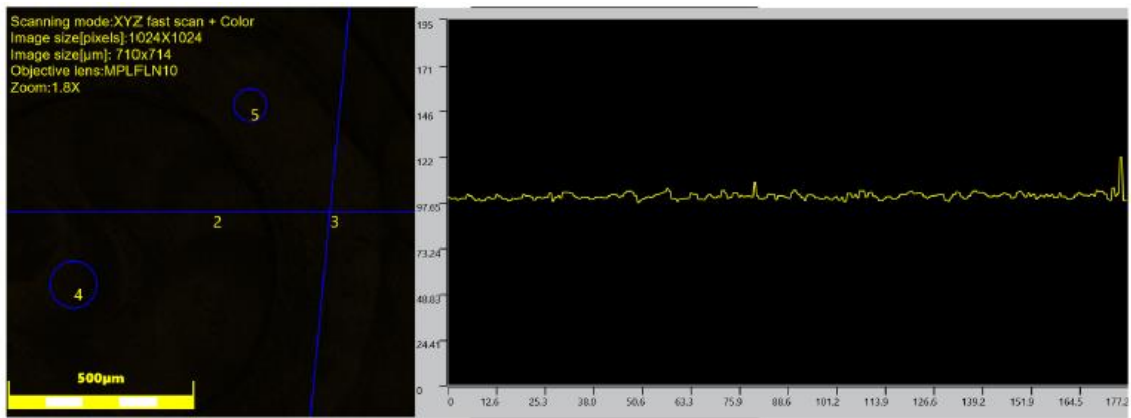
#### 4.1 Acabamento superficial

O acabamento superficial dos moldes e lentes, foi avaliado com base na aferição da rugosidade, por meio de perfilometria óptica, em que obteve-se valores de Ra e Rt, em micrômetros, para cada amostra microusinada.

Duas zonas foram selecionadas para a análise de rugosidade em cada amostra: a primeira zona a ser medida foi a região central e a segunda a região adjacente, mais radial da amostra. Em cada zona realizou-se 5 medições, de modo que a rugosidade de cada zona foi obtida como sendo a média das 5 aferições. Com isso, conseguiu-se valor de rugosidade para as zonas mais centrais, bem como para as zonas mais externas, podendo-se analisar e comparar a diferença de resultados em cada uma delas, compondo-se a rugosidade média de cada amostra.

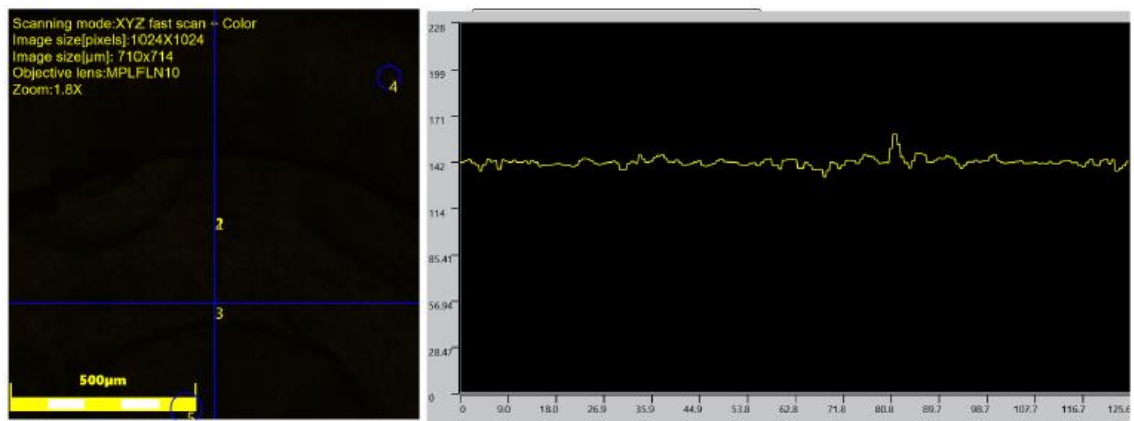
Nas figuras 36 até a 39, têm-se como exemplos os resultados obtidos de perfilometria óptica da lente 7 e do molde 4, ambos mostrando suas respectivas aferições nas regiões central e na borda, em que além de possibilitar a comparação dos valores conseguidos em cada modelo aferido, pode-se também avaliar visualmente a variação da seção em análise.

Figura 36 - Lente 4 - região central.



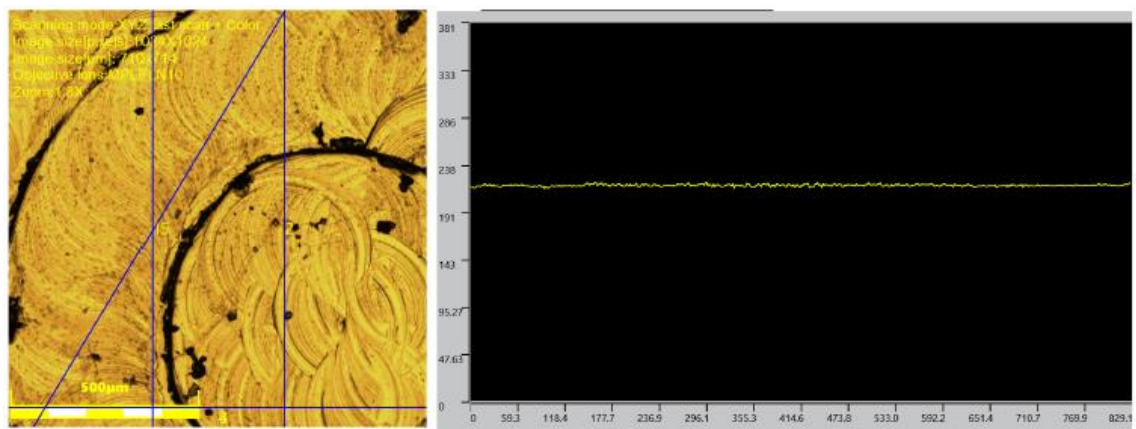
Fonte: Autor.

Figura 37 - Lente 4 - Região da borda.



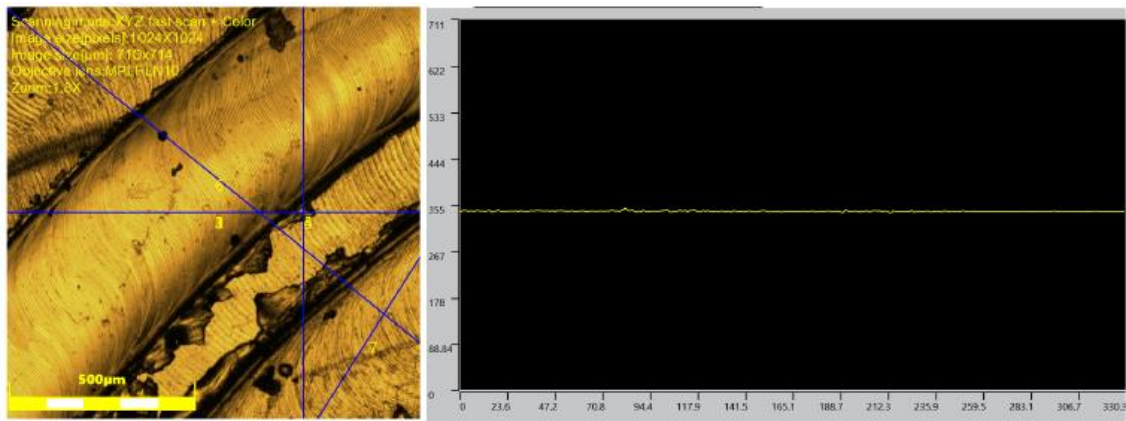
Fonte: Autor.

Figura 38 - Molde 7 – Região central.



Fonte: Autor.

Figura 39 - Molde 7 – Região da borda.



Fonte: Autor.

Portanto, em vista da comparação acima entre ambos modelos de lente e molde microfresados com ferramenta de ponta reta, embora no RSA os valores possuam uniformidade ao longo da seção analisada aparentemente maior em relação ao PMMA, seus valores obtidos são numericamente maiores, o que resulta em componentes obtidos com menos variação nas medidas, porém de maior rugosidade.

