**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**ESTUDO DO PROCESSO DE REPLICAÇÃO POR LAMINAÇÃO EM
POLIMETILMETACRILATO(PMMA) AQUECIDO**

LAERCIO JAVAREZ JUNIOR

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientadora: Prof. Dra. **Luciana Montanari**

São Carlos
- 2009 -

Dedico este trabalho à minha família

Agradecimentos

A Deus, pelo dom da vida.

A orientadora Prof. Dra. Luciana Montanari, pela orientação, apoio as idéias e ensinamentos, além da amizade.

Ao prof. Dr. Renato Goulart Jasinevicius e Prof. Dr. Jaime Gilberto Duduch, pela contribuição técnica, sugestões e amizade.

Ao Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes pela ajuda, paciência e disposição em ensinar.

Ao Prof. Dr. Sebastião V. Canevarolo Jr. pelos ensinamentos e explicações.

Ao Prof. Dr. Carlos Alberto Fortulan pelo empréstimo da estufa.

Aos técnicos Ariel e Adolfo Ferrarin Neto do Departamento de Engenharia de Produção.

Aos técnicos da oficina Mauro Olivatto, José Carlos Risardi e José Carlos Botelho pelo empenho, criatividade nas execuções técnicas e sem duvida os classifico como engenheiros mecânicos da mais alta qualidade.

Ao técnico do Departamento de Materiais José Silvano Cerqueira Lima pela ajuda na preparação e análise das amostras.

Aos técnicos, desenhistas e gerentes, amigos da Metalgráfica Iguaçu que com ensinamentos me transformaram em um engenheiro mecânico técnico.

A LAMINADORES 3G[®], em especial a Guilherme e Giuliano Tuponi pelo empréstimo do laminador para uso neste trabalho.

Aos amigos José Antonio, Andre, Rivail, Renan, Renê pela ajuda e amizade.

Aos meus pais Prof. Laércio Javarez e Prof. Marize Javarez pelo incentivo e apoio

Ao meu irmão Prof. Msc. Marcelo Augusto Javarez pelo incentivo, apoio e amizade

Ao amigo Humberto Furlanetto e a Mabel Furlanetto pela amizade e incentivo.

Aos amigos de verdade, entre eles, Rubens, Daniela, Renato e Joelmir por serem simplesmente pessoas incríveis.

“A mente que se abre a uma nova idéia jamais voltará ao seu tamanho original”
(Albert Einstein)

Resumo

Javarez Jr., Laercio. (2009). *Estudo do processo de replicação por laminação em polimetilmetacrilato (PMMA) aquecido*. 93 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

O crescente aumento na demanda de sistemas miniaturizados, a criação e desenvolvimento de métodos simples e eficazes e com menor custo de fabricação de microcomponentes desafiam projetistas e pesquisadores. Dentro deste contexto, este trabalho visa o estudo do processo de replicação por laminação, com PMMA (polimetilmetacrilato) aquecido, para geração de microestruturas. O laminador utilizado é de precisão e a distância entre rolos possui controle milimétrico garantindo sua distância, mesmo quando em operação. Foi confeccionado um cilindro molde contendo microrranhuras que serão replicadas no PMMA. Utilizaram-se, como material do cilindro molde, o alumínio e a liga de alumínio 7075. O processo de aquecimento do PMMA consistiu de duas maneiras: condução através do contato com placa térmica, e convecção através do aquecimento em estufa. Para PMMA identificou-se a temperatura ótima para replicação a 105 °C. O estudo demonstrou que, para replicar uma geometria com taxa de replicação elevada, devem-se levar em consideração fatores como a velocidade de laminação e a taxa de redução (distância entre cilindros). Este trabalho vai de encontro a pensamentos inovadores, demonstrando ser uma técnica que permite obter a replicação de determinadas geometrias com eficiência de produção.

Palavras chave: Replicação por Laminação, Cilindro Molde, Microestruturas

Abstract

Javarez Jr., Laercio. (2009). *Study of the replication process by rolling of heated polimetilmethacrylate (PMMA)*. 93 p. Dissertation (Master) - School of Engineering of São Carlos, São Paulo, São Carlos, 2009.

The increasing demand for miniaturature systems, the creation and development of simple, effective and low cost manufacturing mehods of microcomponents challenge designers and researchers. Within this context, this work aims to study the replication process by rolling of heated PMMA (polymethylmethacrylate) to generate microstructures. A precision mill roll is used so that the distance between rolls has millimeter adjustment ensuring the distance is kept constant, even while in operation. A cylinder mold containing microgrooves to be replicated in PMMA was fabricated. Aluminum and 7075 aluminum alloy were used for the cylinder mold. The process of heating the PMMA occurred in two manners: conduction through the contact thermal plate, and convection by heating in an oven. For PMMA, the temperature for replication of 105°C was identified as being optimum. The study showed that, to replicate a geometry with a high rate of replication, one should take into account factors such as the rolling speed and the rate (distance between cylinders). This work goes towards the innovative thinking, proving to be a technique that allows for the replication of certain geometries and production efficiency.

Keywords: Replication by Rolling Barrel Mold, Microstructures

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Exemplos de aplicações de micro componentes ópticos...	2
Figura 1.2	Esquema do processo de replicação através da laminação em PMMA aquecido.....	5
Figura 1.3	(a) Montagem de um colimador prismático de celular (WALKER, 2009). (b) Microscopia eletrônica de varredura de um colimador prismático de celular comercial.....	6
Figura 2.1	Exemplo de um sistema de prensagem a quente.....	11
Figura 2.2	Razão de aspecto.....	11
Figura 2.3	Esquema do processo de remoção do microcomponente do molde.....	13
Figura 2.4	Exemplo de replicação por resina curada em UV.....	13
Figura 2.5	Visão esquemática de um laminador duo.....	19
Figura 2.6	Transferência unidimensional de calor por condução (INCROPERA, 2008).....	23
Figura 2.7	Nodo superficial com convecção e condução unidimensional transiente.....	26
Figura 3.1	Diagrama esquemático para replicação de PMMA através do processo de laminação.....	29
Figura 3.2	Gráfico de espectroscopia energia x contagem de elétrons.....	30
Figura 3.3	Gráfico do espectroscopia de energia x contagem de elétrons.....	31
Figura 3.4	Durômetro LECO®, modelo LT-240.....	32
Figura 3.5	Laminador G3 Rio Preto® especial de precisão.....	34
Figura 3.6	Bloco padrão 4mm de espessura em uso para calibração das distâncias entre os cilindros laminadores.....	35
Figura 3.7	Esquema ferramenta tipo bedame (Catálogo Sandvik® 2009).....	36

Figura 3.8	Ferramenta tipo bedame Sandvik®.....	37
Figura 3.9	Projeto de perfil Nikon V20A e análise da ferramenta de diamante.....	38
Figura 3.10	Geometria de ferramenta de diamante monocristalino.....	38
Figura 3.11	Perfilômetro óptico VEECO NT1100.....	39
Figura 3.12	Microscópio eletrônico de varredura (MEV).....	40
Figura 3.13	Aparelho BALTEC MED020 para aplicação de camada micrométrica de ouro.....	40
Figura 3.14	Torno de Precisão INDEX GU 600 CNC.....	42
Figura 3.15	Procedimento de alinhamento peça-maquina.....	43
Figura 3.16	Processo de usinagem dos canais.....	43
Figura 3.17	Desenho do cilindro molde e detalhes dos microcanais.....	45
Figura 3.18	Superfície dos canais com 0,10mm de profundidade e 0,7mm de distância entre canais, usando perfilômetro óptico VEECO®	49
Figura 3.19	Perfil dos canais com 0,10mm de profundidade e 0,7mm de distância entre canais, usando perfilômetro óptico VEECO®	50
Figura 3.20	Perfil dos canais com 0,10mm de profundidade e 0,7mm de distância entre canais, usando perfilômetro óptico VEECO®, sem rebarbas.....	50
Figura 3.21	Torno de ultraprecisão RANKO PNEUMO® ASG 2500 e Controle Numérico ALLEN-BRADLEY® CNC 8200.....	51
Figura 3.22	Desenho de camisa acoplada ao cilindro de laminação.....	52
Figura 3.23	Dispositivo para fixação da camisa à placa de vácuo.....	52
Figura 3.24	Trecho de perfilometria óptica Veeco de canais em camisa de alumínio 7075.....	54
Figura 3.25	Trecho de perfilometria óptica 3D Veeco de canais em camisa de alumínio 7075.....	54
Figura 3.26	Cilindro de alumínio com camisa de liga de alumínio 7075 colada.....	55

Figura 3.27	Estufa do NETEF – EESC.....	56
Figura 3.28	Esquema de aquecimento do PMMA em estufa.....	56
Figura 3.29	leitor de termopares e corpo de prova de PMMA com termopares.....	57
Figura 3.30	Curvas de Temperatura (T em °C e x em mm) obtidas pelo programa 1D HEAT TRANSFER.....	59
Figura 3.31	Curvas de Temperatura (T em °C e x em mm) obtidas pelo programa 1D HEAT TRANSFER.....	61
Figura 3.32	Aquecedor de placa FISATOM.....	63
Figura 3.33	Curvas de Temperatura (T em °C e x em mm) obtidas pelo programa 1D HEAT TRANSFER.....	64
Figura 4.1	Abaulamento em corpo de prova.....	69
Figura 4.2	Guia de saída de alumínio para apoio do corpo de prova.	70
Figura 4.3	Gráfico taxa de replicação vs temperatura em replicação de canal molde de 0,05 mm de profundidade.....	71
Figura 4.4	Gráfico taxa de replicação vs temperatura em replicação de canal molde de 0,1 mm de profundidade.....	71
Figura 4.5	Gráfico taxa de replicação vs temperatura em replicação de canal molde de 0,15 e 0,20 mm de profundidade.....	72
Figura 4.6	Gráfico taxa de replicação vs temperatura em replicação de canal molde de 0,25 mm de profundidade.....	73
Figura 4.7	Gráfico taxa de replicação vs temperatura em replicação de canal molde de 0,05 mm de profundidade.....	74
Figura 4.8	Gráfico taxa de replicação vs temperatura em replicação de canal molde de 0,05 mm de profundidade.....	74
Figura 4.9	Gráfico taxa de replicação vs temperatura em replicação de canal molde de 0,10 mm de profundidade.....	75
Figura 4.10	Gráfico taxa de replicação vs temperatura em replicação de canal molde de 0,15 mm de profundidade.....	76
Figura 4.11	Gráfico taxa de replicação vs temperatura em replicação de canal molde de 0,20 mm de profundidade.....	76

Figura 4.12	Gráfico taxa de replicação vs temperatura em replicação de canal molde de 0,25 mm de profundidade.....	77
Figura 4.13	Aproximação de uma replicação do corpo de prova de PMMA de 2mm de espessura replicado a 105°C com redução de 25% analisado em MEV com aumento de 400x.....	78
Figura 4.14	Variação da taxa de nucleação e de crescimento como função de cristalização (CANEVAROLO, 2002).....	78
Figura 4.15	Trecho do corpo de prova de PMMA de 2mm de espessura replicado a 105°C com redução de 25% analisado em perfilometria mecânica.....	79
Figura 4.16	Trecho do corpo de prova de PMMA de 2mm de espessura replicado a 105°C com redução de 25% analisado em MEV com aumento de 80x.....	80
Figura 4.17	Largura x altura de replicação (SHIH-JUNG; YAU-CHIA, 2007).....	81
Figura 4.18	Análise de perfil através do perfilômetro óptico do molde replicador e a replicação obtida.....	83
Figura 4.19	Análise de perfil através do perfilômetro óptico do molde replicador e a replicação obtida.....	84
Figura 4.20	Trecho do corpo de prova de PMMA de 2mm de espessura replicado a 105°C com redução de 25% analisado em perfilometria óptica.....	84
Figura 4.21	Trecho do corpo de prova de PMMA de 2mm de espessura replicado a 105°C com redução de 25% analisado em MEV com aumento de 650x.....	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	valores típicos para coeficiente de transferência de calor por convecção (INCROPERA).....	25
Tabela 3.1	Porcentagem da quantidade em massa e em átomos de cada elemento encontrado no material.....	30
Tabela 3.2	Porcentagem da quantidade em massa e em átomos de cada elemento encontrado no material.....	31
Tabela 3.3	Valores médios de dureza medidos em três pontos.....	32
Tabela 3.4	Propriedades do PMMA (Mano 1991).....	33
Tabela 3.5	Referência de número de canais e posição e profundidade do canal usinado.....	47
Tabela 3.6	Sequência de usinagem da camisa de alumínio 7075...	53
Tabela 3.7	Tempo de medição até a superfície da placa atingir 105°C.....	58
Tabela 3.8	Tempo x temperatura na superfície da placa de PMMA. Cálculo realizado pelo software 1D HEAT TRANSFER.....	59
Tabela 3.9	Tempo x temperatura na superfície da placa de PMMA. Cálculo realizado pelo software 1D HEAT TRANSFER.....	61
Tabela 3.10	Tempo de medição até a superfície da placa atingir 105°C.....	64
Tabela 3.11	Tempo x temperatura na superfície da placa de PMMA.....	65
Tabela 4.1	Replicação em corpos de prova de 4mm.....	68
Tabela 4.2	Replicação em corpos de prova de 2mm.....	69

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

LCD	Liquid Cristal Display
HUD	Head Up Display
UV	Ultra violeta
EOD	Elementos óticos difrativos
PMMA	Polimetilmetacrilato
PVC	Policloreto de vinila
PC	Polycarbonato
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
USP	Universidade de São Paulo
CD	Compact Disc
DVD	Discos de vídeo digital
VLSI	Very Large Scale Integratad
T _g	Temperature glass (°C)
T _m	Temperature melt (°C)
ε	Deformação (mm)
R	Raio do cilindro (mm)
w	Largura (mm)
L	Comprimento (mm)
T	Temperatura (°C)
T _m	Temperatura para um nodo interior m (°C)
h _i	Espessura inicial da placa (mm)
Δh	Diferença entre largura sem laminar e laminada (mm)
$\bar{S}$	Tensão média (N/mm ²)
P	Força de Laminação(N)
q''	Fluxo de energia (W/m ²)
k	condutividade térmica do material (W/m.K)
h	Coeficiente de transferência de calor por convecção (W/m ² .K)
Fo	Número do Fourier
α	Difusividade térmica (m ² /s)
ρ	Densidade do material (g/cm ³)

Cp	Calor específico (cal/g.°C)
PVD	Physical Vapour Deposition
EDS	Energy Dispersive Spectroscopy
HB	Dureza Brinel (MPa)
HV	Dureza Vickers (MPa)
r_e	Raio de ponta(mm)
a_r	distancia útil de usinagem (mm)
l_a	Largura do bedame (mm)
γ	Ângulo de saída da ferramenta (graus)
α_1	Ângulo de folga (graus)
b	Chanfro (mm)
CNC	Controle Numérico Computadorizado
VL	Velocidade de laminação (mm/s)
NETEF	Núcleo de Engenharia Térmica e Fluidos

