

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR ERIC FUJIWARA
..... E APROVADA
PELA COMISSÃO JULGADORA EM 06 / 08 / 2009


.....
ORIENTADOR

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**Processo Automatizado de Fabricação de
Preformas Aplicado a Fibras Ópticas
Mantenedoras de Polarização para Sensores
Fotônicos**

Autor: **Eric Fujiwara**
Orientador: **Carlos Kenichi Suzuki**

85/2009

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

Processo Automatizado de Fabricação de Preformas Aplicado a Fibras Ópticas Mantenedoras de Polarização para Sensores Fotônicos

Autor: **Eric Fujiwara**
Orientador: **Carlos Kenichi Suzuki**

Curso: Engenharia Mecânica
Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Dissertação de mestrado acadêmico apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Campinas, 2009
SP – Brasil

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

F955p Fujiwara, Eric
Processo automatizado para fabricação de preformas aplicado a fibras ópticas mantenedoras de polarização para sensores fotônicos / Eric Fujiwara. --Campinas, SP: [s.n.], 2009.

Orientador: Carlos Kenichi Suzuki.
Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Fibras ópticas. 2. Automação. 3. Processos de fabricação - Simulação por computador. 4. Materiais óticos. I. Suzuki, Carlos Kenichi. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Título em Inglês: Automated preform fabrication method applied to polarization-maintaining fibers for photonic sensors

Palavras-chave em Inglês: Optical fibers, Automation, Manufacturing processes - Computer simulation, Optical materials

Área de concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica

Banca examinadora: Paulo Roberto Gardel Kurka, Delson Torikai

Data da defesa: 06/08/2009

Programa de Pós Graduação: Engenharia Mecânica

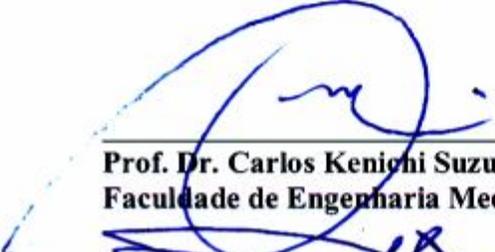
**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO

**Processo Automatizado de Fabricação de
Preformas Aplicado a Fibras Ópticas
Mantenedoras de Polarização para Sensores
Fotônicos**

Autor: **Eric Fujiwara**
Orientador: **Carlos Kenichi Suzuki**

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:



Prof. Dr. Carlos Kenichi Suzuki, Presidente
Faculdade de Engenharia Mecânica – UNICAMP



Prof. Dr. Paulo Roberto Gardel Kurka
Faculdade de Engenharia Mecânica – UNICAMP



Prof. Dr. Delson Torikai
Escola Politécnica – USP

Campinas, 6 de Agosto de 2009

Dedicatória

Dedico este trabalho à minha família e à minha avó.

Agradecimentos

Este trabalho não poderia ser terminado sem a ajuda de diversas pessoas às quais presto minha homenagem:

Ao Prof. Dr. Carlos Kenichi Suzuki, não somente pela orientação, mas principalmente pela credibilidade e confiança atribuídas ao meu trabalho, bem como pelas oportunidades oferecidas ao longo de toda a minha graduação.

Ao Dr. Eduardo Ono, pelo grande auxílio e pelas discussões que muito auxiliaram no desenvolvimento do projeto.

Aos colegas do LIQC: Juliana S. dos Santos, Rafael T. Takeishi, Edmilton Gusken, Cláudio R. Silveira, Rita H. B. Jacon e Allan C. Mercado.

À Aya Hase, pelo grande apoio durante a elaboração deste trabalho.

A todos os docentes e funcionários responsáveis pelo curso de Engenharia de Controle e Automação que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a minha formação.

À FAPESP pelo apoio financeiro.

Resumo

FUJIWARA, Eric. *Processo Automatizado de Fabricação de Preformas Aplicado a Fibras Ópticas Mantenedoras de Polarização para Sensores Fotônicos*. Campinas, FEM, UNICAMP, 2009. 99 p. Dissertação (Mestrado).

Fibras ópticas mantedoras de polarização (PMF) permitem preservar o estado de polarização da luz através de uma elevada birrefringência, induzida, por exemplo, com a não-circularidade do núcleo, e são utilizadas em sistemas ópticos coerentes e na fabricação de sensores, lasers e giroscópios ópticos. Entretanto, os métodos de produção de preformas para PMF demandam etapas adicionais de processamento e elevado custo. Assim, foi desenvolvido um processo automatizado, baseado na plataforma LabVIEW, para produção de preformas não-circulares pelo método VAD, através da variação da velocidade de rotação da preforma entre valores máximo e mínimo, durante a etapa de deposição. O método foi também simulado através de um modelo matemático, possibilitando o estudo do efeito das variáveis de processo, como a velocidade máxima de rotação e tempo de “delay”, na geometria final da preforma. Foram produzidas preformas *soot* de diferentes secções transversais, como geometrias elípticas com razão de diâmetros de até 1,59, bem como preformas triangulares e quadrangulares, de sorte que a não-circularidade se manteve mesmo após a consolidação. Dessa forma, a metodologia apresentada permite produzir preformas não-circulares com custos acessíveis e sem agregar etapas adicionais aos processos convencionais de fabricação, abrindo fronteiras para o desenvolvimento de novos produtos para a área de tecnologia de fibras ópticas especiais, e sensores fotônicos no país.

Palavras-chave

- Fibras ópticas mantenedoras de polarização, Método VAD, Automação

Abstract

FUJIWARA, Eric. *Automated Preform Fabrication Process Applied to Polarization-Maintaining Fibers for Photonic Sensors*. Campinas, FEM, UNICAMP, 2009. 99 p. Dissertação (Mestrado).

Polarization-maintaining fibers (PMF) preserve the state of light polarization due to a high birefringence index, induced by the non-circularity of fiber core. These fibers are necessary on the implementation of coherent optical systems, sensors, lasers and fiber gyroscopes. However, the PMF preform fabrication methods demand additional stages of processing, increasing the manufacturing costs. Concerning these problems, an automated methodology for non-circular preform fabrication based on LabVIEW platform was developed, based on controlling the rotation velocity between maximum and minimum values during the deposition stage of VAD method. Moreover, focusing the study of the process variables effect, like the maximum velocity and delay time, on the preform geometry, the methodology was also simulated by using a mathematical model. Soot preforms were produced according to different cross sections, resulting in elliptical geometries with diameters proportion of 1,59, as well triangular and square shaped preforms, and the geometries were preserved even after the consolidation. Results show that presented methodology allows producing non-circularly shaped preforms with low costs, and without demanding the accomplishment of additional stages on conventional process, assisting the development of new products for the optical fiber technology and photonic devices scenario.

Keywords

- Polarization-Maintaining fiber, VAD method, Automation

Índice

Índice	viii
Lista de Figuras	x
Lista de tabelas	xiii
Nomenclatura	xiv
CAPÍTULO 1 – Introdução	1
CAPÍTULO 2 – Revisão da Literatura	4
2.1. Processos de fabricação de preformas de sílica	4
2.1.2. O método MCVD	5
2.1.2. O método OVD	6
2.1.3. O método VAD	7
2.2. Fibras ópticas mantenedoras de polarização	8
2.2.1. Classificação de fibras ópticas mantenedoras de polarização	9
2.2.2. Principais aplicações para fibras ópticas mantenedoras de polarização	11
2.2.3. Fabricação de preformas para fibras ópticas mantenedoras de polarização	13
2.3. Fabricação de preformas não-circulares	17
CAPÍTULO 3 – Materiais e métodos	20
3.1. Processo de fabricação de preformas elípticas	20
3.2. Processo de fabricação de preformas não-circulares	23
3.3. Modelo matemático bidimensional para o processo de fabricação de preformas elípticas e não-circulares	24
3.3.1. Sistema de coordenadas e referenciais	24
3.3.2. Variação da velocidade de rotação da preforma	25
3.3.3. Implementação de tempos de atraso	29
3.3.4. Modelo matemático para a deposição de <i>soot</i>	31
3.3.5. Simulação do modelo matemático bidimensional	32
3.4. Modelo matemático tridimensional para o processo de fabricação de preformas elípticas e não-circulares	34
3.4.1. Sistema de coordenadas e referenciais	35

3.4.2. Modelo matemático para a deposição de <i>soot</i>	35
3.4.3. Simulação do modelo matemático tridimensional	38
3.5. Automação do sistema de deposição	39
3.5.1. Especificação do hardware	40
3.5.2. Elaboração do software	40
3.6. Estudo das variáveis de processo.....	44
3.6.1. Estudo dos parâmetros de processo através de simulação do modelo matemático bidimensional	45
3.6.2. Estudo experimental dos parâmetros de processo	46
3.6.3. Estudo experimental dos parâmetros de processo através de simulação do modelo matemático tridimensional	49
CAPÍTULO 4 – Resultados e discussões	50
4.1. Simulação do modelo matemático bidimensional	50
4.1.1. Validação	50
4.1.2. Estudo do ângulo de ciclo e do ângulo de deposição para a obtenção de preformas não-circulares	55
4.1.3. Estudo do efeito dos parâmetros de processo na simulação de preformas elípticas	59
4.1.4. Estudo do efeito dos parâmetros de processo na simulação de preformas não-circulares	63
4.2. Deposição de preformas	69
4.2.1. Desempenho do sistema de controle de rotação	69
4.2.2. Deposição e consolidação de preformas elípticas.....	70
4.2.3. Estudo do efeito dos parâmetros de processo na deposição de preformas elípticas	77
4.2.4. Deposição e consolidação de preformas não-circulares.....	80
4.3. Simulação do modelo matemático tridimensional.....	83
4.3.1. Validação	83
4.3.2. Estudo do efeito dos parâmetros de processo na simulação de preformas elípticas	85
4.3.3. Estudo do efeito dos parâmetros de processo na simulação de preformas não-circulares	87
CAPÍTULO 5 – Conclusões	94
5.1. Sugestões para próximos trabalhos.....	95
Trabalhos publicados.....	96
Referências Bibliográficas	97

Lista de Figuras

Figura 1.1. Consumo mundial de PMF, em milhões de dólares (Méndez e Morse, 2007).	2
Figura 2.1. Método MCVD (Watanabe e Matsuda 1992).	5
Figura 2.2. Método OVD (Schultz 1980).	6
Figura 2.3. Método VAD. Nesta configuração, deposição e consolidação são realizadas no mesmo estágio (Izawa 2000).	8
Figura 2.4. Polarização linear da luz.	9
Figura 2.5. Polarização circular da luz.	10
Figura 2.6. Tipos de PMF: (a) “Elliptical-Core Fiber”, (b) “Dumbell-Core Fiber”, (c) “Elliptical-Cladding Fiber”, (d) PANDA e (e) “Bow-Tie Fiber”	11
Figura 2.7. Princípio de funcionamento do giroscópio óptico a partir do Efeito Sagnac (Sharon e Lin 2001)	13
Figura 2.8. Fabricação de PMF através de cortes nas laterais da preforma (Kajioka <i>et al</i> 1996)..	14
Figura 2.9. Fabricação de PMF através de prensagem termomecânica (Kimimichi e Takeyoshi 1992).	14
Figura 2.10. Método “Rod-in-Tube” (Yamaguchi <i>et al</i> 1990).	15
Figura 2.11. Método alternativo para fabricação de preforma para fibra PANDA (Yamaguchi <i>et al</i> 1990).	15
Figura 2.12. Esquemático do método “Gas-Phase Etching”: (a) deposição dos aplicadores de tensão, (b) “etching”, (c) deposição do núcleo, (d) fibra “Bow-Tie” produzida à partir da metodologia (Birch <i>et al</i> 1982).	16
Figura 2.13. Fibra óptica para laser de fibra “Double-Cladding” (Méndez 2008).	19
Figura 3.1. Câmara de deposição VAD.	21
Figura 3.2. Aparato de deposição através do método VAD.	22
Figura 3.3. Sistema de coordenadas e referencial para o modelo matemático bidimensional.	25
Figura 3.4. Variação da velocidade de rotação em função da posição angular.	26
Figura 3.5. Variação da velocidade de rotação em função do tempo.	28
Figura 3.6. Variação da posição angular em função do tempo.	29
Figura 3.7. Variação da velocidade de rotação em função do tempo, com aplicação do tempo de “delay”.	30
Figura 3.8. Variação da posição angular em função do tempo, com aplicação do tempo de “delay”.	31
Figura 3.9. Representação para o perfil de deposição do <i>soot</i>	32
Figura 3.10. Diagrama de blocos correspondente ao software de simulação do modelo matemático bidimensional.	34
Figura 3.11. Sistema de coordenadas e referencial para o modelo matemático tridimensional. ...	35

Figura 3.12. Modelagem do maçarico para deposição de <i>soot</i> .	36
Figura 3.13. Determinação do raio da circunferência no referencial do alvo.	38
Figura 3.14. Diagrama de blocos correspondente ao software de simulação do modelo matemático tridimensional.	39
Figura 3.15. Interface do módulo de controle da rotação.	42
Figura 3.16. Máquina de estados que representa o funcionamento do software.	43
Figura 3.17. Interface do módulo de ajuste de parâmetros.	44
Figura 3.18. Interface do software ImageJ 1.36b.	48
Figura 3.19. Parâmetros para medição de diâmetro em preformas <i>soot</i> .	48
Figura 3.20. Parâmetros para medição de diâmetros em preformas consolidadas.	49
Figura 4.1. Velocidade de rotação constante ao longo do tempo.	51
Figura 4.2. Variação da posição angular ao longo do tempo utilizando velocidade de rotação constante.	51
Figura 4.3. Variação do raio de uma preforma circular obtida através de simulação.	52
Figura 4.4. Geometria de uma preforma circular obtida por simulação.	54
Figura 4.5. Variação da velocidade angular ao longo do tempo.	52
Figura 4.6. Variação da posição angular ao longo do tempo utilizando velocidade de rotação variável.	53
Figura 4.7. Variação do raio de uma preforma elíptica obtida por simulação.	53
Figura 4.8. Geometria de uma preforma elíptica obtida por simulação.	54
Figura 4.9. Geometria de preformas não-circulares para $\gamma = 90^\circ$.	56
Figura 4.10. Geometria de preformas não-circulares para $\gamma = 135^\circ$.	57
Figura 4.11. Geometria de preformas não-circulares para $\gamma = 180^\circ$.	58
Figura 4.12. Efeito da velocidade máxima de rotação sobre a geometria de uma preforma elíptica.	60
Figura 4.13. Efeito do tempo de “delay” sobre a geometria de uma preforma elíptica.	61
Figura 4.14. Relação entre o tempo de “delay” e a deformação da geometria elíptica.	62
Figura 4.15. Efeito dos parâmetros de processo na variação do raio de uma preforma para $\phi = 120^\circ$.	65
Figura 4.16. Geometrias de preformas obtidas para $\phi = 120^\circ$ e $\Omega = 24$ RPM.	65
Figura 4.17. Efeito dos parâmetros de processo na variação do raio de uma preforma para $\phi = 90^\circ$.	66
Figura 4.18. Geometrias de preformas obtidas para $\phi = 90^\circ$.	66
Figura 4.19. Efeito dos parâmetros de processo na variação do raio de uma preforma para $\phi = 72^\circ$.	67
Figura 4.20. Geometrias de preformas obtidas para $\phi = 72^\circ$.	67
Figura 4.21. Efeito dos parâmetros de processo na variação do raio de uma preforma para $\phi = 60^\circ$.	68
Figura 4.22. Geometrias de preformas obtidas para $\phi = 60^\circ$ e $\Omega = 24$ RPM.	68
Figura 4.23. Imagem da preforma P001 durante a deposição.	70
Figura 4.24. Preforma P002: diâmetro máximo (a), diâmetro mínimo (b) e vista inferior da preforma <i>soot</i> (c).	71
Figura 4.25. Imagem da preforma P003 durante a deposição: posições de diâmetro máximo (esquerda) e mínimo (direita).	72
Figura 4.26. P003: diâmetro máximo (a), diâmetro mínimo (b) e vista inferior da preforma <i>soot</i> (c). Em (d), a vista inferior da preforma pós-consolidada (transparente).	72

Figura 4.27. Preforma P004: diâmetro máximo (a), diâmetro mínimo (b) e vista inferior da preforma <i>soot</i> (c).	73
Figura 4.28. Preforma P005: diâmetro máximo da preforma <i>soot</i> (a) e consolidada (c), e diâmetro mínimo da preforma <i>soot</i> (b) e consolidada (d).	74
Figura 4.29. Preforma P006: diâmetro máximo (a), diâmetro mínimo (b) e vista inferior da preforma <i>soot</i> (c).	75
Figura 4.30. Preforma P007: diâmetro máximo das preformas <i>soot</i> (a) e consolidada (e), e diâmetro mínimo das preformas <i>soot</i> (b) e consolidada (f). Observa-se também a vista inferior das preformas <i>soot</i> (c) e consolidada (d).	76
Figura 4.31. Efeito tempo de “delay” sobre a geometria de uma preforma <i>soot</i> elíptica.	78
Figura 4.32. Efeito da velocidade máxima de rotação sobre a geometria de uma preforma <i>soot</i> elíptica.	79
Figura 4.33. Imagem da preforma P008 durante a deposição.	81
Figura 4.34. Preforma P008: vistas lateral (a) e inferior (b) da preforma <i>soot</i> e vistas lateral (c) e inferior (d) da preforma consolidada.	81
Figura 4.35. Imagem da preforma P009 durante a deposição: posições de diâmetro máximo (esquerda) e mínimo (direita).	82
Figura 4.36. Preforma P009: vistas lateral (a) e inferior (c) da preforma <i>soot</i> e vistas lateral (b) e inferior (d) da preforma consolidada. Em (e), observa-se a não-circularidade na ponta da preforma consolidada.	83
Figura 4.37. Geometria final das preformas obtidas por simulação: rotação constante com função polinomial (a) e Gaussiana (b), e rotação variável com função polinomial (c) e Gaussiana (d).	84
Figura 4.38. Variação do raio da preforma para as funções polinomial (P) e Gaussiana (G).	85
Figura 4.39. Efeito do tempo de “delay” e da velocidade máxima de rotação na geometria de preformas elípticas.	86
Figura 4.40. Preformas elípticas obtidas através do modelo matemático tridimensional.	86
Figura 4.41. Efeito do tempo de “delay” na geometria da preforma para $\varphi = 120^\circ$	88
Figura 4.42. Geometria da preforma para $\varphi = 120^\circ$, $\Omega = 6$ RPM e $t_d = 10$ s: vistas lateral (a) e superior (b).	88
Figura 4.43. Efeito do tempo de “delay” na geometria da preforma para $\varphi = 90^\circ$	89
Figura 4.44. Geometria da preforma para $\varphi = 90^\circ$, $\Omega = 6$ RPM e $t_d = 10$ s: vistas lateral (a) e superior (b).	89
Figura 4.45. Efeito do tempo de “delay” na geometria da preforma para $\varphi = 72^\circ$	90
Figura 4.46. Geometria da preforma para $\varphi = 72^\circ$, $\Omega = 6$ RPM e $t_d = 10$ s: vistas lateral (a) e superior (b).	91
Figura 4.47. Efeito do tempo de “delay” na geometria da preforma para $\varphi = 60^\circ$	91
Figura 4.48. Geometria da preforma para $\varphi = 60^\circ$, $\Omega = 6$ RPM e $t_d = 10$ s: vistas lateral (a) e superior (b).	92
Figura 4.49. Geometria de preformas não-circulares simuladas através de função polinomial. ...	92
Figura 4.50. Geometria de preformas simuladas através de função polinomial com $\Omega = 6$ RPM e $t_d = 10$ s. $\varphi = 72^\circ$: vistas lateral (a) e superior (b). $\varphi = 60^\circ$: vistas lateral (c) e superior (d). .	93

Lista de tabelas

Tabela 4.1. Geometrias obtidas na deposição de preformas elípticas, através da atribuição de diferentes parâmetros de processo.....	77
Tabela 4.2. Comparativo entre a geometria de preformas <i>soot</i> depositadas e pós-consolidadas. .	80

Nomenclatura

B	Magnitude do campo magnético
c	Contador de eventos de “delay”
c	Velocidade da luz
d	Diâmetro mínimo da elipse [mm]
D	Diâmetro máximo da elipse [mm]
D	Diâmetro da espira
f_b	Função de distribuição da taxa de deposição do maçarico [mm]
g_b, g_c	Coefficientes de atenuação da função Gaussiana
HE_x, HE_y	Modos ortogonais lineares de propagação
HE^+, HE^-	Modos ortogonais circulares de propagação
K	Constante de Brewster ou “stress-optic coefficient” [Pa^{-1}]
L	Comprimento da fibra óptica
m_{soot}	Massa de <i>soot</i> depositada [g]
n	Contador de eventos (exceto “delays”)
$n_{//}, n_{\perp}$	Índice de refração nas direções ortogonais
r	Raio da preforma, coordenada polar [mm]
R	Amplitude máxima de deposição do maçarico [mm]
r_0	Raio inicial da preforma [mm]
r_b	Raio da circunferência do maçarico [mm]
r_t	Raio da preforma no referencial da circunferência do maçarico [mm]
t	Tempo [s]
T	Tempo total de simulação [s]
t_d	Tempo de “delay” [s]
V	Constante de Verdet

V_{GeCl_4}	Volume consumido de tetracloreto de germânio [mL]
V_{SiCl_4}	Volume consumido de tetracloreto de silício [mL]
x_0	Deslocamento do centro da circunferência em relação à origem no eixo x [mm]
x_t	Posição no eixo x em coordenadas cartesianas, no referencial do alvo [mm]
y_0	Deslocamento do centro da circunferência em relação à origem no eixo y [mm]
y_t	Posição no eixo y em coordenadas cartesianas, no referencial do alvo [mm]
α	Aceleração angular (ângulo) [s^{-1}]
β	Aceleração angular (tempo) [$\text{rad}/s^2, \text{°}/s^2$]
$\beta_x, \beta_y, \beta^+, \beta^-$	Constantes de propagação dos modos ortogonais
γ	Ângulo de deposição [rad, °]
$\delta\phi$	Incremento angular na coordenada esférica ϕ [rad, °]
$\delta\theta$	Incremento angular na coordenada esférica θ [rad, °]
Δs	Birrefringência
Δt	Passo de simulação [s]
$\Delta\Phi$	Ângulo de rotação do plano de polarização
ε	Proporção de diâmetros
η	Eficiência da deposição [%]
θ	Posição angular, coordenada polar [rad, °]
λ_0	Comprimento de onda no vácuo
σ	Tensão [Pa]
τ	Tempo de ciclo [s]
ϕ	Coordenada esférica [rad, °]
φ	Ângulo de ciclo [rad, °]
ω	Velocidade angular [rad/s, RPM]
Ω	Velocidade máxima de rotação [rad/s, RPM]
CPM	“Circular-Polarization Maintaining”
CVD	“Chemical Vapor Deposition”
GeCl_4	Tetracloreto de germânio
GeO_2	Dióxido de germânio (germânia)

LPM	“Linear-Polarization Maintaining”
MCVD	“Modified Chemical Vapor Deposition”
OVD	“Outside Vapor Deposition”
PMD	“Polarization Mode Dispersion”
PMF	Fibra Óptica Mantenedora de Polarização (“Polarization-Maintaining Fiber”)
SiCl ₄	Tetracloroeto de silício
SiO ₂	Dióxido de silício (sílica)
VAD	“Vapor-Phase Axial Deposition”

Capítulo 1

Introdução

No presente cenário mundial, os desenvolvimentos na área de tecnologia da informação, juntamente com o advento dos sistemas de sensoriamento, propiciaram uma crescente demanda por fibras ópticas especiais. Dentre os diversos tipos de fibras especiais, destaca-se a fibra óptica mantenedora de polarização (PMF – “Polarization-Maintaining Fiber”).

A PMF apresenta características especiais que possibilitam a preservação do estado de polarização da luz que se propaga em seu interior, o que viabiliza a sua aplicação em sistemas ópticos coerentes, bem como na manufatura de sensores de alta precisão e de giroscópios ópticos. Estudos recentes apontam uma perspectiva de mercado de 14 % para a PMF, considerando tanto as fibras convencionais quanto especiais (Méndez 2008). Em termos quantitativos, o consumo mundial desta fibra apresentou um significativo crescimento nos últimos anos, conforme ilustrado na **Figura 1.1**, atingindo a margem de US\$ 66 milhões em 2005 (Méndez e Morse, 2007).

Atualmente, encontram-se disponíveis diversas metodologias para fabricação de PMF. Entretanto, estes métodos apresentam inúmeras desvantagens, visto que são exigidos procedimentos muito complexos, além da implementação de etapas adicionais aos métodos usuais para manufatura de fibras, elevando os custos e o tempo de produção. Esta dificuldade de fabricação reflete diretamente no preço do produto, de forma que, enquanto fibras ópticas convencionais para telecomunicações custam cerca de US\$ 0,20 por metro, o preço das PMF atinge valores em torno de US\$ 3,00 por metro (Méndez, 2008).