Os resultados totais obtidos de acabamento superficial são mostrados nas tabelas 6 a 9 abaixo, em que há os valores em cada zona, e depois os valores referentes a cada amostra.

Tabela 6: Ra e Rt de cada zona aferida para moldes em RSA 6061.

MOLDE - RSA	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rt [ $\mu\text{m}$ ]
1	0,526	2,262
1 – Réplica	0,639	2,605
2	Central: 0,514 Borda: 0,439	Central: 2,190 Borda: 1,994
2 – Réplica	Central: 0,608 Borda: 0,453	Central: 2,764 Borda: 2,884
3	Central: 0,598 Borda: 0,508	Central: 2,738 Borda: 2,242
3 – Réplica	Central: 0,664 Borda: 0,713	Central: 2,858 Borda: 3,087
4	Central: 0,388 Borda: 0,526	Central: 1,624 Borda: 2,152
4 – Réplica	Central: 0,412 Borda: 0,467	Central: 1,813 Borda: 2,031
5	Central: 0,528 Borda: 0,290	Central: 2,324 Borda: 1,351
5 – Réplica	Central: 0,490 Borda: 0,318	Central: 2,129 Borda: 1,462
6	Central: 0,588 Borda: 0,527	Central: 2,554 Borda: 2,368
6 – Réplica	Central: 0,506 Borda: 0,456	Central: 2,324 Borda: 1,957
7	Central: 0,413 Borda: 0,651	Central: 1,775 Borda: 2,792
7 – Réplica	Central: 0,466 Borda: 0,451	Central: 1,946 Borda: 1,867

Fonte: Autor.



Tabela 7: Ra e Rt médio de cada modelo de molde em RSA 6061.

Molde - RSA	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rt [ $\mu\text{m}$ ]
1	0,526	2,262
1 – Réplica	0,639	2,605
2	0,476	2,092
2 – Réplica	0,530	2,824
3	0,553	2,490
3 – Réplica	0,688	2,972
4	0,457	1,888
4 – Réplica	0,439	1,922
5	0,409	1,837
5 – Réplica	0,404	1,795
6	0,557	2,461
6 – Réplica	0,481	2,140
7	0,532	2,283
7 – Réplica	0,458	1,906

Fonte: Autor.

Tabela 8: Ra e Rt de cada zona aferida para lentes em PMMA.

Lente - PMMA	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rt [ $\mu\text{m}$ ]
1	0,309	2,587
1 – Réplica	0,320	2,643
2	Central: 0,319 Borda: 0,638	Central: 1,984 Borda: 4,738
3	Central: 0,423 Borda: 0,602	Central: 3,012 Borda: 10,375
4	Central: 0,283 Borda: 0,311	Central: 1,985 Borda: 2,277
5	Central: 0,345 Borda: 0,585	Central: 3,172 Borda: 8,213
6	Central: 0,620 Borda: 0,268	Central: 4,897 Borda: 4,246
7	Central: 0,161 Borda: 0,102	Central: 1,403 Borda: 0,987

Fonte: Autor.

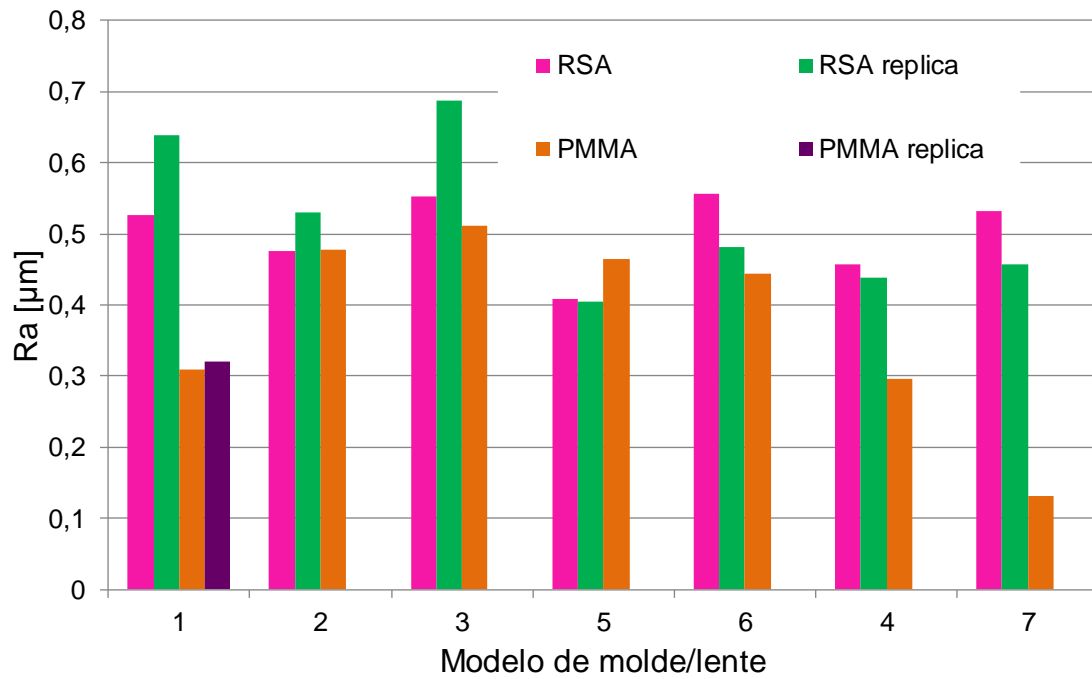
Tabela 9: Ra e Rt médio de cada modelo de lente em PMMA.

Lente - PMMA	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rt [ $\mu\text{m}$ ]
1	0,309	2,587
1 – Réplica	0,320	2,643
2	0,478	3,361
3	0,512	6,693
4	0,297	2,131
5	0,465	5,692
6	0,444	4,571
7	0,131	1,195

Fonte: Autor.

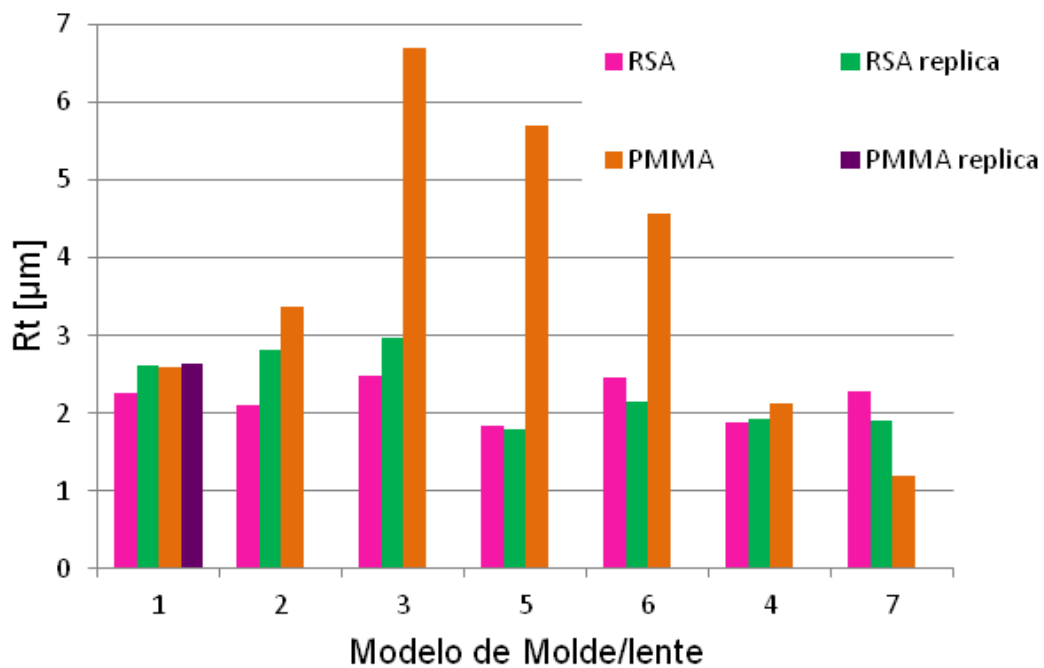
Os valores obtidos de rugosidade média para o PMMA foram inferiores, comparados com os respectivos modelos em RSA, conforme observado na figuras 40 e 41, porém no PMMA houve valores em média mais altos de Rt, em relação aos respectivos de RSA, e isso pode ter ocorrido pelo fato de que, por vezes durante o processo de microusinagem do PMMA, o material tenha alcançado temperaturas próximas à temperatura de transição vítrea do polímero, o que pode ter resultado em perda de qualidade na integridade superficial, podendo resultar em picos e vales mais acentuados, devido à disformidade superficial presente na localidade afetada, conforme evidenciado na figura 42 abaixo, em que a região mais clara é disforme ao restante da superfície da lente, sendo perceptível uma descontinuidade de acabamento nessa área.