SUMÁRIO

1 –	INTRODUÇÃO.....	1
1.1 -	Considerações Iniciais.....	1
1.2 –	Justificativa.....	7
1.3 –	Objetivos e estrutura da dissertação.....	7
2 –	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	9
2. 1–	Considerações iniciais.....	9
2.2 –	Replicação.....	9
2.3 –	Características dos materiais.....	15
2.3.1 –	Alumínio.....	16
2.3.2 –	Polímeros.....	17
2.3.2.1–	Comportamento físico dos polímeros à temperatura.....	17
2.3.2.2–	Viscoelasticidade dos polímeros.....	18
2.3.2.3–	Polimetilmetacrilato (PMMA).....	18
2.4 –	Processo de laminação ou prensagem por rolo.....	19
2.4.1 –	Cálculo da carga na laminação de chapas a frio.....	20
2.5 –	Aquecimento do substrato.....	21
2.5.1 –	Transferência de calor e massa.....	22
2.5.1.1 –	Condução de calor.....	22
2.5.1.2 –	Convecção.....	24
2.5.2 –	Condução em Regime Transiente.....	25
2.5.2.1 –	Método das diferenças finitas.....	25
2.5.2.2 –	Método explícito da Equação do calor.....	26
3.	METODOLOGIA	28
3.1 –	Considerações gerais	28
3.2 –	Descrição do cilindro molde e do material do substrato (PMMA).....	29
3.2.1 –	Liga de alumínio 7075 e alumínio.....	30
3.2.2 –	Polimetilmetalacrato.....	32
3.3 –	Laminador de precisão	34

3.3.1 – Calibração do Laminador.....	35
3.4 – Ferramenta de corte.....	35
3.5 – Análise das superfícies.....	39
3.6 – Processos de Usinagem dos Cilindros.....	41
3.6.1– Torno Index® GU 600 CNC.....	41
3.6.1.1 – Usinagem do cilindro molde de alumínio.....	42
3.7 – Aquecimento do PMMA.....	55
3.7.1– Estufa.....	56
3.7.2– Placa térmica.....	62
4- RESULTADOS.....	67
4.1 – Considerações Gerais.....	67
4.2 – Testes com o cilindro de alumínio.....	67
4.2.1 – Resultados dos testes com o cilindro de alumínio..	70
4.3 – Testes realizados no cilindro molde de liga de alumínio 7075.....	82
4.3.1 – Resultados dos testes com o cilindro de alumínio 7075.....	82
5- CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	87
5.1 – Conclusões.....	87
5.2 – Sugestões para Trabalhos Futuros.....	89
6- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	90

Capítulo 1

1. Introdução

1.1. Considerações Iniciais

A última década apresentou um grande salto nas pesquisas de microcomponentes. O resultado desse desenvolvimento pode ser visualizado em produtos populares como máquinas fotográficas acopladas a aparelhos celulares, impressoras “inkjet” de alta resolução e, também, em outros produtos nos ramos da automobilística e biomedicina. Já para uso de microcomponentes ópticos, os produtos obtidos são inúmeros, entre eles podem-se citar: telas “touch screen” para celulares, telas LCD (“*Liquid Cristal Display*”), pára-brisas de aeronaves que estão sendo preparados para receber e enviar informações e até viseiras de capacetes para pilotos estão recebendo este recurso, recurso conhecido como HUD (“*Head Up Display*”) (Figura 1.1). A produção de microcomponentes e microlentes não somente possui um respeitável potencial de mercado, mas também é considerada uma das tecnologias líderes do nosso tempo. Segundo Tay et al. (2005), a predição do potencial de mercado desses sistemas miniaturizados para 2007 girou em torno de US\$ 26,4 bilhões com previsão de crescimento anual médio de 19,1%.

Figura 1.1 – Exemplos de aplicações de microcomponentes ópticos.

A massificação de microestruturas, arranjos de microlentes, bem como suas exigências técnicas, concorrem para o desenvolvimento de técnicas de produção, podendo ser elas em baixa escala de replicação para fabricação de moldes e protótipos ou replicação em larga escala, de forma a dar resposta a um mercado em crescimento acelerado. Replicação consiste, essencialmente, na cópia de um perfil matriz para um material que possa reproduzir tais perfis. Os passos do processo envolvido nas técnicas de replicação são basicamente os mesmos para todas as abordagens, isto é, envolve a fabricação de uma microestrutura (relevo), a formação de um molde adequado para esse relevo e a produção de réplicas em polímeros ou em outros materiais para esse molde (OLIVEIRA, 2006).

Os processos de replicação são capazes de alcançar resoluções nanométricas em grandes áreas e o custo dessas estruturas replicadas é praticamente independente de sua complexidade (GALE, 1997). Quanto aos moldes, demandam superfícies com alto grau de acabamento e as paredes da microestrutura necessitam

ser, muitas vezes, ligeiramente inclinadas e livres de rebarbas para facilitar a desmoldagem.

A viabilidade de sua produção se dá por meio de processos de replicação como ablação a laser, fotopolimerização através de ultravioleta, fotolitografia, microinjeção, termoformagem, moldagem a frio, LIGA modificado (acrônimo alemão “Lithographic”, “Galvanoformung”, “Abformung” (litografia, eletrodeposição e moldagem)), entre outros (KANG, 2004 e JIANG et al., 2008). Ruprecht et al. (2007) abordam, em seu trabalho, o estudo de várias técnicas usadas para replicação. E ainda, especifica os processos de microfundição de precisão, micromoldagem por injeção de metal (IMGRUND et al., 2001), como os métodos que apresentam potencial para serem processos de produção econômica. A replicação, em larga escala, de microestruturas através de microinjeção, termoformagem e moldagem a frio também são citadas por Blough et al. (1997).

Muitas dessas técnicas têm sido usadas para a produção comercial de componentes de precisão. Por exemplo, a proposta de Shiu et al. (2007) é realizar usinagem a laser com alta precisão, em chapa metálica, produzindo microcanais e depois, pelo método de prensagem a quente, replicar as amostras. Já Knopf et al. (2008) aplica o mesmo método, porém através de usinagem a laser, produz um relevo negativo na chapa metálica. Ambos os trabalhos conseguiram replicar o relevo molde com fidelidade mostrando ser um método eficiente de prensagem a quente.

Idei et al. (2006) usam a técnica de LIGA envolvendo radiação síncroton para formar micromoldes em níquel, e posterior replicação com estampagem a quente, em vácuo. Trata-se de um processo com tecnologia mais cara e sofisticada na produção dos micromoldes.

O trabalho de Huang et al. (2009) aplica a técnica de prensagem a quente utilizando CO₂ (gás carbônico) e utiliza este gás como agente para interagir com PMMA (polimetilmetacrilato), facilitando sua moldagem. Essa técnica proporcionou boa replicação com pressão elevada, no entanto, o tempo de prensagem esteve em torno de 60 minutos.

Alguns desses processos são complicados e demandam muito tempo em sua fabricação, envolvendo altas temperaturas e pressões, além do uso de máquinas e moldes a um custo elevado (YANG et al., 2008).

Uma alternativa eficiente para a produção em série e com baixo custo é o método de laminação, cuja deformação e formação da microestrutura replicada ocorrem quando um material entra em contato com rolos que contenham microrranhuras em sua superfície, pois há evidências de ser um método mais rápido e moderno na fabricação de microlentes e/ou microestruturas. Normalmente, os materiais a serem replicados são polímeros termoplásticos, tais como o policarbonato (PC), o polimetilmetacrilato (PMMA) (OTTEVAERE et al., 2006), resinas fotossensíveis do tipo Novolak e resinas curadas por radiação ultravioleta (UV).

Dentro desse contexto, Shuhuai (2009) utilizam o método da replicação por laminação, onde o cilindro molde é aquecido até 160°C e a replicação ocorre em substrato de policarbonato (PC). Os resultados obtidos foram satisfatórios com alta fidelidade de replicação para baixa velocidade de laminação e alta pressão.

Yeo (2009) realiza seu experimento com laminação de substrato de PMMA e cilindro molde aquecido. Estuda os efeitos da pressão, temperatura e velocidade sobre a influência da profundidade do canal. Também explora a combinação dessas variáveis no processo de otimização da fabricação.

A participação desse experimento nessa evolução tecnológica tem como base o estudo e desenvolvimento do método alternativo usado igualmente por Shuhuai et al. (2009) e Yeo (2009), ou seja, o método de laminação com cilindro molde, no entanto, ao contrario do que fez os dois autores, neste experimento o substrato (polímero) será aquecido, em vez do tradicional aquecimento do cilindro molde. Tal motivação se deve por acreditar que o polímero reagiria melhor às deformações plásticas permanentes quando já estivesse aquecido e não através de um choque térmico, como no caso da transferência de calor através do cilindro molde. Seu princípio de funcionamento consiste num rolo matriz, o qual possui microcanais que foram previamente usinados, que gira sobre o PMMA. Através do aquecimento e pressão sofridos pelo polímero serão geradas microdeformações, obtendo assim, as replicações (Figura 1.2). Durante a deformação do PMMA ocorrem as frações elástica e plástica. A fração elástica da deformação aparece devido a variações do ângulo e distância de ligação entre os átomos da cadeia polimérica. A fração plástica aparece devido ao atrito e escoamento entre as moléculas poliméricas. Isso faz com que o polímero demore um tempo finito para responder a solicitação, gerando defasagem entre o início da solicitação e a resposta (CANEVAROLO, 2002).

Figura 1.2 – Esquema do processo de replicação através da laminação em PMMA aquecido.

Foram usinados, no cilindro molde, microcanais com duas formas geométricas diferentes (perfil retangular e perfil em “V”). Perfis quadrados foram usinados num cilindro de alumínio e, perfis em “V”, numa camisa de liga de alumínio 7075 que foi acoplada ao cilindro de alumínio. As formas geométricas dos perfis foram escolhidas, pois são usadas em muitos produtos, como por exemplo, mostra a Figura 1.3. A Figura 1.3 (a) mostra a montagem de um celular e a Figura 1.3 (b) a microscopia eletrônica de varredura de uma lâmina de um celular comercial. Note a geometria do colimador prismático na Figura 1.3 (a)

Figura 1.3 – (a) Montagem de um colimador prismático de celular (WALKER, 2009).
(b) Microscopia eletrônica de varredura de um colimador prismático de celular comercial.

São estudados diferentes parâmetros do molde para a técnica de replicação, incluindo parâmetros de temperatura, velocidade de laminação e distância entre cilindros

1.2. Justificativa

Estudos estão sendo desenvolvidos na indústria e institutos de pesquisa para modernização da técnica de replicação visando eficiência, baixo custo de fabricação e miniaturização dos componentes replicados. Aplicações ligadas à fabricação de microestruturas, tanto para produção de elementos ópticos quanto de microcomponentes, estão em crescimento acelerado, destacando-se áreas importantes como biomedicina, robótica e armamentista. Existem, atualmente, diversas técnicas para a produção de microcomponentes através da replicação, algumas com custo elevado e outras com custo reduzido, porém todas, em franco desenvolvimento, com o objetivo de aumentar a capacidade produtiva e precisão na miniaturização.

Tendo em vista o vasto campo de aplicações de microestruturas e o surgimento de novas técnicas de replicação, o Laboratório de Engenharia de Precisão da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (EESC – USP) iniciou estudos no campo de replicação de microestruturas. Oliveira (2006) avalia a replicação de moldes torneados com ferramentas de diamantes usando prensagem a quente em PMMA. Já, Dias; Jasinevicius (2009) estudam a técnica de micromoldagem através de prensagem a quente de microestruturas geradas através de torneamento com ferramenta de diamante. Dentro desse contexto, a contribuição desse trabalho concentra-se no entendimento dos problemas, dificuldades e soluções, encontrados na replicação de polímeros (PMMA), através da técnica de laminação.

1.3. Objetivos e estrutura da dissertação

O objetivo principal desse trabalho é o estudo de um método de replicação mais rápido e eficaz na fabricação de componentes ópticos. Trata-se de um processo de replicação, usando laminação, onde o substrato de PMMA é aquecido. A replicação ocorre quando o PMMA aquecido passa entre os rolos do laminador.

Logo, o cilindro molde deve conter a microestrutura a ser replicada. São estudados parâmetros como temperatura, distância entre rolos, deformação do substrato e velocidade de laminação.

Para melhor compreensão, o trabalho desenvolvido encontra-se estruturado em capítulos. Além desse capítulo introdutório, está assim dividido:

Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica

Será apresentada revisão bibliográfica que aborda os temas das propriedades dos materiais, além do processo de laminação, descrição resumida sobre as técnicas de replicação e tópicos para o cálculo de equações de calor através de método explícito de diferenças finitas.

Capítulo 3 – Materiais e métodos

O conteúdo desse capítulo apresenta a metodologia usada, abrangendo o processo de fabricação dos moldes, o processo de replicação usando laminação, além dos equipamentos usados para medição.

Capítulo 4 – Resultados e discussão

São apresentados os resultados e discussão sobre a preparação do experimento, as replicações obtidas, a integridade estrutural e os parâmetros envolvidos de distância entre rolos e temperatura.

Capítulo 5 – Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

Nesse capítulo são apresentadas as conclusões do trabalho e sugestões para trabalhos futuros para continuação do estudo da replicação em PMMA.

E, por último, as referências bibliográficas.

CAPÍTULO 2

2. Revisão bibliográfica

2.1. Considerações iniciais

O processo de fabricação de microcomponentes está baseado em resultados individuais de manufatura, sendo, um dos desafios da engenharia moderna, o estudo do efeito em escala a fim de criar novas técnicas de produção em massa, viáveis e com baixo nível de retrabalho (QIN, 2006). Assim, a conformação mecânica, além de proporcionar processos de produção econômicos, apresenta muitas vantagens como a economia de material, controle das propriedades mecânicas e alta taxa de sua produtividade. Dessa forma, técnicas tais como a replicação de moldes avança no caminho de desenvolvimento e produção, em larga escala, de microcomponentes.

2.2. Replicação

A cópia física do perfil da superfície de uma microestrutura fabricada é possível usando técnicas de replicação, tais como, prensagem a quente (“hot embossing”), moldagem (“moulding”) ou fundição (“casting”). Esses processos mostram-se como tecnologias chave para produção, em massa e baixo custo, de elementos ópticos difrativos (EOD) ou elementos microópticos com características de tamanho micrométrico ou nanométrico. Esses processos de replicação são capazes de alcançar resoluções micrométricas em grandes áreas e o custo dessas estruturas replicadas independe de sua complexidade. Exemplos de microrrelevos de alta resolução, rotineiramente construídos que empregam técnicas de replicação, são redes de difração para aplicação em espectroscopia de emissão, estruturas

holográficas para aplicação em elementos de segurança e fabricação de discos compactos (CD) e discos de vídeo digital (DVD) (PALERMO, 2000).

Os materiais mais usados pelos métodos de produção óptica são vidros ópticos (FRITZE et al., 1998) e polímeros (HARTMANN et al., 2001). A escolha do método de produção depende da aplicação, quantidade produzida, forma óptica e estabilidade (GILL, 2002). Método de produção óptica utilizando técnicas de replicação em polímeros tem sido utilizado há vários anos. As vantagens dos polímeros incluem seu peso leve, resistência e baixo custo (GILL, 2002).

Alguns dos métodos empregados na replicação de microlentes, arranjos de microlentes e microestruturas, usando polímeros ópticos, são: Cura de Fotopolímeros através de Ultravioleta (“Ultraviolet Cure Photopolymers”) (NEZUKA, et al., 2008), Fundição em Epóxi (“Epoxy Casting”), Moldagem por Compressão (“Compression Molding”), Prensagem por Rolo (“Roll Embossing”), Litografia (“Lithography”), Moldagem por Injeção (“Injection Molding”) e Prensagem a quente (“hot embossing”) (GILL, 2002).

- **Prensagem a quente**

Essa técnica é bastante atrativa, pois a partir de um equipamento relativamente simples, é capaz de replicar estruturas com bastante fidelidade, em áreas de até 10 x 10 cm². Consiste em submeter o polímero (tipicamente um filme de policarbonato) a uma temperatura consideravelmente acima da T_g (tipicamente mais que 50°C acima), e sob pressão. O equipamento pode ser do tipo estampa ou do tipo cilindro rolante. A Figura 2.1 mostra um exemplo de um sistema de prensagem a quente.

Figura 2.1 – Exemplo de um sistema de prensagem a quente.