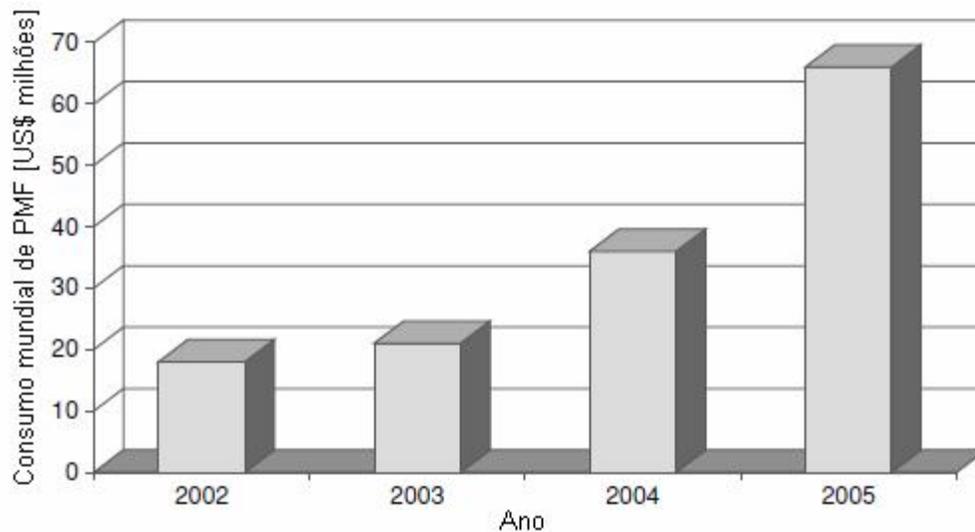


Figura 1.1. Consumo mundial de PMF, em milhões de dólares (Méndez e Morse, 2007).

Neste contexto, o Laboratório de Quartzos e Dispositivos Fotônicos (LIQC) da FEM–UNICAMP possui o know-how e tecnologia necessários para a fabricação de preformas de sílica para fibras ópticas através do método “Vapor-phase Axial Deposition” (VAD), sendo a única instalação capacitada em todo o hemisfério sul. Esta iniciativa, iniciada em 1996, propiciou o estudo de metodologias inovadoras para a obtenção de preformas para fibras convencionais e especiais, bem como dispositivos ópticos de alta precisão (Suzuki 1998).

O presente trabalho concerne o desenvolvimento de um processo automatizado, baseado no método VAD, para a fabricação de preformas elípticas para fibras ópticas mantenedoras de polarização, bem como preformas não circulares para aplicação em outros dispositivos ópticos de vanguarda. Complementarmente, propõe-se o estudo do efeito dos parâmetros de processo na geometria produzida, através de análise experimental e simulações por métodos computacionais, possibilitando a obtenção de preformas de alta qualidade, baixo custo e com excelente controle das características geométricas.

No Capítulo 2, são inicialmente apresentados os principais métodos de fabricação de preformas para fibras ópticas. Em seguida, estas discussões são particularizadas para a PMF, através da descrição do princípio de funcionamento, classificação, fabricação e principais aplicações em sistemas de sensoriamento. O Capítulo 3, por sua vez, apresenta o sistema de

deposição de preformas não-circulares baseado no método VAD, assim como os modelos matemáticos desenvolvidos para estudo dos parâmetros de processo. No Capítulo 4, os diversos resultados obtidos experimentalmente e através de simulações são analisados e discutidos, com ênfase principal sobre a análise geométrica das preformas. Finalmente, no Capítulo 5, são apresentadas as conclusões sobre o presente trabalho, bem como algumas sugestões para futuros desenvolvimentos.

Capítulo 2

Revisão da Literatura

2.1. Processos de fabricação de preformas de sílica

De forma geral, fibras ópticas e outros dispositivos ópticos são produzidos a partir de matrizes cilíndricas de sílica vítrea, denominadas preformas, fabricadas através de processos CVD (“Chemical Vapor Deposition”), caracterizados pela deposição de nanopartículas (“soot”) de sílica (SiO_2), geradas através de reações de oxidação e hidrólise de tetracloreto de silício (SiCl_4) e outros haletos metálicos, e da consolidação em câmaras de alta temperatura. As reações de formação do *soot* são descritas através das equações



Os métodos CVD permitem produzir vidros de alta pureza, resultando em um guiamento de luz com baixa atenuação óptica e com controle dimensional preciso, sem grandes variações no diâmetro da preforma. Outra vantagem é a possibilidade do controle e homogeneização do perfil do índice de refração, característica altamente desejada em fibras ópticas e sistemas optoeletrônicos de alta precisão, através da utilização de elementos dopantes, como a germânia (GeO_2), na etapa de deposição (Izawa e Sudo 1987). Atualmente, dentre os processos mais comumente empregados na fabricação de preformas para fibras ópticas, encontram-se o MCVD (“Modified Chemical Vapor Deposition”), o OVD (“Outside Vapor Deposition”) e o VAD (“Vapor-Phase Axial Deposition”).

2.1.1. O método MCVD

O método MCVD foi inventado pelo Bell Laboratories em conjunto com a AT&T, em 1974 (Jablonowski 1986). A metodologia consiste na deposição de filmes de sílica dopada sobre a parede interna de um tubo de sílica fundida. O tubo é posicionado na direção horizontal e mantido em rotação constante ao longo de seu eixo, enquanto que um sistema de suprimento efetua a passagem dos haletos metálicos em seu interior, utilizando oxigênio como gás de arraste. Uma chama de oxigênio e hidrogênio é aplicada diretamente sobre a parede externa, através de um maçarico com movimento de translação ao longo do comprimento do tubo, permitindo que a reação de oxidação ocorra, o que produz partículas de SiO_2 que são imediatamente sinterizadas em filmes de vidro transparente. Quando o filme atinge a espessura desejada, o tubo é colapsado, resultando em uma preforma com núcleo de sílica dopada e casca de sílica pura, proveniente do tubo de sílica fundida. O procedimento do MCVD é ilustrado na **Figura 2.1**. Apesar da alta produtividade, o MCVD apresenta uma grande desvantagem referente às restrições geométricas da preforma, ou seja, o comprimento e o raio da preforma são limitados pelas dimensões do tubo.

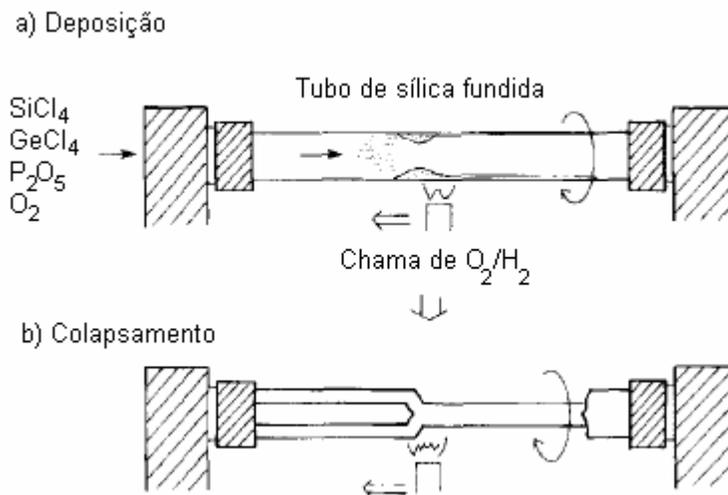


Figura 2.1. Método MCVD (Watanabe e Matsuda 1992).

2.1.2. O método OVD

O método OVD foi inventado pela Corning Glass em 1972. (Blakenship e Deneka 1982). A sistemática consiste na deposição de nanopartículas sobre um bastão de sílica posicionado na direção horizontal, fixado por suas extremidades, enquanto que um sistema proporciona a rotação do alvo com velocidade constante. A deposição é realizada através de reações em chama, utilizando um maçarico alimentado com gases oxigênio, hidrogênio e tetracloreto de silício e germânio. Analogamente ao MCVD, o maçarico é deslocado continuamente ao longo do comprimento do bastão, permitindo a deposição de camadas de *soot* por toda a extensão do alvo. Ao final do procedimento, é obtida uma preforma *soot* porosa e opaca, que, depois de consolidada em fornos de alta temperatura e atmosfera controlada, transforma-se em uma preforma completamente transparente. Ao contrário do MCVD, o OVD não permite produzir preformas com núcleo e casca em apenas uma etapa. Logo, utiliza-se um procedimento denominado *overcladding*, que consiste na deposição de *soot* sobre uma preforma já consolidada e com diferente índice de refração. O procedimento do OVD é apresentado na **Figura 2.2**. Entretanto, apesar de permitir a produção de preformas com diâmetros maiores em comparação com as fabricadas pelo MCDV, observa-se que a aplicabilidade do OVD ainda é restrita pelo comprimento do bastão inicial.

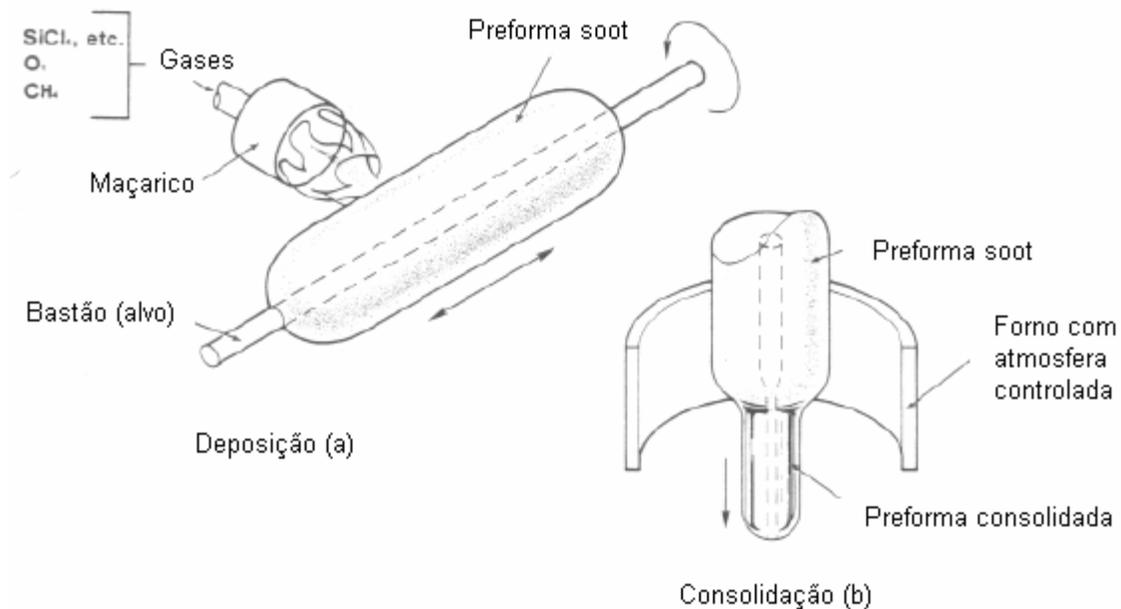


Figura 2.2. Método OVD (Schultz 1980).

2.1.3. O método VAD

O método VAD foi desenvolvido nos laboratórios da NTT (Japão) em 1977 (Izawa *et al* 1997). Analogamente ao OVD, o processo é caracterizado pela deposição de *soot* sobre um alvo em rotação constante. Contudo, no caso do VAD, o bastão de sílica é posicionado na direção vertical e fixado apenas pela extremidade superior. Por sua vez, o maçarico que efetua a reação de oxidação e hidrólise dos tetracloreto é disposto em um ponto fixo, com a chama apontando na direção da preforma. Uma vez que o processo é iniciado, um sistema de translação efetua o deslocamento da preforma para cima, na direção vertical. Logo, o crescimento da preforma ocorre gradualmente, com deposição de camadas de *soot* tanto no sentido radial quanto axial. Após a deposição, a preforma *soot* é consolidada em um forno de alta temperatura com atmosfera controlada, resultando em uma preforma transparente (Suzuki e Torikai 1998). Adicionalmente, a preforma é também submetida a um processo termoquímico denominado desidratação, que proporciona a remoção de impurezas, tais como as hidroxilas, que atenuam e comprometem a capacidade de transmissão da fibra. O procedimento do VAD é ilustrado na **Figura 2.3**. Nota-se que, para esta configuração, é necessário efetuar etapas adicionais de *overcladding* para produzir uma preforma completa com núcleo e casca. Entretanto, existem sistemas onde a deposição da casca é realizada simultaneamente com o núcleo, através da utilização de mais de um maçarico (Murata 1986). Ao contrário do que ocorre nos métodos MCVD e OVD, no VAD as dimensões da preforma não são limitadas pela geometria do alvo inicial, o que permite produzir preformas com comprimento e diâmetro grandes, além de preservar o controle e homogeneidade das propriedades ópticas requeridas em vidros de alta qualidade. Estas características, aliadas ao baixo custo relativo e alta eficiência, permitem que o VAD seja empregado não só na fabricação de fibras ópticas, como também na manufatura de guias planares e substratos para fotomáscaras.

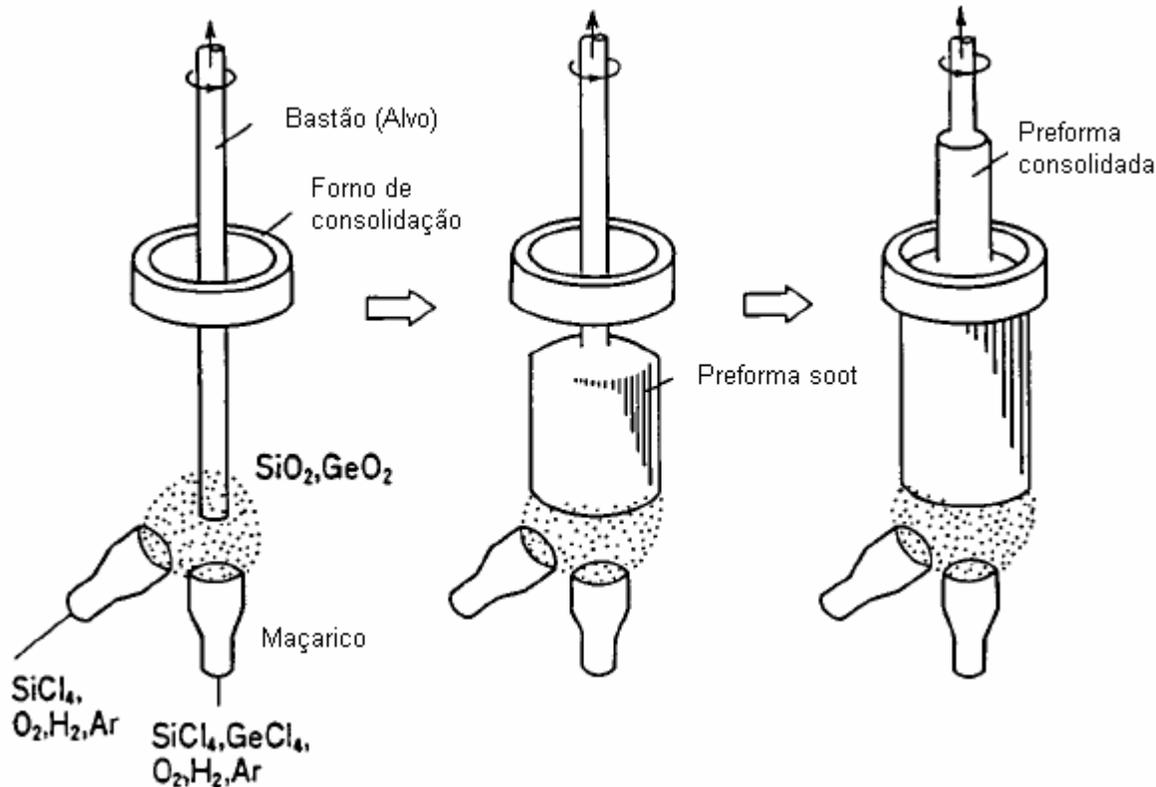


Figura 2.3. Método VAD. Nesta configuração, deposição e consolidação são realizadas no mesmo estágio (Izawa 2000).

2.2. Fibras ópticas mantenedoras de polarização

Sistemas ópticos de transmissão compostos por fibras ópticas convencionais apresentam problema devido à flutuação do estado de polarização da luz (“Polarization Mode Dispersion” – PMD) ao longo do comprimento da fibra. Este problema é ocasionado principalmente devido à diferença entre os índices de refração dos modos ortogonais de polarização linear do meio óptico HE, ocasionados tanto por condições internas (geradas durante a fabricação da preforma e da fibra, principalmente devido à não-circularidade absoluta do núcleo da fibra, ou seja, ocorrem algumas variações no diâmetro ao longo de todo seu comprimento), quanto externas (advindas do meio ambiente) fazendo com que as componentes da luz sejam propagadas com velocidades diferentes. O efeito de PMD é, sobretudo, indesejado em sistemas onde a informação de fase torna-se importante, conforme será explanado em tópicos posteriores. Para sanar estes problemas, foram desenvolvidas as fibras ópticas mantenedoras de polarização, doravante denominadas PMF (“Polarization-Maintaining Fibers”). Estas fibras especiais possuem propriedades que permitem

preservar o estado de polarização da luz propagada, através de um nível de birrefringência instituído propositalmente e de forma controlada sobre o núcleo da fibra, acarretando em uma grande diferença nas constantes dos modos ortogonais de propagação da luz, resultando no desacoplamento destes dois modos e fazendo com que estes sejam transmitidos com pouca transferência de potência entre os mesmos (Okoshi e Kikuchi 1988).

2.2.1. Classificação de fibras ópticas mantenedoras de polarização

A classificação das PMF pode feita através do tipo de polarização da luz (Noda *et al* 1986). As fibras LPM (“Linear-Polarization Maintaining Fibers”) baseiam-se na preservação dos modos ortogonais de polarização linear HE_x e HE_y , fazendo com que os modos propaguem com pouca transferência de potência, conforme ilustra a **Figura 2.4**. Em contrapartida, as fibras CPM (“Circular-Polarization Maintaining Fiber”), apresentadas na **Figura 2.5**, efetuam o desacoplamento dos modos de polarização circular da luz HE^+ e HE^- .

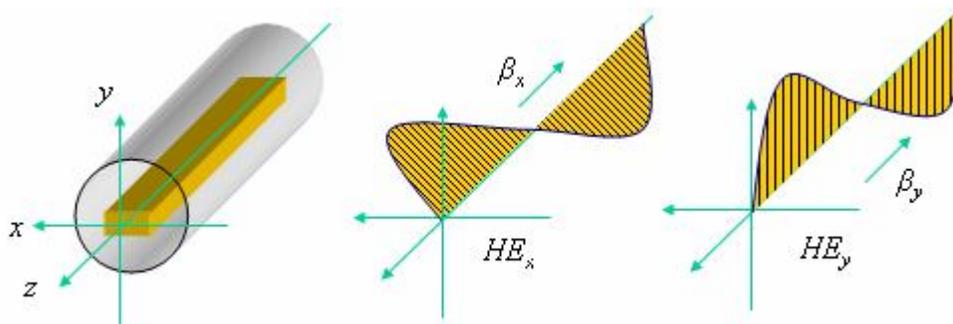


Figura 2.4. Polarização linear da luz.

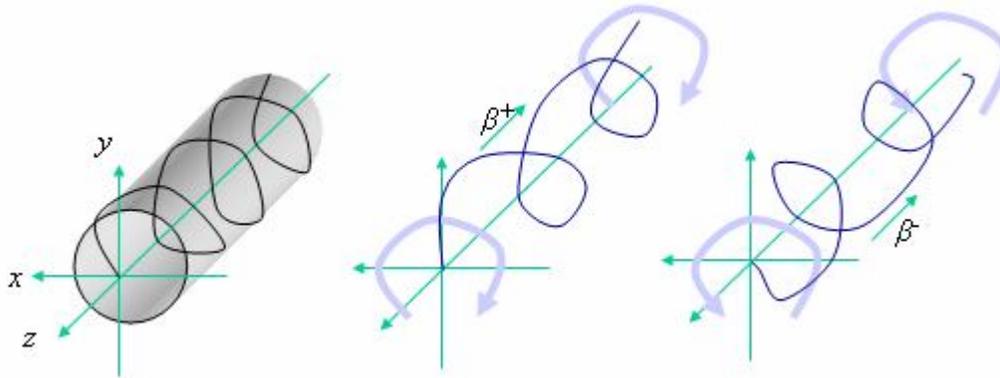


Figura 2.5. Polarização circular da luz.

Por sua vez, as fibras LPM são também divididas em duas categorias, cuja classificação é realizada de acordo com o método no qual a birrefringência é aplicada. Nas PMF de efeito geométrico (“Geometry Type”), a birrefringência é resultante da não-circularidade do núcleo da fibra. Fibras ópticas convencionais devem possuir o seu núcleo perfeitamente circular para evitar os efeitos de PMD. Contudo, ao alterar propositamente a geometria do núcleo para um formato elíptico, por exemplo, ocorre uma distribuição axial assimétrica do índice de refração da fibra, resultando em diferenças nas constantes de propagação dos modos. Matematicamente, é constatado que a birrefringência é correlacionada à proporção dos diâmetros da elipse, ou seja, quanto maior a elipsidade, maior será a capacidade da fibra de preservar a polarização. Os principais exemplos de PMF de efeito geométrico são a fibras de núcleo elíptico (“Elliptical-Core Fiber”) e a “Dumbbell-Core Fiber”. Já nas PMF de efeito de tensões (“Stress Type”), a diferença nas constantes de propagação é resultado da aplicação de tensões internas axiais assimétricas, atuantes sobre o núcleo da fibra. Dentre os exemplos mais conhecidos, existem as fibras de casca elíptica (“Elliptical-Cladding fiber”), a fibra PANDA (“Polarization-Maintaining AND Absorption-Reducing”) e a fibra “Bow-Tie”. Alguns tipos de PMF são ilustrados na **Figura 2.6**. Nota-se que as PMF de efeito geométrico também são influenciadas por efeitos de tensão sobre o núcleo. Contudo, a contribuição desta componente é muito menor do que a quantidade incrementada pelo efeito geométrico.

No caso das fibras CPM, um dos poucos exemplos conhecidos é a “Twisted Round Fiber”, no qual a fibra é submetida a processos de torção durante a sua fabricação.

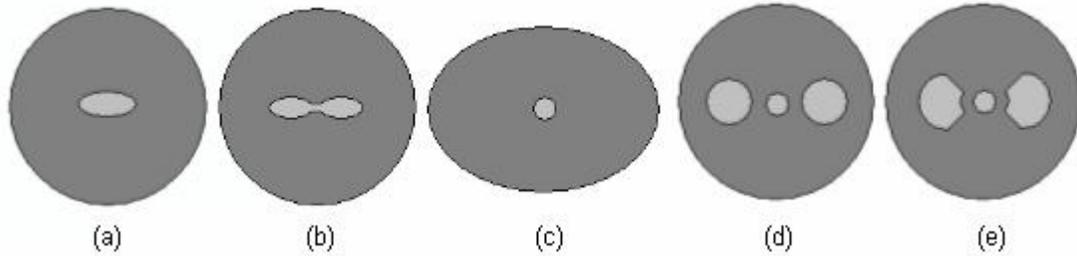


Figura 2.6. Tipos de PMF: (a) “Elliptical-Core Fiber”, (b) “Dumbbell-Core Fiber”, (c) “Elliptical-Cladding Fiber”, (d) PANDA e (e) “Bow-Tie Fiber”.

2.2.2. Principais aplicações para fibras ópticas mantenedoras de polarização

As PMFs possuem aplicação na implementação de sistemas ópticos coerentes com multiplexação por fase (Okoshi e Kikuchi 1988), utilizados, por exemplo, em sistemas de transmissão de “High-Definition Television” (HDTV), uma vez que fibras convencionais não permitem preservar a polarização da luz durante longas distâncias. Estas fibras são também utilizadas na confecção de dispositivos opto-eletrônicos, como polarizadores, filtros, interferômetros e chaveadores ópticos (Noda *et al* 1986), e em lasers de fibra de alta potência (Das e Lit 2002).

Entretanto, atualmente há um grande interesse em utilizar a característica especial da PMF em diversos tipos de sensores ópticos de alta precisão, como, por exemplo, para a detecção pontual e distribuída de variação de temperatura, pressão, vibrações mecânicas (Zhang e Wit 1993), campo magnético e corrente elétrica (Bonhert *et al* 2002). A maioria dos sensores de fibra óptica implementados com PMF consistem na detecção da defasagem da luz propagada, ocasionada pelos efeitos do meio de medição. Por exemplo, tensão mecânica e mudança de fase podem ser correlacionados através do Efeito Fotoelástico,

$$\Delta s = n_{//} - n_{\perp} = K\sigma, \quad (2.3)$$

onde Δs é a birrefringência (diferença entre o índice de refração nas direções ortogonais $n_{//}$ e n_{\perp}), K é a constante de Brewster e σ é a tensão aplicada (Paul 1982). O efeito da temperatura também foi observado em estudos anteriores, que sugerem que a variação da temperatura ambiente é

incrementada proporcionalmente à birrefringência da fibra (Mochizuki *et al* 1982). No caso de detecção de campos magnéticos, utiliza-se o princípio do Efeito Faraday. Quando um certo comprimento de fibra é submetido a um campo magnético, ocorre uma rotação nos eixos principais do plano de polarização, resultando em uma mudança na fase de propagação da luz, sendo que este deslocamento angular é proporcional à magnitude do campo, de acordo com a equação

$$\Delta\Phi = VBL, \quad (2.4)$$

onde $\Delta\Phi$ é o ângulo de rotação do plano de polarização, B é a magnitude do campo magnético, V é a constante de Verdet e L é o comprimento da fibra. Em sensores comerciais, o Efeito Faraday é amplificado utilizando uma espira contendo uma grande quantidade de fibra, na configuração de um interferômetro (guia de ondas contra-propagantes).