Figura 40 - Ra das lentes e moldes microfresados.



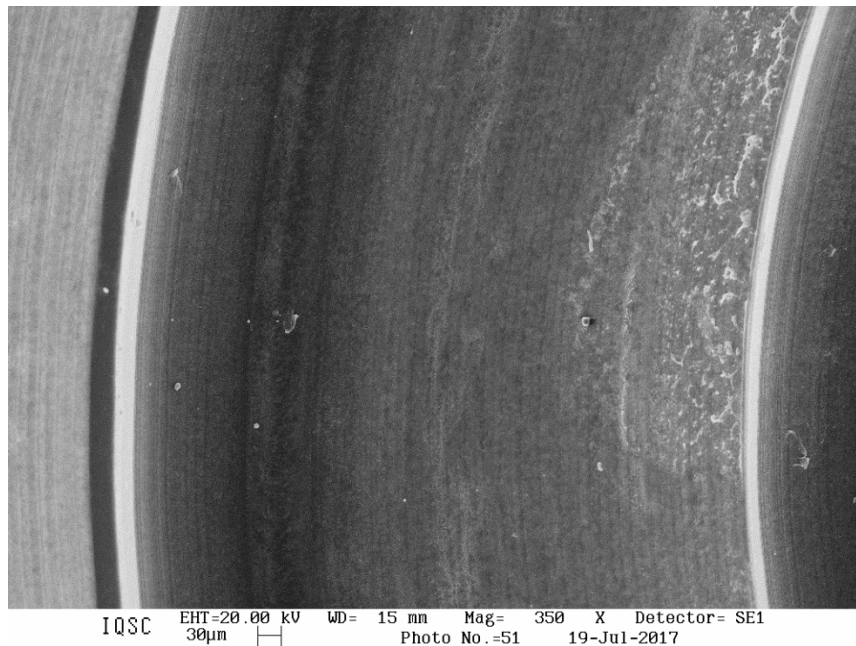
Fonte: Autor.

Figura 41 - Rt das lentes e moldes microfresados.



Fonte: Autor.

Figura 42 - Lente modelo 2 em PMMA; região visualmente disforme por provável temperatura próxima à  $T_g$  durante o processo.



Fonte: Autor.

Um fator importante a se considerar na análise dos resultados obtidos, é no que tange a taxa de avanço, que foi programada como 500 mm/min, porém durante os ensaios raramente conseguiu atingir tal valor, tendo sido variável de acordo com a região em que a ferramenta microusinava a amostra. Somente nas zonas mais externas das amostras o avanço conseguia atingir o valor programado, de modo que a variação foi radial, ou seja, quanto menor o raio de trabalho, menor o avanço alcançado, devido à menor distância percorrida e conseqüente tempo disponível para conseguir atingir a taxa programada de 500 mm/min. Com isso, deve-se considerar avanço variável, sendo maior tanto quanto maior o raio de trabalho. Portanto, pelas fórmulas de rugosidade teórica, dada em função do avanço, quanto maior seu valor, maior tende a ser a rugosidade.

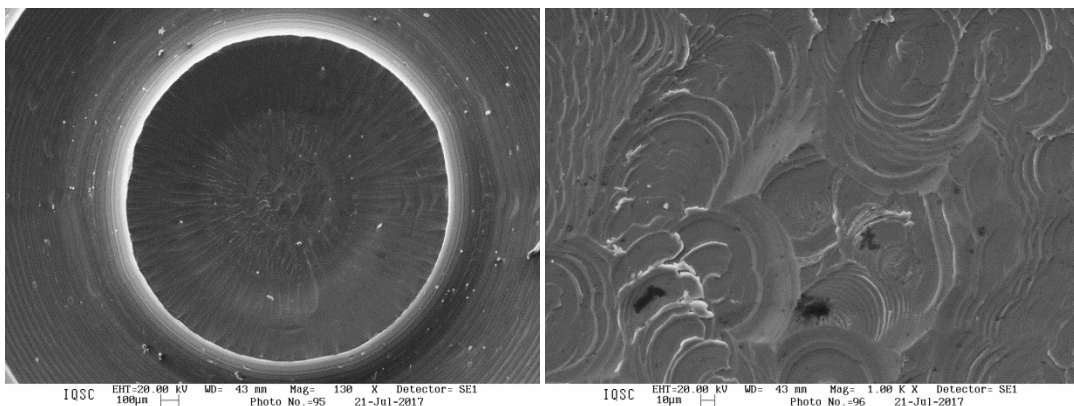
No RSA, apesar da replicação dos modelos em todos os moldes fabricados, houve mudança de estratégia de usinagem apenas nos moldes 1 e 3, de modo que, conseguiu-se um melhor acabamento no molde 1, em relação ao respectivo modelo replicado, tal que, mesmo diminuindo-se o ap e o ae na operação de desbaste, e teoricamente, tendo refinado a superfície pós desbaste, o acabamento via pocket em todo o molde e radial na região central, foi menos eficaz se comparado à estratégia original, em que aplicou-se a estratégia radial em todo o molde.

Isso porque, teoricamente,  $ap$  e  $ae$  são parâmetros que, quanto maiores, diminuem a qualidade superficial da peça. O  $ae$  adotado não pode ser superior ao valor do raio da ferramenta, senão a ferramenta não consegue usinar todo o material que deve ser desbastado, devendo ser, portanto, um pouco menor que o valor do raio, para que consiga cortar toda a superfície do material e confira uma superfície regular, sem altas variações de acabamento. E o  $ap$  não deve ser muito alto, pois além de originar irregularidades na superfície usinada, aumenta a força requerida para realização da operação, aumentando assim o desgaste da ferramenta, a qual pode inclusive sofrer a fratura.

Já no molde 3, a réplica foi produzida aumentando-se o  $ae$  do desbaste, de 0,16 mm para 0,25 mm, e alterando-se a estratégia de acabamento para apenas *pocket*, tal que anteriormente era composto por *pocket* seguido de *radial* para a região central. Com tais mudanças, obteve-se um pior resultado no modelo replicado, evidenciando o efeito prejudicial do aumento de  $ae$  quando os demais parâmetros não se alteram, além do efeito positivo em se adotar a operação *radial* na região central do molde, dado que houve aumento da rugosidade também nessa região, no molde replicado.

Um fato comum observado no microfresamento com ferramentas *Ball nose* em Alumínio RSA 6061, foi que no ponto central das amostras, a ferramenta não consegue cortar o material, tendo sido responsável pelas marcas no centro (figura 43), conseguindo apenas espalhar parte do material nas suas adjacências. Devido a esse fenômeno, observou-se que nas microusinagens em RSA com *Ball nose*, embora o avanço na região central seja menor que nas regiões mais externas, os valores de rugosidade obtidos na região central são maiores que nas zonas mais externas.

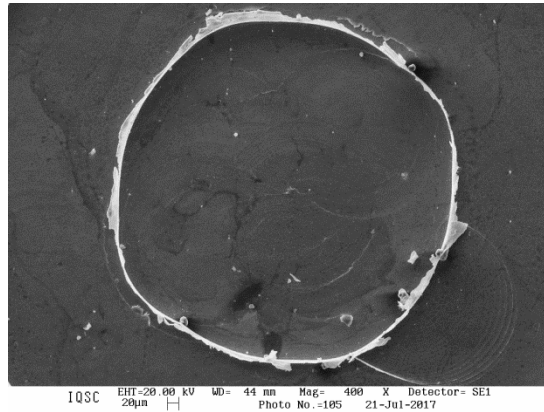
Figura 43 - Marcas no centro da peça, ao usar ferramentas *Ball nose*, no RSA.