A prensagem por estampa fornece excelente resolução para estruturas com dimensões horizontais submicrométricas de baixa razão de aspecto. Prensas com cilindros rotativos são mais rápidas e baratas, porém menos adequadas para estruturas profundas ($> 1\mu m$). Estruturas com alta razão de aspecto podem ser obtidas, porém com etapas de cura mais adequadas, aumentando o tempo e custo do processo de replicação (CIRINO, 2002). Os materiais mais usados como substratos são o PVC (policloreto de vinila) e o PC (policarbonato). Entende-se por razão de aspecto como sendo a razão entre a altura máxima da estrutura (h) e a menor dimensão lateral (e), como mostra a Figura 2.2. Maior será a razão de aspecto, quanto maior for a altura e menor for a largura da estrutura.

Figura 2.2 – Razão de aspecto.

- **Moldagem por injeção**

Nessa técnica injeta-se um material polimérico fundido numa câmara sob temperatura controlada, onde está o microrrelevo que se quer replicar. O polímero é esfriado e solidifica-se, quando é então separado do molde (PASCO; EVEREST, 1978). A maioria de produtos de consumo, tais como lentes de Fresnel para projetores e câmeras e discos compactos (CDs) para a reprodução de áudio, são fabricados a partir de moldagem por injeção. Ela é apropriada tanto para estruturas com baixa ou alta razão de aspecto (BRENNER et al., 1993).

Os produtos obtidos por moldagem por injeção possuem custo mais elevado em relação aos fabricadas por prensagem a quente, porém essa tecnologia tem potencial para produzir microrrelevos de melhor qualidade em substratos (de PMMA e policarbonato) espessos (maiores que 1 mm de espessura) (CIRINO, 2002). Alguns parâmetros influenciam significativamente na estrutura e superfície dos microcomponentes gerados. Eles podem relacionar-se diretamente ao material a ser injetado, por exemplo, velocidade de injeção, temperatura de injeção, viscosidade do fluxo ou ao molde, como material e temperatura do molde, canais de entrada e distribuição do fluxo, geometria das cavidades (razão de aspecto do microcomponente). Além disso, há as relações interfaciais do molde e do material de injeção. Como mostra a Figura 2.3, durante a micromoldagem por injeção, a mistura penetra na cavidade e microcavidades do molde, adquirindo sua forma. Os microcomponentes gerados são ejetados do molde, depois de aberto. Trabalhos experimentais mostram que as microestruturas podem romper facilmente durante o processo de remoção do microcomponente do molde devido à própria geometria (PIOTTER, 1997 e MERZ, 2002).

Figura 2.3 – Esquema do processo de remoção do microcomponente do molde.

- **Resina curada em ultravioleta**

Essa tecnologia produz réplicas com alta qualidade, resolução e boa reprodutibilidade. O monômero é derramado em um molde e coberto com vidro ou alguma outra substância que é transparente a luz UV (Figura 2.4).

Figura 2.4 – Exemplo de replicação por resina curada em UV.

A radiação UV causa no monômero uma ligação transversal, dando forma a uma lente rígida ou semi-rígida. Esse método é capaz de produzir características com alta razão de aspecto e permite a opção de ter substância química adesiva promovendo a aderência do polímero no vidro e/ou outros materiais (AHN et al., 2007). O processo UV tem algumas limitações críticas, entretanto, um lado do molde deve ser transparente à radiação UV. A maioria dos materiais transparentes aplicáveis é frágil ou difícil de se fazer em máquinas. Adicionalmente, remover a peça do molde é frequentemente difícil, especialmente se o polímero é aderido a um lado do molde. A cura leva tempo e o molde é ocupado durante este tempo. Para

conseguir a produção de volumes elevados, muitos moldes devem ser usados (GILL, 2002). A principal desvantagem está no longo tempo de cura da resina, que pode levar horas.

- **Prensagem por Rolo**

Prensagem por rolo é uma extensão do processo de compressão, que promove a tecnologia de produção em massa. Em prensagem por rolo, um grande cilindro, frequentemente de cobre, é usinado com as características desejadas. Enquanto uma película do polímero passa sobre o rolo que gira, o relevo é pressionado sobre a película, imprimindo as características geométricas do rolo. Essa tecnologia é usada para fabricar produtos que requerem grandes áreas e características ópticas reflexivas e transmissíveis, tais como telas de LCD de televisores. O processo é excelente para produzir grandes arranjos de lentes ópticas, mas é pouco prático para produzir lentes ópticas individuais, para o uso em conectores ópticos de fibra ou em circuitos integrados em eletrônica (GILL, 2002).

- **Moldagem por Compressão**

Microsistemas reflexivos–difrativos e microestruturas são, frequentemente, replicadas por moldagem por compressão, por exemplo, CD e DVD. No molde de compressão, uma folha ou um pó do polímero é colocado entre duas placas moldes aquecidas. A força e o calor são aplicados. Desse modo, as placas fazem o polímero se comprimir lentamente, imprimindo as características geométricas do molde. Uma vez que as características foram impressas, o molde deve ser refrigerado abaixo da temperatura de transição vítrea (T_g), fazendo com que o polímero seja ejetado do molde com sucesso. Uma das vantagens da moldagem por compressão é também uma de suas limitações. Refrigerar as placas moldes desde a temperatura de derretimento do polímero até sua temperatura vítrea é um processo lento devido à massa térmica das placas do molde. Essa baixa velocidade de resfriamento pode limitar a velocidade de produção do processo, mas permite também que a peça refrigere lentamente, limitando as tensões induzidas na peça (GILL, 2002).

- **Fundição em Epóxi**

Fundição em epóxi é um processo de cura de fotopolímeros através de ultravioleta, o processo inclui uma reação química de “endurecimento” do polímero através do aquecimento. Essa reação química é um processo exotérmico em que o calor produzido pode causar inexatidão nas dimensões ópticas e pode induzir tensões internas. A maioria das colas epóxi não tem alta transmissividade para ser usada em sistemas ópticos refrativos, e, assim, deve ser somente usada no sistema óptico reflexivo (GILL, 2002).

O processo a ser utilizado nesse trabalho é o processo de replicação por laminação, o qual se caracteriza por ser um método mais atrativo em termos de velocidade de produção. Para tanto, foi realizada pesquisa bibliográfica sobre qual material teria maior vantagens para sua aplicação. Para confecção do cilindro molde do laminador, foi escolhido o alumínio, visto suas propriedades mecânicas e a relação custo benefício. O material a ser moldado (substrato) é polimetilmetacrilato (PMMA), devido às suas características viscoelásticas e suas propriedades ópticas. A seguir são apresentadas as principais características desses materiais.

2.3. Características dos materiais

A escolha do material a ser trabalhado, conhecendo suas características e propriedades físicas e químicas, é fundamental para obter-se sucesso na operação. Para a fabricação dos cilindros moldes é interessante considerar propriedades como dureza e condutividade térmica, pois para replicar será necessário manter a integridade do cilindro molde quando estiver sujeito às forças de laminação (necessidade de alta dureza) e auxiliar na troca de calor do substrato para “congelar” as estruturas obtidas. Assim, o alumínio destacou-se frente a outros materiais, tais como cobre e latão.

2.3.1. Alumínio

O alumínio fundido incorpora outros metais e substâncias metalóides como o silício (que atua como metal) em sua estrutura. Quando o alumínio se resfria e se solidifica, alguns dos constituintes da liga podem ser retidos em solução sólida. Isto faz com que a estrutura atômica do metal se torne mais rígida. Os átomos podem ser visualizados como sendo arranjados em uma rede cristalina regular formando moléculas de tamanhos diferentes daqueles do elemento de liga principal (ABAL, 2009).

A grande variedade das ligas de alumínio oferece à indústria uma vasta combinação de resistência mecânica, resistência à corrosão e ao ataque de substâncias químicas, condutividade elétrica, usinabilidade, ductilidade, formabilidade, entre outros benefícios (ABAL, 2009).

A função de cada elemento da liga se altera de acordo com a quantidade dos elementos presentes e suas interações com outros elementos. A Abal (2009) subdivide os elementos de liga adicionados em dois grupos:

- Elementos que conferem à liga a sua característica principal (resistência mecânica, resistência à corrosão, fluidez no preenchimento de moldes, etc.);
- Elementos que têm função acessória, como o controle de microestrutura, de impurezas e traços que prejudicam a fabricação ou a aplicação do produto, os quais devem ser controlados no seu teor máximo.

Entre outras ligas destaca-se, em particular, a que foi utilizada neste experimento:

- **Ligas de alta resistência mecânica**

São características das ligas de alumínio com zinco (série 7XXX) as que oferecem resistência mecânica. São tão resistentes quanto o aço estrutural, mas necessitam de proteção superficial contra a oxidação. Estas ligas são utilizadas quando o fator resistência/peso for o requisito para o bom desempenho do projeto, como na aviação.

2.3.2. Polímeros

A palavra polímero originou-se do grego *poli* (muitos) e *mero* (unidade de repetição). Deste modo, polímero é uma macromolécula formada por dezenas de milhares de meros unidos através de ligação covalente. A matéria-prima para produção de um polímero é chamada monômero, que é uma molécula com uma grande unidade de repetição (mero). Em função da estrutura química, do número médio de meros por cadeia e do tipo de ligação covalente, os polímeros podem ser classificados em três grandes classes: plásticos, borrachas e fibras (CANEVAROLO, 2002).

2.3.2.1 Comportamento físico dos polímeros à temperatura

O comportamento físico-químico nas temperaturas de transição vítrea, e de fusão cristalina (T_m) é de grande importância no estudo desses materiais no processo de replicação.

- **Temperatura de transição vítrea**

A transição vítrea está associada à região amorfa dos polímeros e representa a temperatura em que a mobilidade das cadeias moleculares, devido à rotação de grupos laterais em torno de ligações primárias, se torna restrita pela coesão intramolecular. Abaixo da temperatura de transição vítrea, T_g desaparece a mobilidade das cadeias macromoleculares, e o material se torna mais rígido e quebradiço (como vidro, por isso “g”, do inglês “glass”). Nos polímeros de uso geral, T_g , não ultrapassa 110°C (MANO, 1991).

- **Temperatura de fusão cristalina (T_m)**

A temperatura de fusão cristalina (“m” do inglês “melt”) é aquela em que as regiões ordenadas dos polímeros, isto é, os cristalitos e esferulitos se desagregam e fundem-se envolvendo mudança de estado e está associada a regiões cristalinas. Nos polímeros de alta cristalinidade a temperatura de fusão é relativamente alta,

quando comparada à temperatura de fusão dos polímeros relativamente amorfos. Nos termoplásticos a temperatura máxima de fusão é inferior a 300°C sendo que os termofixos não apresentam fusão, pois sofrem carbonização por aquecimento (MANO, 1991).

2.3.2.2. Viscoelasticidade dos polímeros

Canevarolo (2002) afirma que viscoelasticidade é definida como o fenômeno pelo qual o polímero apresenta características de um fluido e de um sólido elástico ao mesmo tempo. A fração elástica da deformação aparece devido a variações do ângulo e distância de ligação entre os átomos da cadeia polimérica. A fração plástica aparece devido ao atrito e escoamento entre as moléculas poliméricas. Isso faz com que o polímero demore um tempo finito para responder a solicitação, gerando uma defasagem entre esta e a resposta.

2.3.2.3 Polimetilmetacrilato (PMMA)

Apesar dos monômeros acrílicos serem conhecidos desde 1843, sua expansão começou a ocorrer somente em 1901 com os estudos realizados na Alemanha pelo Dr. Otto Rohm. Em 1927, a Rohm & Haas produziu industrialmente o primeiro polímero acrílico (polimetil acrilato) sob o nome de “acrilóide” e “plexigum”, o qual foi vendido com uma solução do polímero em solvente orgânico e foi usado principalmente em lacas e formulações para revestimentos superficiais (INDAC, 2009).

Em 1932, o inglês J. W. C. Crawford desenvolveu um método simples e econômico de se obter o metilmetacrilato, enquanto que, seu companheiro, Rowland Hill estudava em profundidade a polimerização deste monômero. (INDAC, 2009).

Produtos em polimetilmetacrilato são conhecidos pelo brilho da superfície em praticamente qualquer cor. A adesão entre as partes é excelente e os resultados podem ser observados em aplicações como displays de veículos, portas de “box” de

banheiro, canetas, porta retratos, logotipos de empresas, ou seja, inúmeras aplicações.

Para se alcançar o objetivo do experimento, fez-se necessário fazer uma revisão bibliográfica sobre o processo de laminação, bem como suas características, variáveis de velocidade e tensão aplicadas sobre o material a ser laminado.

2.4. Processo de laminação ou prensagem por rolo

Para o desenvolvimento do processo de replicação foi de fundamental importância efetuar breve revisão bibliográfica no que diz respeito à laminação, suas características e propriedades.

A laminação consiste na passagem de uma peça entre dois cilindros que giram de forma a reduzir a área da seção transversal. No caso de placas e chapas, o processo é bastante semelhante ao estiramento por forjamento, apresentando bom controle dimensional e uma produtividade muito maior devido à sua continuidade.

Os cilindros dos laminadores planos são lisos e, normalmente o cilindro inferior não possui movimento vertical, o mesmo não ocorre com o superior, o qual deve ser regulado verticalmente tendo em vista a espessura de laminação a ser requerida.

A Figura 2.7 mostra uma vista lateral de um laminador duo constituído por quadros, dois cilindros de trabalho e mancais nos quais giram o cilindro.

Figura 2.5 – Visão esquemática de um laminador duo.

Na laminação de polímeros é muito importante se ter o comportamento do material que está sendo laminado, sob as condições de processo, tais como:

- Velocidade de laminação onde, como em materiais ferrosos o excesso dela causa deformações indesejáveis.
- Reduções aplicadas– seu excesso ou pouca pressão entre cilindros pode causar defeitos no produto acabado
- Cilindros utilizados – Cilindros de materiais muito moles causam excentricidade e conseqüentemente uma deformação não uniforme.
- Material a ser laminado– o conhecimento das características do material laminado é importante para a definição das condições de velocidade e redução a ser utilizada.

2.4.1. Cálculo da carga na laminação de chapas a frio

Helman e Cetlin (1993) definem que uma estimativa para a carga de laminação de chapas a frio pode ser obtida considerando o processo de laminação como um processo de compressão homogênea entre placas bem lubrificadas. As placas são de comprimento, L , e largura, w . Dessa forma a área de contato (A) é dada pela equação 1.

$$A = Lw = \sqrt{R\Delta h} \cdot w \quad (1)$$

Onde:

R é o raio do cilindro

Δh a diferença entre espessura laminada e sem laminar

Admitindo que não exista deformação lateral, ou seja, que $h_i \ll w$, a carga de laminação (P), é dada pela equação 2.

$$P = \bar{S} A = \bar{S} w \sqrt{R\Delta h} \quad (2)$$

Onde:

h_i é a espessura inicial da placa.

$\bar{S}$ é a tensão média de escoamento para um estado plano de deformação.

Logo a força por unidade de largura é dada pela equação 3.

$$\frac{P}{w} = \bar{S} \sqrt{R\Delta h} \quad (3)$$

Porém como esta equação não considera o efeito do atrito, Helman e Celtin (1993) sugeriram um acréscimo de aproximadamente 20% no valor da carga, a fim de incluir tal efeito.