Contudo, certamente a aplicação de maior impacto reside na fabricação de giroscópios ópticos, que, devido à alta sensibilidade à variação de rotação e ao tamanho compacto, são muito utilizados para navegação de aeronaves e posicionamento de radares (Pavlath 1991), bem como na implementação de sensores de posicionamento e inclinação para o controle da postura de robôs humanóides (Hirai *et al* 1998), uma vez que permitem detecção de movimento com extrema precisão, da ordem de 0,005 °/s, sobrepujando inclusive a resolução de acelerômetros e “magnetic compasses” (Borenstein *et al* 1997). A detecção da rotação é realizada através do Efeito Sagnac. Para uma longa espira de fibra óptica disposta na configuração de interferômetro, o Efeito Sagnac postula que a rotação do anel de fibra em torno de seu eixo central acarreta no deslocamento de um dos modos de polarização, onde a defasagem é proporcional à velocidade de rotação, de acordo com a equação

$$\Delta\Phi = \frac{\lambda_0 c}{2\pi LD} \Omega, \quad (2.5)$$

onde $\Delta\Phi$ é o ângulo de rotação, Ω é a velocidade de rotação, L é o comprimento de fibra, D é o diâmetro da espira, λ_0 é o comprimento de onda no vácuo e c é a velocidade da luz (Hotate 1997, Sharon e Lin 2001). A **Figura 2.7** ilustra o Efeito Sagnac em uma espira de fibra óptica.

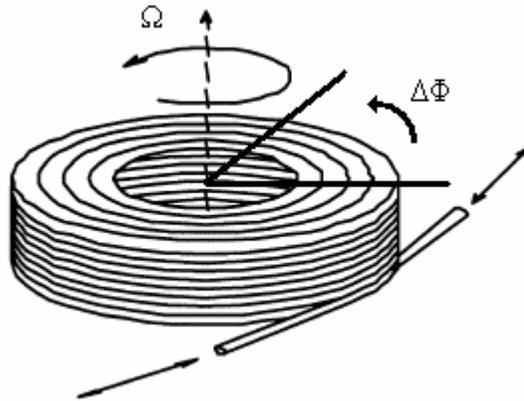


Figura 2.7. Princípio de funcionamento do giroscópio óptico a partir do Efeito Sagnac (Sharon e Lin 2001)

2.2.3. Fabricação de preformas para fibras ópticas mantenedoras de polarização

Atualmente, existem diversos métodos para fabricação de preformas para PMF, sendo que cada processo varia de acordo com o tipo de fibra desejada.

Para as fibras geometria elíptica, um dos métodos mais utilizados consiste em realizar cortes nas laterais de uma preforma. A **Figura 2.8** ilustra um processo de fabricação de preformas para PMF do tipo “Elliptical-Cladding Fiber”, onde inicialmente é produzida uma preforma convencional. Depois de consolidada, o conjunto, composto por núcleo e casca, é submetido a cortes em suas laterais na direção axial, seguido por uma etapa de polimento da superfície desbastada (Dianov *et al* 1992, Kajioka *et al* 1996). No caso de uma “Elliptical-Core Fiber”, basta realizar o corte antes de efetuar o *overcladding*. O resultado é uma geometria aproximadamente elíptica, o suficiente para gerar a birrefringência necessária.

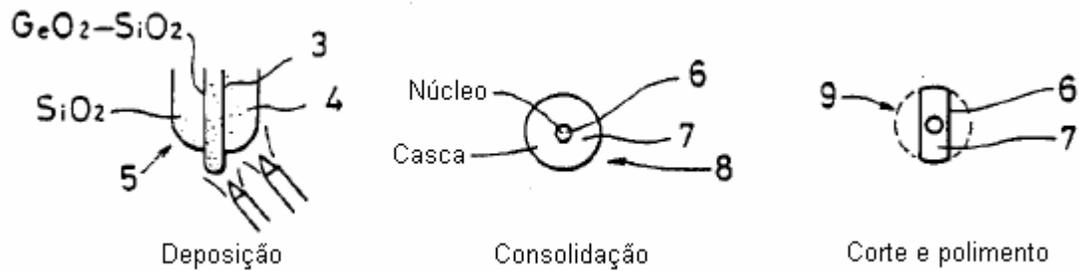


Figura 2.8. Fabricação de PMF através de cortes nas laterais da preforma (Kajioka *et al* 1996).

Alternativamente, a modelagem da geometria também pode ser realizada através de prensagens termomecânicas sobre as laterais da preforma. O procedimento é aplicado sobre uma preforma já consolidada, aquecendo o vidro até torná-lo maleável e aplicando pressão por meio de um mecanismo, resultando em uma estrutura de geometria radial aproximadamente elíptica, conforme ilustra a **Figura 2.9**. O método pode ser implementado na fabricação de “Elliptical-Core Fiber” ou “Elliptical-Cladding Fiber” (Kimimichi e Takeyoshi 1992).

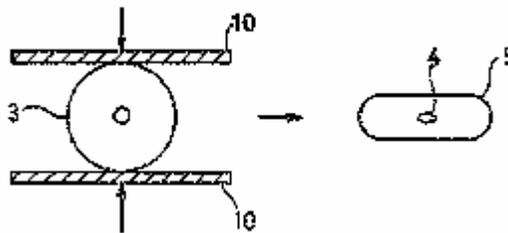


Figura 2.9. Fabricação de PMF através de prensagem termomecânica (Kimimichi e Takeyoshi 1992).

No caso da fibra PANDA, utiliza-se um método denominado “Rod-in-Tube”, que consiste em perfurar dois túneis ao redor do núcleo de uma preforma consolidada, e inserir tubos aplicadores de tensão no interior das cavidades. Por último, o conjunto é aquecido, promovendo fusão entre as cavidades e tubos. O procedimento é ilustrado na **Figura 2.10**. Outra metodologia consiste em realizar um *overcladding* sobre um arranjo já contendo o núcleo e os aplicadores de tensão dispostos paralelamente, evitando a etapa de corte. Após a deposição, o conjunto é consolidado, resultando em uma preforma com núcleo, casca e aplicadores de tensão. Este processo é apresentado na **Figura 2.11** (Yamaguchi *et al* 1990).

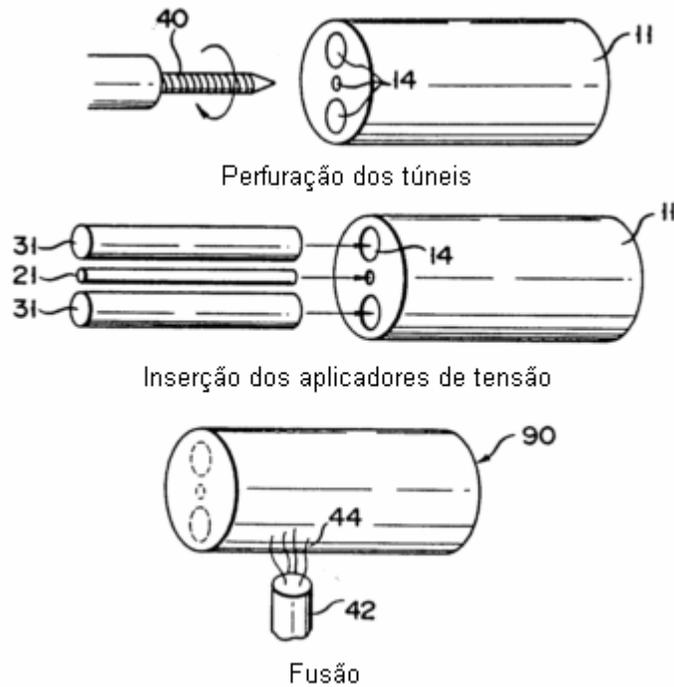


Figura 2.10. Método “Rod-in-Tube” (Yamaguchi *et al* 1990).

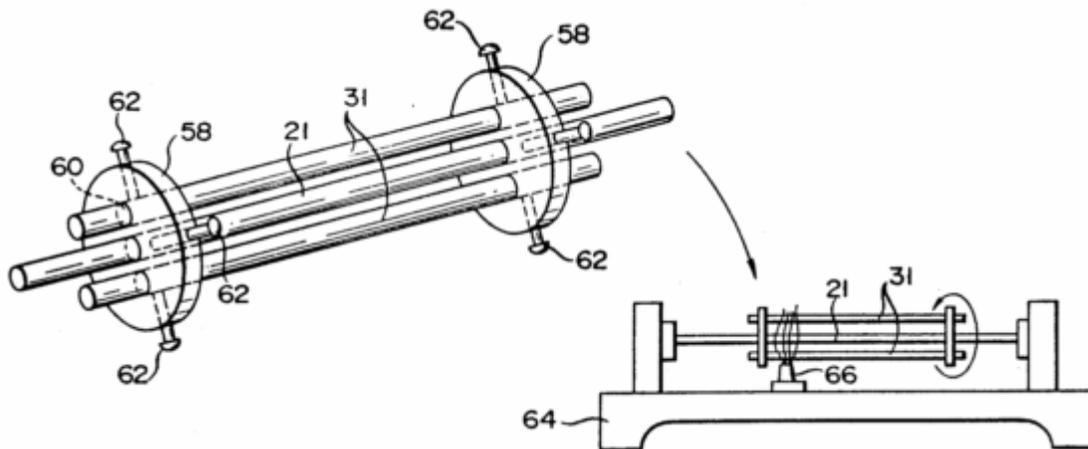


Figura 2.11. Método alternativo para fabricação de preforma para fibra PANDA (Yamaguchi *et al* 1990).

Para fibra “Bow-Tie”, utiliza-se o método “Gas-Phase Etching”, baseado na introdução dos aplicadores de tensão durante a etapa de deposição do MCVD. Inicialmente, é depositada uma camada de $F_2/P_2O_5/SiO_2$, cujo índice de refração é praticamente igual ao da sílica. Em seguida, camadas altamente dopadas de B_2O_3/SiO_2 são depositadas, resultando em diferentes índices de refração para cada nível de soot. Então, a rotação do tubo de sílica fundida é interrompida e dois

maçaricos são dispostos nas laterais da preforma em posições diametralmente opostas, enquanto gás flúor é passado no interior do tubo, ocasionando o ataque químico (“etching”) da camada de B_2O_3/SiO_2 nas regiões afetadas pela chama. Após algum período, todo o B_2O_3/SiO_2 é dissolvido, restando apenas camadas nas posições não atingidas pelo maçarico. O processo prossegue com a deposição de mais uma camada de $F_2/P_2O_5/SiO_2$ e do núcleo de SiO_2/GeO_2 . Finalmente, o conjunto é colapsado, resultando na preforma com núcleo, casca e aplicadores de tensão (Birch *et al* 1982). A **Figura 2.12** apresenta um esquemático do “Gas-Phase Etching”.

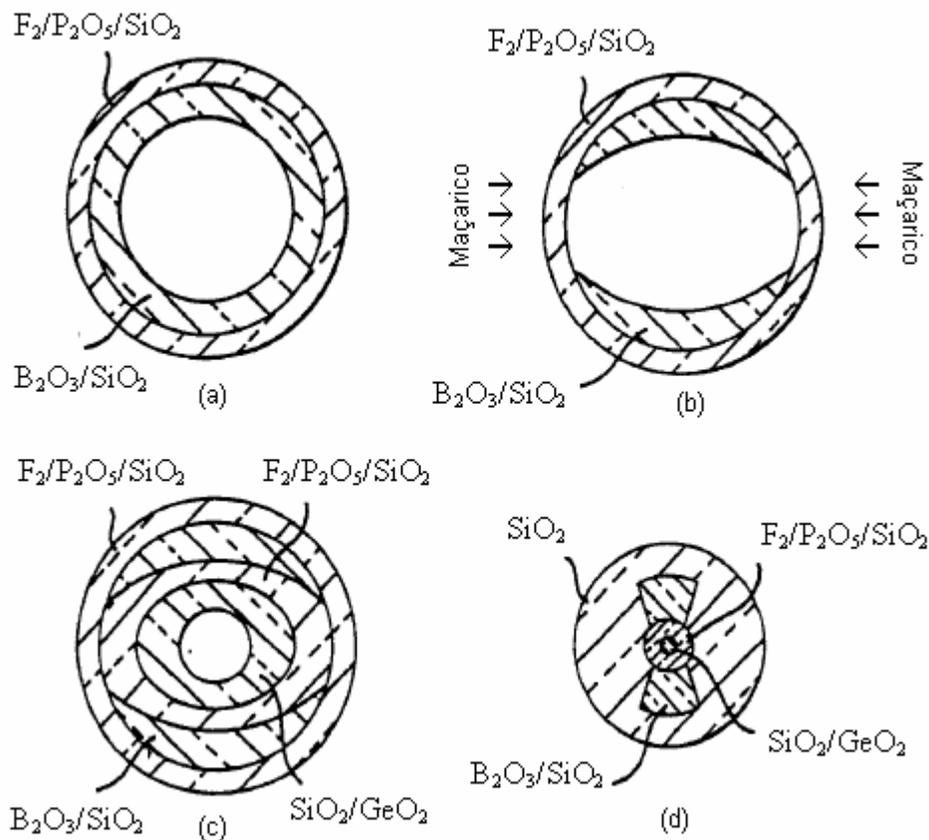


Figura 2.12. Esquemático do método “Gas-Phase Etching”: (a) deposição dos aplicadores de tensão, (b) “etching”, (c) deposição do núcleo, (d) fibra “Bow-Tie” produzida à partir da metodologia (Birch *et al* 1982).

Entretanto, os métodos atualmente existentes apresentam muitas desvantagens, seja no caso de fibras de efeito geométrico ou por tensões. A grande maioria destas metodologias consiste em processos complexos, de difícil reprodutibilidade, e que exigem equipamentos com grande precisão para que possam ser implementados adequadamente.

Outro problema reside no fato de que os métodos atualmente existentes exigem que sejam efetuadas etapas adicionais além dos processos usuais de fabricação de preformas circulares, o que acarreta em um aumento significativo no tempo e no custo de produção. No caso dos métodos de fabricação de preformas elípticas, é necessário inicialmente realizar a deposição da preforma utilizando processos convencionais para, em seguida, aplicar os processos de prensagem ou cortes nas laterais. Estes problemas também são observados no caso da fabricação de preformas para PMF por efeito de tensões, visto que é necessário primeiramente produzir a preforma circular para em seguida efetuar as perfurações ou o ataque termoquímico.

Além disso, estes métodos necessitam que a preforma seja manipulada diretamente, o que dificilmente garante que a geometria resultante apresente simetria e poucas imperfeições. No caso das técnicas de prensagem, cortes nas laterais e perfurações, é requerido um ajuste muito fino de posicionamento das ferramentas mecânicas para que a geometria da preforma não apresente irregularidades e assimetrias axiais. Mesmo no método de deposição sobre os aplicadores de tensão já posicionados ao redor da preforma núcleo, deve-se tomar muita precaução no posicionamento dos aplicadores e também evitar que ocorram variações no diâmetro dos mesmos ao longo do comprimento. Observa-se também que, no caso de qualquer erro de manipulação através dos métodos descritos, a preforma é inutilizada, ocasionando grandes prejuízos de tempo, custo e material.

Desta forma, considerando que as PMF não admitem variações longitudinais em sua geometria, o que implica na variação do estado de polarização ao longo do comprimento, a fabricação deste tipo de fibra torna-se extremamente complicada (Suzuki *et al* 2007a).

2.3. Fabricação de preformas não-circulares

A exemplo de preformas elípticas para PMF, vidros de sílica com outros tipos de geometrias radiais não-circulares são continuamente requeridos em diferentes aplicações.

No presente cenário tecnológico, é necessário produzir vidros de sílica com elevada pureza e transparência óptica para a confecção de equipamentos opto-eletrônicos de tecnologia avançada. Um dos principais exemplos refere-se à indústria de displays de cristal líquido (LCD). Os LCDs possuem uma vasta gama de aplicações devido à sua alta qualidade e definição de imagem, baixo gasto de energia e tamanho compacto, com utilização crescente em equipamentos como televisores, monitores, e dispositivos portáteis, como telefones celulares, câmeras e “handhelds”. Durante o processo de fabricação de LCDs, vidros de sílica de alta qualidade são empregados na confecção de lentes e substratos de fotomáscaras para microlitografia. Nestes tipos de aplicações, o vidro deve possuir características como um bom acabamento, planicidade superficial, estabilidade química, elevadas homogeneidade e transmissibilidade óptica, além de não apresentarem bolhas ou impurezas, de forma a garantir que os circuitos sejam impressos de forma precisa. Além da fabricação de LCDs, vidros de sílica de alta qualidade também são utilizados em lentes, fotomáscaras e substratos em processos de microlitografia para a fabricação de semicondutores, microchips e dispositivos de captura de imagem como CCDs (“Charge-coupled device”), e em sistemas ópticos para equipamentos de fabricação de displays e microchips, como “IC stepper” e “LCD stepper”.

De forma geral, os métodos de fabricação de vidros de alta qualidade baseiam-se na produção de preformas com geometria radial circular, de forma que, a partir destas matrizes, é possível extrair discos de diferentes espessuras. Entretanto, uma grande parte das aplicações necessita de vidros com formatos não circulares. No caso de fotomáscaras e substratos para fotomáscaras para litografia, por exemplo, é exigida uma geometria retangular, devido à sua adequação ao design do produto final.

Outro exemplo é observado em lasers de fibra “Double-Cladding”. Neste tipo de dispositivo, a casca da fibra é dopada com elementos que permitam a amplificação da luz, como o érbio ou o itérbio. Como o laser é bombeado a partir da casca, a luz amplificada que propaga em torno do núcleo é absorvida na interface entre os dois meios, o que resulta também em um ganho na potência da radiação propagada no interior do núcleo. Para propiciar uma melhor captação de luz pelo núcleo, as fibras “Double-Cladding” são confeccionadas com cascas de geometrias não-circulares, como, por exemplo, retangulares, hexagonais ou na forma de estrelas,

conforme ilustrado na **Figura 2.13**, o que garante que os feixes conduzidos pela casca atinjam a interface com o núcleo (Carter *et al* 2004). Não obstante, uma fibra óptica com núcleo triangular também foi proposta anteriormente (Dyott *et al* 1973). Apesar de peculiar, nenhuma aplicação direta foi reportada até o momento.

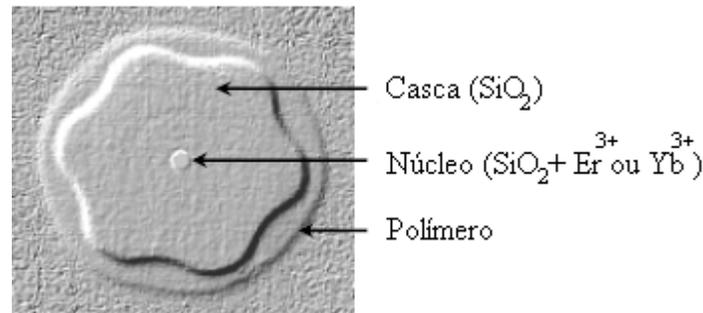


Figura 2.13. Fibra óptica para laser de fibra “Double-Cladding” (Méndez 2008).

Para modificar o formato das preformas, são utilizados processamentos adicionais que consistem, basicamente, na extração de material das laterais através de corte, ou modelagem geométrica utilizando deformações termomecânicas (Nakaishi 1996, Horikoshi 2004, Shiraishi 2004). Contudo, estes procedimentos implicam em um grande aumento no tempo e no custo de produção, além da dificuldade em obter grandes precisões geométricas. Em etapas de corte, por exemplo, é necessária a utilização de ferramentas e máquinas específicas para extrair material das laterais do bastão sem danificar a sua parte central, a qual será utilizada no produto final. Além disso, as porções extraídas dificilmente poderão ser reaproveitadas, o que implica em um considerável desperdício de material. No caso de deformações termomecânicas, necessita-se de fornos com alta temperatura, além de um controle preciso do pressionamento mecânico aplicado e do resfriamento do vidro pós-aquecimento, para evitar o surgimento de trincas. Outro problema decorre do fato que, ao submeter o vidro a condições extremas ou instáveis de temperatura, podem ocorrer modificações nas propriedades ópticas do mesmo, o que resultaria na perda de sua qualidade. Nota-se ainda que, em ambos os métodos, é necessário aplicar um polimento sobre a região deformada do bastão para eliminar possíveis defeitos e imperfeições em sua superfície, acarretando na necessidade de implementação de várias etapas adicionais ao processo usual de fabricação, além de gastos com energia, infra-estrutura e mão-de-obra especializada (Suzuki *et al* 2007b).

Capítulo 3

Materiais e métodos

3.1. Processo de fabricação de preformas elípticas

Dadas as dificuldades apresentadas anteriormente, foi desenvolvida uma metodologia inovadora para fabricação de preformas elípticas, que permite sanar uma grande parte dos problemas que ocorrem durante os processos de fabricação de preformas para PMF.

Atualmente, o Laboratório de Materiais e Dispositivos Fotônicos (LIQC) da FEM-UNICAMP possui a infra-estrutura e o *know-how* necessários para a produção de preformas de sílica através do método VAD, conforme ilustra a **Figura 3.1**. A deposição é realizada em uma câmara equipada com um regulador de fluxo (“mass-flow controller”) dos gases envolvidos nas reações que ocorrem na chama do maçarico, tais como hidrogênio, oxigênio, argônio e os tetracloreto de silício e germânio. É interessante ressaltar que o processo é realizado sob uma atmosfera controlada, com matérias-primas de alta pureza, e que o maçarico especial realiza uma queima uniforme dos reagentes, produzindo uma chama com poucas oscilações. Por sua vez, o controle do deslocamento da preforma é realizado através de motores de passo, controlados por softwares, elaborados com base na plataforma LabVIEW da National Instruments, e em hardwares de comunicação apropriados. Ao todo são utilizados dois motores, um destinado a cada grau de liberdade (rotação e translação), sendo que a rotação é realizada com velocidade constante. Por outro lado, o movimento de translação utiliza um sistema de controle de posição, retro-alimentado pela imagem da preforma através de uma câmera CCD. A principal justificativa deste aparato é a necessidade de manutenção da distância entre alvo e maçarico, uma vez que este parâmetro é de extrema importância para o controle do perfil do índice de refração (Ono *et al*

2003). Uma representação detalhada do sistema de deposição é apresentada na **Figura 3.2**. Complementarmente, o LIQC também possui um forno programável com atmosfera controlada para consolidação e desidratação, que permite produzir preformas completamente transparentes e com baixas concentrações de hidroxilas (Fujiwara *et al* 2005).



Figura 3.1. Câmara de deposição VAD.

Todos os parâmetros do processo de deposição estão atualmente ajustados para produzir preformas com geometria perfeitamente circular. No entanto, para a deposição de preformas elípticas, foi elaborado um método que consiste na variação da velocidade de rotação da preforma ω de acordo com o seu posicionamento angular θ , do repouso até uma velocidade máxima Ω em movimento acelerado, e da velocidade máxima até o repouso em movimento desacelerado, de forma que as posições de velocidade máxima e mínima estejam espaçadas de 90° , ou seja, as posições de mesma velocidade encontrar-se-ão em pontos axialmente opostos, defasados de 180° . Uma vez que o maçarico permanece em uma posição fixa, o movimento alternado fará com que a deposição seja maior nos instantes em que a preforma estiver na condição de velocidade mínima.

Assim, repetindo-se o movimento durante um intervalo de tempo, será gerada uma preforma de formato elíptico perfeitamente simétrico, com duas posições de maior deposição, resultando no eixo de maior diâmetro D , e duas posições de menor deposição, relativas ao eixo de menor diâmetro d . Para aumentar ainda mais a diferença entre os diâmetros dos eixos da elipse, pode-se implementar um tempo de atraso (“delay”) t_d nas posições angulares onde a velocidade assume valores nulos, interrompendo o movimento da preforma por alguns segundos. Dessa forma, quantidade depositada de *soot* pelo maçarico é incrementada, assim como o diâmetro maior da elipse.

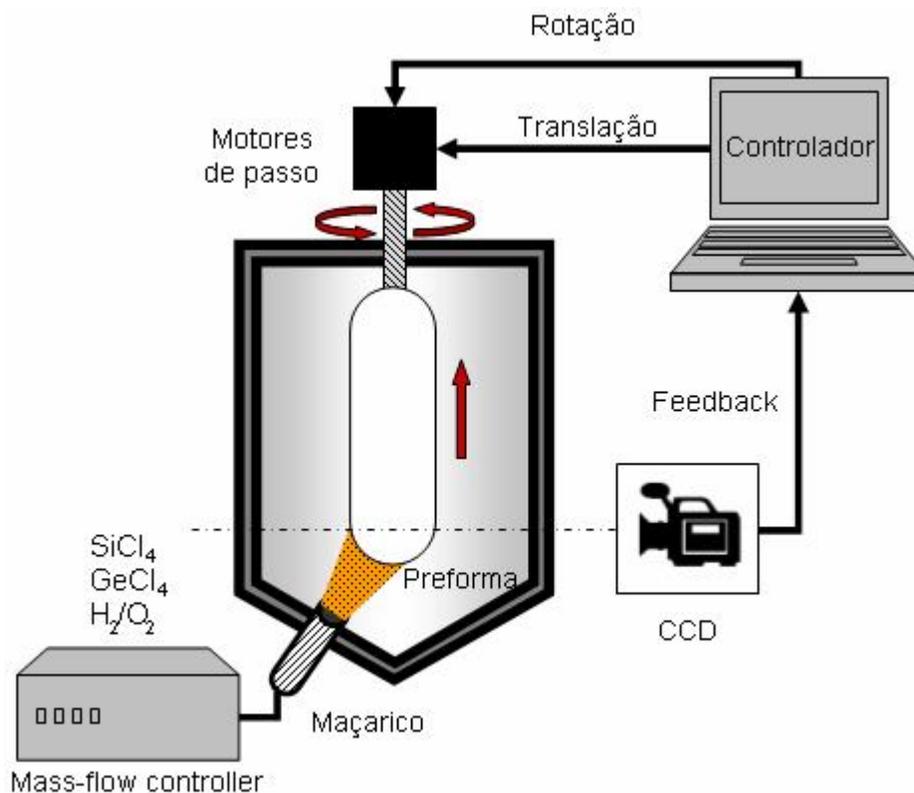


Figura 3.2. Aparato de deposição através do método VAD.