Fonte: Autor.

Já com a utilização de ferramentas de topo reto, as marcas deixadas no centro das amostras não são significativas, pelo próprio formato da ferramenta, a qual tem contato efetivo com a peça durante todo o processo, mesmo no ponto central (figura 44). Logo, para esse tipo de ferramenta, observa-se que as rugosidades nas regiões centrais são menores que nas regiões externas, o que pode ser explicado pela ausência de espalhamento de material no centro, e do efeito das menores taxas de avanço conseguidas nas regiões centrais.

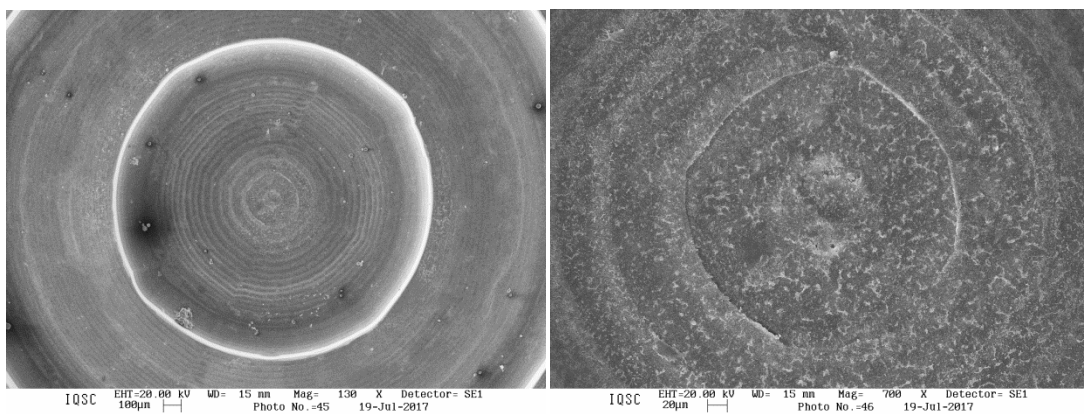
Figura 44 - Centro de lente, modelo 7, microusinada com ferramenta de topo reto.



Fonte: Autor.

Por sua vez, na microusinagem com o PMMA, tais marcas centrais são bem menos relevantes, dado que o RSA é um material mais dúctil que o dado polímero. Por isso, mesmo com o emprego de ferramenta Ball nose, as marcas centrais são quase imperceptíveis, não havendo espalhamento de material (figura 45).

Figura 45 - Centro da lente 2, em PMMA, com emprego de ferramenta ball nose.

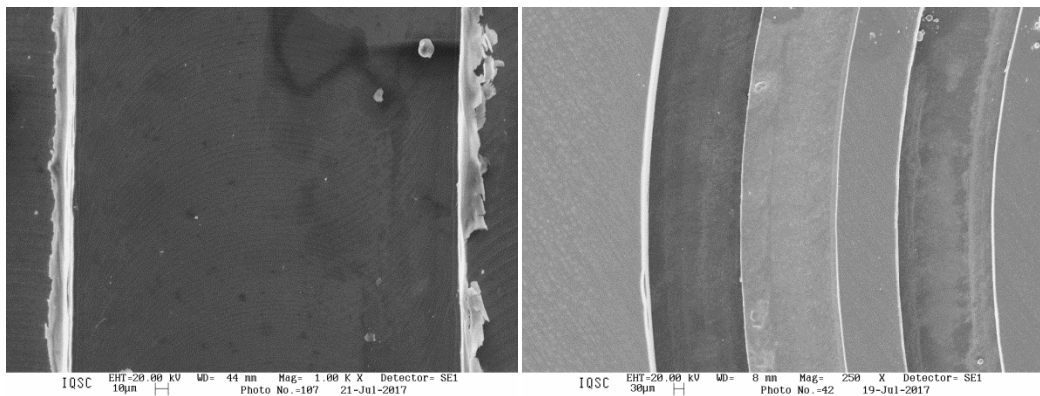


Fonte: Autor.

Logo, por meio da utilização da ferramenta Ball nose, o acabamento na região central foi melhor, se comparado aos moldes em RSA, tal que, para o PMMA as rugosidades médias conseguidas foram melhores na região central do que nas extremidades, com exceção da lente 6, apresentando, portanto, resultados inversos aos obtidos com o RSA.

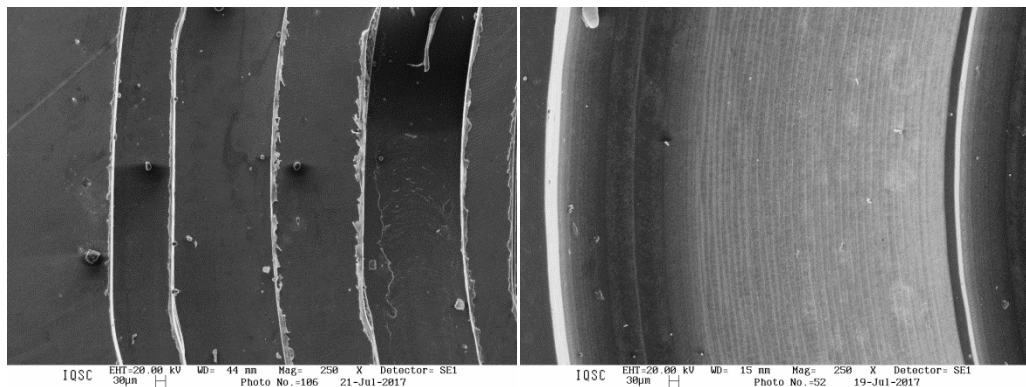
Em virtude da análise realizada através do MEV, pôde-se observar a formação de rebarbas, podendo-se notar que nos moldes em RSA houve grande quantidade de rebarba nas paredes dos canais e zonas, quando comparado às lentes em PMMA. Tal fato evidencia-se tanto com a ferramenta de topo reto, quanto com a Ball nose (figura 46 e 47). Tais rebarbas são de difícil remoção, e embora o acabamento superficial esteja satisfatório, a presença dessas rebarbas acaba por comprometer a qualidade funcional do componente.

Figura 46 - Comparação entre rebarbas no RSA, à esquerda, e PMMA, à direita, ambas microusinadas com ferramenta de topo reto.



Fonte: Autor.

Figura 47 - Comparação entre rebarbação no RSA, à esquerda, e PMMA, à direita, ambas microusinadas com ferramenta ball nose.



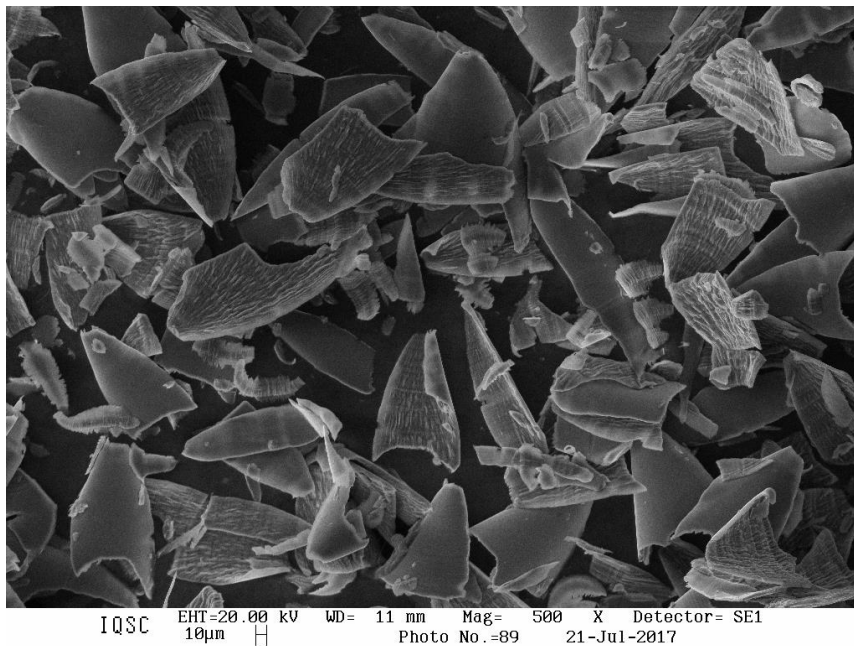
Fonte: Autor.