Dessa forma a carga por unidade de largura resulta na equação 4.

$$\frac{P}{w} = 1,2 \bar{S} \sqrt{R\Delta h} \quad (4)$$

Esta equação não fornece uma resposta exata do valor da carga, porém fornece uma estimativa rápida e relativamente confiável. Para este experimento foi importante verificar que existe um meio de calcular a carga aplicada, porém, devido à viscoelasticidade do PMMA, acaba sendo muito complicado descobrir o valor exato da carga tendo em vista que a temperatura influencia diretamente na rigidez do material. Como serão realizadas flutuações de temperatura acima e abaixo da T_g , optou-se por identificar esta variável (pressão de laminação) de outra maneira que pudesse conter valores a medida que fosse diminuindo a distância entre os cilindros. Essa variável será chamada, neste experimento de distância entre os rolos.

Conhecendo as características do material do cilindro, do PMMA e as variáveis de controle do processo de laminação resta, agora, saber um pouco mais sobre o aquecimento ao longo da espessura no PMMA.

2.5 Aquecimento do substrato

Para melhor controle da temperatura, visto que serão utilizadas características viscoelásticas do substrato no processo, realizou-se a busca de informações relativas a conceitos e fundamentos de transferência de calor e massa, com o intuito

de identificar a temperatura em cada nodo ao longo da espessura no interior ou na sua superfície.

2.5.1. Transferência de calor e massa

A transferência de calor ocorre sempre que existir diferença de temperatura e sempre na direção da temperatura maior para a menor. A transmissão de calor está essencialmente ligada à taxa com que o calor é transferido dependendo de uma série de fatores, sendo que o primeiro a ser considerado é o modo como o calor é transmitido, ou seja, o mecanismo físico pelo qual ocorre a transferência.

O calor pode ser trocado por três diferentes modos: condução, convecção e radiação. Desses três, a condução e a radiação podem ocorrer isoladamente, como mecanismos independentes, sendo que a convecção é na verdade uma combinação envolvendo a condução com deslocamento de massa. Diante do exposto, necessita fazer-se uma breve revisão sobre conceitos de transferência de calor.

2.5.1.1. Condução de calor

Condução é o mecanismo mais comum de transmissão de calor, e ocorre em meios sólidos ou em fluidos que não se movimentam. Este mecanismo ocorrerá sempre que materiais a diferentes temperaturas forem colocados em contato físico.

O mecanismo de condução está diretamente associado à atividade atômica e molecular. A temperatura de um meio ou objeto está diretamente associada ao movimento de translação, rotação e vibração das moléculas que constituem este meio: quanto maior a temperatura, maior a atividade em nível molecular. Desse modo, a transmissão de calor pode ser vista como a transferência de energia de moléculas mais energéticas para as moléculas menos energéticas. No mecanismo de condução, o que determina a transferência é a interação molecular, que ocorre em nível microscópico. Seus efeitos, no entanto, ocorrem em nível macroscópico (BRAGA, 2003).

A estrutura do material é uma característica muito importante na determinação das taxas de transmissão de calor por condução. É possível quantificar os processos de transferência de calor em termos de equações para as taxas de transferência, que permitem calcular a quantidade de energia transferida por unidade de tempo. No caso da condução, a equação que fornece a taxa de transferência é conhecida como 'Lei de Fourier'. Para uma parede plana como a mostrada na Figura 2.8, na qual as faces são mantidas a diferentes temperaturas ($T_1 > T_2$), e na qual a temperatura varia segundo uma função $T(x)$, a taxa de transferência de calor é dada pela equação 5.

$$q'' = -k \frac{dT}{dx} \quad (5)$$

Figura 2.6 – Transferência unidimensional de calor por condução (INCROPERA, 2008).

Observe que $q''x$ é o fluxo de energia (W/m^2), ou seja, é a taxa de transferência de calor na direção x por unidade de área perpendicular à direção de transferência. A constante k é a condutividade térmica do material ($W/m.K$). Sob condições estacionárias, o fluxo de calor é linear (INCROPERA, 2008).

2.5.1.2. Convecção

Convecção é o mecanismo de transferência que ocorre entre uma superfície e um fluido em movimento, que estejam a diferentes temperaturas. Quando o processo de transmissão de calor envolve um fluido em movimento, a transferência não pode ser atribuída unicamente à interação molecular. Isto porque o deslocamento de um conjunto de moléculas, movimentando-se de forma agregada, contribui para intensificar a transferência de calor. No modo convectivo, as taxas de transferência de calor estão diretamente associadas ao movimento. (BRAGA, 2003)

Quantificar as taxas de transferência de calor em processos convectivos é mais complicado do que no caso da condução, porque o processo dependerá fortemente das características do escoamento e não apenas da estrutura do material.

Quando o movimento do fluido é criado artificialmente, pelo uso de um dispositivo mecânico como um ventilador ou agitador, diz-se que a troca de calor se dá por convecção forçada. Mas o deslocamento de massa pode ser provocado apenas pela ação de forças de empuxo, resultantes de diferenças de massa específica do fluido porque a massa específica de um fluido diminui com o aumento de temperatura. Assim, o fluido próximo a uma superfície aquecida torna-se menos denso e tende a subir, enquanto o fluido mais frio e pesado tende a descer. Isso gera um movimento natural, ainda que as velocidades de deslocamento sejam em geral, baixas. Neste caso dar-se-á um processo de convecção natural ou livre. Na Tabela 2.2 são dados valores típicos do coeficiente de transferência de calor por convecção. (BRAGA, 2003)

Independentemente de a convecção ser natural ou forçada, a equação usada para estimar a taxa de calor transmitida em um processo convectivo é descrita pela lei do resfriamento de Newton (equação 6):

$$q'' = h(T_{\text{sup}} - T_{\infty}) \quad (6)$$

Onde q'' é o fluxo de calor por convecção (W/m^2), é proporcional a diferença das temperaturas de superfície e do fluido. O coeficiente de transferência de calor por convecção é h dado em ($\text{W/m}^2.\text{K}$).

Tabela 2.1 – Valores típicos para coeficiente de transferência de calor por convecção (INCROPERA, 2008).

Processo	h (W/m ² K)
Convecção natural	
Gases	2–25
Líquidos	20–1.000
Convecção forçada	
Gases	25–250
Líquidos	50–20.000
Convecção com mudança de fase	
Ebulição ou condensação	2.500–100.000

2.5.2. Condução em Regime Transiente

Muitos problemas de transferência de calor são dependentes do tempo. Tipicamente, tais problemas transientes surgem quando ocorrem mudanças nas condições de contorno do sistema. Por exemplo, se uma temperatura superficial do sistema for alterada, a temperatura em cada ponto desse sistema também começará a mudar. As mudanças no interior do sistema continuarão até que uma nova distribuição estacionária de temperaturas seja atingida.

Problemas de transferência de calor estão restritos quanto à geometria e condições de contorno, porém em muitos casos tornam-se necessárias o emprego de métodos de diferenças finitas, pois essas geometrias ou as condições de contorno descartam a hipótese de emprego de técnicas analíticas.

2.5.2.1. Método das diferenças finitas

Existem na literatura, métodos implícitos e explícitos, para a obtenção de equações de calor, sendo que para este projeto, será usado o método explícito de equação de calor, visto ser o mais prático (sem o uso de grandes programas de

cálculos) e o projeto não requerer alta precisão, como por exemplo, precisão de duas casas decimais para temperatura.

2.5.2.2. Método explícito da Equação do calor

O objetivo desse trabalho é entender as fórmulas principais que poderão ser usadas.

Pontos nodais designam as posições em relação ao eixo x no interior ou na superfície do material (Figura 2.9). São representados pelos índices m e n que além de serem discretizados em relação ao espaço, também são discretizados em relação ao tempo.

Figura 2.9 – Nodo superficial com convecção e condução unidimensional transiente.

É usada, para um sistema unidimensional, a equação de diferenças finitas (equação 7) para um nodo interior m .

$$T_m^{p+1} = Fo(T_{m+1}^p + T_{m-1}^p) + (1 - 2Fo)T_m^p \quad (7)$$

Onde Fo é uma forma, em diferenças finitas, do número de Fourier (equação 8).

$$Fo = \frac{\alpha \cdot \Delta t}{(\Delta x)^2} \quad (8)$$

α é a difusividade térmica (m^2/s) dada pela equação 9.

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot c_p} \quad (9)$$

Uma forma explícita da equação, em diferenças finitas, para um nodo na superfície pode ser obtida realizando-se um balanço de energia em volume de controle ao redor desse nodo (equação 10).

$$T_0^{p+1} = 2Fo \left(\frac{q''_0 \Delta x}{k} + T_1^p \right) + (1 - 2Fo) T_0^p \quad (10)$$

Uma característica do método explícito é que ele não é incondicionalmente estável, ou seja, ele pode ser caracterizado por oscilações numéricas induzidas. Essas oscilações podem se tornar instáveis fazendo-se com que os valores diverjam das condições reais. Para efetuar correções foi criado o critério de estabilidade, que se caracteriza pela exigência de que o coeficiente associado ao nodo de interesse, no instante anterior, seja maior ou igual a zero (INCROPERA, 2008).

Assim, o critério da estabilidade para um nodo unidimensional é dado pela equação 11.

$$Fo \leq \frac{1}{2} \quad (11)$$

Após revisão bibliográfica dos processos de replicação, materiais e meios de aquecimento do substrato, desenvolve-se a metodologia de trabalho para a replicação, em PMMA, empregando o processo de laminação.

Capítulo 3

3. Metodologia

3.1. Considerações gerais

O objetivo desse trabalho é o estudo do processo de laminação como um método de replicação mais rápido e eficaz na fabricação de componentes ópticos.

Para isso, nesse capítulo, são descritos e especificados os equipamentos e/ou materiais usados nos processos para confecção do cilindro molde. E ainda, descreve-se o processo de aquecimento do PMMA, o equipamento necessário e a forma de obter as temperaturas ideais para alta taxa de replicação.

No cilindro inferior do laminador são usinados microcanais com geometria previamente definida. A replicação é obtida através do aquecimento e pressão sofridos pelo polímero quando passa entre os cilindros do laminador. A forma obtida relaciona a geometria dos microcanais do cilindro molde, a distância entre rolos, a temperatura do PMMA durante o processo e a velocidade de laminação. Foram usinados, no cilindro molde, microcanais com duas formas geométricas diferentes (perfil retangular e perfil em “V”). Perfis quadrados foram usinados num cilindro de alumínio e, perfis em “V”, numa camisa de liga de alumínio 7075 que foi acoplada ao cilindro de alumínio.

Para fabricação dos microcanais com perfis retangulares, foi usada ferramenta de PVD (*Physical Vapour Deposition*) e torno de precisão. Para fabricação dos microcanais em “V”, foi usada ferramenta de diamante monocristalino e torno de ultraprecisão, pois uma grande área de aplicação da tecnologia de usinagem de ultraprecisão encontra-se na fabricação de molde e matrizes para a produção em grande escala de componentes ópticos (LUO et al., 2005 e GRANADO, 2006). Já o substrato de PMMA foi aquecido de duas maneiras distintas: em estufa convencional e em placa térmica, verificando-se processos de convecção e condução de calor, respectivamente. O cálculo do coeficiente de transmissão de calor possibilitou obter

a curva de temperatura em função da distância ao longo da espessura do corpo de prova. Para tanto, foi usado o programa 1D HEAT TRANSFER. A Figura 3.1 mostra a sequência de execução do processo.

Figura 3.1 – Diagrama esquemático para replicação de PMMA através do processo de laminação.

3.2. Descrição do cilindro molde e do material do substrato (PMMA)

3.2.1. Liga de alumínio 7075 e alumínio

A opção em fabricar o cilindro molde em alumínio foi devido às suas propriedades de boa usinabilidade e baixa resistência ao escoamento.

Foram escolhidos dois tipos de alumínio: o alumínio sem elementos, chamado nesse trabalho simplesmente de alumínio, e o de liga 7075. Análises químicas dos alumínios, realizadas no EDS (*Energy Dispersive Spectroscopy*), constataram a presença dos constituintes de massa química e atômica de cada uma das amostras, atestando a classificação de cada material. As Figuras 3.2 e 3.3 mostram os gráficos de espectroscopia (Figura 3.2 – alumínio e Figura 3.3 – liga de alumínio 7075) e as Tabelas 3.1 (alumínio) e 3.2 (liga de alumínio 7075), a porcentagem em massa e de átomos. Foram escolhidos dois pontos aleatórios de cada material para efetuar a medição das porcentagens.

- **Amostra 1 – Alumínio**

Figura 3.2 – Gráfico de espectroscopia energia x contagem de elétrons.

Tabela 3.1 – Porcentagem da quantidade em massa e em átomos de cada elemento encontrado no material.

Elemento	Massa (%)		Átomos (%)	
	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 1	Ponto 2
Alumínio	99.43	99.09	99.72	99.61
Manganês	0.57	0.91	0.28	0.39

- **Amostra 2 – Liga de alumínio 7075**

Figura 3.3 – Gráfico de espectroscopia de energia x contagem de elétrons.

Tabela 3.2 – Porcentagem da quantidade em massa e em átomos de cada elemento encontrado no material.

Elemento	Massa (%)		Átomos (%)	
	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 1	Ponto 2
Alumínio	87.8	89.03	94.24	95.28
Cobre	3.01	2.87	1.37	1.30
Zinco	8.75	8.17	3.88	3.61

Para medição de dureza foram fabricados dois corpos de prova de cada material, com dimensões de Ø15 x 10 mm. Para medição, foi usado o durômetro digital LECO®, modelo LT-240 (Figura 3.4).

Figura 3.4 – Durômetro LECO®, modelo LT-240.

Foram efetuadas medições de dureza em três pontos diferentes para cada corpo de prova. Os valores são apresentados na Tabela 3.3, para o alumínio e a liga de alumínio 7075.

Tabela 3.3 – Valores de dureza medidos em três pontos.

Material	Alumínio		Liga de alumínio 7075	
Pontos	Dureza HB	Dureza HV	Dureza HB	Dureza HV
1	42,4	85	75,9	140
2	50,2	95	81,6	160
3	52,4	95	80,8	155

3.2.2. Polimetilmetacrilato

O polimetilmetacrilato foi escolhido por ser usado em dois terços dos componentes ópticos existentes, devido sua alta estabilidade óptica, fácil

usinabilidade, dureza e resistência a umidade e maleabilidade em temperatura acima da T_g , além de baixo custo (BAUER et al., 2000 apud GRANADO, 2006).

Esse polímero apresenta a mesma transparência que os mais finos vidros ópticos. Sua transmitância de luz é de 92 por cento e índice de refração de 1,49, suficientemente necessários para a utilização em lentes e outras aplicações ópticas (GRANADO, 2006).

As soluções aquosas da maioria dos produtos de limpeza não interferem na estrutura do PMMA, porém apresenta baixa resistência aos ésteres, hidrocarbonetos aromáticos e cetonas (MULTIPLAST, 2004).

A Tabela 3.4 mostra as principais propriedades do PMMA.

Tabela 3.4 – Propriedades do PMMA (Mano, 1991).

Propriedades	Valores
Massa Molecular (u)	500.000–1.000.000
Densidade (g/cm ³)	1,18
Temperatura de fusão cristalina (°C)	160
Temperatura de fusão vítrea (°C)	105

No entanto, o material apresenta tensões internas relativas, oriundas de seu processo de produção. Canevarolo (2002) cita uma maneira de aliviar possíveis tensões internas no polímero. Um aumento na temperatura aumenta a movimentação molecular (mobilidade), permitindo que o sistema retorne à posição de equilíbrio mais rapidamente, ou seja, reduz o tempo necessário para retornar o equilíbrio. Esse tempo é chamado de tempo de relaxação.

Para certificar que o PMMA estaria livre das tensões internas que poderiam comprometer o resultado da replicação, os corpos de prova foram colocados numa estufa, a temperatura pouco acima da T_g do polímero (105 °C) e, lá, permaneceram por 48 horas. Segundo CANEVAROLO (2002) esse tempo seria suficiente para haver relaxação das cadeias moleculares.