Nota-se que esta metodologia apresenta uma série de vantagens em relação aos métodos descritos anteriormente. Uma vez que a implementação é feita durante a etapa convencional de deposição, o método não requer a realização de procedimentos adicionais, proporcionando uma redução no tempo e nos custos de fabricação. Além disso, não é necessário utilizar equipamentos específicos e nem alterar drasticamente a estrutura do processo convencional de deposição de

preformas circulares, bastando apenas modificar o controle do motor de rotação para executar uma trajetória de velocidade variável ao invés de constante.

Outra vantagem consiste no fato de que o controle da geometria da preforma pode ser realizado através da seleção dos parâmetros do controlador, tais como a velocidade e o tempo de “delay”, devido ao fato de que diferentes conjuntos de valores de parâmetros resultam em diferentes valores de elipsidade. Assim, o método proposto não requer a manipulação direta da preforma, proporcionando um controle preciso da simetria e evitando imperfeições na geometria da preforma.

O presente procedimento também pode ser utilizado para realizar *overcladding* de cascas elípticas, o que viabiliza a fabricação de “Elliptical-Cladding Fibers”. Neste caso, inicialmente deve-se preparar a preforma núcleo circular para em seguida realizar a deposição sobre o núcleo utilizando o método apresentado. Nota-se que, neste caso, também não é necessário implementar etapas adicionais ao processo convencional, visto que o método é aplicado durante a própria etapa usual de *overcladding*, apenas modificando o controle da rotação.

3.2. Processo de fabricação de preformas não-circulares

Alternativamente, o método pode ser utilizado para produzir preformas com geometrias não-circulares, desde que haja simetria em relação ao eixo. Na metodologia de fabricação de preformas elípticas, a variação da velocidade de rotação é efetuada em ciclos de 180° . Neste caso, o comprimento angular do ciclo será assumido como um valor variável φ , podendo assumir valores diferentes de 180° . Dessa forma, o número de posições com maior taxa de deposição será dado pela razão entre φ e 360° , ou seja, para φ igual a 90° , a programação resultará em 4 regiões de maior deposição e 4 regiões com menor deposição, resultando em uma geometria aproximadamente quadrangular, enquanto que, para φ igual a 120° , pode-se obter uma preforma com secção triangular. Assim, diferentes geometrias não-circulares, incluindo hexágonos e pentágonos, podem ser produzidas a partir da escolha conveniente do ângulo de ciclo.

Visto que permite produzir preformas com a geometria desejada através do controle dos parâmetros de processo, a metodologia elimina a necessidade de manipulação direta da preforma, garantindo precisão na simetria e evitando imperfeições nas laterais. No caso de uma geometria quadrada, o bastão torna-se praticamente, excetuando-se as pontas, um bloco retangular de vidro, o que possibilita a utilização do mesmo tanto na direção axial quanto radial. A presente metodologia também se mostra eficiente no processo de fabricação de placas de vidro, pois, ainda que seja necessário executar procedimentos adicionais, o gasto de energia e de material para manipular uma preforma retangular é muito menor do que o custo de processamento de uma preforma circular.

3.3. Modelo matemático bidimensional para o processo de fabricação de preformas elípticas e não-circulares

Para validar a sistemática do método, e estudar os parâmetros envolvidos no processo, foi desenvolvido um modelo matemático do sistema de variação da velocidade da preforma. Entretanto, devido à elevada complexidade dos fenômenos envolvidos, principalmente no processo de deposição do *soot*, foram consideradas algumas simplificações durante a modelagem. Observa-se, entretanto, que estas ressalvas não comprometem criticamente na validade do processo.

3.3.1. Sistema de coordenadas e referenciais

A deposição de *soot* sobre a preforma pode ser retratada como um modelo bidimensional, considerando que o perímetro de uma secção radial da preforma é atingido pela chama do maçarico perpendicularmente. Adotando o centro desta secção como a origem de um sistema de coordenadas polares, conforme ilustrado na **Figura 3.3**, a equação do movimento de um ponto sobre a superfície da preforma \vec{s} em função do tempo t é expressa por

$$\vec{s}(t) = r(t) \hat{r} + \theta(t) \hat{\theta}, \quad (3.1)$$

onde r é o raio da preforma, que corresponde à taxa de deposição de *soot*, e θ é a posição angular, relacionada à velocidade de rotação.

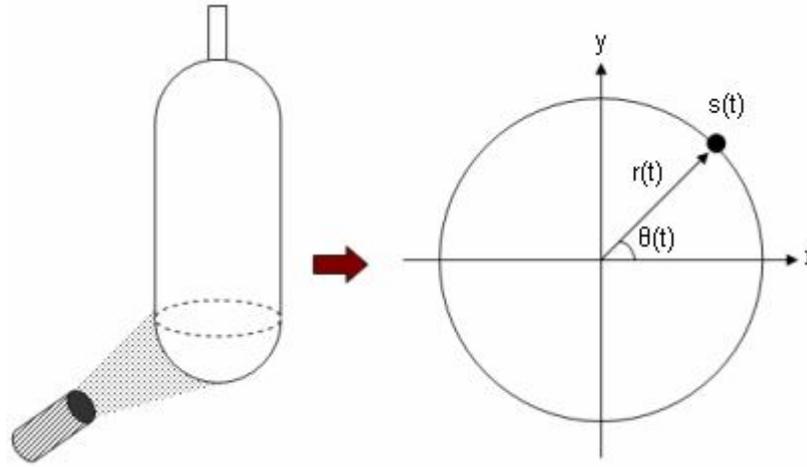


Figura 3.3. Sistema de coordenadas e referencial para o modelo matemático bidimensional.

3.3.2. Variação da velocidade de rotação da preforma

Para produzir preformas não-circulares, a velocidade de rotação deve ser administrada de acordo com a posição angular, conforme ilustra a **Figura 3.4**. Para um perfil trapezoidal de velocidades, a função de correlação entre ω e θ é dada por

$$\omega(\theta) = \begin{cases} \alpha \left(\theta - \frac{n\varphi}{2} \right), & n \text{ par} \\ \Omega - \alpha \left(\theta - \frac{n\varphi}{2} \right), & n \text{ ímpar} \end{cases} \quad (3.2)$$

onde Ω é a velocidade máxima de rotação e φ é o ângulo de ciclo. A variável α é a taxa de variação de ω em função de θ , ou seja, para um perfil linear de velocidades, α é definida como

$$\alpha = \frac{2\Omega}{\varphi}. \quad (3.3)$$

Ainda na equação (3.2), a variável n corresponde a um contador inteiro que define o tipo de movimento que é executado. Quando o valor de ω é incrementado do repouso até Ω , n assume um valor par, enquanto que nos instantes em que ω é decrementado de Ω até 0, atribui-se um valor ímpar para n , de forma que o contador n é incrementado em 1 sempre que o movimento atinge os pontos de velocidade máxima e mínima. Por definição, n é sempre ajustado para 0 no início do processo.

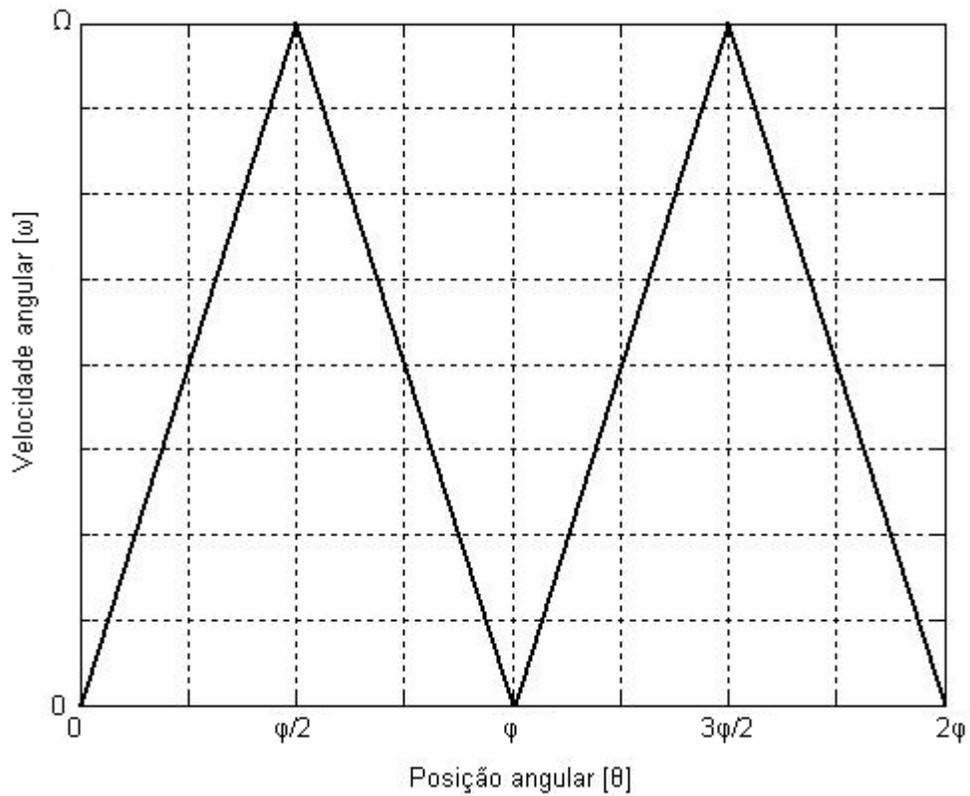


Figura 3.4. Variação da velocidade de rotação em função da posição angular.

A variação de ω também pode ser expressa em função do tempo, conforme ilustra a **Figura 3.5**. Considerando que o sistema despende um certo período de tempo τ para percorrer um comprimento φ , ou seja

$$\varphi = \frac{\Omega\tau}{2}, \quad (3.4)$$

temos que a variação da velocidade de rotação é dada por

$$\omega(t) = \begin{cases} \beta\left(t - \frac{n\tau}{2}\right), & n \text{ par} \\ \Omega - \beta\left(t - \frac{n\tau}{2}\right), & n \text{ ímpar} \end{cases}, \quad (3.5)$$

onde β é a aceleração angular, expressa como

$$\beta = \frac{2\Omega}{\tau}, \quad (3.6)$$

ou então,

$$\beta = \frac{\Omega^2}{\varphi}. \quad (3.7)$$

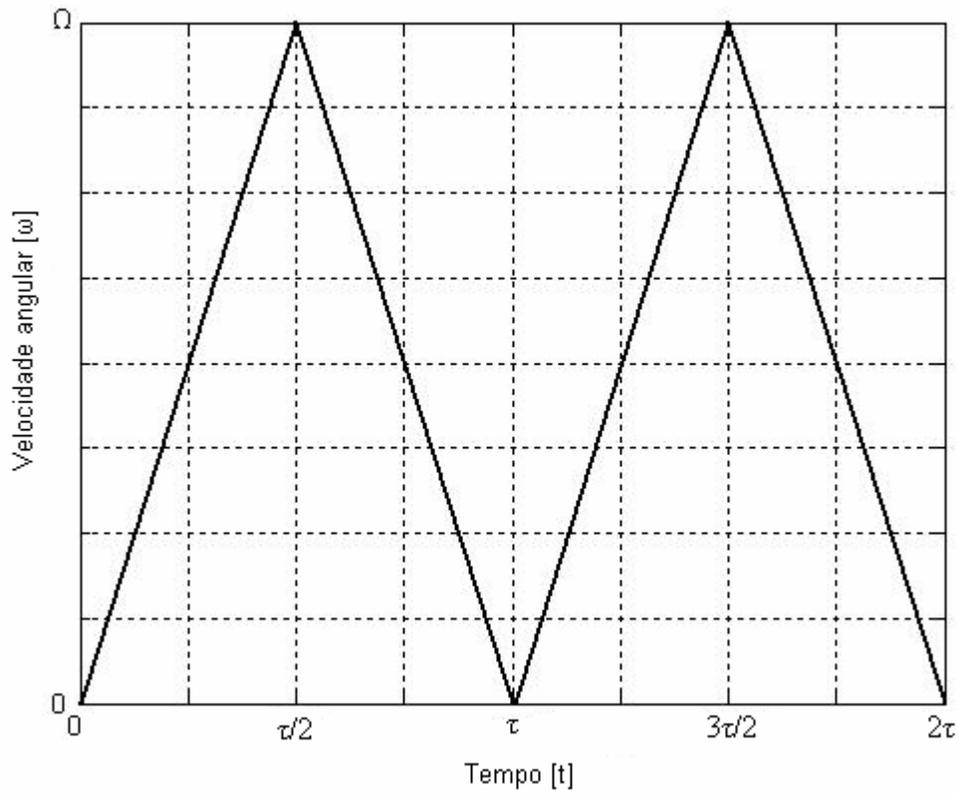


Figura 3.5. Variação da velocidade de rotação em função do tempo.

Dessa forma, integrando a equação (3.5), nota-se que a relação entre θ e t , ilustrada na **Figura 3.6**, é dada por

$$\theta(t) = \begin{cases} \frac{\beta}{2} \left[t^2 - \left(\frac{n\tau}{2} \right)^2 \right] - \frac{\beta n \tau}{2} \left(t - \frac{n\tau}{2} \right) + \frac{n\varphi}{2}, & n \text{ par} \\ -\frac{\beta}{2} \left[t^2 - \left(\frac{n\tau}{2} \right)^2 \right] + \left(\Omega + \frac{\beta n \tau}{2} \right) \left(t - \frac{n\tau}{2} \right) + \frac{n\varphi}{2}, & n \text{ ímpar} \end{cases}, \quad (3.8)$$

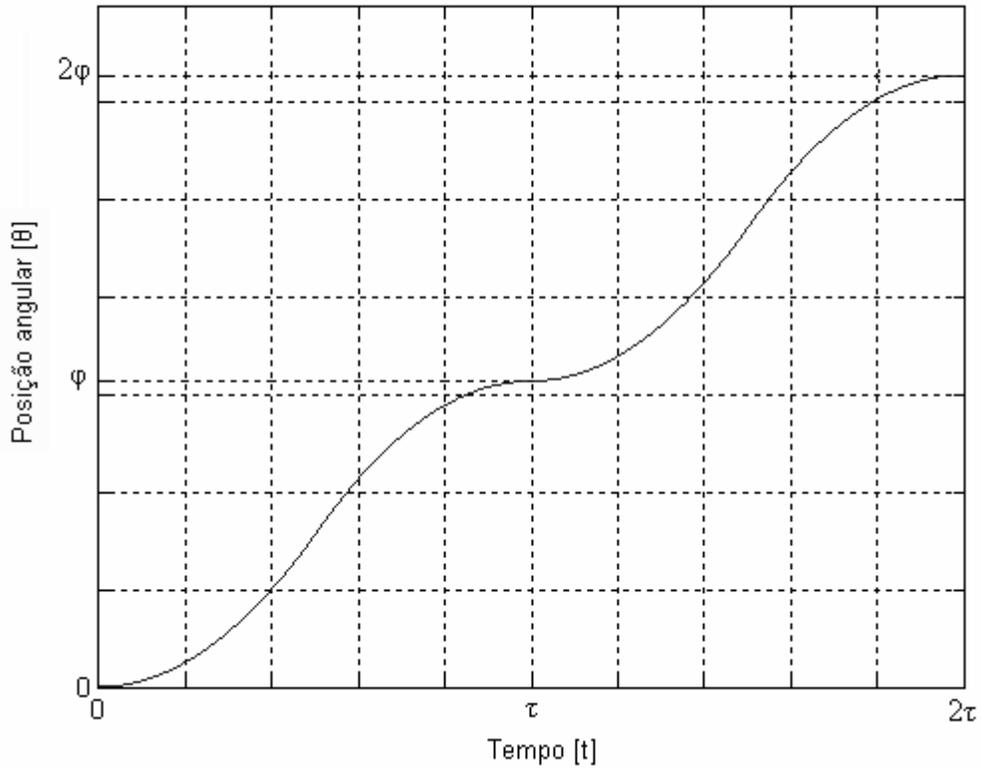


Figura 3.6. Variação da posição angular em função do tempo.

3.3.3. Implementação de tempos de atraso

Ao aplicar tempos de atraso nas posições angulares de velocidade nula, é possível incrementar a taxa de crescimento da camada de *soot*. Definindo c como o contador de “delays”, de sorte que o valor de c é um número inteiro, ajustado para 0 no início do processo e incrementado sempre que o movimento é submetido a um evento de “delay”, a equação para a variação de ω em função do tempo é alterada para

$$\omega(t) = \begin{cases} \beta \left(t - ct_d - \frac{n\tau}{2} \right), & n \text{ par} \\ \Omega - \beta \left(t - ct_d - \frac{n\tau}{2} \right), & n \text{ ímpar} \end{cases}, \quad (3.9)$$

onde t_d é o tempo de “delay”, conforme ilustrado na figura **Figura 3.7**.

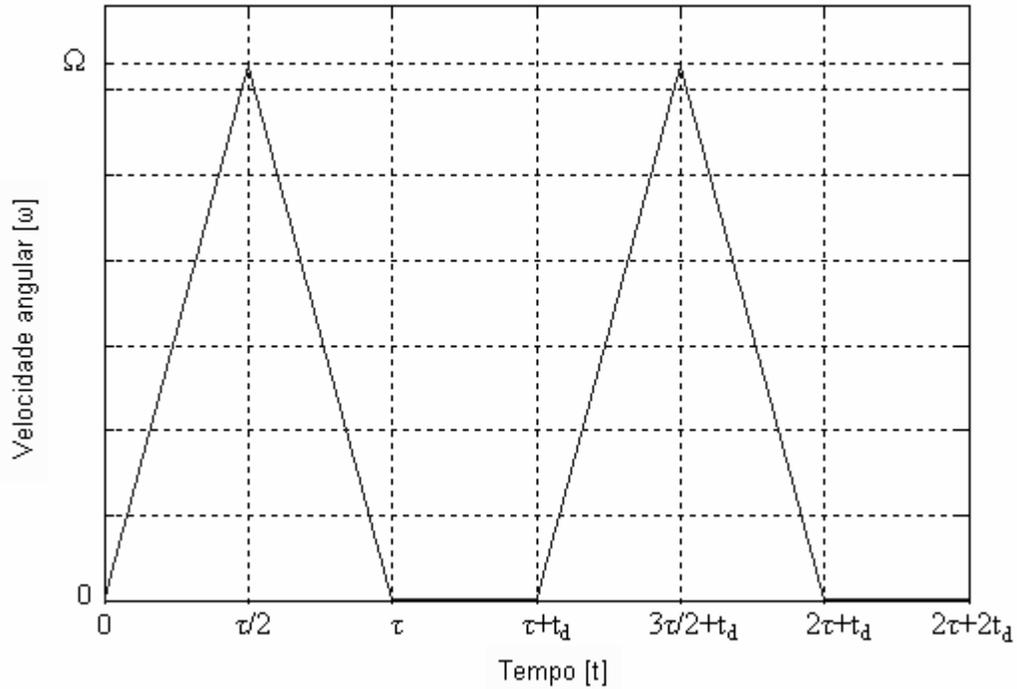


Figura 3.7. Variação da velocidade de rotação em função do tempo, com aplicação do tempo de “delay”.

Integrando a equação (3.9), obtém-se a função da variação da posição angular ao longo do tempo, apresentada na **Figura 3.8**, dada por

$$\theta(t) = \begin{cases} \frac{\beta}{2} \left[(t - ct_d)^2 - \left(\frac{n\tau}{2} \right)^2 \right] - \frac{\beta n\tau}{2} \left(t - ct_d - \frac{n\tau}{2} \right) + \frac{n\varphi}{2}, & n \text{ par} \\ -\frac{\beta}{2} \left[(t - ct_d)^2 - \left(\frac{n\tau}{2} \right)^2 \right] + \left(\Omega + \frac{\beta n\tau}{2} \right) \left(t - ct_d - \frac{n\tau}{2} \right) + \frac{n\varphi}{2}, & n \text{ ímpar} \end{cases} \quad (3.10)$$

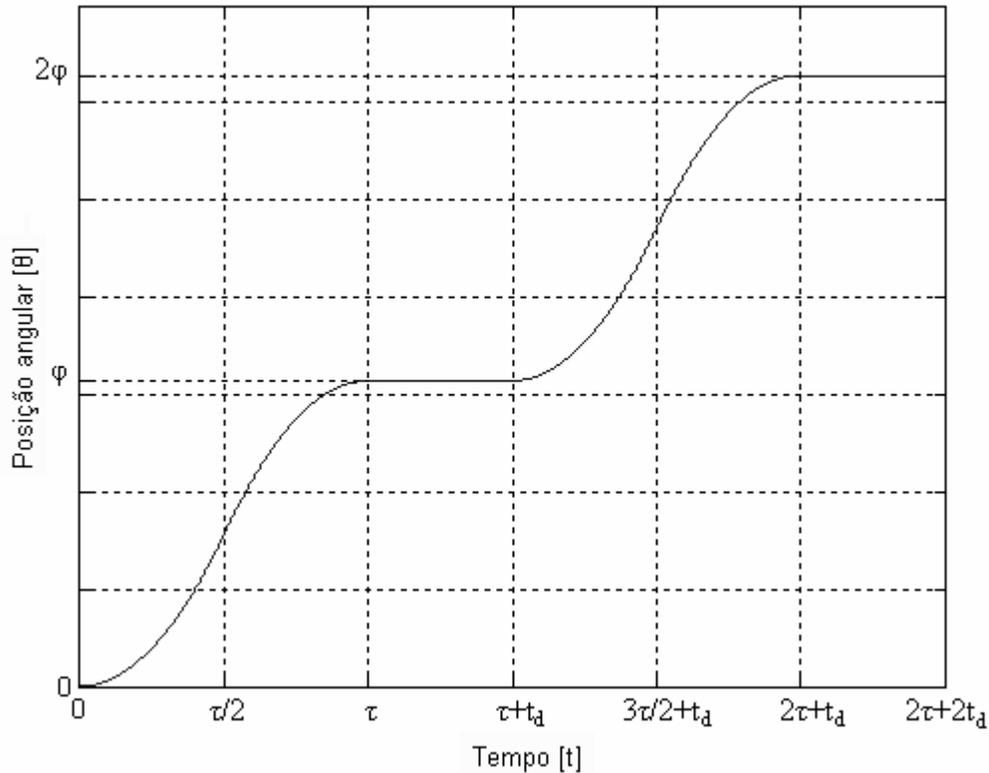


Figura 3.8. Variação da posição angular em função do tempo, com aplicação do tempo de “delay”.

3.3.4. Modelo matemático para a deposição de *soot*

A etapa de deposição de *soot* envolve uma quantidade considerável de parâmetros de processo, como a temperatura da chama, a taxa de admissão e exaustão de gases, a velocidade de translação da preforma, o ângulo de inclinação do maçarico, e a distância entre alvo e maçarico (Izawa e Sudo, 1987). Considerando um modelo bidimensional simplificado, todos estes parâmetros podem ser agrupados em uma única variável, correlacionada diretamente com a taxa de crescimento do *soot*.

Para um intervalo de tempo Δt relativamente curto, o perfil de deposição do *soot* pode ser aproximado por uma parábola com vértice invertido, conforme ilustra a **Figura 3.9**, onde R é a amplitude de deposição, referente à taxa de crescimento do *soot*, e γ é o ângulo de deposição, ou seja, o comprimento angular no qual o alvo é atingido pela chama, relacionado ao ângulo do maçarico.

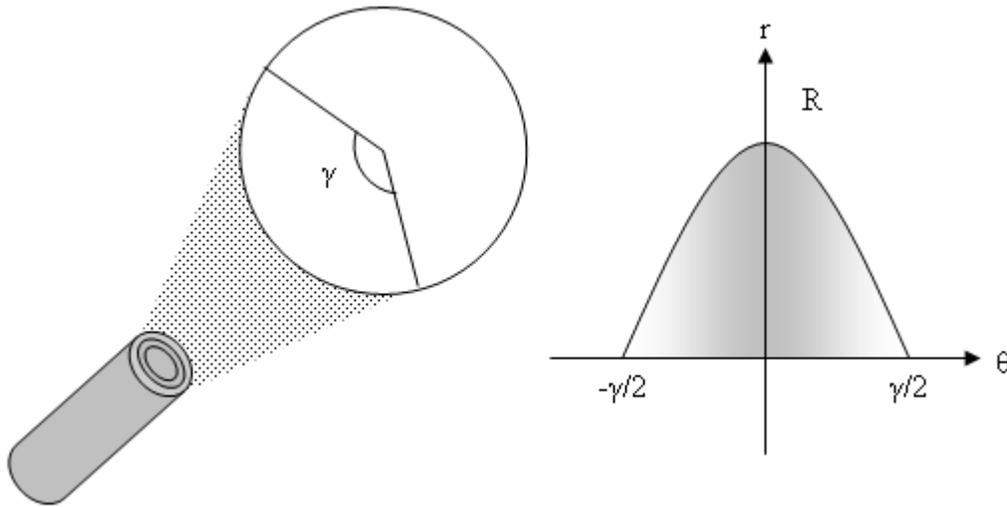


Figura 3.9. Representação para o perfil de deposição do *soot*.