## 4.2. Formação de cavacos

Investigou-se quanto à formação ou não de cavacos, e sua natureza. Para tanto, analisou-se tanto os moldes em RSA como as lentes em PMMA, para as ferramentas Ball nose e de topo reto.

Para o microfresamento com ferramenta Ball nose em RSA, apesar de se tratar de um material dúctil, ocorreu formação de cavacos curtos e contínuos, embora não tenha apresentado uma geometria contínua, apresentando-se na forma de lascas (figuras 48 e 49), uma vez que esse tipo de cavaco ocorre para casos no qual o material ser dúctil e relativamente homogêneo, é submetido a pequenos e médio avanços.

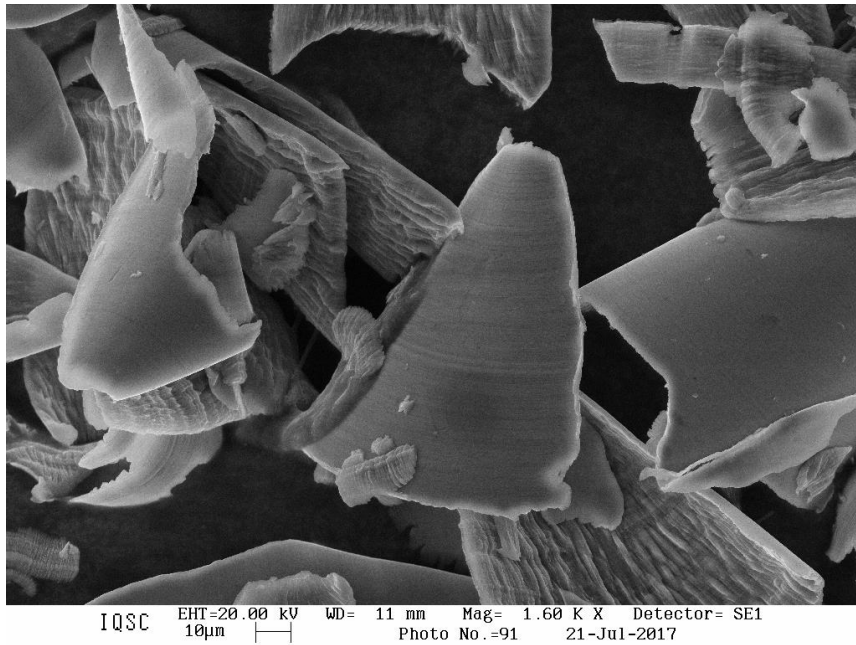
Figura 48 - Vista geral dos cavacos de RSA, utilizando ferramenta Ball nose.



Fonte: Autor.



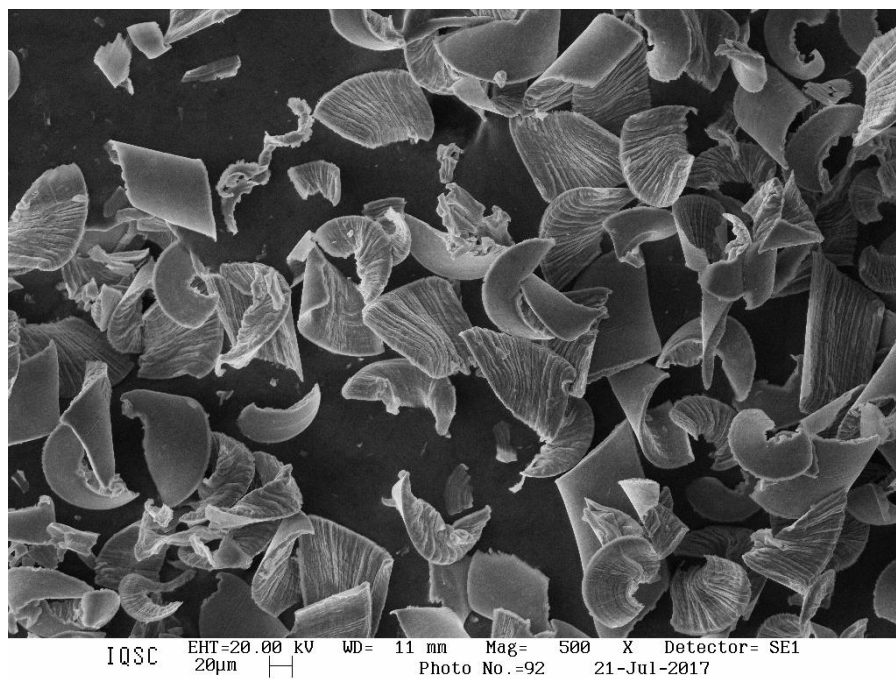
Figura 49 - Vista em detalhe dos cavacos de RSA, utilizando ferramenta Ball nose.



Fonte: Autor.

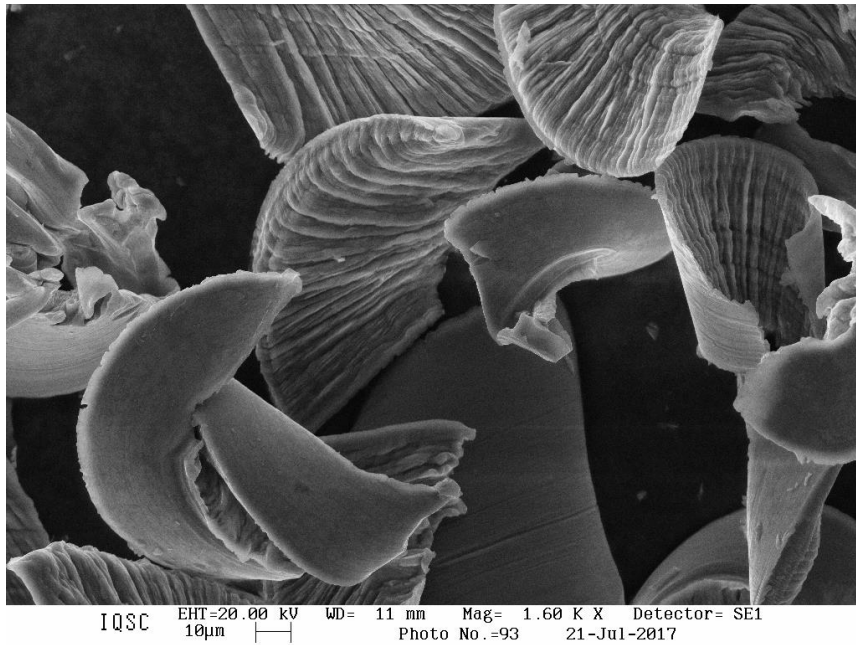
Já para os ensaios envolvendo a ferramenta de topo reto, observou-se também a formação de cavacos curtos e contínuos, porém estes apresentaram um formato mais uniforme, assemelhando-se à forma de espiral, conforme figuras 50 e 51.

Figura 50 - Vista geral dos cavacos de RSA, utilizando ferramenta de topo reto.



Fonte: Autor.