Foram escolhidos corpos de prova de PMMA com tamanhos diferentes. Para replicação usando o cilindro de alumínio, as dimensões dos corpos de prova foram de 75 x 20 x 2 mm e 75 x 20 x 4 mm. Enquanto para replicação com o cilindro de liga de alumínio 7075, foram adotados corpos de prova com tamanhos de 10 x 20 x 2

mm e 10 x 20 x 4 mm. Para obter a replicação, os corpos de prova de PMMA foram sujeitos à pressão enquanto passavam entre os cilindros do laminador.

3.3. Laminador de precisão

O processo de replicação através da laminação contou com um laminador de precisão da marca Laminadores G3 Rio Preto[®]. Esse tipo de laminador é usado por ourives, tem peso de 15 kg, é manual, possui abertura máxima de 4 mm entre rolos, engrenagens helicoidais para garantir o contato ininterrupto entre os dentes e sincronia de velocidade dos rolos de laminação. O volante superior, conforme mostra a Figura 3.5, movimenta duas coroas sincronizadas, fazendo com que o cilindro do laminador móvel (superior), desça ou suba de forma linear e sincronizada, nas duas extremidades.

Figura 3.5 – Laminador G3 Rio Preto[®] especial de precisão.

3.3.1. Calibração do Laminador

Com o objetivo de aferir as distâncias entre os cilindros de laminação houve necessidade de calibrá-los. Para isso, foi usado um bloco padrão de 4 mm de espessura, marca MITUTOYO®, conforme mostra a Figura 3.6, e um relógio comparador de base magnética. Depois de calibrada a distância de 4 mm, observou-se que para cada volta completa do volante superior do laminador, a distância entre rolos variava em 0,5mm, indicada no relógio comparador. Assim, o equipamento foi calibrado.

Figura 3.6 – Bloco padrão 4 mm de espessura em uso para calibração das distâncias entre os cilindros laminadores.

A seguir são descritas as ferramentas de usinagem usadas na fabricação dos cilindros molde.

3.4. Ferramenta de corte

Foram utilizadas no processo de usinagem, duas ferramentas de corte, uma de metal duro SANDVIK® (MAGR/L 3 050), para usinagem dos canais retangulares no

cilindro de alumínio, e uma ferramenta de diamante monocristalino, para usinagem dos canais em “V”, da camisa de liga de alumínio 7075.

- **Ferramenta SANDVIK® (MAGR/L 3 050)**

A ferramenta usada é de classe N (metais não ferrosos), de metal duro com cobertura de PVD para operações que exigem tenacidade. É recomendada para cortes interrompidos. A Figura 3.7 apresenta um desenho esquemático da geometria da ferramenta (bedame).

Onde:

la – largura do bedame

re – raio de aresta

ar – distância útil de usinagem

Figura 3.7 – Esquema ferramenta tipo bedame (Catálogo SANDVIK®, 2009).

A ferramenta usada (Figura 3.8) *la*, de 0,5mm ($\pm 0,02$ mm), *re* de 0,05mm e *ar* até 1,3 mm.

Figura 3.8 – Ferramenta usada (tipo bedame – SANDVIK®).

- **Ferramenta de diamante**

O torneamento com ferramenta de diamante monocristalino (ponta única) é um excelente processo de fabricação para a produção de componentes onde a complexidade de forma e acabamento são exigidos a níveis submicrométrico e nanométricos (GRANADO, 2006). E ainda, apresenta baixo coeficiente de expansão térmica aliado a alta condutividade térmica, fazendo com que o calor gerado durante a usinagem, não seja deslocado através da aresta de corte, a fim de evitar expansão da ferramenta e alterações das dimensões da peça. Tem baixíssima compressibilidade, de maneira que a ferramenta não sofra compressão devido às forças de corte (BREHM, 1976).

As características favoráveis (precisão e acabamento) para obtenção de moldes e matrizes, possivelmente de serem obtidas pelo processo de usinagem de ultraprecisão com ferramenta de diamante monocristalino, e a perspectiva de usar uma ferramenta com geometria diferente, no caso perfil em “V” para geração dos microcanais, foram fatores que levaram à escolha em produzir mais um cilindro molde para verificar o comportamento da replicação. Estudos referentes aos parâmetros de corte, com ferramenta de diamante monocristalino, para usinagem de cilindros moldes podem ser encontrados em Choi et al. (2009).

A geometria da ferramenta foi verificada através do auxílio do projetor de perfil NIKON®, modelo V20A (Figura 3.9), disponível no Laboratório de Engenharia de Precisão da EESC-USP.

Figura 3.9 – Projetor de perfil NIKON® V20A e análise da ferramenta de diamante.

A Figura 3.10 mostra a ferramenta de diamante monocristalino, em “V”, usada no experimento.

γ : ângulo de saída: 0°
 α : ângulo de folga: 2°
 b : chanfro: 0,125 mm

Figura 3.10 – Geometria de ferramenta de diamante monocristalino.

Para a análise da superfície do molde e da replicação, foram utilizados perfilômetros mecânico e óptico, além de microscopia eletrônica de varredura (MEV).

3.5. Análises das superfícies

A perfilometria mecânica das superfícies dos cilindros molde foi realizada no Núcleo de Engenharia de Manufatura Avançada (NUMA), do Departamento de Engenharia de Produção da EESC-USP. Foi usado o perfilômetro marca Taylor-Hobson®, modelo Form Talysurf Series Indutivo, com ponta de diamante a 90°, “cut-off” de 0,08 mm, raio de ponta de 2,0 μm e resolução de 4 nm. O Form Talysurf Series segue padrões para medições de rugosidade, ondulação, retitude e forma. O equipamento dispõe de um barramento de referência de alta precisão, medidor indutivo de alta resolução de calibração com esfera, permitindo correção altamente precisa.

Também foi usado, para caracterização e avaliação das superfícies dos cilindros molde, o perfilômetro óptico 3D VEECO® NT1100. Esse perfilômetro óptico (Figura 3.11) realiza medições tridimensionais, através de um “scanner” interferométrico vertical. Possui resolução máxima de 1 Å e resoluções verticais de 0,1nm até 1 mm.

Figura 3.11 – Perfilômetro óptico VEECO® NT1100.

Para análise das superfícies replicadas, em PMMA, fez-se do uso do MEV (Figura 3.12).

Figura 3.12 – Microscópio eletrônico de varredura (MEV).

Para superfícies não metalizadas foi usado o recurso de metalização com aplicação de ouro em pó, conforme aparelho mostrado na Figura 3.13. A análise de matéria em porcentagem de átomos e porcentagem em massa do elemento químico foi dada através do EDS (“Energy Dispersive Spectroscopy”).

Figura 3.13 – Aparelho BALTEC® MED020 para aplicação de camada micrométrica de ouro.

3.6. Processos de Usinagem dos Cilindros Moldes

Para a fabricação dos cilindros moldes foram usados dois processos de usinagem: o cilindro de alumínio foi usinado num torno de precisão (Índex[®]) e a camisa de liga de alumínio 7075, num torno de ultraprecisão (Rank Pneumo[®]). Os dois possuem CNC (controle numérico computadorizado). O cilindro de alumínio substituiu o cilindro inferior usado no laminador de precisão. Para tanto, ele foi fabricado com as mesmas dimensões de comprimento e diâmetro do cilindro comercial. Através do processo de torneamento de ultraprecisão foi fabricada uma camisa de liga de alumínio 7075. Essa camisa foi acoplada ao cilindro de alumínio. Para atenuar ou até mesmo eliminar quaisquer desalinhamentos entre a camisa e o cilindro de alumínio, a montagem foi realizada sob pressão e fez-se uso de cola de auto torque.

3.6.1. Torno Índex[®] GU 600 CNC

O torno de precisão usado (Figura 3.14) possui controle SIEMENS[®] S3T com doze estações, potência no motor de 32KW e rotação máxima de 5000 rpm. Está alocado no NUMA da EESC – USP.

Figura 3.14 – Torno de Precisão INDEX® GU 600 CNC.

3.6.1.1. Usinagem do cilindro molde de alumínio

A usinagem do cilindro molde de alumínio, para uso no laminador G3 Rio Preto®, seguiu os seguintes procedimentos:

- 1) Deixar o cilindro nas dimensões pré-estabelecidas para substituição do cilindro inferior do laminador.
- 2) Efetuar canais na área útil do cilindro, ou seja, na área de contato com o corpo de prova de PMMA.

Foi, então, dado início à fabricação do cilindro. Primeiro, realizando usinagem de desbaste num torno convencional, marca Romi®, modelo TORMAX 20.

Na sequência, o cilindro molde foi fixado no torno Index®, realizando-se um primeiro passe para alinhar a ferramenta com a peça (Figura 3.15).

Figura 3.15 – Procedimento de alinhamento peça-máquina.

Posteriormente, realizaram-se usinagens dos canais retangulares com a pastilha SANDVIK® MAGR/L 3 050, como mostra a Figura 3.16. No processo, a velocidade de corte permaneceu constante, 200 m/min., e o avanço foi de 0,04 mm/r, conforme especificação do catálogo do fabricante da pastilha.

Figura 3.16 – Processo de usinagem dos canais.

Os canais foram usinados seguindo os seguintes critérios:

- O início da usinagem ocorreu a 10 mm da face inicial (lado que possui o rasgo de chaveta do cilindro).
- Foram usinados 8 canais retangulares com a mesma profundidade. Um conjunto de 4 canais foi usinado em corte único e, o outro conjunto, foi usinado, seguido de um passe da ferramenta em vazio na mesma posição, para eliminação de eventuais rebarbas.
- Variou-se a distância entre os canais usinados, sempre obedecendo dois conjuntos de 4 canais.
- Foram usinados canais com 5 diferentes medidas de profundidade.

A Figura 3.17 mostra o desenho do cilindro molde e os detalhes dos microcanaís retangulares.

Figura 3.17 – Desenho do cilindro molde e detalhes dos microcanais.

A Tabela 3.5 mostra os passos realizados da usinagem a partir do ponto inicial.

Tabela 3.5 – Referência de número de canais e posição e profundidade do canal usinado.

Número de canais	Distância da face inicial (mm)	Profundidade do canal em relação ao raio (mm)	Distância entre canais (mm)
1	10,6	0,05	0
2	11,2	0,05	0,6
3	11,8	0,05	0,6
4	12,4	0,05	0,6
1	13	0,05	0,6
2	13,6	0,05	0,6
3	14,2	0,05	0,6
4	14,8	0,05	0,6
1	15,5	0,05	0,7
2	16,2	0,05	0,7
3	16,9	0,05	0,7
4	17,6	0,05	0,7
1	18,3	0,05	0,7
2	19	0,05	0,7
3	19,7	0,05	0,7
4	20,4	0,05	0,7
1	21,2	0,05	0,8
2	22	0,05	0,8
3	22,8	0,05	0,8
4	23,6	0,05	0,8
1	24,4	0,05	0,8
2	25,2	0,05	0,8
3	26	0,05	0,8
4	26,8	0,05	0,8
1	27,7	0,05	0,9
2	28,6	0,05	0,9
3	29,5	0,05	0,9
4	30,4	0,05	0,9
1	31,3	0,05	0,9
2	32,2	0,05	0,9
3	33,1	0,05	0,9
4	34	0,05	0,9
1	34,6	0,1	0,6
2	35,2	0,1	0,6
3	35,8	0,1	0,6
4	36,4	0,1	0,6
1	37	0,1	0,6
2	37,6	0,1	0,6
3	38,2	0,1	0,6
4	38,8	0,1	0,6
1	39,5	0,1	0,7
2	40,2	0,1	0,7
3	40,9	0,1	0,7
4	41,6	0,1	0,7
1	42,3	0,1	0,7

Número de canais	Distância da face inicial (mm)	Profundidade do canal em relação ao raio (mm)	Distância entre canais (mm)
2	43	0,1	0,7
3	43,7	0,1	0,7
4	44,4	0,1	0,7
1	45	0,15	0,6
2	45,6	0,15	0,6
3	46,2	0,15	0,6
4	46,8	0,15	0,6
1	47,4	0,15	0,6
2	48	0,15	0,6
3	48,6	0,15	0,6
4	49,3	0,15	0,7
1	50	0,15	0,7
2	50,7	0,15	0,7
3	51,4	0,15	0,7
4	52,1	0,15	0,7
1	52,8	0,15	0,7
2	53,5	0,15	0,7
3	54,2	0,15	0,7
4	54,8	0,2	0,6
1	55,4	0,2	0,6
2	56	0,2	0,6
3	56,6	0,2	0,6
4	57,2	0,2	0,6
1	57,8	0,2	0,6
2	58,4	0,2	0,6
3	59	0,2	0,6
4	59,7	0,2	0,7
1	60,4	0,2	0,7
2	61,1	0,2	0,7
3	61,8	0,2	0,7
4	62,5	0,2	0,7
1	63,2	0,2	0,7
2	63,9	0,2	0,7
3	64,6	0,2	0,7
4	65,2	0,25	0,6
1	65,8	0,25	0,6
2	66,4	0,25	0,6
3	67	0,25	0,6
4	67,6	0,25	0,6
1	68,2	0,25	0,6
2	68,8	0,25	0,6
3	69,4	0,25	0,6
4	70,1	0,25	0,7
1	70,8	0,25	0,7
2	71,5	0,25	0,7
3	72,2	0,25	0,7
4	72,9	0,25	0,7
1	73,6	0,25	0,7

Número de canais	Distância da face inicial (mm)	Profundidade do canal em relação ao raio (mm)	Distância entre canais (mm)
2	74,3	0,25	0,7
3	75	0,25	0,7

Para avaliar a geometria dos canais usinados, fez-se uso de perfilometrias mecânica e óptica. Nota-se que houve formação de rebarbas nas superfícies laterais dos canais (logo no início dos canais), como mostra a Figura 18. Elas são decorrentes do processo de torneamento. Uma lixa de grana 1200 foi usada para a eliminação dessas rebarbas.

Figura 3.18 – Superfície dos canais com 0,10mm de profundidade e 0,7mm de distância entre canais, usando perfilômetro óptico VEECO®.

Uma análise do perfil dos canais apresentados na Figura 18 pode ser vista na Figura 19. Notam-se picos logo no início dos canais. Esses picos são os indicativos de presença de rebarbas.

Figura 3.19 – Perfil dos canais com 0,10mm de profundidade e 0,7mm de distância entre canais, usando perfilômetro óptico VEECO®.

A Figura 20 mostra o mesmo perfil da Figura 19, após o lixamento.

Figura 3.20 – Perfil dos canais com 0,10mm de profundidade e 0,7mm de distância entre canais, usando perfilômetro óptico VEECO®, sem rebarbas.

- **Torno de ultraprecisão RANKO PNEUMO® ASG 2500**

Este torno foi projetado para torneamento ou retificação de ultraprecisão. A base da máquina possui isoladores pneumáticos passivos, montados cinematicamente em uma estrutura soldada de aço. Os mancais do eixo-árvore são aerostáticos, o que dá a máquina precisão de giro, rigidez axial e radial. A máquina utiliza um CNC da ALLEN-BRADLEY®, modelo 8200, para controlar o deslocamento

dos eixos da máquina (X e Z), com incrementos de 0,00001 mm (10 nm). Esses eixos são perpendiculares entre si e definem o plano no qual é gerada a peça. As peças a serem usinadas são fixadas à placa por meio de vácuo (cerca de $-0,7$ kPa). O fluido refrigerante utilizado foi ALKALISOI® 900, direcionado para a região do corte através de uma névoa pressurizada. O torno, Figura 3.21, está alocado no Laboratório de Engenharia de Precisão da EESC – USP.

Figura 3.21 – Torno de ultraprecisão RANKO PNEUMO® ASG 2500 e Controle Numérico ALLEN-BRADLEY® CNC 8200.