Logo, a variação do raio da preforma r em função do tempo e da posição angular é dada por

$$r(\theta, t) = \begin{cases} r(\theta, t - \Delta t) - R \left(\theta - \frac{\gamma}{2} \right) \left(\theta + \frac{\gamma}{2} \right), & \text{se } -\frac{\gamma}{2} \leq \theta \leq \frac{\gamma}{2}, \\ r(\theta, t - \Delta t), & \text{se } |\theta| > \frac{\gamma}{2} \end{cases}, \quad (3.11)$$

onde $r(\theta, t - \Delta t)$ é o raio para a posição angular θ , no instante de tempo da iteração anterior. Logicamente, no início do processo, r assume valor r_0 para todo θ , onde r_0 corresponde ao raio inicial da preforma.

3.3.5. Simulação do modelo matemático bidimensional

O modelo matemático para a deposição de preformas não-circulares foi simulado utilizando o software MATLAB, da MathWorks. A implementação foi realizada através da elaboração de blocos seqüenciais de processamento matemático, ilustrados na **Figura 3.10**, designados às seguintes tarefas:

- **Módulo de temporização:** Recebe como parâmetros de entrada o tempo total T e o passo da simulação Δt . Retorna o tempo de simulação t . É responsável por atualizar o valor de t e sincronizar a operação dos outros módulos.
- **Módulo de rotação da preforma:** Recebe como parâmetros de entrada o tempo t , a velocidade máxima de rotação Ω , o tempo de “delay” t_d e o ângulo de ciclo φ . Retorna a velocidade angular ω . É responsável por implementar as equações do modelo cinemático e atualizar os contadores de ciclo n e de delay c . O valor de ω é integrado na saída do módulo para a obtenção da posição angular θ .
- **Módulo de deposição do soot:** Recebe como parâmetros de entrada o tempo t , a posição angular θ , o raio inicial da preforma r_0 , a amplitude de deposição R e o ângulo de deposição γ . Retorna o raio da preforma r . É responsável por implementar o modelo de deposição do *soot*, considerando que o r deve ser recalculado para todo θ a cada nova iteração.
- **Módulo de fabricação da preforma:** Recebe como parâmetros de entrada o tempo de simulação t , a posição angular θ e o raio da preforma r . Retorna o vetor de posições \vec{s} . Responsável por acoplar os resultados dos módulos de rotação e deposição.
- **Módulo de visualização de dados:** Recebe o vetor de posições \vec{s} . Responsável por apresentar a visualização gráfica das variáveis do processo.

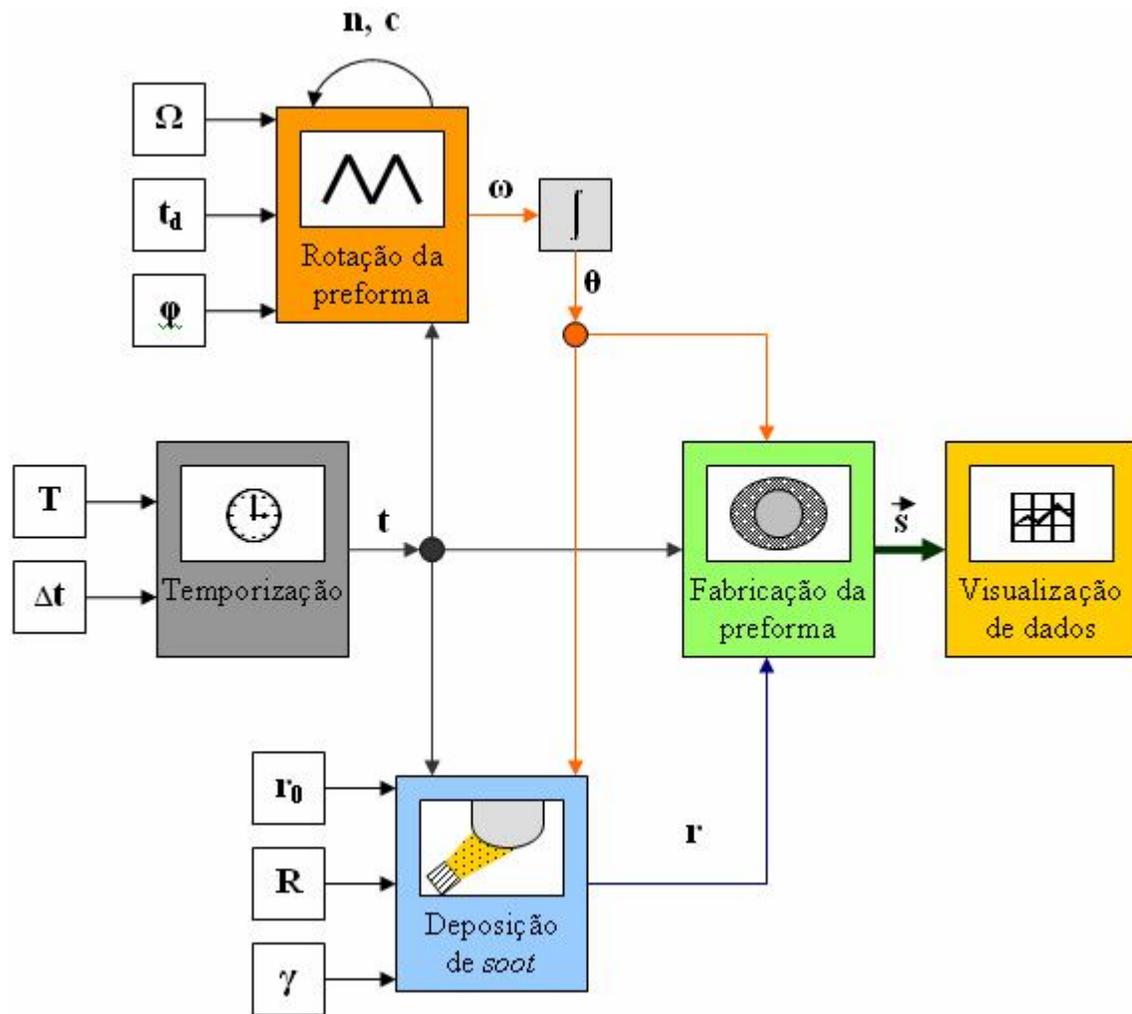


Figura 3.10. Diagrama de blocos correspondente ao software de simulação do modelo matemático bidimensional.

3.4. Modelo matemático tridimensional para o processo de fabricação de preformas elípticas e não-circulares

O modelo matemático bidimensional proporciona uma abordagem satisfatória para o tratamento do evento de deposição de *soot* na direção radial. Entretanto, uma vez que o Método VAD baseia-se em deposição radial e axial simultaneamente, foi elaborado um modelo matemático tridimensional tentativo para avaliar o efeito do processo de fabricação de preformas elípticas e não-circulares, considerando-se também as componentes axiais de deposição.

3.4.1. Sistema de coordenadas e referenciais

O presente modelo adota um sistema de coordenadas esféricas (r, θ, ϕ) , com origem coincidente com o eixo da preforma, e deslocado de uma certa distância a partir da extremidade inferior do alvo, conforme ilustra a **Figura 3.11**. Ademais, considera-se que a orientação é positiva na direção da extremidade da preforma.

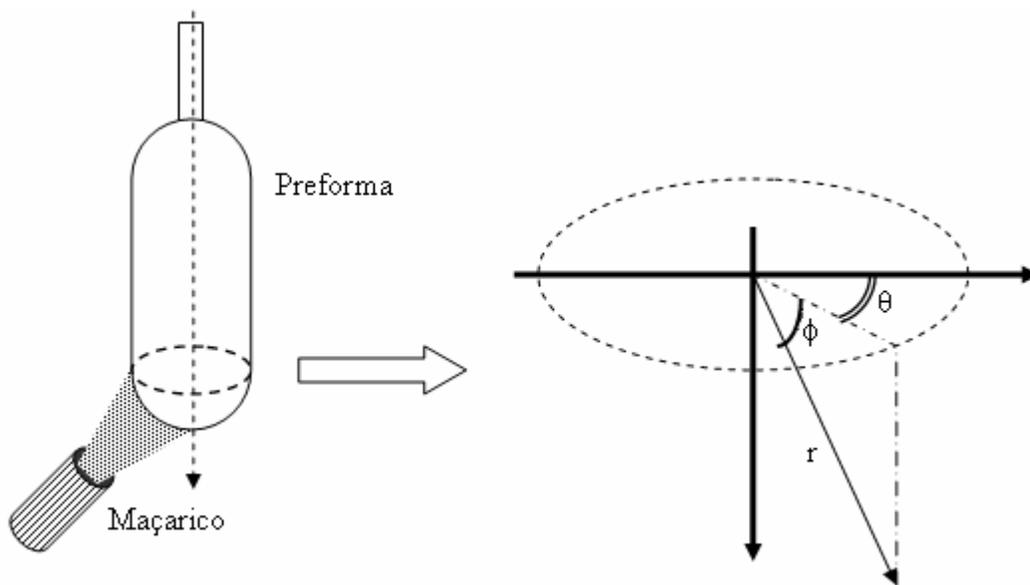


Figura 3.11. Sistema de coordenadas e referencial para o modelo matemático tridimensional.

3.4.2. Modelo matemático para a deposição de soot

A deposição do *soot* é determinada através dos parâmetros que definem o alvo e o maçarico. Neste caso, o alvo é representado pela extremidade inferior da preforma e, para fins de simplificação, foi aproximado por uma casca semi-esférica com raio inicial r_0 , ou seja, $0 \leq \theta \leq 2\pi$ e $0 \leq \phi \leq \pi/2$ com incrementos de $\delta\theta$ e $\delta\phi$, respectivamente. Apesar de a geometria semi-esférica não representar exatamente a extremidade da preforma durante a deposição, é interessante ressaltar que o perfil do alvo é majoritariamente determinado pelos parâmetros de deposição, podendo assumir formatos arredondados, pontiagudos ou até mesmo planos, de acordo com a conveniência (Santos *et al*, 2006). Deste modo, para a análise de outros perfis de geometria, basta modificar o raio inicial do alvo, fazendo com que este seja definido em função de ϕ .

Em relação ao maçarico, o perfil de deposição de *soot* pode ser modelado através de um cone, com inclinação determinada pelo ângulo do maçarico em relação à direção axial da preforma. Dessa forma, a área do alvo que é influenciada pelo maçarico é dada pela projeção de uma circunferência (base do cone), sobre a superfície da preforma. Logo, define-se o posicionamento do maçarico através do raio da circunferência da base r_b e de seu deslocamento normal ao eixo da preforma x_0 e y_0 . Este deslocamento permite, de certa forma, reproduzir os efeitos de inclinação do maçarico. Um esquemático do modelo é apresentado na **Figura 3.12**.

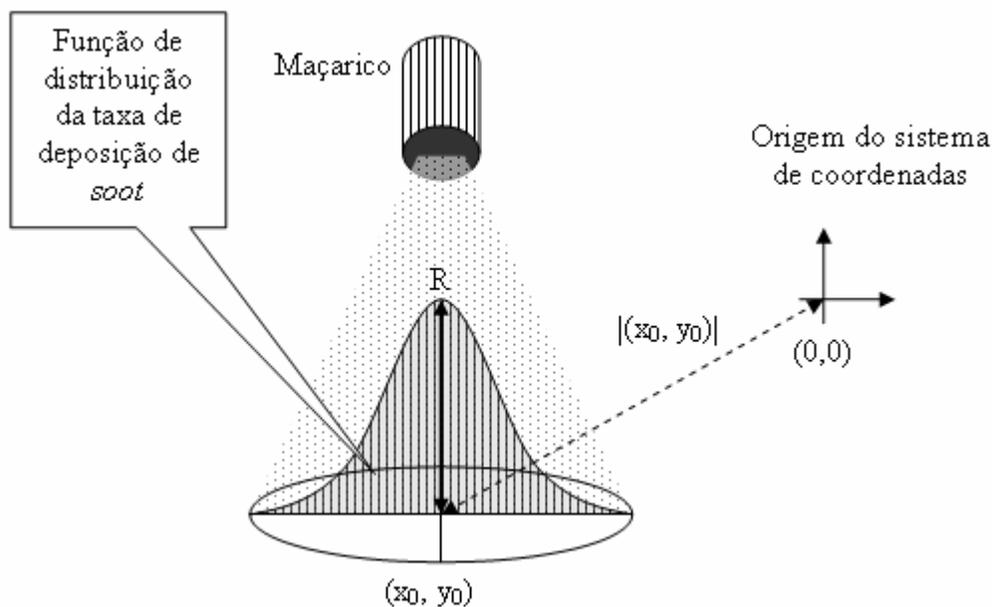


Figura 3.12. Modelagem do maçarico para deposição de *soot*.

Uma vez determinado o posicionamento do maçarico, é necessário definir a função que melhor representa a distribuição da taxa de deposição de *soot*. O presente modelo matemático assume que, a cada incremento de tempo Δt , uma certa quantidade de *soot* é agregada ao alvo, de sorte que esta taxa é determinada em função da posição do maçarico. Assim, a deposição é dada pela soma em coordenadas esféricas do alvo com o perfil de *soot*, ou seja,

$$r(t) = r(t - \Delta t) + f_b(r_t). \quad (3.12)$$

A taxa de deposição de *soot* f_b é definida pelo raio da circunferência do cone r_t . Uma vez que a quantidade de *soot* formada, proveniente das reações em chama, é maior próximo ao centro do maçarico, define-se que em $r_t = 0$, a função assume valor da máxima amplitude de deposição R , de forma que este valor é atenuado com o aumento do raio da circunferência até $r_t = r_b$, quando assume valor nulo. Para estudar o efeito de f_b , foi avaliada a modelagem através de um polinômio de segundo grau, dado por

$$f_b(r_t) = R \left(1 - \frac{r_t^2}{r_b^2} \right), \quad (3.13)$$

e através de uma função Gaussiana, expressa por

$$f_b(r_t) = R \exp\left(-\frac{(r_t - g_b(r_b))^2}{2g_c(r_b)^2}\right). \quad (3.14)$$

Observa-se que o modelo Gaussiano assume que a redução da taxa depositada com o aumento do raio da circunferência é modulada através dos parâmetros g_b e g_c , ajustados em função de r_b , de sorte que a velocidade de redução é maior do que no modelo parabólico.

O cálculo do raio da preforma em relação ao referencial da circunferência do maçarico r_t é dado por

$$r_t = \sqrt{(x_t - x_0)^2 + (y_t - y_0)^2}, \quad (3.15)$$

onde x_t e y_t são definidos pela posição em coordenadas cartesianas, no referencial do alvo, conforme ilustra a **Figura 3.13**, de sorte que r_t é calculado a cada iteração, considerando a rotação da preforma

$$\begin{bmatrix} x_t(t) \\ y_t(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta(t)) & -\sin(\theta(t)) \\ \sin(\theta(t)) & \cos(\theta(t)) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_t(t - \Delta t) \\ y_t(t - \Delta t) \end{bmatrix}. \quad (3.16)$$

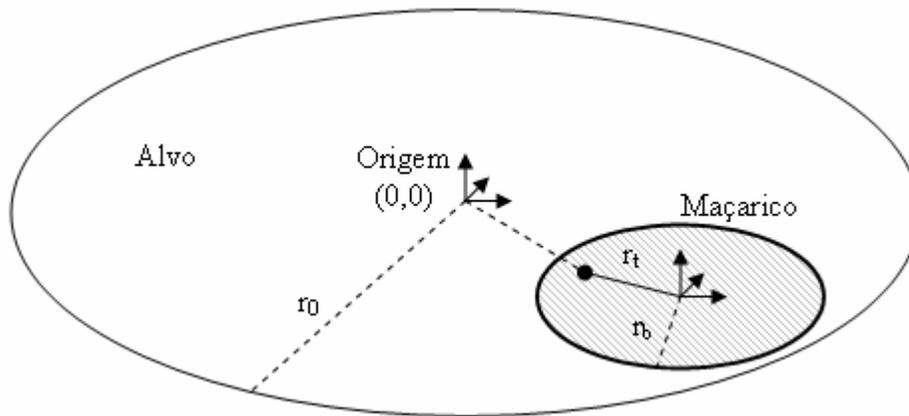


Figura 3.13. Determinação do raio da circunferência no referencial do alvo.

Nota-se que as equações cinemáticas para a rotação da preforma são idênticas às aplicadas no modelo matemático bidimensional.

3.4.3. Simulação do modelo matemático tridimensional

O modelo matemático tridimensional também foi simulado através do software MATLAB, utilizando como base o mesmo algoritmo para processamento das equações cinemáticas. Segundo a organização em blocos seqüenciais de processamento matemático, ilustrados na **Figura 3.14**, o programa desempenha as seguintes tarefas:

- **Módulo de temporização:** Idêntico ao modelo matemático bidimensional.
- **Módulo de rotação da preforma:** Idêntico ao modelo matemático bidimensional.
- **Módulo de deposição do soot:** Este Módulo é subdividido em dois blocos. O **Módulo do alvo** determina a geometria inicial da preforma e atualiza, a cada iteração, o valor de r para todo θ e ϕ . Já o **Módulo do maçarico** define os parâmetros de posição do centro do maçarico, e a função de deposição de *soot*. Finalmente, o **Módulo de deposição de soot** efetua a soma em coordenadas esféricas do alvo com a função de deposição, considerando a rotação do alvo a cada incremento no tempo.
- **Módulo de fabricação da preforma:** Idêntico ao modelo matemático bidimensional.

- Módulo de visualização de dados:** Responsável por apresentar a visualização gráfica das variáveis do processo. É interessante ressaltar que, uma vez que o MATLAB não oferece funções pré-programadas para esquematização gráfica de superfícies em coordenadas esféricas, foi desenvolvido um algoritmo que consiste em desenhar diversas camadas de projeção em r e θ , discretizadas em ϕ .

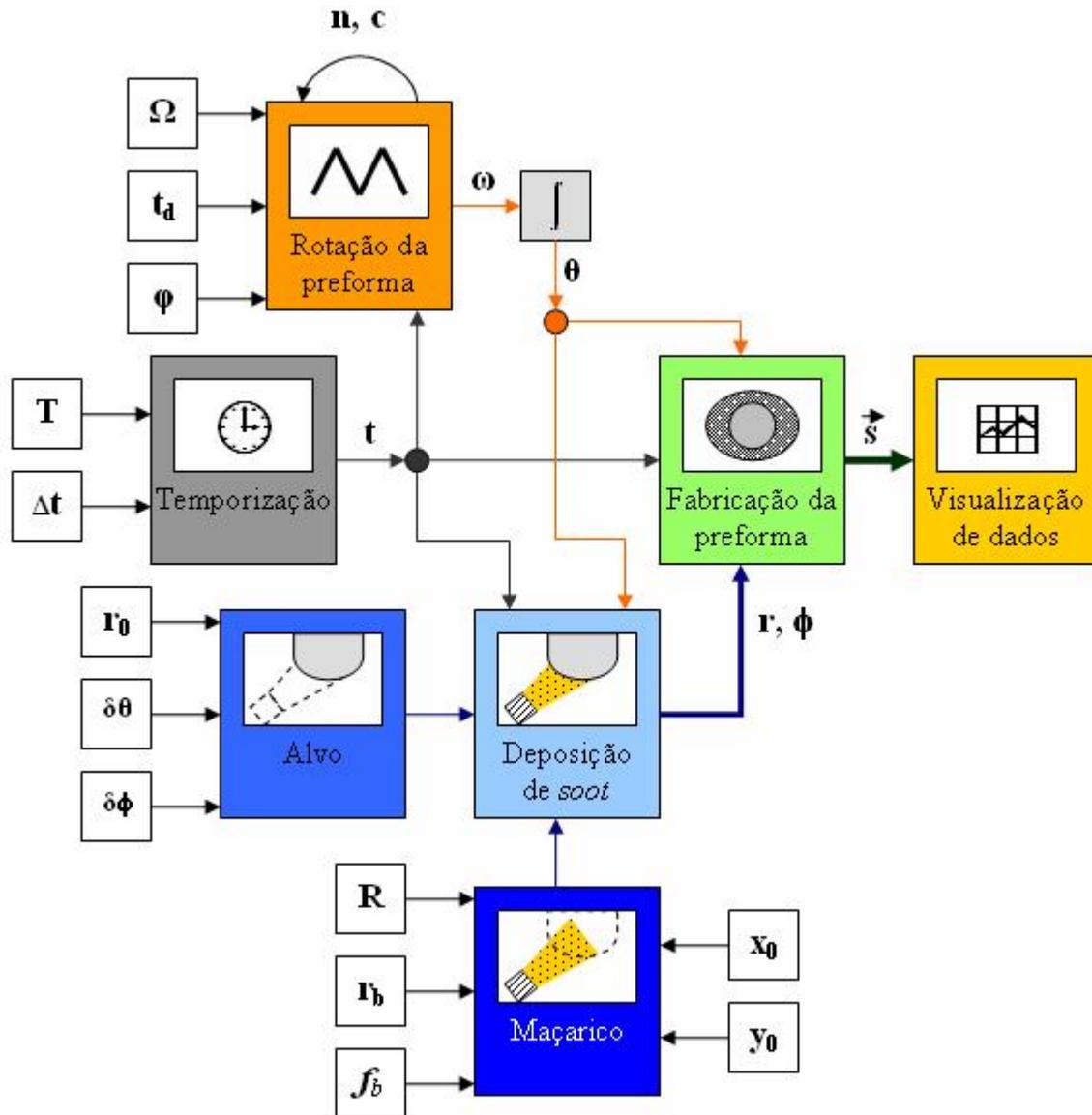


Figura 3.14. Diagrama de blocos correspondente ao software de simulação do modelo matemático tridimensional.

3.5. Automação do sistema de deposição

O método de fabricação de preformas elípticas e não-circulares foi implementado no sistema de deposição VAD atualmente instalado. Para isso, foi realizada a permutação do módulo de rotação constante por um sistema de rotação variável, conforme descrito nos tópicos posteriores.

3.5.1. Especificação do hardware

O sistema de rotação é composto por um motor de passo, governado por um módulo de controle da National Instruments. Uma vez que o mesmo controlador é destinado ao movimento de translação, e com o intuito de preservar a robustez do sistema, optou-se por utilizar o mesmo hardware previamente instalado, ou seja, foi efetuada apenas a substituição do software que promove o controle da rotação.

Foi empregado um motor de passo de cinco fases, da marca Oriental Motor/Vexta Step, cuja precisão é de 0,024 °/passo, o que garante uma boa resolução na variação da rotação.

No caso do controlador, utilizou-se de uma placa NI PCI-Step-4CX, com interface para acionamento de até quatro motores de passo. Apesar de antigo, o hardware se comportou adequadamente para os propósitos do projeto.

3.5.2. Elaboração do software

Para realizar a variação da velocidade de rotação da preforma, foi desenvolvido um software baseado na plataforma LabVIEW, da National Instruments, para o controle do motor de passo relativo ao movimento de rotação. O LabVIEW possui muitas vantagens que facilitam tanto o trabalho do programador quanto o do usuário. A programação, por exemplo, é orientada a objetos e realizada através de diagrama de blocos, o que permite que sejam desenvolvidos códigos muito mais intuitivos do que os algoritmos convencionais em linhas de comando. Além disso, os softwares desenvolvidos possuem interface simples e amigável, o que permite que usuário se adapte rapidamente com o ambiente do programa (Jamal, 1994). No caso do presente

projeto, foi utilizada a plataforma LabVIEW 5.1.1, juntamente com o pacote Motion Control, com funções prontas para controle de motores.

O controle da velocidade de rotação pode ser realizado tanto em função do tempo quanto em função do ângulo. No primeiro caso, o software utiliza um laço de comparação com o relógio do computador para efetuar a mudança da velocidade. No segundo caso, utiliza-se um comparador com o contador de passos do motor, disponibilizado pelo próprio LabVIEW, depois da devida conversão de unidades.

O ciclo de aceleração e desaceleração do motor é realizado através do acionamento e desligamento do mesmo. Inicialmente, quando $\theta = 0^\circ$, o motor é acionado para atingir uma velocidade-alvo de Ω , com uma aceleração α . O instante em que o motor atinge Ω coincide justamente com $\theta = 90^\circ$ (metade do ciclo), devido à escolha de α , de acordo com o perfil linear de variação de velocidade. Em seguida, o motor é desligado, efetuando um movimento desacelerado de α até atingir novamente o repouso, quando $\theta = 180^\circ$. Neste instante, é aplicado o tempo de atraso, ou seja, o software espera t_d segundos antes de reiniciar o ciclo. No caso de $t_d = 0$ s, o ciclo é repetido ininterruptamente.

Observa-se que todo o controle dos ciclos de variação de velocidade é realizado automaticamente, necessitando apenas que o usuário configure os parâmetros iniciais do processo. A interface do software, ilustrada na **Figura 3.15**, é composta por um módulo de controle de rotação para velocidade constante (“Constant Rotation”), utilizado principalmente nas etapas iniciais do processo de deposição pelo método VAD, como por exemplo, para o aquecimento da câmara; um módulo de controle de rotação para velocidade variável (“Variable Rotation”), de acordo com o modelo apresentado anteriormente; e indicadores gráficos de velocidade para monitoramento do processo. Para o módulo de velocidade constante, os parâmetros que podem ser ajustados são a velocidade inicial (“Initial Velocity”) e o sentido de rotação do motor (“Direction”). Também é possível alterar a velocidade do motor enquanto este estiver em movimento (função “Change Velocity”). No caso do módulo de rotação variável, os parâmetros que podem ser ajustados são: a velocidade Ω (“Maximum Velocity”), o sentido de rotação (“Direction”) e o tempo de atraso (“Delay Time”). A aceleração α também pode ser

ajustada (“Acceleration”), embora o software possa realizar automaticamente o ajuste deste parâmetro.