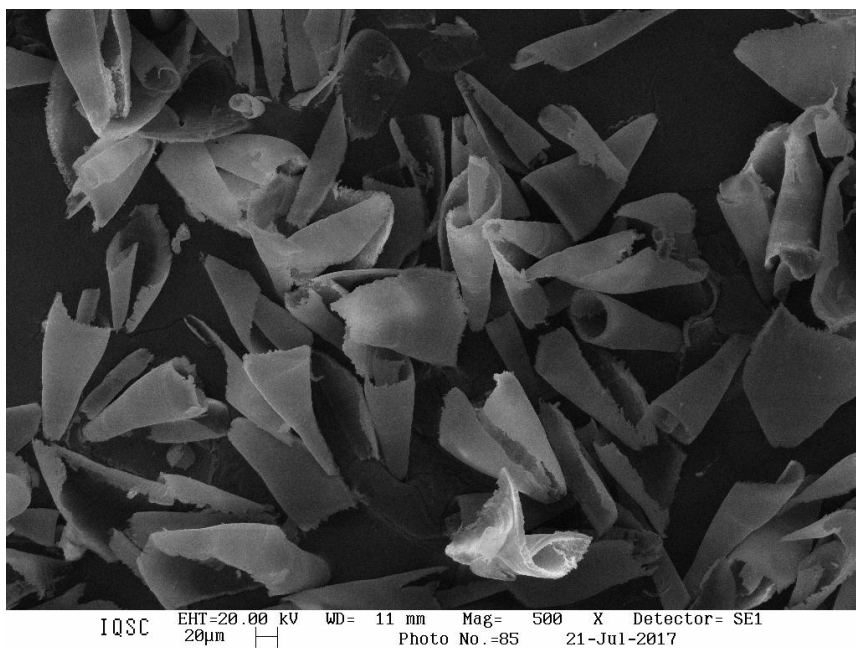
Figura 51 - Vista em detalhe dos cavacos de RSA, utilizando ferramenta de topo reto.



Fonte: Autor.

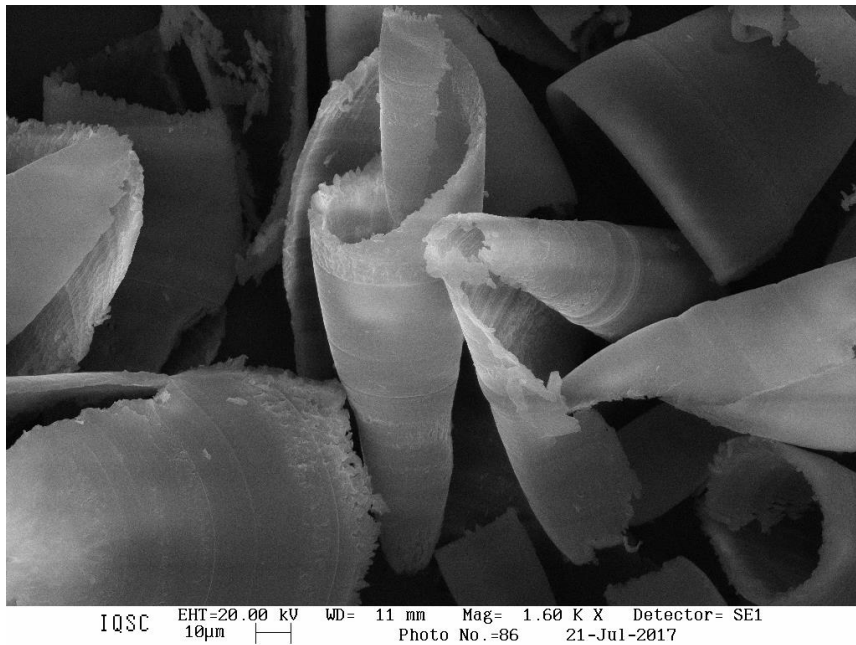
Quanto ao microfresamento de PMMA, notou-se que a utilização de ferramentas Ball nose, induziu à formação de um cavaco contínuo, apresentado forma regular de espiral, devido ao raio de ponta completo da ferramenta ball nose, conforme mostrado nas figuras 52 e 53.

Figura 52 - Vista geral dos cavacos de PMMA utilizando ferramenta Ball nose.



Fonte: Autor.

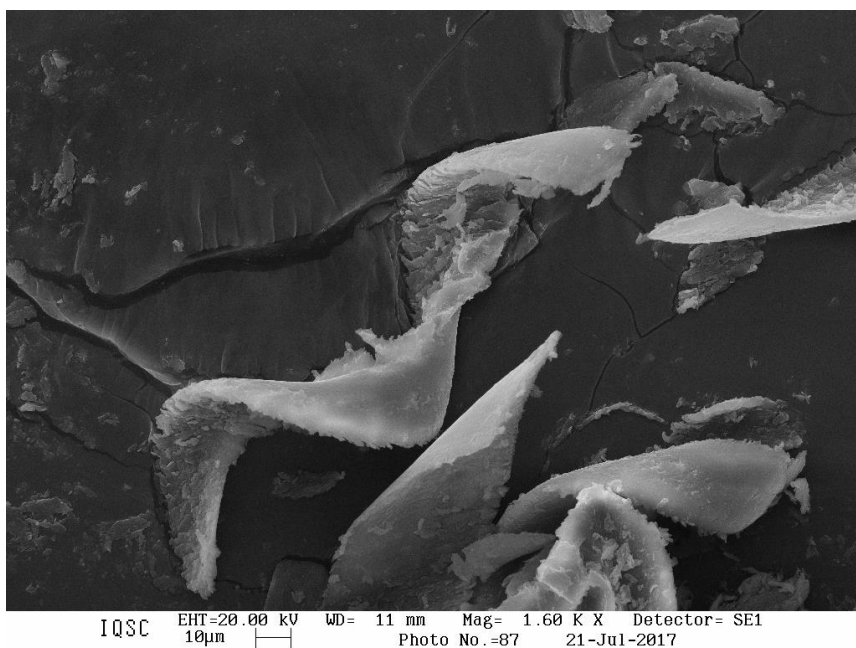
Figura 53 - Vista em detalhe dos cavacos de PMMA utilizando ferramenta Ball nose.



Fonte: Autor.

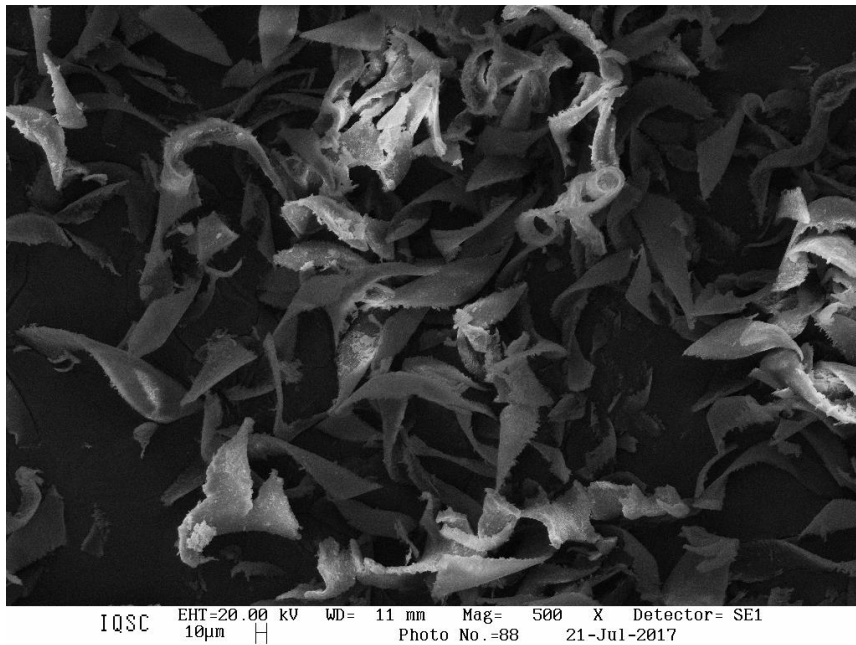
Por sua vez, ao microusinar o PMMA com ferramenta de topo reto, conseguiu-se um cavaco contínuo helicoidal, sendo mais irregular quanto à forma, como ilustrado nas figuras 54 e 55.

Figura 54 - Vista geral dos cavacos formados de PMMA utilizando ferramenta de topo reto.



Fonte: Autor.

Figura 55 - Vista detalhada dos cavacos de PMMA utilizando ferramenta de topo reto.



Fonte: Autor.