Vários trabalhos publicados mostram a replicação com dimensões cada vez menores e uma grande área de aplicação da tecnologia de usinagem de ultraprecisão encontra-se na fabricação de molde e matrizes para a produção, em grande escala, de componentes ópticos, por isso, foi usado o torno de ultraprecisão RANKO PNEUMO® ASG 2500, usando ferramenta de diamante monocristalino. Foi usinada uma camisa de liga de alumínio 7075 (Figura 3.22) que foi fixada, com cola de alto torque, ao cilindro de alumínio.

Figura 3.22 – Desenho de camisa acoplada ao cilindro de laminação.

Para realizar a usinagem, houve a necessidade de se construir um suporte para fixar a camisa na placa do torno através de vácuo (-70 kPa). A fixação da liga de alumínio 7075 na placa de vácuo, através do suporte, pode ser visto na Figura 3.23.

Figura 3.23 – Dispositivo para fixação da camisa à placa de vácuo.

A usinagem dos canais em “V” foi realizada com ferramenta de diamante, a uma distância de 10 μm entre os canais e com variações de profundidade.

A seqüência de usinagem está descrita na Tabela 3.6. A rotação permaneceu constante, 900 rpm.

Tabela 3.6 – Sequência de usinagem da camisa de alumínio 7075.

Passos	Profundidade de corte (μm)			Espaço (mm)	
	10	20	30	0,2	0,3
1°	3 canais				
2°				√	
3°	5 canais				
4°					√
5°	5 canais				
6°					√
7°	5 canais				
8°				√	
9°	3 canais				

Onde:

√- indica que deve ser dado um espaço, de acordo com a tabela, antes da próxima usinagem.

Foi realizada perfilometria óptica para análise da estrutura dos canais da camisa de liga de alumínio, conforme mostram as Figuras 3.24 e 3.25.

Figura 3.24 – Trecho de perfilometria óptica VEECO® de canais em camisa de alumínio 7075.

Figura 3.25 – Trecho de perfilometria óptica 3D VEECO® de canais em camisa de alumínio 7075.

As imagens geradas na perfilometria óptica mostraram que os canais foram realizados sem quaisquer deformações na estrutura, acompanhando a geometria da ferramenta de diamante.

Efetuada a análise da estrutura, pode-se, então, realizar a montagem da camisa no cilindro laminador, fixando-a com cola de alto torque, como mostra a Figura 3.26.

Figura 3.26 – Cilindro de alumínio com camisa de liga de alumínio 7075 colada.

Para realizar o processo de replicação no cilindro molde, fez-se necessário conhecer o processo de aquecimento e a temperatura do substrato de PMMA em diversos pontos da sua espessura, para obter melhor controle da temperatura não só da superfície, mas também no interior do material.

3.7. Aquecimento do PMMA

Para a replicação do PMMA é interessante aquecer apenas a superfície onde será efetuada a replicação, visto que a outra superfície estará em temperatura ambiente e ajudará no resfriamento do sistema quando necessário.

O aquecimento do PMMA foi realizado através de duas formas: uma, usando estufa, e outra, através de uma placa térmica. Ambas com controle de temperatura.

3.7.1. Estufa

O substrato de PMMA foi aquecido em estufa (Figura 3.27), marca ODONTOBRAS®, modelo EL-1.3, no NETEF – EESC (Núcleo de Engenharia Térmica e Fluidos da Escola de Engenharia de São Carlos) com temperatura controlada (erro de $\pm 1^{\circ}\text{C}$).

Figura 3.27 – Estufa do NETEF – EESC.

Para realizar o aquecimento fez-se necessário a utilização de um tijolo refratário, a fim de que somente a parte da superfície a ser replicada recebesse o calor, conforme mostra Figura 3.28.

Figura 3.28 – Esquema de aquecimento do PMMA em estufa.

Foi realizado um furo de 1 mm no centro de um corpo de prova de PMMA (75x20) para se alocar um termopar para medir a temperatura naquele ponto. Isso facilitou o cálculo do coeficiente de transmissão de calor e, conseqüentemente, possibilitou obter a curva de temperatura em função da distância ao longo da espessura do corpo de prova. Para isso foi usado o programa 1D HEAT TRANSFER, desenvolvido pelo professor Wilton Pereira da Silva da Universidade Federal de Campina Grande. A Figura 3.29 mostra os termopares fixados ao corpo de prova e um leitor de termopares.

Figura 3.29 – Leitor de termopares e corpo de prova de PMMA com termopares.

As temperaturas do PMMA, da estufa e do ambiente do laboratório foram controladas com o objetivo de verificar suas influências nos resultados obtidos.

- **Temperaturas encontradas:**

Temperatura do PMMA – 25°C

Temperatura da estufa – 180°C

Temperatura ambiente da sala do laboratório – 20°C

Para calcular o coeficiente de convecção, h , houve a necessidade de conhecer alguns resultados de tempo versus temperatura. Desse modo, e com o auxílio do programa 1D HEAT TRANSFER, foi possível obter o valor de h da estufa.

Foram usados corpos de prova, em PMMA, com 2 mm e 4 mm de espessura.

- **Para a placa de 2 mm**

Foram realizadas três medições de tempo até que a temperatura na superfície da placa atingisse 105°C. Os valores medidos estão na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 – Tempo de medição até a superfície da placa atingir 105°C.

Medição	Tempo
1	1'58"
2	2'
3	2'01"

O PMMA possui as seguintes propriedades:

K (condutividade térmica do acrílico) = 0,19 W/m.K

Espessura da placa = 2 mm

Densidade = 1190g/cc

Calor específico = 1,47 J/g°C

Intervalo de tempo = 100 segundos

Coeficiente convectivo placa $h = 50$ (valor calculado através de valores de tempo e temperatura experimentais)

Coeficiente convectivo ambiente $h = 2$ (valor calculado através de valores de tempo e temperatura experimentais).

Dessa forma foi obtida a curva temperatura versus distância ao longo da espessura parametrizada em relação ao tempo, conforme mostra a Figura 3.30. Os dados, tempo versus temperatura, são mostrados na Tabela 3.8.

Figura 3.30 – Curvas de Temperatura (T em °C e x em mm) obtidas pelo programa 1D HEAT TRANSFER.

Tabela 3.8 – Tempo x temperatura na superfície da placa de PMMA. Cálculo realizado pelo programa 1D HEAT TRANSFER.

Tempo (s)	Temperatura (°C)
0	25
10	59
20	71
30	80
40	86
50	91
60	95
70	98
80	101
90	104
100	103
110	107
120	109
130	111
140	114
150	116

Tempo (s)	Temperatura (°C)
160	117
170	118
180	119
190	120
200	121
210	122
220	123
230	124
240	125
250	126

- **Para a placa de 4 mm**

O coeficiente de convecção é o mesmo obtido para as duas espessuras visto que se trata de uma propriedade característica da estufa para transferência de calor. O coeficiente convectivo do tijolo refratário é um valor aproximado, pois ele é considerado um isolante térmico a altas temperaturas, portanto, a face que estava em contato, permanece a temperatura ambiente.

Como o coeficiente de convecção do forno já foi achado com a placa de 2 mm, então só se fez necessário achar os valores de tempo versus temperatura, obtidos no gráfico através do programa 1D HEAT TRANSFER.

Para o programa foram utilizados os seguintes dados e propriedades do PMMA:

K (condutividade térmica do acrílico) = 0,19

Espessura da placa = 4 mm

Densidade = 1190

Calor específico = 1470

Intervalo de tempo = 100 segundos

Coeficiente convectivo placa $h = 50$ (valor calculado através de valores de tempo e temperatura experimentais)

Coefficiente convectivo do tijolo $h = 2$ (valor calculado através de valores de tempo e temperatura experimentais)

Dessa forma, foi obtida a curva temperatura versus distância ao longo da espessura, conforme mostra a Figura 3.31. Os dados do tempo versus temperatura são mostrados na Tabela 3.9.

Figura 3.31 – Curvas de Temperatura (T em $^{\circ}\text{C}$ e x em mm) obtidas pelo programa 1D HEAT TRANSFER.

Tabela 3.9 – Tempo x temperatura na superfície da placa de PMMA. Cálculo realizado pelo programa 1D HEAT TRANSFER.

Tempo (s)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
0	25
10	53
20	70
30	79
40	80
50	82
60	86
70	89
80	92
90	94

Tempo (s)	Temperatura (°C)
100	96
110	98
120	100
130	102
140	103
150	105
160	116
170	118
180	119
190	120
200	121
210	122
220	123
230	124
240	125
250	126

3.7.2. Placa térmica

Com o objetivo de acelerar o aumento de temperatura do PMMA, este foi aquecido por condução térmica através do contato com a chapa de alumínio do aquecedor Fisatom[®] (Figura 3.32), disponível no Laboratório de Engenharia de Precisão da EESC – USP. As temperaturas dos corpos de prova, em PMMA, foram controladas através de termopares e leitor de termopares marca Minipa[®]. A sala do laboratório utilizada no processo estava a temperatura controlada, em 20°C.

Figura. 3.32 – Aquecedor de placa FISATOM®.

Como feito no aquecimento por estufa, foi realizado um furo de 1 mm no centro de um corpo de prova de PMMA (75 x 20 mm) para se alocar um termopar. Assim, é possível medir a temperatura naquele ponto e, com isso, facilita o cálculo do coeficiente de transmissão de calor e, conseqüentemente, a possibilidade de levantar a curva da temperatura em função da distância ao longo da espessura do corpo de prova. O programa 1D HEAT TRANSFER auxiliou na obtenção das curvas de temperatura e análise dos resultados de temperaturas ao longo da espessura.

As temperaturas do PMMA, da estufa e do ambiente do laboratório foram controladas com o objetivo de verificar suas influências nos resultados obtidos.

- **Temperaturas encontradas:**

Temperatura do PMMA – 25°C

Temperatura da placa térmica– 150°C

Temperatura ambiente da sala do laboratório – 20°C

Para calcular o coeficiente de convecção, houve a necessidade de se conhecer alguns resultados de tempo versus temperatura. Esses valores foram inseridos no programa 1D HEAT TRANSFER e, assim, foi possível obter o valor h da estufa.

Foram realizadas três medições de tempo até que a temperatura na superfície da placa atingisse 105°C. Os valores medidos estão na Tabela 3.10.

Tabela 3.10 – Tempo de medição até a superfície da placa atingir 105°C.

Medição	Tempo
1	40"
2	41"
3	39,51"

Foram usados os seguintes dados e propriedades do PMMA:

K (condutividade térmica do acrílico) = 0,19

Espessura da placa = 2 mm

Densidade = 1190

Calor específico = 1470

Intervalo de tempo = 100 segundos

Coeficiente convectivo placa $h=130$ (valor calculado através dos dados de tempo experimentais)

Coeficiente convectivo ambiente $h = 2$ (valor calculado através dos dados de tempo experimentais).

Dessa forma foi obtida a curva temperatura versus distância ao longo da espessura, conforme mostra a Figura 3.33. Os dados do tempo versus temperatura são mostrados na Tabela 3.11.

Figura 3.33 – Curvas de Temperatura (T em $^\circ\text{C}$ e x em mm) obtidas pelo programa 1D HEAT TRANSFER.

Tabela 3.11 – Tempo x temperatura na superfície da placa de PMMA.

Tempo (s)	Temperatura (°C)
0	25
10	78
20	92
30	100
40	105
50	109
60	112
70	115
80	117
90	118
100	120

As duas formas de transferência de calor (estufa ou placa aquecida) para aquecimento do PMMA obtiveram resultados iguais para o experimento, não influenciando assim, no resultado da replicação por laminação. O objetivo em analisar esses dois métodos foi o de encontrar uma forma mais eficiente de produção em larga escala. Vários fatores atestam melhor eficiência em termos de produção para a técnica da placa aquecida.

- 1) Menor consumo de energia, pois se tem menor área para aquecer, ou seja, somente o corpo de prova do PMMA.
- 2) Mais rápido, pois o fluxo de calor para uma peça em contato é muito superior ao transmitido pelo ambiente, visto que esse acontece por condução e não por convecção.
- 3) Eficiência no transporte pós-aquecimento. O tempo do transporte do corpo de prova da estufa até o laminador envolve sua abertura e fechamento e o transporte dele até o local da replicação. Este tempo perdido foi cronometrado, durando, em média, de 5 segundos. Logo a temperatura da superfície da peça diminuía. Esta perda foi medida e computada em média de 5°C, ou seja, o aquecimento do PMMA deveria ser feito 5°C acima da

temperatura desejada no momento da laminação. Já na placa aquecida esta perda de temperatura era insignificante, pois a perda de tempo para transporte era inferior a 1 segundo.

Capítulo 4

4. Resultados e discussão

4.1. Considerações Gerais

Replicação é a cópia física do perfil da superfície de uma microestrutura fabricada. Para a obtenção de microestruturas replicadas usando o processo de microlaminação é necessário relacionar a forma obtida com a geometria dos microcanais do cilindro molde, a distância entre rolos, a temperatura do PMMA durante o processo e a velocidade de laminação. Nesse capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos experimentos realizados.

4.2. Testes com o cilindro molde de alumínio

A princípio foram realizadas variações de temperatura e distância entre rolos. A velocidade de laminação foi mantida constante em todos os casos. As variações de temperatura do PMMA se concentraram em torno de 105°C, que é sua T_g. Isso foi feito devido ao fato de abaixo da T_g o material apresentar características sólidas frágeis e acima da T_g, exibir características viscoelásticas. Como a T_m do PMMA é 160°C e suas características físicas são líquidas acima desta temperatura, foi dado início aos testes com variações da ordem de 5°C acima da T_g, e 5 °C abaixo da T_g.

Foram criadas tabelas a fim de organizar o experimento. Cada tabela contém os seguintes itens:

- 1) Velocidade de laminação (VL) – é a velocidade tangencial dos cilindros. Foi obtida medindo-se o tempo e o deslocamento percorrido pelo substrato enquanto laminado.

- 2) Temperatura – do PMMA no ponto de contato com o laminador.
- 3) Redução – é a distância entre cilindros em porcentagem de diminuição da amostra, ou seja, uma amostra de 2 mm com 50% de redução, resultaria em 1 mm de distância entre rolos.

Os experimentos foram realizados em corpos de prova de PMMA com 75 mm de largura, 20 mm de comprimento e dois tipos de espessuras, 2 e 4 mm.

Os testes foram realizados sem o auxílio de refrigeração posterior à laminação.

- **Corpos de prova de PMMA de 4 mm de espessura**

Para cada valor de temperatura e porcentagem de redução, foram efetuados 3 testes e analisados em perfilômetro mecânico.

A Tabela 4.1 mostra variações de temperatura, porcentagem de redução e velocidade de laminação usadas para o corpo de prova de 4 mm.

Tabela 4.1 – Replicação em corpos de prova de 4mm.

Temperatura (°C)	Redução (%)	VL (mm/s)
110	6	60,3
105	6	60,3
100	6	***
110	13	60,3
105	13	60,3
100	13	***
110	19	60,3
105	19	60,3
100	19	***

*** indica a inviabilidade da passagem do corpo de prova pelos cilindros, pois o PMMA já não apresentava características viscoelásticas.

- **Corpos de prova de PMMA de 2 mm de espessura**

A Tabela 4.2 mostra variações de temperatura, porcentagem de redução e velocidade de laminação utilizadas para o corpo de prova de 2 mm.

Tabela 4.2 – Replicação em corpos de prova de 2 mm.

Temperatura	Redução	VL (mm/s)
110	12	60,3
105	12	60,3
100	12	***
110	25	60,3
105	25	60,3
100	25	***
110	37	60,3
105	37	60,3
100	37	***

*** indica a inviabilidade da passagem do corpo de prova pelos cilindros, pois o PMMA já não apresentava características viscoelásticas.