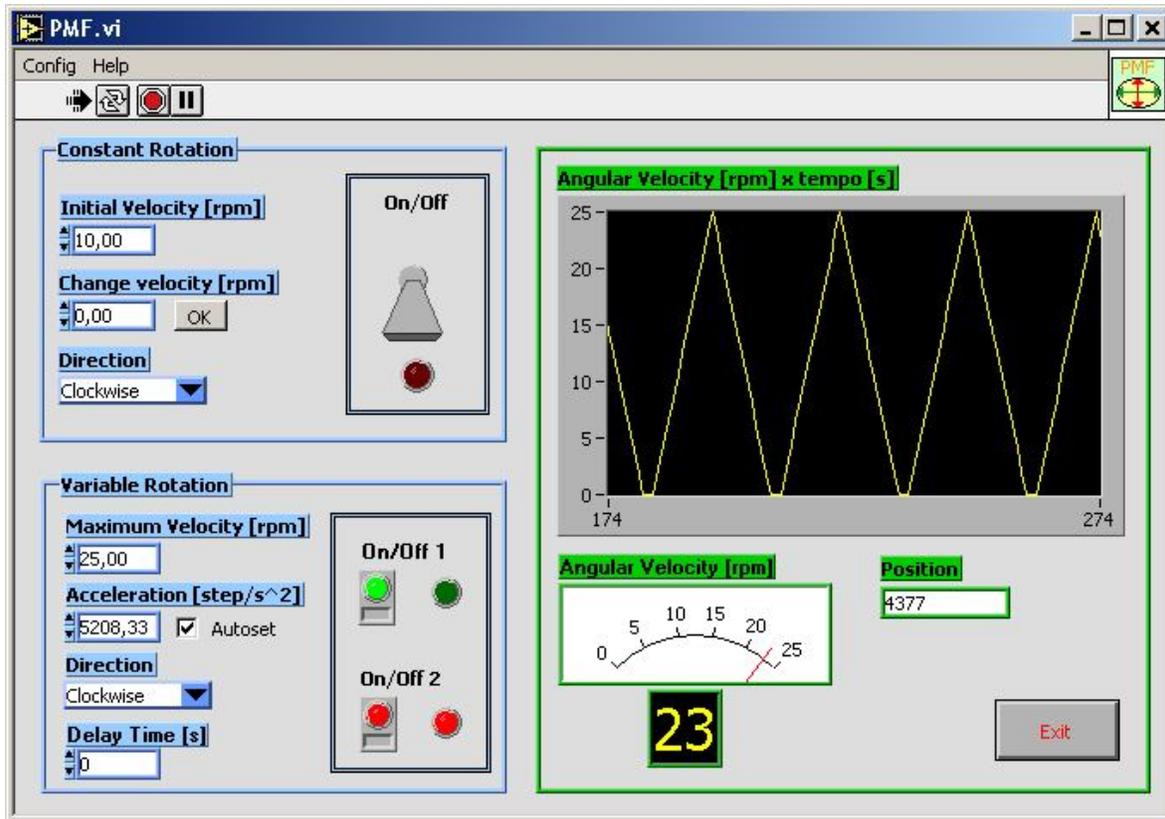


Figura 3.15. Interface do módulo de controle da rotação.

De forma geral, o funcionamento do software pode ser descrito na forma de uma máquina de estados, conforme demonstra a **Figura 3.16**. O motor encontra-se inicialmente desativado (Estado 0), podendo ser ajustado tanto para o modo de funcionamento com velocidade constante (Estado 1) ou variável (Estado 2), através da ativação (nível lógico 1) ou desativação (nível lógico 0) de um sinal de controle. O sinal de controle VV indica operação em velocidade variável, enquanto que o sinal VC implica na operação em velocidade constante. O modo de funcionamento do motor em velocidade variável possui prioridade sobre os outros estados para evitar qualquer interferência em seu funcionamento, visto que a interrupção dos ciclos de variação de velocidade poderia resultar em perda de posicionamento do motor, o que anularia o controle da elipsidade e inutilizaria a preforma. Da máquina de estados, observa-se também, que, caso o motor esteja operando em velocidade constante e é acionada a mudança para o modo de

velocidade variável, o software “memoriza” as condições de operação. Assim, ao sair do modo de velocidade variável, o programa restaura o motor para o modo de velocidade constante. Outra opção possível consiste em modificar a operação memorizada, por exemplo, desligando o modo de velocidade constante quando este está armazenado durante o modo de operação variável. O modo memorizado pode ser modificado sem que ocorra qualquer influência sobre o modo de velocidade variável, garantindo a robustez do sistema.

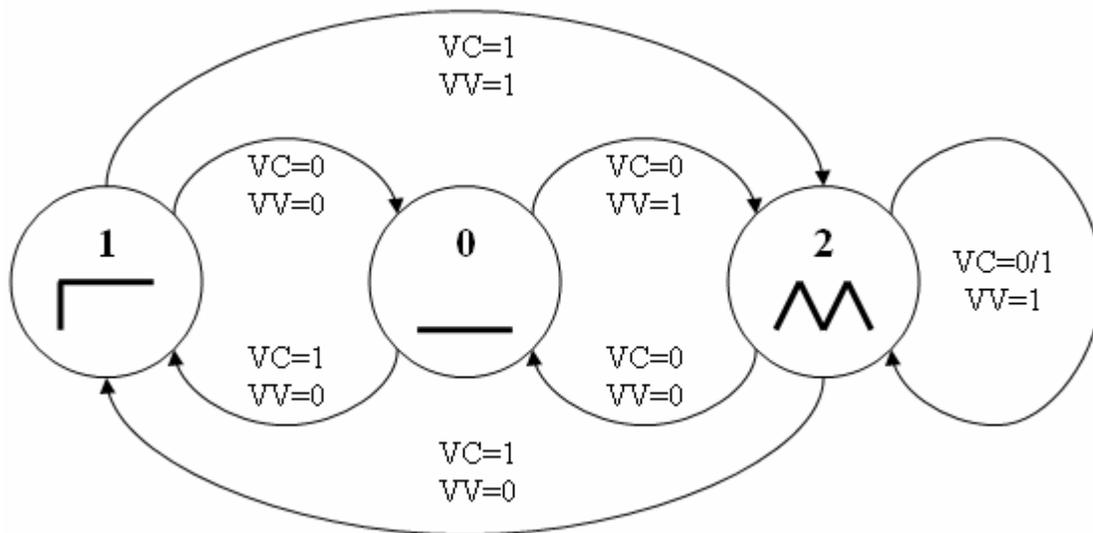


Figura 3.16. Máquina de estados que representa o funcionamento do software.

O software possui ainda uma interface complementar, ilustrada na **Figura 3.17**, para acesso às configurações avançadas, como, por exemplo, os parâmetros de “set-up” dos motores de passo. Esta interface encontra-se sempre em segundo plano, uma vez que não há necessidade de ajustar estes parâmetros com frequência, a não ser que sejam feitas modificações no hardware (como a substituição de motores). O parâmetro “Slot #” corresponde ao endereço do módulo de controle de motores, enquanto que o “Axis #” refere-se ao número do motor que está sendo requisitado pelo software. A resolução do motor, em graus por passo, deve também ser informada através desta interface utilizando o comando “Resolution”, uma vez que este valor é aplicado em rotinas de conversão de velocidade. Além disso, o programa permite escolher o modo de parada do motor através da variável “Stop Mode”. Esta parada pode ser efetuada através de desaceleração (“Decelerated Stop”), onde a velocidade é reduzida gradualmente até o repouso, da interrupção brusca do movimento (“Halt Stop”), ou até mesmo com o desligamento do motor (“Kill Stop”).

Neste trabalho, todos os experimentos foram realizados utilizando o “Decelerated Stop”. Outro controle disponível nesta interface é o ajuste do fator de aceleração (“Acceleration Factor”). Este parâmetro estipula a não-linearidade do perfil de aceleração do motor, ou seja, ao invés de efetuar o movimento com um perfil linear, os ciclos de aceleração e desaceleração podem ser ajustados de forma a realizar um perfil côncavo, aproximadamente parabólico. O acesso a este parâmetro foi restrito devido ao fato do modelo adotado para este projeto utilizar como base o perfil linear de aceleração. Observa-se também que a escolha do ângulo de ciclo ϕ foi ocultada nesta interface, com o intuito de prevenir equívocos durante a preparação dos experimentos.

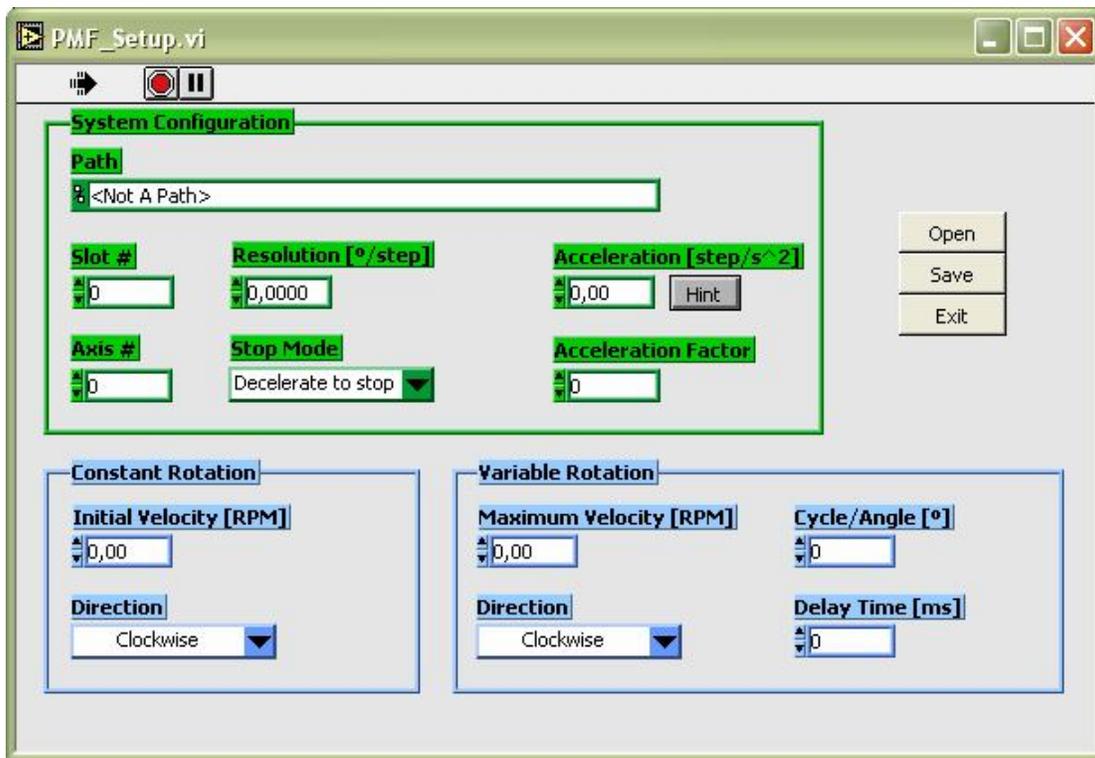


Figura 3.17. Interface do módulo de ajuste de parâmetros.

3.6. Estudo das variáveis de processo

A metodologia proposta no presente projeto permite produzir preformas com diversas geometrias de secção radial, de acordo com a seleção adequada das variáveis de processo. Especificamente, o tipo de geometria é ajustado através do ângulo de ciclo ϕ , enquanto que a diferença entre o raio das posições de maior e menor taxa de deposição é determinada pela

escolha da velocidade máxima de rotação Ω e do tempo de “delay” t_d . Dessa forma, torna-se extremamente conveniente o estudo do efeito particular de cada uma destas variáveis de processo, o que tornaria possível determinar os valores necessários para a obtenção de uma geometria específica, mesmo antes de realizar a deposição da preforma. Assim, para este estudo, foram consideradas abordagens analítica, através de simulação, e experimental, utilizando o sistema automatizado de deposição.

No caso de preformas elípticas, sabe-se que a razão entre os diâmetros máximo e mínimo é diretamente proporcional ao nível de birrefringência da fibra e, conseqüentemente, à capacidade de preservar a polarização. Neste sentido, define-se a proporção de diâmetros ε , expressa por

$$\varepsilon = \frac{D}{d}, \quad (3.12)$$

onde D e d são os diâmetros máximo e mínimo da preforma, respectivamente.

3.6.1. Estudo dos parâmetros de processo através de simulação do modelo matemático bidimensional

O processo de deposição foi simulado utilizando o modelo matemático bidimensional descrito previamente. O estudo das variáveis de processo baseou-se na variação de três parâmetros: Ω , t_d e φ . Por conveniência, os valores destas variáveis foram ajustados em intervalos predefinidos, ou seja, de 6 a 24 RPM no caso de Ω , e entre 0 e 10 s no caso de t_d , em virtude da adequação aos limites físicos do aparato experimental. Em relação a φ , a simulação foi conduzida utilizando valores de 180°, 120°, 90°, 72° e 60°, visando a fabricação de preformas elípticas, triangulares, quadrangulares, pentagonais e hexagonais, respectivamente.

Para as variáveis de temporização, optou-se por fixar o passo de simulação Δt em 0,01 s, e ajustar o tempo de simulação T de acordo com os valores de Ω , t_d e φ , de forma a controlar o número de revoluções executadas pelo software.

Finalmente, no caso dos parâmetros de *soot*, foram realizadas algumas tentativas para reproduzir a taxa de deposição experimental no modelo simulado, resultando em um valor razoavelmente adequado para a amplitude máxima da parábola de deposição R igual a 5×10^{-6} mm, considerando um alvo com raio inicial r_0 de 50 mm. Contudo, uma vez que o maçarico é disposto na direção axial com uma certa inclinação em relação ao eixo da preforma, optou-se por realizar testes utilizando valores para o ângulo de deposição γ de 90° , 135° e 180° , o que simularia, de forma simplificada, os efeitos da distância entre o alvo e o maçarico e do ângulo de inclinação.

Os dados resultantes da simulação foram analisados de acordo com os valores de D , d , e com a geometria obtida.

3.6.2. Estudo experimental dos parâmetros de processo

O sistema automatizado de deposição foi utilizado para a fabricação de diversas preformas de sílica-germânia, utilizando diferentes valores de Ω , t_d e φ .

A variação de Ω foi efetuada em um intervalo de valores entre 10 e 35 RPM, sendo que 25 RPM é a velocidade utilizada em deposições de preformas circulares. Nota-se que o intervalo foi escolhido de forma a garantir o funcionamento do motor de passo em condições normais, sem superaquecimento. No caso de t_d , foram utilizados valores entre 0 e 10 s. Por fim, foram aplicados valores de 180° , 120° e 90° para φ , visando a fabricação de preformas elípticas, triangulares e quadrangulares.

Para os outros parâmetros de processo, concernentes ao fluxo de gases, ângulo e posição do maçarico e controle da translação, foram atribuídos valores previamente dimensionados com base em deposições de preformas circulares, sempre visando as condições com maior eficiência de fabricação.

Em alguns casos, foram utilizados três valores diferentes de um parâmetro de processo em uma mesma deposição, ou seja, a preforma foi dividida em três zonas ao longo de seu

comprimento, sendo que para cada uma destas zonas foi atribuído um valor diferente de uma certa variável, resultando em diâmetros diferentes para cada um destes intervalos. Nestes casos, foram realizados estudos independentes para cada região. Nota-se, contudo, que em uma mesma posição apenas um dos parâmetros foi variado, implicando na fixação dos outros dois.

Depois de depositadas, as preformas *soot* foram submetidas aos tratamentos termoquímicos de consolidação e desidratação para que a análise geométrica fosse estendida tanto para as preformas porosas quanto para as preformas transparentes, além da determinação da taxa de variação da elipsidade de preformas porosas para transparentes. As variáveis de controle do tratamento termoquímico também foram ajustadas com base em experimentos anteriores, aplicados em preformas circulares. Dessa forma, a geometria final foi monitorada tanto para preformas *soot*, quanto para pós-consolidadas.

A análise da geometria das preformas elípticas foi realizada através do software ImageJ 1.36b, que consiste de um programa desenvolvido no National Institutes of Health para tratamento de imagens laboratoriais com código-fonte aberto e desenvolvido em linguagem Java, cuja interface é apresentada na **Figura 3.18**. Inicialmente, obteve-se a imagem dos perfis de maior e menor diâmetro e da secção radial, a partir da extremidade inferior, tanto para preformas *soot* quanto consolidadas, através de uma máquina fotográfica convencional. Em seguida, mediu-se, via software, os diâmetros máximo e mínimo em diferentes pontos igualmente espaçados ao longo do comprimento. Para preformas *soot*, cujo procedimento é ilustrado na **Figura 3.19**, iniciou-se as medidas considerando um ponto 4 cm distante a partir da ponta (região inferior), com espaçamento uniforme de 1 cm entre cada posição de medição. Já no caso de preformas transparentes, o ponto inicial partiu de 1,5 cm em relação à ponta, enquanto que o deslocamento entre pontos foi parametrizado em 0,5 cm, conforme ilustrado na **Figura 3.20**. A diferença entre os parâmetros de medição é justificada pelo encolhimento do *soot* após a consolidação. A partir dos diversos diâmetros obtidos, foi calculada a média dos diâmetros, resultando nos valores de D e d empregados no estudo das variáveis de processo.

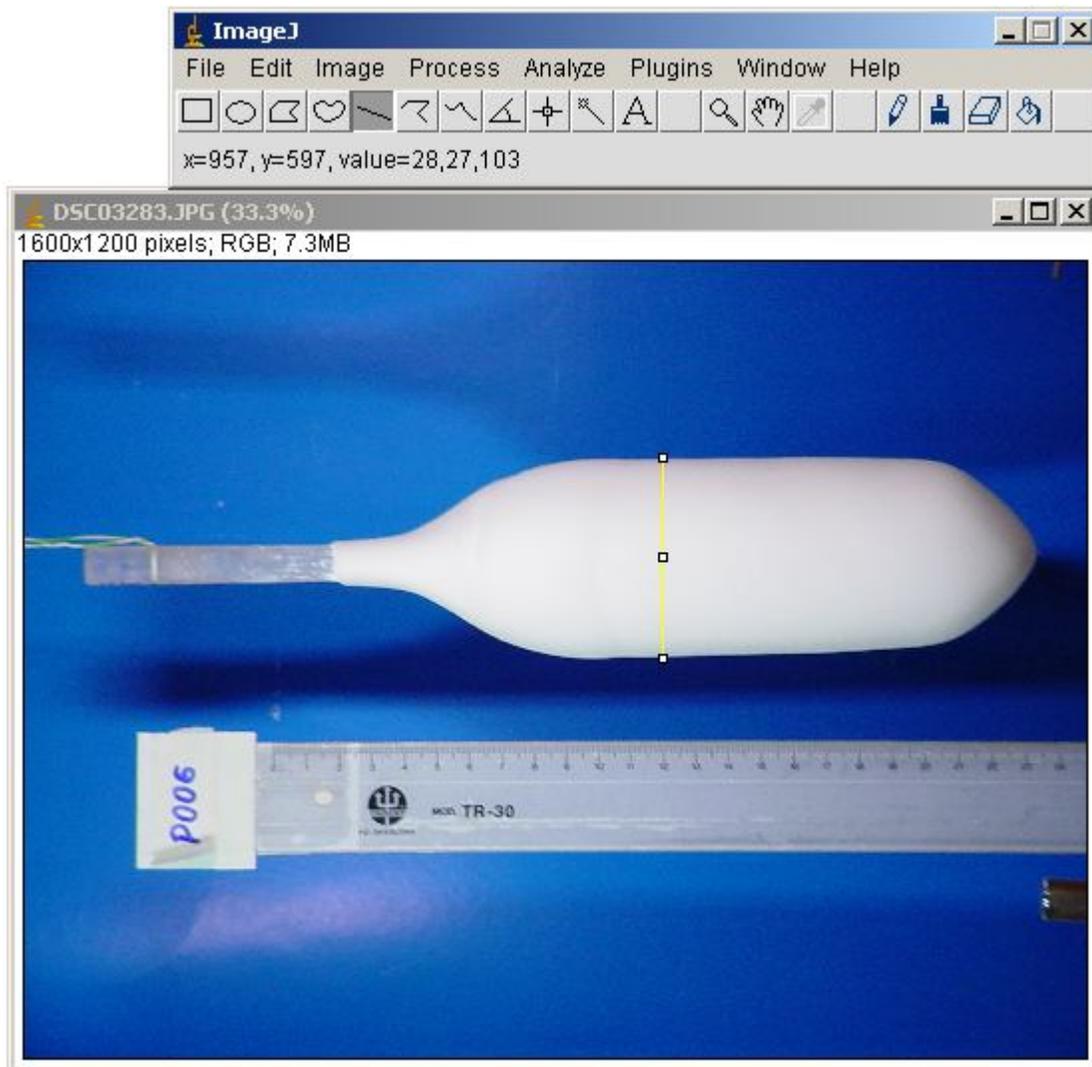


Figura 3.18. Interface do software ImageJ 1.36b.

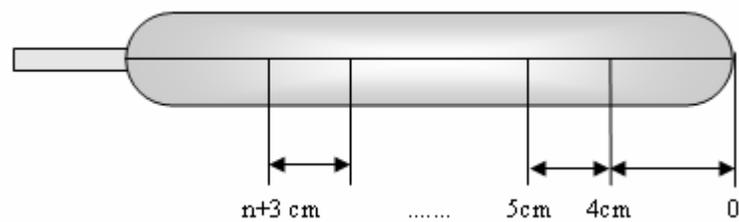


Figura 3.19. Parâmetros para medição de diâmetro em preformas *soot*.

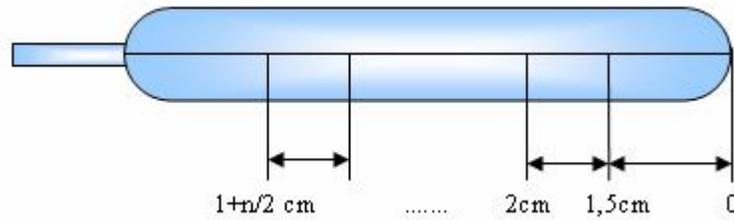


Figura 3.20. Parâmetros para medição de diâmetros em preformas consolidadas.

3.6.3. Estudo experimental dos parâmetros de processo através de simulação do modelo matemático tridimensional

Neste trabalho, a análise dos parâmetros de processo foi efetuada baseando-se majoritariamente no modelo matemático bidimensional. Dessa forma, adotou-se o modelo matemático tridimensional como uma ferramenta complementar para avaliação dos efeitos de deposição axial e radial simultaneamente.

As simulações foram conduzidas atribuindo valores de 6, 12 e 24 RPM para Ω , e atrasos de 0, 5 e 10 s para t_d . Também foram realizados testes com diferentes ϕ , ajustando esta variável para ângulos de 180°, 120°, 90°, 72° e 60°. Em relação aos parâmetros de temporização, analogamente ao modelo bidimensional, optou-se por utilizar um passo Δt em 0,01 s, e ajustar o tempo de simulação T para cada conjunto de Ω , t_d e ϕ , de sorte que o valor de T seja equivalente à uma revolução completa do alvo, considerando os tempos de atraso.

No caso do Módulo de deposição de *soot*, o alvo foi definido com um raio inicial r_0 de 50 mm, e incrementos angulares de $\pi/4$ para $\delta\theta$ e $\delta\phi$. No caso do maçarico, após uma análise prévia das variáveis de processo, optou-se por aplicar uma amplitude R de 0,0125 mm, raio da circunferência do cone r_b de 50 mm e deslocamentos x_0 e y_0 de 30 mm e 0 mm, respectivamente. Também foram realizados testes para f_b , avaliando as funções polinomial e Gaussiana. Para a função Gaussiana, os coeficientes de atenuação foram ajustados para $g_b = -0,01$ e $g_c = 20$.

Capítulo 4

Resultados e discussões

4.1. Simulação do modelo matemático bidimensional

4.1.1. Validação

Para comprovar a funcionalidade do modelo, inicialmente foi realizado um teste comparativo entre uma preforma circular e uma preforma elíptica, geradas através do software de simulação. Assim, os parâmetros de processo foram ajustados em $T = 20$ s, $\gamma = 135^\circ$, $\Omega = 6$ RPM e $t_d = 0$ s. A única diferença deve-se ao fato de que no caso da preforma circular a velocidade de rotação foi mantida constante em Ω durante toda a simulação, enquanto que para a preforma elíptica foram aplicados ciclos de variação de velocidade com $\varphi = 0$. A **Figura 4.1** e a **Figura 4.4** mostram o comportamento de ω ao longo do tempo para o caso de velocidade constante e variável, respectivamente. O efeito destes parâmetros pode ser observado em detalhes através da análise de θ e r . Se a velocidade é mantida constante, θ aumenta linearmente com o tempo, acarretando na distribuição homogênea da taxa de deposição ao longo da circunferência, resultando em um valor de r praticamente idêntico para todo θ , conforme mostram a **Figura 4.2** e a **Figura 4.3**. Por outro lado, ao aplicar os ciclos de variação de ω , a taxa de incremento de θ torna-se não-linear, resultando na diferença da quantidade de *soot* depositada nas regiões de velocidade máxima e mínima, de acordo com o apresentado na **Figura 4.5** e na **Figura 4.6**. Finalmente, a diferença na geometria pode ser claramente notada se compararmos a **Figura 4.7** e a **Figura 4.8**, que representam a secção radial das preformas circular e elíptica, respectivamente, obtidas através da simulação. O monitoramento de r acusa que para o caso circular, o diâmetro mínimo vale $d_C = 61,39$ mm e o diâmetro máximo vale $D_C = 61,39$ mm, resultando em uma razão

de diâmetros ϵ_C praticamente unitária. Por outro lado, para a preforma elíptica obteve-se $d_E = 56,83$ mm e $D_E = 66,08$ mm, com $\epsilon_E = 1,16$, o que comprova a validade da metodologia desenvolvida.