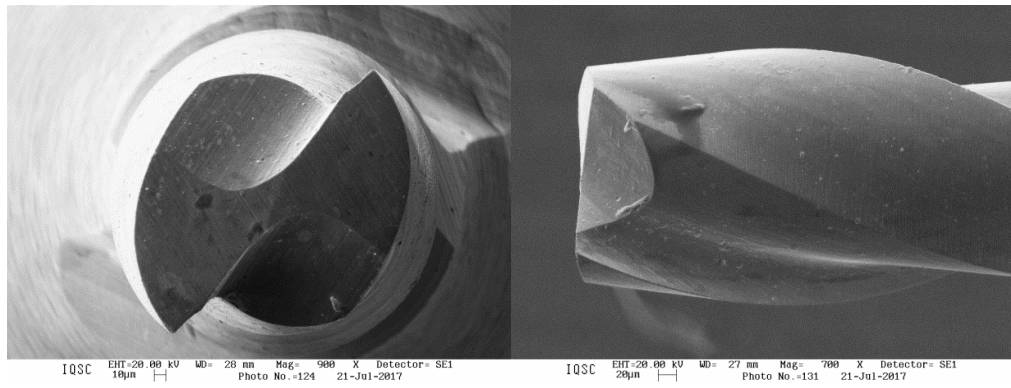
Por fim, teve-se que, com o mesmo material, o formato do cavaco obtido foi diferente, de acordo com a mudança da ferramenta. Isso pode-se dever ao fato de que, segundo FERRARESI (1970), a mudança de condições de usinagem associada a alterações na superfície de saída da ferramenta contribuem para que haja alteração na forma do cavaco.

### 4.3 Avaria das ferramentas

Por meio do uso da técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV), aferiu-se as condições das ferramentas empregadas nos ensaios, a fim de detectar se houve algum tipo de avaria.

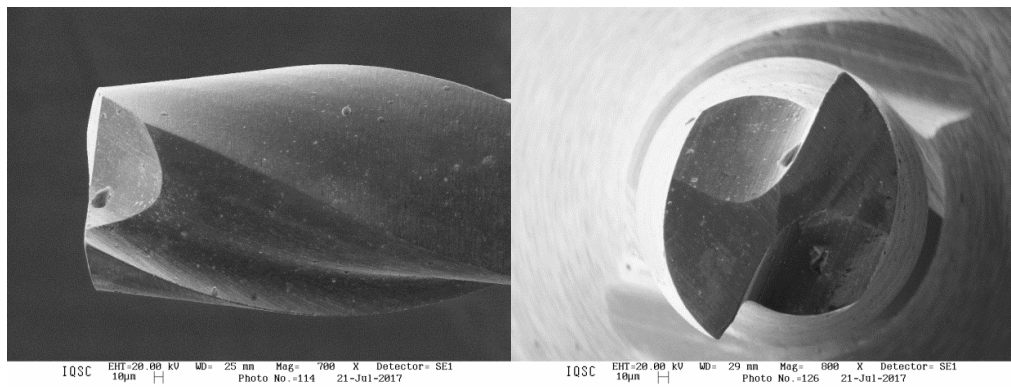
As ferramentas de topo reto, tanto a usada no PMMA, quanto a usada no RSA, apresentaram boas condições, não sendo visível nenhum tipo de desgaste que comprometa seu uso, como mostrado nas figuras 56 e 57.

Figura 56 - Ferramenta de topo reto usada para RSA.



Fonte: Autor.

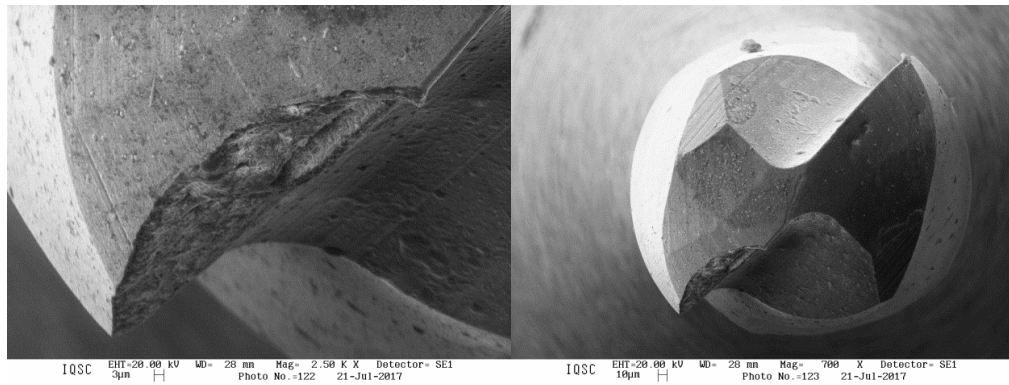
Figura 57 - Ferramenta de topo reto usada para PMMA.



Fonte: Autor.

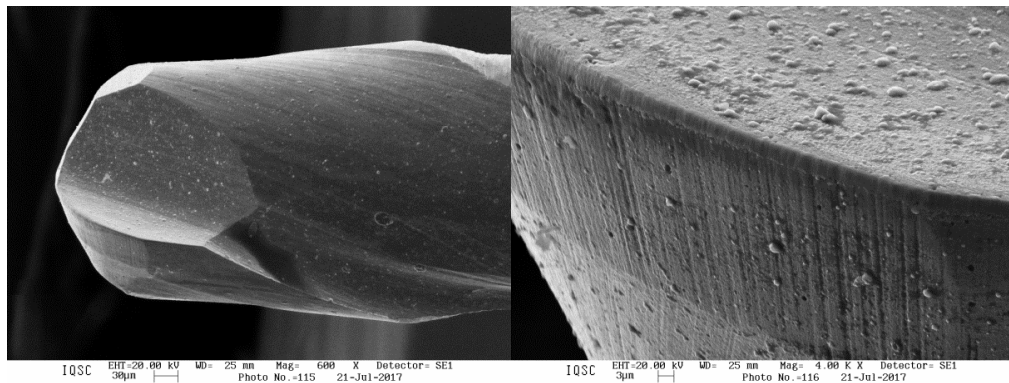
Já quanto a utilização das ferramentas Ball nose de  $\varnothing 0,4\text{mm}$ , a empregada em RSA fraturou (figura 58), enquanto que a utilizada para o PMMA apresentou um pequeno desgaste numa das arestas de corte, resultando em aparente perda de afiação da ferramenta, como ilustrado na figura 59.

Figura 58 - Fratura na ferramenta Ball nose de 0,4mm de diâmetro, usada no RSA.



Fonte: Autor.

Figura 59 - Desgaste em uma das arestas de corte da ferramenta Ball nose de diâmetro 0,4mm, usada no PMMA.

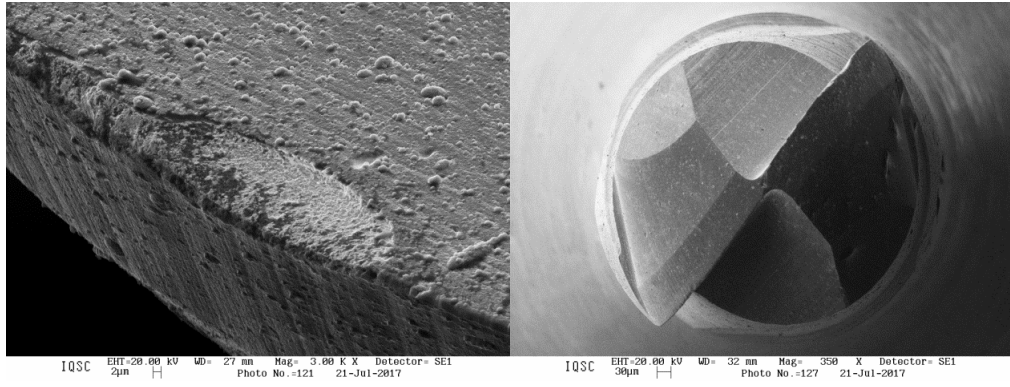


Fonte: Autor.

A fratura ocorrida pode ter sido um dos fatores responsáveis pelos elevados valores de rugosidade obtidos no molde 3, dado que tal molde foi o último a ser fabricado, dentre os quatro produzidos com tal ferramenta. E analisando o PMMA, esse pequeno desgaste também pode ter sido influente para que na lente 3, o Ra aferido tenha sido maior que os demais produzidos com a mesma ferramenta, tendo sido o único dentre as quatro lentes que teve Ra superior a 0,5  $\mu\text{m}$ .