Para efeito de comparação, os testes anteriores foram refeitos, porém com o auxílio de refrigeração externa forçada (jato de água). O corpo de prova logo após a replicação recebia jatos d'água a temperatura ambiente (20°C) a fim de refrigerar o PMMA e diminuir sua temperatura abaixo da Tg com o objetivo de paralisar sua estrutura, porém os resultados não demonstraram eficiência, visto que o próprio cilindro, a temperatura ambiente (20°C) já tinha a função de baixar essa temperatura de forma eficiente.

Foi detectado que, para porcentagem de reduções elevadas ou temperatura muito elevada, iniciou-se um abaulamento no corpo de prova (Figura 4.1).

Figura 4.1 – Abaulamento em corpo de prova.

Foi construída uma guia de saída (Figura 4.2) para o corpo de prova deslizar e não acompanhar o raio de curvatura do cilindro.

Figura 4.2 – Guia de saída de alumínio para apoio do corpo de prova.

4.2.1. Resultados dos testes com o cilindro molde de alumínio

Com o objetivo de avaliar a replicação nos corpos de prova de PMMA, foram analisadas as áreas dos canais de replicação e comparadas com as áreas dos canais obtidos no cilindro antes da replicação. A partir daí foram estabelecidas porcentagens, definidas como taxa de replicação, que seria a porcentagem do canal replicado em relação ao canal original do molde.

- **Corpo de prova de 4 mm espessura**

Para as dimensões do canal do molde, 0,05 mm de profundidade e distância entre canais de 0,6, 0,7, 0,8 e 0,9 mm, foram observadas porcentagens iguais de replicação para cada faixa de temperatura e distância entre rolos. O gráfico da Figura 4.3 mostra a taxa de replicação em função da temperatura de replicação para cada porcentagem de redução.

Figura 4.3 – Taxa de replicação x temperatura em replicação de canal molde de 0,05 mm de profundidade.

Para as dimensões do canal do molde, 0,1 mm de profundidade e distância entre canais de 0,6 e 0,7mm, foram observadas porcentagens iguais de replicação para cada faixa de temperatura e distância entre rolos. O gráfico da Figura 4.4 mostra a taxa de replicação em função da temperatura de replicação para cada porcentagem de redução.

Figura 4.4 – Taxa de replicação x temperatura em replicação de canal molde de 0,1 mm de profundidade.

Para as dimensões do canal do molde, 0,15 e 0,20mm de profundidade e distância entre canais de 0,6 e 0,7mm, foram observadas porcentagens iguais de replicação para cada faixa de temperatura e distância entre rolos. O gráfico da Figura 4.5 mostra a taxa de replicação em função da temperatura de replicação para cada porcentagem de redução.

Figura 4.5 – Taxa de replicação x temperatura em replicação de canal molde de 0,15 e 0,20 mm de profundidade.

Para as dimensões do canal do molde, 0,25 mm de profundidade e distância entre canais de 0,6 e 0,7mm, foram observadas porcentagens iguais de replicação para cada faixa de temperatura e distância entre rolos. O gráfico da Figura 4.6 mostra a taxa de replicação em função da temperatura de replicação para cada porcentagem de redução.

Figura 4.6 – Taxa de replicação x temperatura em replicação de canal molde de 0,25 mm de profundidade.

Os índices percentuais mostraram que, para reduções maiores e consequentemente cargas mais elevadas do laminador, aliado a temperaturas próximas a T_g do PMMA, as replicações obtiveram maior fidelidade de área. Esses resultados foram alcançados para velocidade de laminação de 60,3mm/s. Nota-se também que os canais com menor profundidade obtiveram maior fidelidade na replicação.

- **Corpo de prova de 2 mm de espessura**

Para as dimensões do canal do molde, 0,05 mm de profundidade e distância entre canais de 0,6 e 0,7mm, foram observadas porcentagens iguais de replicação para cada faixa de temperatura e distância entre rolos. O gráfico da Figura 4.7 mostra a taxa de replicação em função da temperatura de replicação para cada porcentagem de redução.

Figura 4.7 – Taxa de replicação x temperatura em replicação de canal molde de 0,05 mm de profundidade.

Para as dimensões do canal do molde, 0,05 mm de profundidade e distância entre canais de 0,8 e 0,9 mm, foram observadas porcentagens iguais de replicação para cada faixa de temperatura e distância entre rolos. O gráfico da Figura 4.8 mostra a taxa de replicação em função da temperatura de replicação para cada porcentagem de redução.

Figura 4.8 – Taxa de replicação x temperatura em replicação de canal molde de 0,05 mm de profundidade.

Para as dimensões do canal do molde, 0,1 mm de profundidade e distância entre canais de 0,6 e 0,7mm, foram observadas porcentagens iguais de replicação para cada faixa de temperatura e distância entre rolos. O gráfico da Figura 4.9 mostra a taxa de replicação em função da temperatura de replicação para cada porcentagem de redução.

Figura 4.9 – Taxa de replicação x temperatura em replicação de canal molde de 0,10 mm de profundidade.

Para as dimensões do canal do molde, 0,15 mm de profundidade e distância entre canais de 0,6 e 0,7mm, foram observadas porcentagens iguais de replicação para cada faixa de temperatura e distância entre rolos. O gráfico da Figura 4.10 mostra a taxa de replicação em função da temperatura de replicação para cada porcentagem de redução.

Figura 4.10 – Taxa de replicação x temperatura em replicação de canal molde de 0,15 mm de profundidade.

Para as dimensões do canal do molde, 0,20 mm de profundidade e distância entre canais de 0,6 e 0,7mm, foram observadas porcentagens iguais de replicação para cada faixa de temperatura e distância entre rolos. O gráfico da Figura 4.11 mostra a taxa de replicação em função da temperatura de replicação para cada porcentagem de redução.

Figura 4.11 – Taxa de replicação x temperatura em replicação de canal molde de 0,20 mm de profundidade.

Para as dimensões do canal do molde, 0,25 mm de profundidade e distância entre canais de 0,6 e 0,7mm, foram observadas porcentagens iguais de replicação para cada faixa de temperatura e distância entre rolos. O gráfico da Figura 4.12 mostra a razão de replicação em função da temperatura de replicação para cada porcentagem de redução.

Figura 4.12 – Razão de replicação x temperatura em replicação de canal molde de 0,25 mm de profundidade.

Para reduções maiores e, conseqüentemente, cargas mais elevadas do laminador, velocidade de laminação de 60,30mm/s e temperaturas próximas a T_g do PMMA, as replicações obtiveram maior fidelidade de área. Nota-se também que os canais com menor profundidade obtiveram maior fidelidade na replicação.

Verifica-se que, para todos os casos de replicação, que o perfil retangular do bedame não foi reproduzido fielmente. Na borda superior, foi constatada uma curvatura, na forma de semicircunferência e não linhas retas. A Figura 4.13 mostra o resultado da replicação de um canal retangular. Nota-se a forma abaulada, indicando a não reprodução completa do canal.

Figura 4.13 – Replicação do corpo de prova de PMMA de 2 mm de espessura replicado a 105°C com redução de 25% analisado em MEV com aumento de 400x.

Essa infidelidade de reprodução pode ser explicada através da teoria exposta em Canevarolo (2002): “a variação da taxa de nucleação e de crescimento linear com a temperatura passa por um máximo entre as temperaturas características T_g e T_m do polímero”. A Figura 4.14 ilustra a variação da taxa de nucleação e de crescimento como função da cristalização.

Figura 4.14 – Variação da taxa de nucleação e de crescimento como função de cristalização (CANEVAROLO, 2002).

Com temperatura abaixo de T_g não existe mobilidade para o arranjo das cadeias e, conseqüentemente, não há nucleação e crescimento, o polímero está no

estado vítreo com as cadeias rígidas, imóveis. Para valores crescentes, acima da T_g , a mobilidade aumenta continuamente, facilitando a nucleação e o crescimento. Assim, conclui-se que, quanto maior a velocidade de replicação do PMMA em qualquer temperatura acima da T_g , menor será sua razão de replicação em função da organização do arranjo das cadeias. Dessa forma, para se obter alta razão de replicação far-se-á necessário baixa velocidade de laminação associada com alta taxa de redução e temperaturas próximas a T_g , pois a taxa de redução e a velocidade influenciam na mobilidade das cadeias e a temperatura, como dito anteriormente, abaixo da T_g , paralisa os movimentos. O fato de a geometria da réplica ter aparência semicircular se restringe ao fato do arranjo das cadeias não estar concluído junto ao molde replicador e, já em seguida, ser retirado do molde, visto que é um cilindro laminador. Somente com o alinhamento correto de velocidade de laminação, temperatura e taxa de redução tem-se alta taxa de replicação. Vale ressaltar que esse trabalho é o início de pesquisas na área de fabricação de microestruturas através de laminação, sendo assim, visa estudar os mecanismos e os fatores responsáveis pela qualidade da replicação. A continuidade da pesquisa permitirá o desenvolvimento e otimização do processo para obtenção de maior fidelidade das microestruturas replicadas.

Com o objetivo de avaliar a influência da velocidade na replicação, realizou-se um experimento com um corpo de prova de 2mm de espessura, com redução de 25% e velocidade de laminação de 7,5mm/s. O resultado foi uma razão de replicação da ordem de 70% para todas as variações de profundidade de canais, como mostram as Figuras 4.15 (perfilometria mecânica) e 4.16 (MEV).

Figura 4.15 – Trecho do corpo de prova de PMMA de 2 mm de espessura replicado a 105°C com redução de 25% analisado em perfilometria mecânica.

Figura 4.16 – Trecho do corpo de prova de PMMA de 2 mm de espessura replicado a 105°C com redução de 25% analisado em MEV com aumento de 80x.

Shih-Jung; Yau-Chia (2007), em seu trabalho utilizam a tecnologia em UV para cura do substrato (resina epóxi) replicado. O molde usado continha cavidades retangulares de 80μm de largura por 40μm de profundidade em PC. A velocidade de laminação para a replicação onde se obteve 70% de fidelidade foi a de 1mm/s

(Figura 4.17). Nota-se que os valores de razão de replicação obtidos por Shih–Jung (2007) são parecidos com os encontrados nesse trabalho, no entanto, o tempo para obtenção é aproximadamente 7 vezes maior. Também foram notadas características semicirculares no ponto superior da replicação realizada, semelhantes as obtidas por esse trabalho.

Figura 4.17 – Largura x altura de replicação (SHIH–JUNG; YAU-CHIA, 2007).

Shuhuai et al. (2009), em seu trabalho, aquece o cilindro e não o substrato. O material do substrato é o PC (T_g 160°C). A fidelidade das replicações foi da ordem de 90%, com velocidade de laminação de 0,5 mm/s e de, 50%, para a velocidade de laminação de 2 mm/s, reduzindo-se essa porcentagem à medida que se elevava a velocidade de laminação. Dessa forma, o método por eles utilizado se mostrou também eficiente, porém com grande consumo de energia para o aquecimento do substrato escolhido, já que a temperatura usada para aquecimento do PC foi de 160°C.

Com o intuito de verificar a replicação em geometrias diferentes e menores profundidades de canais foi confeccionada uma camisa de liga de alumínio 7075 e ajustada ao cilindro de alumínio já existente.

4.3. Testes realizados com o cilindro molde de liga de alumínio 7075

Com os resultados obtidos no teste realizado com cilindro de alumínio, a temperatura ideal de trabalho foi ajustada em torno de 105°C, justamente a temperatura T_g do PMMA. Assim, para os testes realizados no cilindro de liga de alumínio 7075, a temperatura de trabalho foi mantida em torno de 105°C. A velocidade de laminação foi mantida constante. Como os resultados obtidos nos testes usando cilindro de alumínio, não houve influência significativa do uso da refrigeração, optou-se por não aplicar também para os testes com liga de alumínio 7075.

Os experimentos foram realizados em corpos de prova de PMMA com 10 mm de largura, 20 mm de comprimento e dois tipos de espessuras, 2 e 4 mm.

- **Corpos de prova de PMMA de 4 mm de espessura**

Em cada condição de temperatura e porcentagem de redução foram efetuados 3 testes e analisados em perfilômetro mecânico.

A temperatura utilizada foi de 105°C. A taxa de redução foi de 19% e a velocidade de laminação foi mantida constante, 60,3mm/s.

- **Corpos de prova de PMMA de 2 mm de espessura**

Em cada condição de temperatura e porcentagem de redução foram efetuados 3 testes e analisados em perfilômetro mecânico.

A temperatura utilizada foi de 105(°C). A taxa de redução foi de 37% e a velocidade de laminação foi mantida constante, 60,3mm/s.

4.3.1. Resultados dos testes com o cilindro molde de liga de alumínio 7075

Com o objetivo de avaliar a replicação nos corpos de prova do PMMA, foram analisadas as áreas dos canais de replicação e comparadas com as áreas dos

canais obtidos no cilindro antes da replicação. A partir daí foram calculadas porcentagens definidas para cada razão de replicação, no qual se avalia a taxa de replicação obtida em relação à original.

- **Corpo de prova de espessura de 4 mm**

Os valores de taxa de replicação foram obtidos através da análise em perfilometria óptica, comparando-se as áreas e alturas das replicações com as área e alturas do molde (Figura 4.18).

Figura 4.18 – Análise de perfil através do perfilômetro óptico do molde replicador e a replicação obtida.

Os resultados da taxa de replicação do substrato foram:

- 30% para replicações cuja profundidade da usinagem é 10μm
- 10% para replicações cuja profundidade da usinagem é 20μm
- 5% para replicações cuja profundidade da usinagem é 30μm

- **Corpo de prova de espessura de 2 mm**

Os valores de taxa de replicação foram obtidos através da análise em perfilometria óptica, comparando-se as áreas e alturas das replicações com as área e alturas do molde (Figura 4.19).

Figura 4.19 – Análise de perfil através do perfilômetro óptico do molde replicador e a replicação obtida.

A análise em perfilômetro óptico VEECO®, em 3d, das estruturas geradas é mostrada na Figura 4.20. Notam-se ranhuras no fundo do canal. Essas ranhuras indicam as marcas deixadas pela ferramenta durante o processo de usinagem.

Figura 4.20 – Trecho do corpo de prova de PMMA de 2 mm de espessura replicado a 105°C com redução de 25% analisado em perfilometria óptica.

Figura 4.21 mostra, através de MEV, as estruturas geradas.

Figura 4.21 – Trecho do corpo de prova de PMMA de 2 mm de espessura, replicado a 105°C, com redução de 25%, analisado em MEV, com aumento de 650x.

Os resultados da taxa de replicação do substrato foram:

- 50% para replicações cuja profundidade da usinagem é 10µm
- 45% para replicações cuja profundidade da usinagem é 20µm
- 43% para replicações cuja profundidade da usinagem é 30µm

Nota-se que, para usinagens em moldes de cilindros com profundidades cada vez menores, a tendência da razão de replicação é maior. Isto é evidente, pois haverá menor distância para as cadeias de átomos do material se movimentar, portanto a fidelidade será maior e a velocidade de laminação também, como já explicada no caso da replicação do cilindro de alumínio.