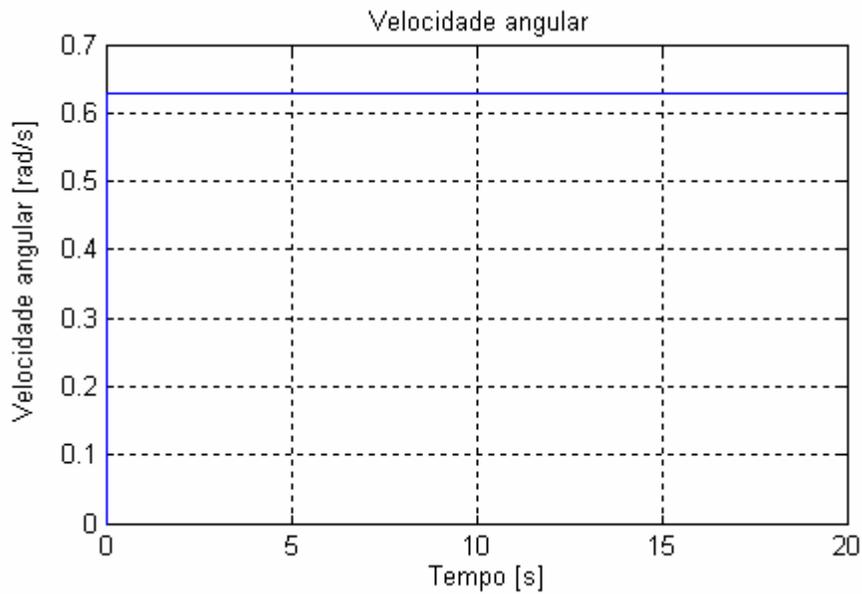


Figura 4.1. Velocidade de rotação constante ao longo do tempo.

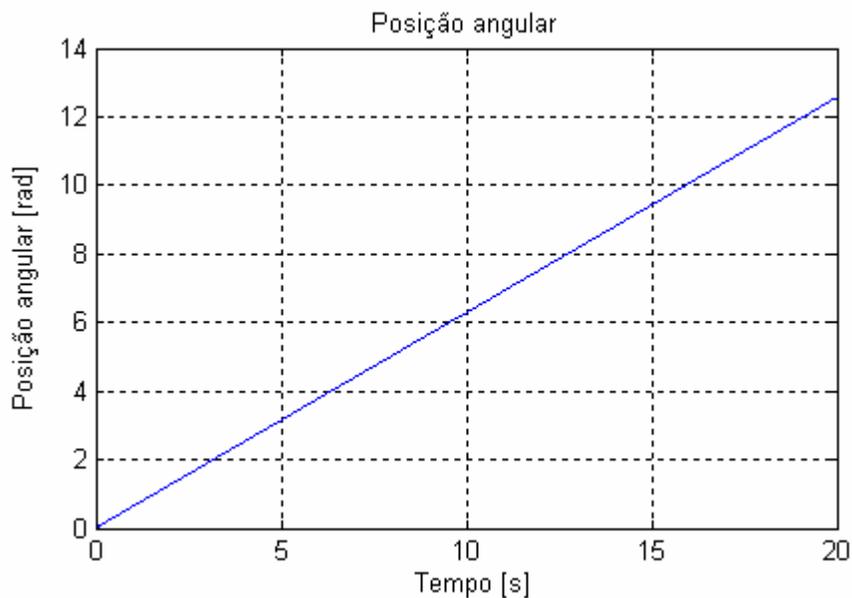


Figura 4.2. Variação da posição angular ao longo do tempo utilizando velocidade de rotação constante.

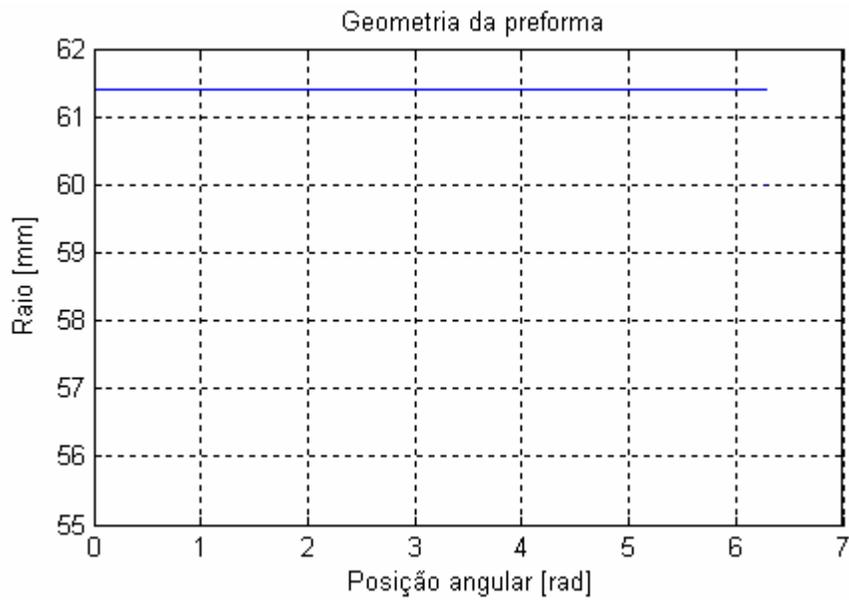


Figura 4.3. Variação do raio de uma preforma circular obtida através de simulação.

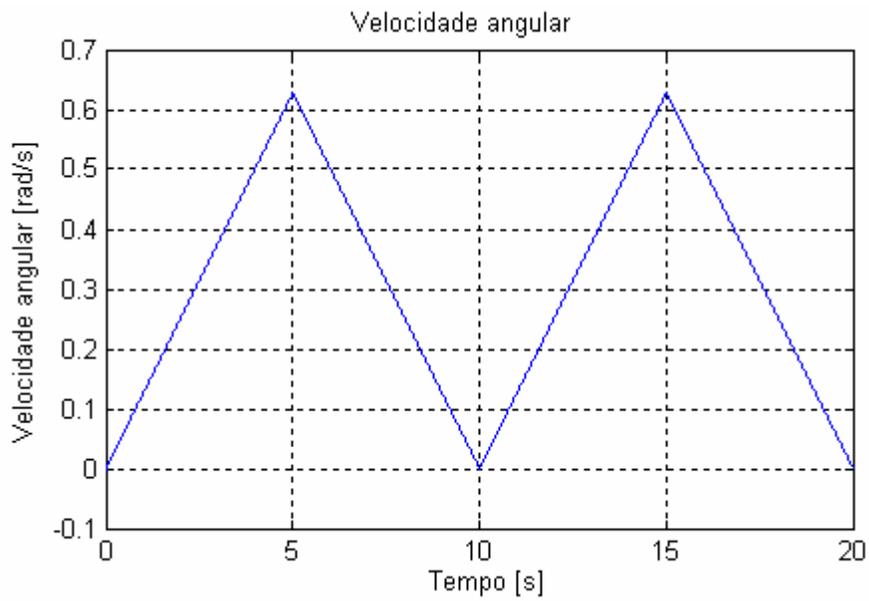


Figura 4.4. Variação da velocidade angular ao longo do tempo.

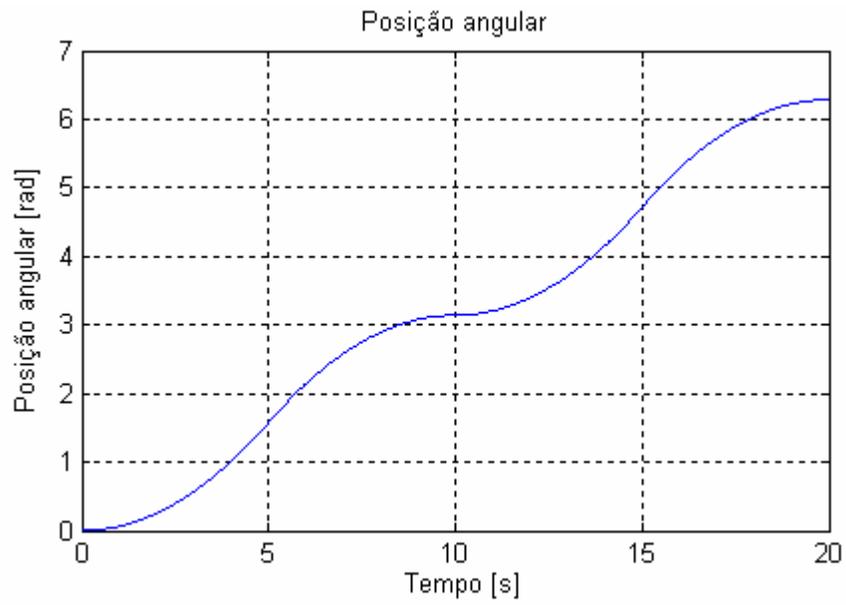


Figura 4.5. Variação da posição angular ao longo do tempo utilizando velocidade de rotação variável.

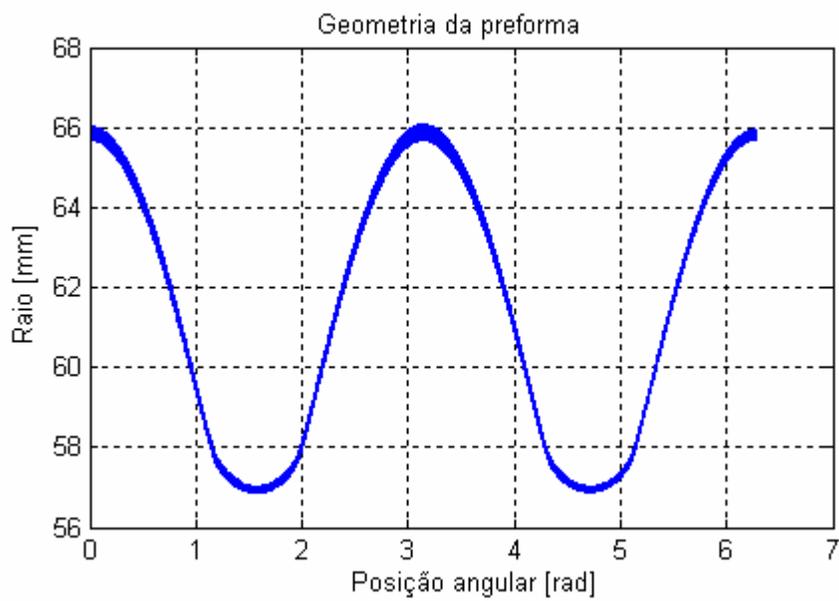


Figura 4.6. Variação do raio de uma preforma elíptica obtida por simulação.

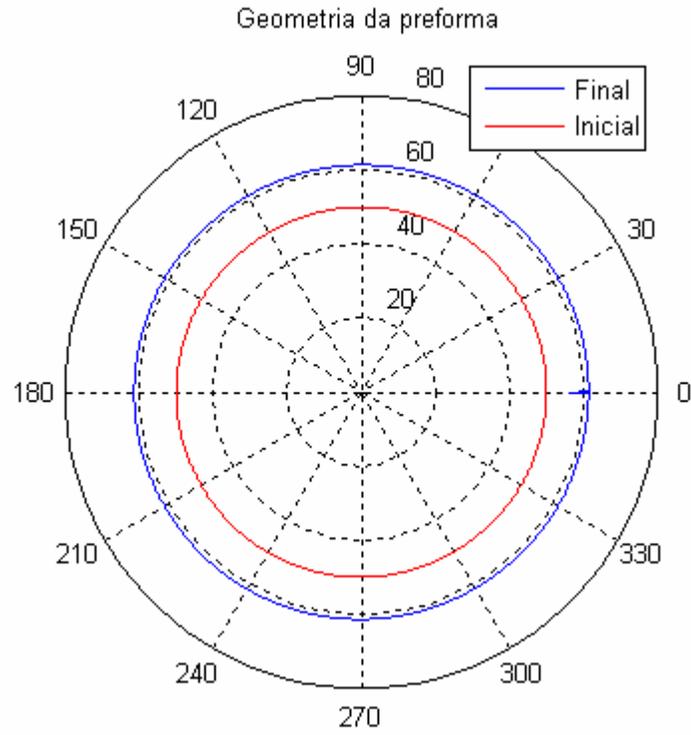


Figura 4.7. Geometria de uma preforma circular obtida por simulação.

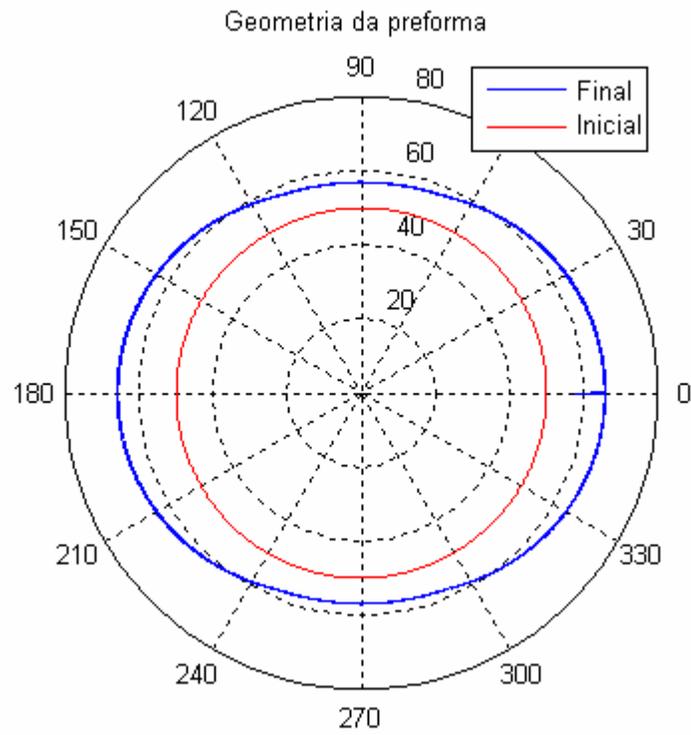
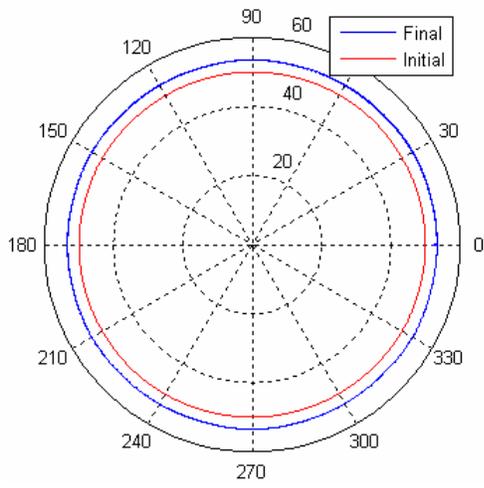


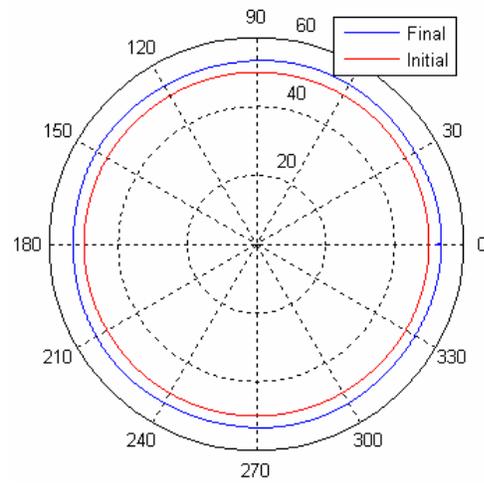
Figura 4.8. Geometria de uma preforma elíptica obtida por simulação.

4.1.2. Estudo do ângulo de ciclo e do ângulo de deposição para a obtenção de preformas não-circulares

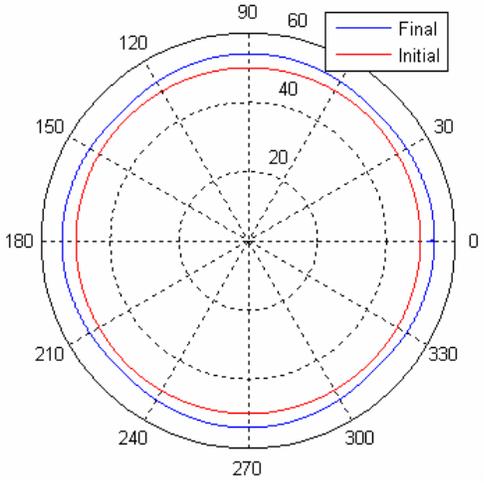
Diversas simulações foram realizadas para o estudo do efeito de φ e ψ na geometria final da preforma. Os parâmetros de processo foram ajustados em $T = 20$ s, $\Omega = 6$ RPM e $t_d = 0$ s, enquanto que, no caso de φ , foram atribuídos valores de 180° , 120° , 90° , 72° e 60° , e no caso de ψ aplicou-se valores de 90° , 135° e 180° . A **Figura 4.9** apresenta a geometria das preformas obtidas para $\gamma = 90^\circ$, da mesma forma que a **Figura 4.10** mostra os resultados para $\gamma = 135^\circ$, e a **Figura 4.11** para $\gamma = 180^\circ$. Observa-se que a taxa de deposição é incrementada com a utilização de valores maiores de ψ , conforme esperado. Contudo, o aumento do raio de ação do maçarico pode acarretar também na deposição de *soot* sobre as regiões de velocidade máxima, modificando significativamente a razão entre os diâmetros da preforma. Por exemplo, para $\varphi = 180^\circ$, o incremento de ψ resultou apenas no aumento da elipsidade. Por outro lado, no caso de $\varphi = 120^\circ$, a condição de $\gamma = 180^\circ$ atenuou criticamente a geometria triangular da preforma, devido à superposição indesejada das camadas de *soot*. A não-circularidade também foi atenuada para as simulações com $\varphi = 90^\circ$ e $\gamma = 135^\circ$, $\varphi = 72^\circ$ e $\gamma = 90^\circ$ ou 180° , e $\varphi = 60^\circ$ e $\gamma = 90^\circ$. Dessa forma, pode-se afirmar que existe um compromisso entre φ e γ , ou seja, torna-se conveniente avaliar as condições do maçarico de acordo com a geometria desejada. É preciso ressaltar, entretanto, que não é mérito deste trabalho proporcionar o controle sobre as condições do maçarico, uma vez que os experimentos são conduzidos a partir do ajuste do maçarico e do fluxo de gases na condição de máxima eficiência. Logo, optou-se por realizar todas as outras simulações fixando o valor de γ em 135° , visto que esta condição proporciona uma melhor adequação aos ajustes experimentais.



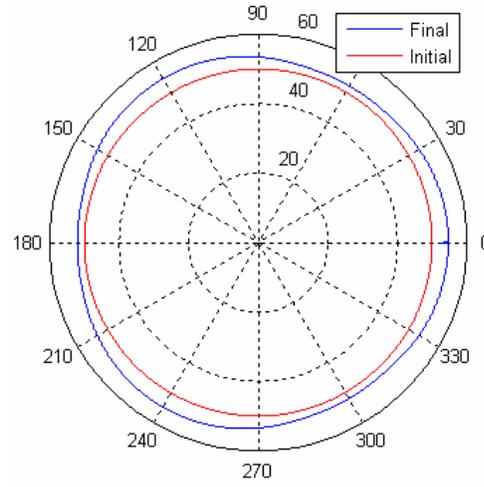
$\varphi=60^\circ$



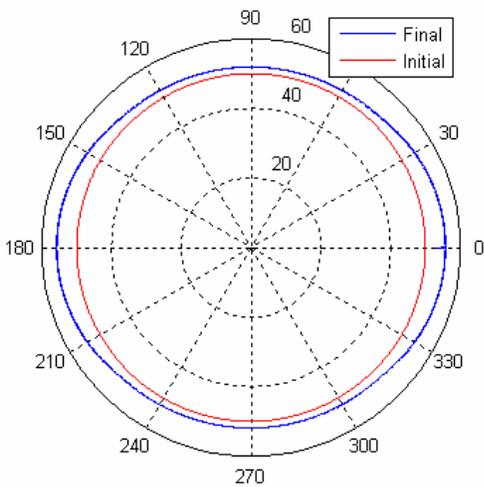
$\varphi=72^\circ$



$\varphi=90^\circ$



$\varphi=120^\circ$



$\varphi=180^\circ$

Figura 4.9. Geometria de preformas não-circulares para $\gamma = 90^\circ$.

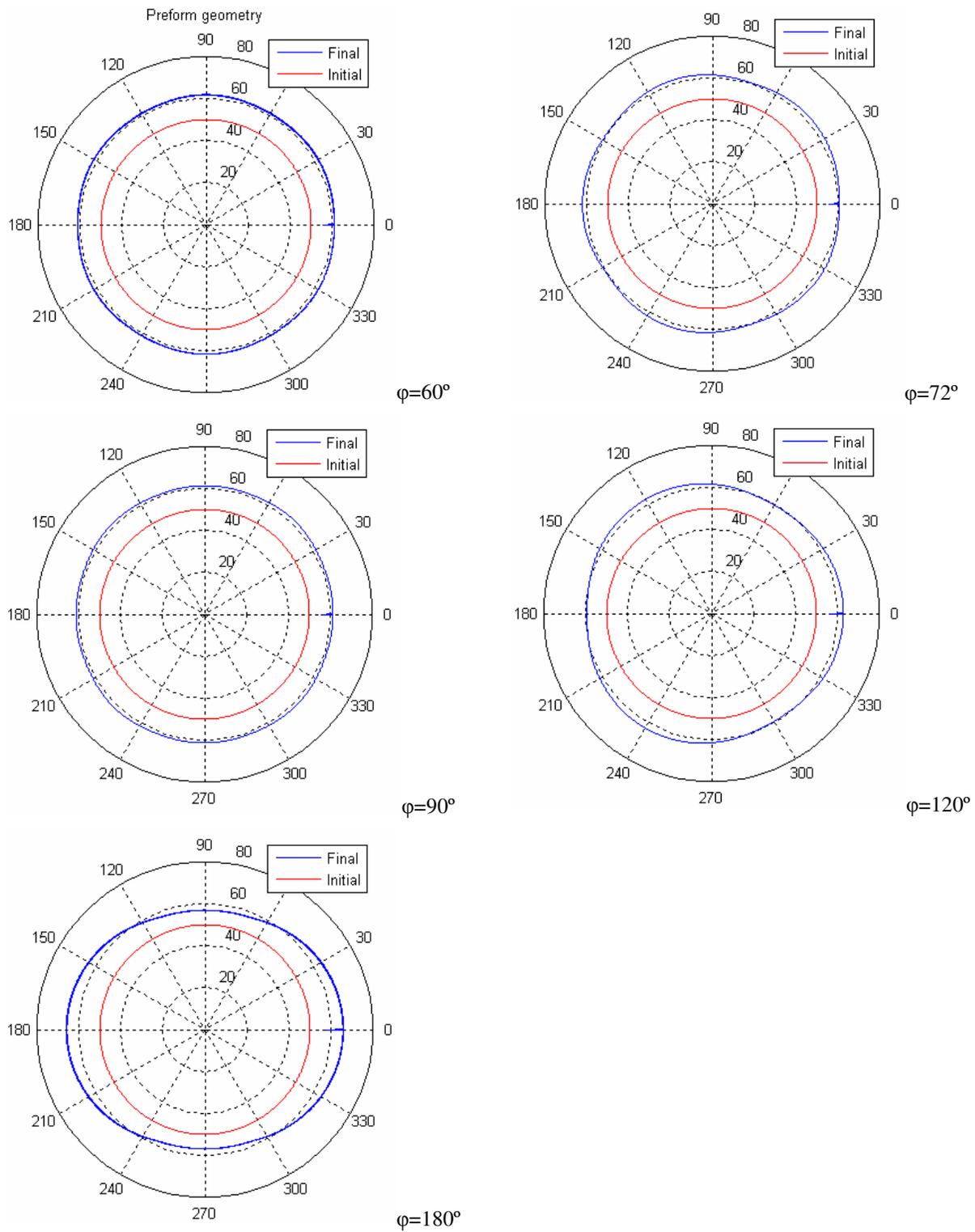


Figura 4.10. Geometria de preformas não-circulares para $\gamma = 135^\circ$.