Por sua vez, para fabricação do modelo 1, de molde e lente, a mesma ferramenta foi empregada, apresentando lascamento nas arestas de corte, conforme a figura 60.

Figura 60 - Lascamento da ferramenta ball nose de 0,4mm de raio, usada para RSA e PMMA.



Fonte: Autor.

## 5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Com os ensaios e resultados coletados da fabricação das lentes e seus respectivos modelos de moldes, pôde-se estudar as diferentes formas de programação no CNC, por meio de variadas estratégias de desbaste e acabamento, resultando em rugosidades médias,  $R_a$ , inferiores para as lentes em PMMA, embora as mesmas tenham apresentado resultados de rugosidade  $R_t$  superiores, em relação ao RSA 6061, devido a certas regiões que sofreram degradação pela temperatura local estar possivelmente próxima à  $T_g$  do polímero. Obteve-se também um conhecimento mais aprofundado sobre os materiais trabalhados, conhecendo-se novas técnicas de caracterização para a liga de alumínio.

As lentes poliméricas apresentaram melhor integridade superficial na região central, e por consequência menor rugosidade, já que nos respectivos modelos de molde de alumínio RSA 6061 a região central foi comprometida devido à maior ductilidade e fluxo de material, como ilustrado através das imagens obtidas via MEV.

Identificou-se através da microusinagem diretamente sobre o PMMA a obtenção de lentes livres de rebarbas nas paredes, de forma que na microusinagem do alumínio RSA 6061 houve formação de rebarbas nas paredes, tanto para ferramentas Ball nose quanto para ferramentas de topo reto.

Com base na avaria sofrida pelas ferramentas, ambas as ferramentas de topo reto, tanto para o PMMA quanto para o RSA 6061, não apresentaram desgaste, entretanto as Ball nose utilizadas para o RSA 6061 apresentaram fratura e lascamento, enquanto que as utilizadas no PMMA houve perda de afiação na de diâmetro 0,4 mm, ratificando a vantagem ao se optar pelo PMMA.

Portanto, com base nos resultados comparativos entre o microfresamento diretamente da lente em PMMA ou o microfresamento de um micromolde de liga de alumínio RSA 6061, têm-se que do ponto de vista técnico a microusinagem do polímero é preferível à do RSA 6061, seja por meio das análises quantitativas ( $R_a$  e  $R_t$ ), quanto pelas análises qualitativas por meio do MEV.

Um estudo posterior poderia ser realizado, de modo que os ensaios seriam o menos variável possível no que diz respeito à homogeneidade de parâmetros e estratégias de usinagem, para se poder avaliar os fatores subsequentes e influentes sobre o produto final, como



viabilidade econômica entre ambos os materiais, capacidade e tempo de produção, para adequar-se a uma aplicação real do produto e de seu mercado, direcionando com precisão a melhor via de manufatura através da ponderação desses fatores adicionais.

## REFERÊNCIAS

ARDILA, R. et al. (2015). **Micro-Milling Process for Manufacturing of Microfluidic Moulds**. 10.20906/CPS/COB-2015-1250.

AURICH, J. C.; REICHENBACH, I. G.; SCHÜLER, G. M. **Manufacture and application of ultra-small micro end mills**. CIRP Annals – Manufacturing Technology, v. 61, n. 1, 2012.

CANEVAROLO Jr. S. V. **Ciência dos Polímeros**. Um texto básico para engenheiros e tecnólogos. 2. Ed. São Paulo; Artliber, 2006. 280 p.

CARDOZO, A. **FRESAMENTO 1**. Introdução. Disponível em: <<https://slideplayer.com.br/slide/1762146/>>. Acesso em 15 jan 2017.

CARR J. W. FEGER C. **Ultraprecision machining of polymers**. IBMT T. J. Watson Research Center, Yorktown heights, NY, USA, 1993

CIMM. **Fresamento e suas finalidades**. 2010. Disponível em: <[http://www.cimm.com.br/portal/noticia/exibir\\_noticia/7303-fresamento-e-suas-finalidades](http://www.cimm.com.br/portal/noticia/exibir_noticia/7303-fresamento-e-suas-finalidades)>. Acesso em: 11 jul. 2017.

COPPINI N. L; MARCONDES F. C.; DINIZ A. E. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 5 Ed. São Paulo; Artliber. 2006. 255 p.

DAVIS, Arthur; KUHNLENZ, Frank. **Optical design using fresnel lenses**: Basic principles and some practical examples. 2007. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/opph.201190287>>. Acesso em: 05 abr. 2019.

EDMUND OPTICS. **Advantages of Fresnel Lenses**. Disponível em: <<https://www.edmundoptics.com/resources/application-notes/optics/advantages-of-fresnel-lenses/>>. Acesso em: 01 fev. 2019.

FABIO J. CORREA (Santa Catarina). Instituto Federal de Santa Catarina. **Aula 6: Classificação e nomenclatura dos processos de usinagem**. Disponível em: <<https://slideplayer.com.br/slide/12879273/>>. Acesso em: 05 mar. 2019.

GRANADO R. M. **Avaliação da integridade superficial do polimetilmetacrilato (PMMA) no torneamento com ferramenta de diamante**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia de São Carlos – USP.

KAROW, H. H. (1993). **Fabrication Methods for Precision Optics**. New York: John Wiley & Sons.

MANO E. B. **Polímeros Como Materiais de Engenharia**. 1. Ed. São Paulo; Edgard Blucher. 1991. 218 p.

OLYMPUS OPTICAL CO. **Catálogo técnico sobre microscópio óptico**.

PONCE O. Z. L.; **Efeitos da usinagem na integridade superficial de aços baixo carbono com grãos ultrafinos**. 2015. Trabalho de conclusão de curso. Engenharia Mecânica – Escola de Engenharia de São Carlos – USP.

POPOV K., Dimov S., Ivanov A., Pham D.T, Gandarias E. 2010, **New tool-work piece setting up technology for micro-milling**, Int J Adv Manuf Technol, vol.47, pp.21-27

PORTAL METALICA. **Fresamento e suas finalidades**. Disponível em: <<http://wwwo.metalica.com.br/fresamento-e-suas-finalidades>>. Acesso em: 28 mar. 2019.

PORTO, Arthur José Vieira et al. **Usinagem de ultraprecisão**. 1, Ed. São Carlos; Rima, 2004. 276 p.

RIBEIRO, J. L. S.; **Forças de usinagem no fresamento de aço para matrizes**. 2006. XVI Simpósio de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia.

SAECHTLING, H. (1983). **International Plastics Handbook**. Munchen: Hanser Gardner Publication.

SILVA, A.R. (2002). **Confecção e caracterização óptica e estrutural de lentes plásticas obtidas pelo processo de injeção**. 78p. Dissertação ( Mestrado ) – Interunidades em Ciências e Engenharia de Materiais. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

SMITH. F.W.; HASHEMI J. **Fundamentos de Engenharia e Ciência dos Materiais**. 5. Ed. McGraw Hill. 2012. 707 p.

TANIGUSHI, N. **Current status in, and the future trends of, Ultraprecision machining and Ultrafine materials processing**. Annals of the CIRP. Vol. 32/2/1983. Tokio Science University.

TOLLEY, P. **Polymer Optics Gain Respects**. Photonics Spectra. October 2003.

VOORT, George Vander. **Metallographic Etching of Aluminum and Its Alloys**. Disponível em: <<https://www.georgevandervoort.com/metallography/specific/aluminum/20001307-metallographic-etching-of-aluminum-and-its-alloys.html>>. Acesso em: 10 jan. 2017.

XIANGDONG, L. (2000). **Ultra- Precision Turning Technology**. Precision Machining Group, Process Technology Division, Singapore Institute of Manufacturing Technology, Singapore.

WORGUL M. **Hot Embossing**. Theory and Technology of Microreplication. 1. Ed. Burlington, USA; Elsevier Inc. 2009. 341 p.