Os resultados de replicação em PMMA obtidos tanto no cilindro de alumínio quanto no cilindro de liga de alumínio 7075 demonstraram que a replicação ocorreu quando a distância entre cilindros era aproximadamente 25% menor que a espessura do corpo de prova, e temperaturas próximas a T_g do PMMA. No entanto, o sucesso de replicação dependerá das características geométricas da ferramenta. Usinagens de moldes com ferramentas quadráticas ou retangulares tendem a apresentar replicações com semicircunferência no seu ápice devido à dificuldade do movimento das cadeias do polímero em preencher os espaços a 90° das superfícies de contato do canal usinado. Já com ferramentas em “V” a tendência é acompanhar

as superfícies de contato do canal até o ângulo agudo (encontro das superfícies). Assim, ocorrerá a formação da mesma geometria (semicircunferência) observada no caso anterior. O tamanho desta semicircunferência dependerá da velocidade de laminação aplicada. Quanto maior a velocidade de laminação, mais elevado será o raio desta semicircunferência, e quanto menor, maior a fidelidade de geometria do perfil do canal.

Capítulo 5

5. Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

5.1. Conclusões

A crescente demanda comercial por produtos que englobam microcomponentes chama a atenção mundial para o aperfeiçoamento e inovação de técnicas de replicação, visando eficiência, baixo custo de fabricação e miniaturização dos componentes replicados, a fim de atender aos grandes centros consumidores.

A grande motivação desse trabalho foi dar continuidade às pesquisas envolvendo replicação. Mais especificamente, estudar e encontrar soluções para replicação de PMMA aquecido, através da técnica de laminação, avaliando os materiais empregados para confecção do molde replicador e o material usado para replicação.

Além disso, o trabalho avaliou as condições utilizadas no processo de laminação, tais como, temperatura do PMMA, velocidade de laminação e distância entre rolos, com o intuito de obter maior razão de replicação.

A integridade geométrica das estruturas replicadas e as usinadas também foram avaliadas. Assim, pode-se concluir:

- Os dois cilindros molde usados na replicação (o alumínio e a liga de alumínio 7075) não apresentaram deformações plásticas na sua estrutura quando usinados. O cilindro de alumínio apresentou pequenas rebarbas devido à geometria do bedame utilizado, porém, foram facilmente removidas com uma lixa de grana 1200. Com relação à replicação, ambos os cilindros moldes, mantiveram suas características geométricas intactas, mesmo após a replicação em PMMA ter sido realizada inúmeras vezes.
- O material no qual foi feita a réplica, o PMMA, tendeu após a passagem entre rolos, a curvar-se, acompanhando o movimento radial do cilindro inferior, fato corrigido com uma guia de saída construída após os rolos laminadores.

A temperatura utilizada para réplica do PMMA foi de 105°C, que é sua Tg. Acima desse valor, o material adquire características cada vez mais plásticas, dificultando a fixação da réplica pelo cilindro molde. Abaixo dessa temperatura, o material está em estado vítreo, e, portanto, frágil, onde qualquer tentativa de laminação pode acarretar em ruptura do material.

- As condições de laminação observadas para alta taxa de replicação foram baixa velocidade de laminação e alta taxa de redução. Com baixa velocidade de laminação, as cadeias tendem a se movimentarem e, avaliando geometricamente, se observa preenchimento do canal a ser replicado. Já a alta velocidade, essas cadeias não tem tempo suficiente para se rearranjarem comprometendo, assim, a fidelidade da replicação. A alta taxa de redução é necessária, pois obriga o rearranjo das cadeias moleculares do PMMA.
- Conseguiu-se 70% de taxa de fidelidade da replicação a velocidade de laminação de 7mm/s, o que comprova a eficiência do processo em termos de produção.
- Observou-se que entre os canais do molde replicador, os que tiveram menor razão de aspecto, resultaram em melhor taxa de fidelidade na replicação, fato observado devido a menor distância para o rearranjo das cadeias moleculares do PMMA.
- Foi verificado que para geometrias retangulares dos canais do cilindro molde, o polímero tendeu a assemelhar-se com a forma de semicircunferência perto das regiões onde se tem ângulo de 90° entre as superfícies. Para geometrias em “V”, a tendência do polímero foi acompanhar a superfície até encontrar o ângulo agudo, e nessa região, também tendeu para formação de semicircunferência.

Os resultados obtidos revelaram que é possível obter alta taxa de fidelidade pelo método de laminação com substrato aquecido, em alta produção. Desse modo, esse trabalho contribui ativamente para a evolução tecnológica na cadeia de processos de fabricação, com objetivos de fidelidade aliada a alta produção.

5.2. Sugestões para trabalhos futuros

A busca pelo aperfeiçoamento do processo de replicação através da laminação mostra-se promissor. Trata-se de uma técnica de baixo custo e rápida que atende as necessidades do mercado do mundo moderno, porém são necessárias adaptações que visam melhorar o sistema. Destacam-se algumas sugestões para melhoria e continuidade do processo:

- Construir um dispositivo para aquecimento do cilindro molde e verificar como se comporta o material replicado.
- Reduzir a profundidade dos canais analisando a replicação, observando as variáveis distância entre rolos e velocidade de laminação.
- Modificar a geometria dos canais e estudar a replicação gerada.
- Utilização de outras técnicas de replicação, por exemplo, a microinjeção.

RERERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAL, 2009. Associação Brasileira de Alumínio. **O Alumínio: Características físicas e químicas**. Disponível em <<http://www.abal.org.br/aluminio/ligas.asp>> Acesso em 22 maio 2009.

AHN, S.; CHOI, M.; BAE, H.; LIM, J.; MYUNG, H.; KIM, H.; KANG, S. Design and fabrication of micro optical film by ultraviolet roll imprinting. **Japanese Journal of Applied Physics**, v. 46, n. 8B, p. 5478 – 5484, 2007.

ASAEDA, T. Optical disk storage is on a roll. **Photonics Spectra**, August, p. 74 – 80, 1995.

BLOUGH, C. G.; ROSSI, .M; MACK, K.S.; MICHAELS, L.R. Single point diamond turning and replication of visible and near-infrared diffractive optical elements. **Journal of Optics a: Pure and Applied Optics**, v. 36 (20), p. 4648 – 4654, July, 1997.

BRAGA, F. W. **Transmissão de calor**, Editora Thomson, 2003.

BREHM, P. D. Diamond machining of metal & plastics optics. SPIE – Advances in Precision Machining of Optics, v. 93, p. 124 – 127, 1976.

CANEVAROLO Jr, S. V. **Ciência dos polímeros**. São Paulo: Artliber Editora, 2002.

CATÁLOGO SANDVIK®. **Catálogo principal de ferramentas de corte da Sandivik® Coromant**, São Paulo, 1203 p., 2009.

CHOI, D. S.; JE, T. J.; YOO, Y. E.; YOON, J. S. **A Study on the High Aspect Ratio Pattern Roll Mold Fabrication Technologies**. Disponível em <http://www.euspen.eu/content/Zurich%20Programme/P5.5_Choi.pdf>. Acesso em 23 setembro 2009.

CIRINO, G. A. **Fabricação de elementos ópticos difrativos empregando processos de microusinagem**. Tese (Doutorado). 2002. 156 f. – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2002.

COLBURN, M.; CHOI, B. J.; BAILEY, T.; EKERDT, J. G.; SREENIVASAN, S. V.; WILLSON, C.G. Development and advantages of step and flash lithography, **Solid State Technology**, v. 46, 2001.

DIAS, P. N.; JASINEVICIUS, R. G. Avaliação da micromoldagem através de prensagem a frio de microestruturas geradas através de torneamento com ferramenta de diamante. In: 5^o. CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 2009, Belo Horizonte. **Anais do 5º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**.

FERREIRA, L. O. S. **Introdução a tecnologia LIGA**. Unicamp curso, cap 15, 11p., 2006.

FRITZE, M.; STERN, M. B.; WYATT, P. W. Laser-fabricated glass microlens arrays. **Optics Letters**, v. 23, n. 2, p. 141 – 143, 1998.

GALE, M. T. Replication techniques for diffractive optical elements, **Microelectronic engineering**, v. 34, p. 321 – 339, 1997.

GILL, D. D. **Precision replication of co-molded meso and micro optics through injection molding**. Dissertation (Degree of Doctor of Philosophy). 2002. 202 f.. Carolina State University. 2002.

GRANADO, R. M. **Avaliação da integridade superficial do polimetilmetacrilato (PMMA) no torneamento com ferramenta de diamante**. 114 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

HARTMANN, D. M.; KIBAR, O.; ESENER, S. C. Optimization and theoretical modeling of polymer microlens arrays fabricated with the hydrophobic effect. **Applied Optics**, v. 40, n. 16, p. 2736 – 2746, 2001.

HUANG, T-C; CHAN, B-D.; CIOU, J-K.; YANG, S-Y. Fabrication of microlens arrays using a CO₂-assisted embossing technique. **Journal of Micromechanics and Microengineering**, v. 19, p. 1 – 6, 2009.

IMGRUND, P.; ROTA, A.; PETZOLDT, F.; SIMCHI, A. Manufacturing of multi-functional micro parts by two-component metal injection moulding. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 33, p. 176 – 186, 2007.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, L. T.; LAVINE, S. A. **Fundamentos de transferência de calor e massa**, Editora LTC, 2008

IDEI, K.; MEKARU, H.; TAKEDA, H.; HATTORI, T. Precise Micro Pattern Replication by Hot Embossing, **JSME Japan Society Mechanical Engineers International Journal**, v. 49, n. 1, p. 69 – 73, 2006.

KANG, S. Replication technology for micro/nano optical components. **Journal of Applied Physics**, v. 43, n. 8B, p. 5706 – 5716, 2004.

KNOFF, G K; OSTOJIC, M.; NIKUMB, S. Rapid fabrication of tooling for microfluidic devices via laser micromachining and hot embossing. **Journal of Micromechanics and Microengineering**, v.18, p. 1 – 80, 2008.

JIANG, L-T.; HUANG,T-C.; CHANG, C-Y.; CIOU, J-R; YANG, C-Y.; HUANG, P-H. Direct fabrication of rigid microstructures on a metallic roller using a dry film resist. **Journal of Micromechanics and Microengineering**, n. 18, p. 1 – 6, 2008.

LUO, X.; CHENG, K.; WEBB, D.; WARDLE, F. Design of ultraprecision machine tools with applications to manufacture of miniature and micro components, **Journal of Materials Processing Technology**, v. 167, p. 515 – 528, 2005.

MAKER, P. D.; MULLER, R. E. Phase holograms in polymethyl methacrylate, **Journal of Vacuum Science & Technology**, v. 10, p. 2516 – 2519, Nov-Dec, 1992.

MANO, E. B. **Polímeros como Materiais de Engenharia**. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1991.

MERZ, L.; RATH, S.; PIOTTER, V.; RUPRECHT, R.; RITZHAUPT-KLEISSL, J.; HAUSSELT, J. Feedstock development for micro powder injection molding. **Microsystem Technologies**, v. 8, p. 129 – 132, 2002.

MULTIPLAST. Literatura técnica sobre polimetilmetacrilato, 2004. Disponível em <<http://www.multiplast.com.br>>. Acesso em 16 maio 2009.

NEZUKA, O.; YAO, D.; KIM, B. H. Replication of microstructures by roll-to-roll UV – curing embossing, **Polymer-Plastic Technology and Engineering**, v. 44, n. 7, p. 865 – 873, 2008.

NIKOLAJEFF, F.; JACOBSSON, S.; HARD, S.; BILLMAN, A.; LUNDBLADH, L.; LINDELL, C. Replication of continuous-relief diffractive optical elements by conventional compact disc injection-molding techniques. **Journal of Optics a: Pure and Applied Optics**, v. 36, n. 20, p. 4655 – 4659, 1997.

OLIVEIRA, R. A. **Avaliação da replicagem de moldes torneados com ferramentas de diamantes usando prensagem a quente em polimetilmetacrilato (PMMA)**. 2006. 133 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

OTTEVAERE, H.; COX, R.; HERZIG, H. P.; MIYASHITA, T.; NAESSENS, K.; TAGHIZADEH, M.; VOLKEL, R.; WOO, H. J.; THIENPONT, H. Comparing glass and plastic refractive microlenses fabricated with different technologies. **Journal of Optics a: Pure and Applied Optics**, p. 407 – 429, 2006.

PALERMO, P.; KORPEL, A.; DICKINSON, G.; WATSON, W. Vídeo disc mastering and replication, **Optics and Laser Technology**, v.9, p. 169-174, 2000.

PASCO, I. K.; EVEREST, J. H. Plastics optics for opto electronics. **Optics and Laser Technology**, v.10, p. 71 – 76, 1978.

PIOTTER, V.; HANEMAN, T.; RUPRECHT, R.; HAUßELT, J. Injection molding and related techniques for fabrication of microstructures. **Microsystem Technologies**, v. 3, p. 129 – 133, 1997.

QIN, Y. Micro-forming and miniature manufacturing systems – development needs and perspectives, **Journal of Materials Processing Technology**, v. 177, p. 8 – 18, 2006.

RUPRECHT, R.; BENZLER, T.; HANEMANN, T.; MULLER, K.; KONYS, J.; PIOTTER, V.; SCHANZ G.; SCHMIDT, L.; THIES, A.; WOLLMER, H.; HAUBELT, H. Various replication techniques for manufacturing three-dimensional metal microstructures, **Microsystem Technologies Journal**, v. 4, p. 28 – 31, 2007.

ROTICH S. K.; SMITH, J. G.; EVANS, A. G. R.; BRUNNSCHWEILER, A. Micromachined thin solar cells with a novel light trapping scheme, Eighth workshop on micromachining, **Journal Of Micromechanics & Microsystems**, v. 8, p.134-137, 1997.

SCHLINGLOFF, G.; KIEL, H.J.; SHOBER, A. Microlenses as amplification for CCD-based detection devices for screening applications in biology, biochemistry, and chemistry, **Journal of Optics a: Pure and Applied Optics**, v. 37, p.1930-1940,1998.

SHIH-JUNG, L.; YAU-CHIA, C. A novel soft-mold roller embossing method for the rapid fabrication of micro-blocks onto glass substrates, **Journal Of Micromechanics And Microengineering**, v. 17, p. 172 – 179, 2007.

SHIU, P. P.; KNOFF, G. K.; OSTOJIC, M.C.; NIKUMB, S. Rapid fabrication of micromolds for polymeric microfluidic devices **IEEE 20th Canadian Conf. Elec. Comp. Eng. (CCECE)**, p. 8 – 11, 2007.

SHUHUAI, L.; TAE-JIN, L.; MOON, G. L. Roll-to-flat thermal Imprint System Development for Large Area Micro Pattern Replication. **Euspen International Conference**, v. 1, p. 61 – 64, 2009.

SOUZA e SILVA; ALBUQUERQUE, A.V. **Controle automatico de calibre (automatic gauge control) em laminadores a frio**, 1999, 81p.

STAUFFER, J.M.; OPPLIGER, Y.; REGNAUL, P. Electron beam writing of continuous resist profiles for optical applications, **Journal of Vaccun Science & Technology**, v.10, p. 2526, 1992.

TAY, B. Y.; LIU, L.; LOH, N. H.; TOR, S. B.; MURAKOSHI, Y.; MAEDA, R. Surface roughness of microstructured component fabricated by μ MIM. **Materials Science and Engineering A**, 396, p. 311-319, 2005.

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

WALKER, N. Microsharp: **Microstructures for optical films**. <<http://resource.npl.co.uk/docs/networks/eman/meetings/20070911structuredsurfaces/walker.pdf>> Acesso em 24 setembro 2009.

YANG, S. Y.; CHENG, F. S.; XU, S. W. HUANG, P. H.; HUANG, T. C. Fabrication of microlens arrays using UV micro-stamping with soft roller and gas-pressurized platform. **Microelectronic Engineering**, n. 85, p. 603 – 609, 2008.

YEO, L.P., NG, S.H., WANG Z. F., WANG, Z. P., DE ROOIJ, N.F., "Micro-fabrication of Polymeric Devices Using Hot Roller Embossing", **Microelectronic Engineering**, vol. 86, p. 933-936, 2009.