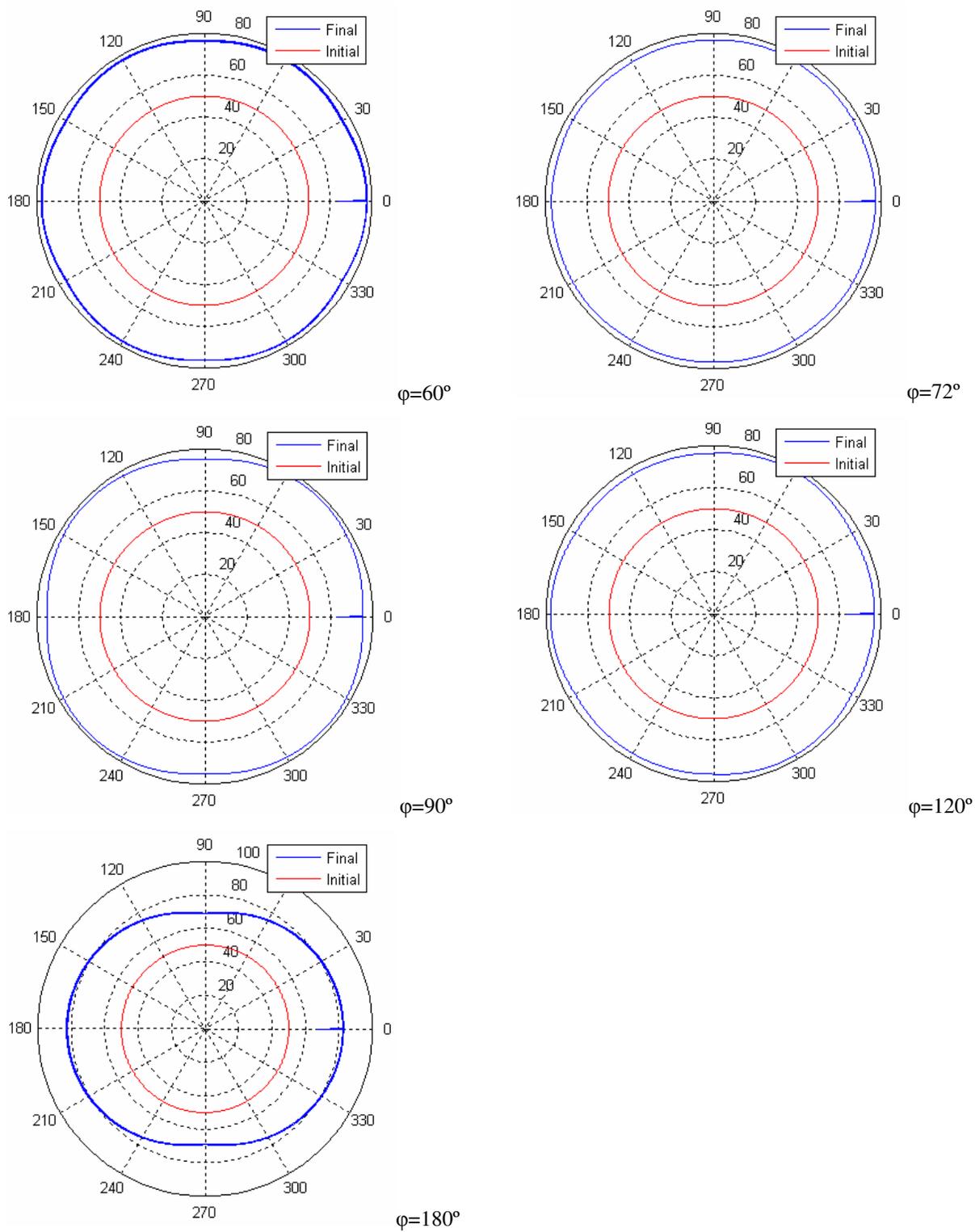


Figura 4.11. Geometria de preformas não-circulares para $\gamma = 180^\circ$.

4.1.3. Estudo do efeito dos parâmetros de processo na simulação de preformas elípticas

Os efeitos da velocidade máxima de rotação e do tempo de atraso na geometria final de uma preforma elíptica foram estudados através da variação dos valores, de 6 a 30 RPM com passo de 2 RPM no caso de Ω , e de 0 a 10 s com intervalo de 1 s no caso de t_d . Os outros parâmetros de simulação foram ajustados para $\gamma = 135^\circ$ e $\phi = 180^\circ$. Para fins de comparação, o tempo T foi corrigido para cada conjunto de Ω e t_d , de forma a fixar a simulação em uma revolução para todos os casos.

A **Figura 4.12** apresenta os valores de proporção de diâmetros obtidos através da variação de Ω . A análise deste gráfico permite afirmar que, para um número igual de revoluções, o aumento de Ω implica na redução de ε . Contudo, existe um certo compromisso entre a velocidade de rotação e o perfil de dopagem da preforma, sendo que valores de Ω maiores do que 20 RPM propiciam a obtenção de um perfil com melhor distribuição (Ono 2004). Dessa, pode-se afirmar que o controle da geometria através de Ω não é muito significativo, visto que, para rotações acima de 15 RPM, a diferença entre os valores máximo e mínimo de ε obtidos é muito pequena.

A **Figura 4.13** apresenta o efeito de t_d sobre ε . Observa-se que, para uma mesma quantidade de revoluções, a proporção entre os diâmetros da preforma é incrementada de maneira linear com o aumento de t_d , resultando em uma acréscimo de até 0,4 nos valores de ε , considerando o intervalo entre 0 e 10 s.

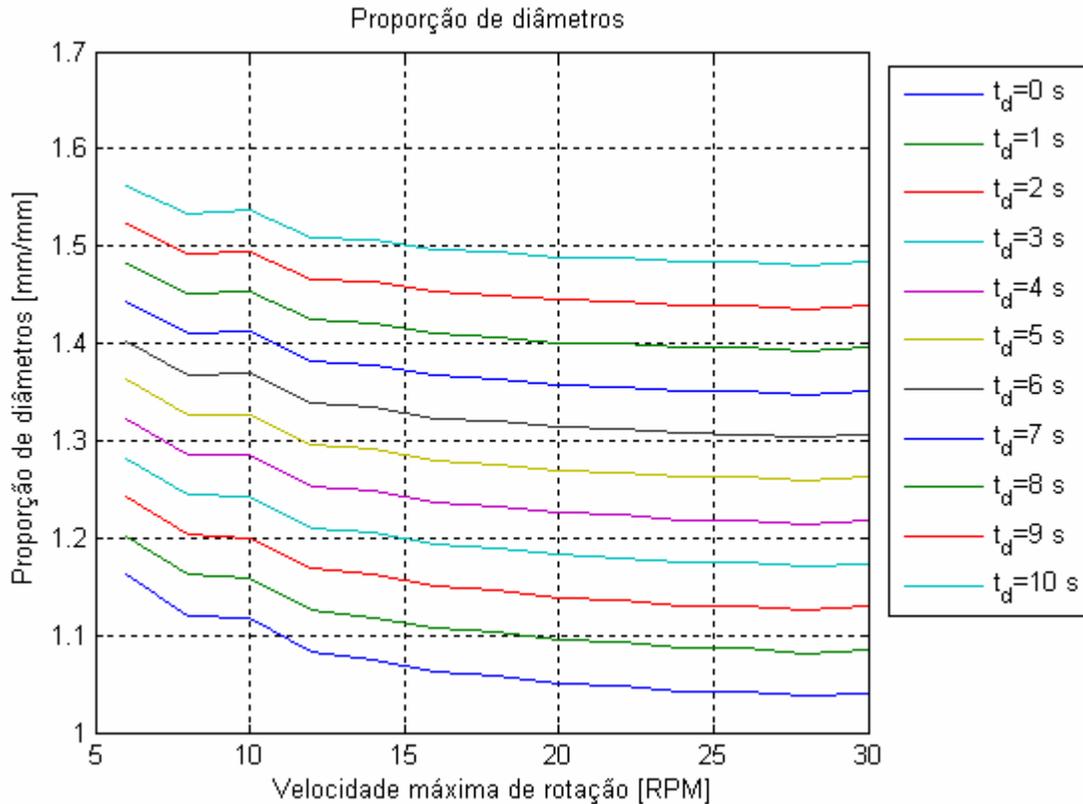


Figura 4.12. Efeito da velocidade máxima de rotação sobre a geometria de uma preforma elíptica.

Contudo, a utilização de valores elevados para t_d acarretou em um efeito não esperado sobre a geometria de uma preforma elíptica. A **Figura 4.14** ilustra a variação na geometria, fixando Ω em 20 RPM e aplicando valores para t_d de 0, 2, 5 e 10 s. Para $t_d = 0$ s, foi obtida uma preforma perfeitamente elíptica, mas com pouca diferença entre os diâmetros máximo e mínimo. Após alterar o valor de t_d para 2 s, observou-se apenas um aumento no diâmetro máximo, preservando a geometria elíptica. Por outro lado, para $t_d = 5$ s, nota-se a formação de uma região de depressão entre as posições de velocidade máxima e de repouso. Percebe-se ainda que esta depressão torna-se ainda mais acentuada no caso de $t_d = 10$ s. Visto que neste modelo a taxa de emissão de *soot* pelo maçarico é constante, a aplicação do tempo de “delay” implica diretamente no aumento da quantidade de *soot* depositada sobre as posições de repouso. Entretanto, uma vez que foi adotado o princípio da superposição, ao interromper a rotação da preforma, ocorre o incremento do raio do alvo através da superposição de camadas, cujo perfil é determinado pelos valores de R e γ . Dessa forma, como $\gamma = 135^\circ$, ou seja, o ângulo de deposição é menor do que 180° , durante o tempo de “delay” a deposição não afeta as posições de velocidade máxima. Logo,

o diâmetro mínimo é mantido enquanto o máximo é incrementado, o que justifica o surgimento da depressão. Apesar de ser um efeito indesejável para a fabricação de preformas elípticas, por outro lado, estas condições de processo permitem a obtenção de preformas para fibras do tipo “Dumbbell-core Fiber”. Estima-se ainda que estas irregularidades possam até mesmo ser eliminadas através da utilização de outros tipos de ciclo de variação da rotação, ou seja, com a substituição de movimentos de desaceleração bruscos pela redução suave da velocidade de rotação, utilizando acelerações variáveis.

Em relação à utilização de valores muito elevados de t_d , também é preciso considerar que a temperatura do alvo possui forte influência sobre o perfil de dopantes (Izawa e Sudo, 1987), ou seja, se uma das regiões da preforma for mantida sob ação do maçarico durante um longo intervalo de tempo, as posições que não são afetadas pela chama sofrerão um certo resfriamento, impossibilitando a homogeneização da temperatura do alvo e prejudicando o controle do perfil de índice de refração.

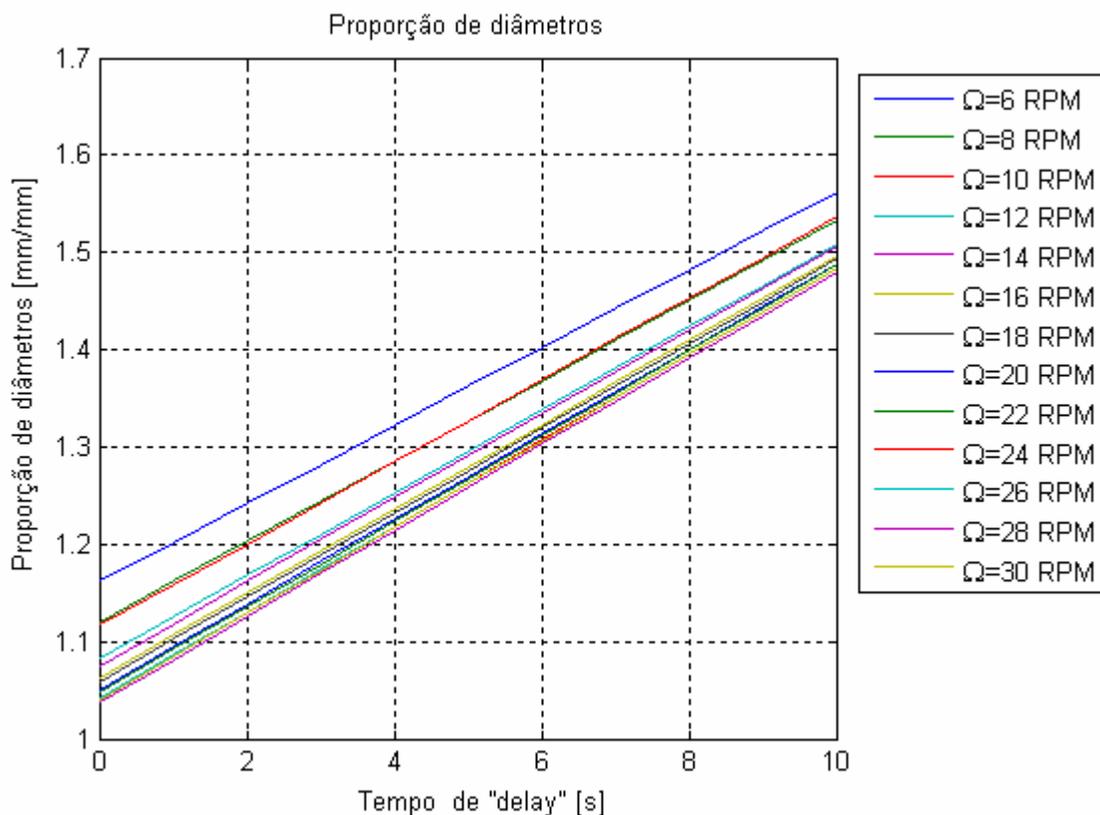


Figura 4.13. Efeito do tempo de “delay” sobre a geometria de uma preforma elíptica.

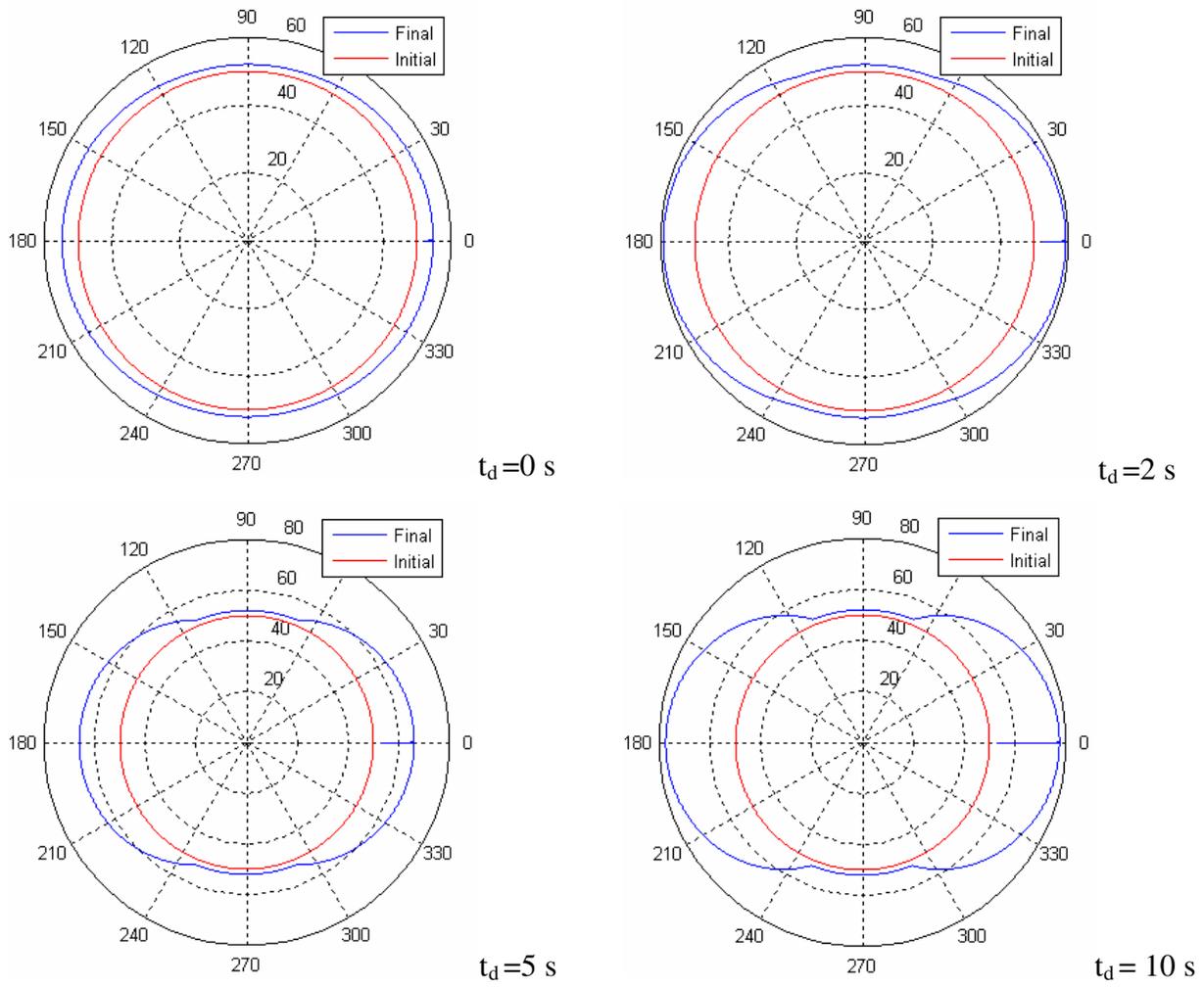


Figura 4.14. Relação entre o tempo de “delay” e a deformação da geometria elíptica.

4.1.4. Estudo do efeito dos parâmetros de processo na simulação de preformas não-circulares

A análise dos parâmetros para a fabricação de preformas com geometrias diferentes de circular e elíptica foi conduzida através da variação de φ , Ω e t_d . No caso do ângulo de ciclo, foram utilizados valores de 120° , 90° , 72° e 60° , o que corresponde a formatos com 3, 4, 5 e 6 posições de diâmetro maior, respectivamente. Por sua vez, o ajuste de Ω compreendeu os valores de 6, 12 e 24 RPM, enquanto que para t_d foram aplicados tempos de 0, 5 e 10 s. Complementarmente, fixou-se γ em 135° . Já o ajuste do tempo de simulação foi efetuado de forma a manter a simulação em apenas uma revolução.

De forma geral, os resultados obtidos permitem afirmar que os efeitos de Ω e t_d apresentam os mesmos comportamentos observados em preformas elípticas, ou seja, a diferença entre diâmetros aumenta de forma sutil com a redução de Ω , e de forma acentuada com o incremento de t_d . Para $\varphi = 120^\circ$, situação ilustrada na **Figura 4.15**, a aplicação de valores elevados para t_d resultou na formação da região de depressão relativa ao ajuste de γ , o que indica a obtenção de uma geometria que não é perfeitamente triangular. Entretanto, para $t_d = 0$ s a diferença entre os diâmetros máximo e mínimo é muito sutil, ou seja, esta condição também não garante a deposição de uma preforma triangular. Dessa forma, através da análise do gráfico, é possível afirmar que, para uma preforma triangular, o melhor balanceamento da geometria pode obtido com a utilização de valores de t_d próximos a 5 s, conforme mostra a **Figura 4.16**.

No caso de $\varphi = 90^\circ$, nota-se que a condição $\gamma = 135^\circ$ não permite produzir preformas com diferenças entre diâmetros máximo e mínimo muito significativas, conforme ilustrado na **Figura 4.17**. Mesmo com a utilização de valores de parâmetros de processo que propiciem o aumento do diâmetro, tais como $\Omega = 6$ RPM e $t_d = 10$ s, a relação entre φ e γ acarreta em uma superposição não desejada de camadas de soot, o que gera posições de máxima e mínima deposição intercaladas por depressões, resultando em uma preforma não-circular cuja geometria pouco se assemelha a um quadrado, conforme mostra a **Figura 4.18**, mas que seria interessante na fabricação de lasers de fibra “Double-Cladding”, por exemplo. Portanto, as análises por

simulação indicam que a fabricação de uma preforma quadrangular demanda também modificações nos parâmetros do maçarico, o que possibilitaria corrigir a correlação entre φ e γ .

As simulações para $\varphi = 72^\circ$, ilustradas na **Figura 4.19**, apresentaram resultados análogos à $\varphi = 120^\circ$, com ressalva de que as depressões são mais acentuadas a partir de $t_d = 5$ s. Logo, para geometrias com maior regularidade, indica-se a utilização de valores de t_d um pouco menores do que 5 s, conforme mostra a **Figura 4.20**.

Finalmente, para $\varphi = 60^\circ$, a variação dos parâmetros de processo também não permite obter preformas com diferenças de diâmetros muito grandes, assim como apresentado na **Figura 4.21**. Contudo, devido à relação harmoniosa entre φ e γ , os resultados de simulação indicam que, para valores de t_d diferentes de 0 s, é possível obter preformas com geometrias próximas a hexágonos. Para a condição $t_d = 10$ s, observa-se somente a formação de cavidades discretas que, na prática, não influenciam prejudicialmente no formato, conforme mostra a **Figura 4.22**.

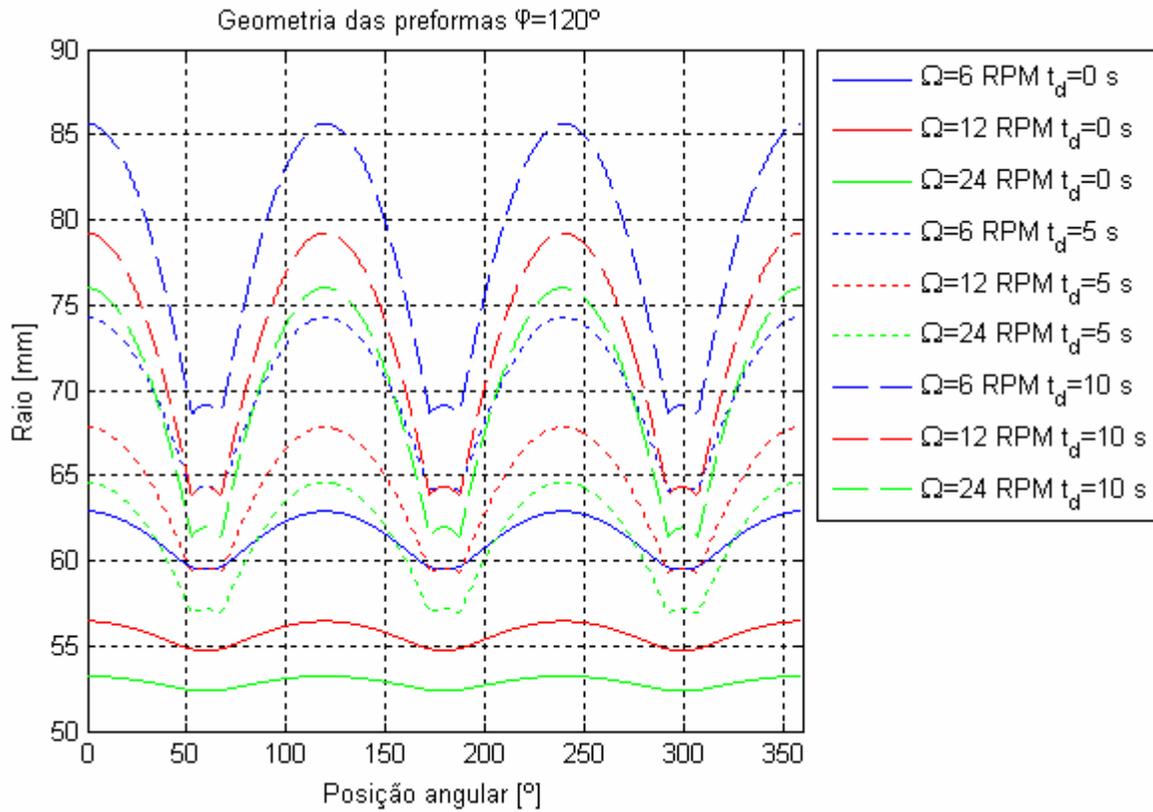


Figura 4.15. Efeito dos parâmetros de processo na variação do raio de uma preforma para $\varphi = 120^\circ$.

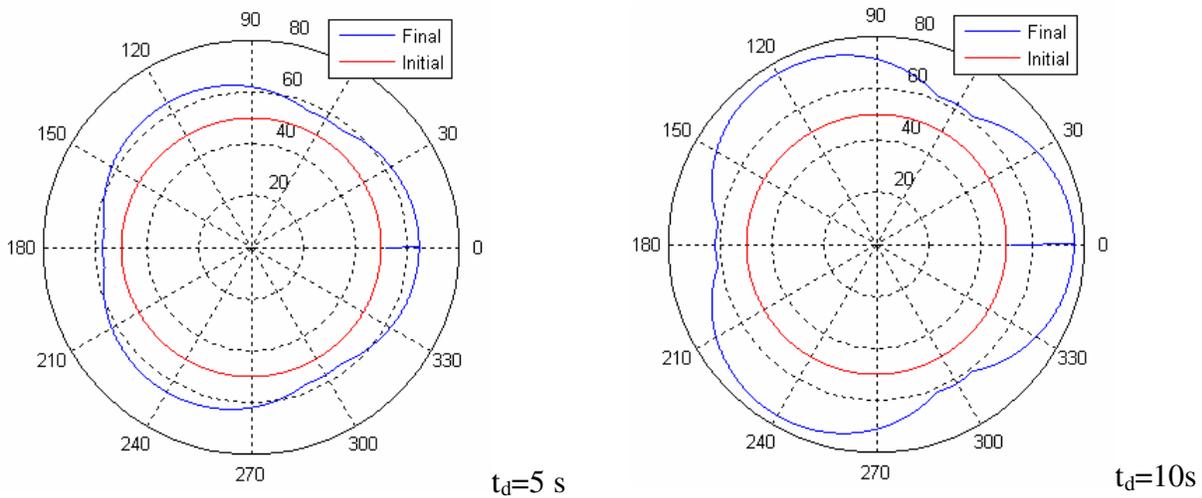


Figura 4.16. Geometrias de preformas obtidas para $\varphi = 120^\circ$ e $\Omega = 24\text{ RPM}$.

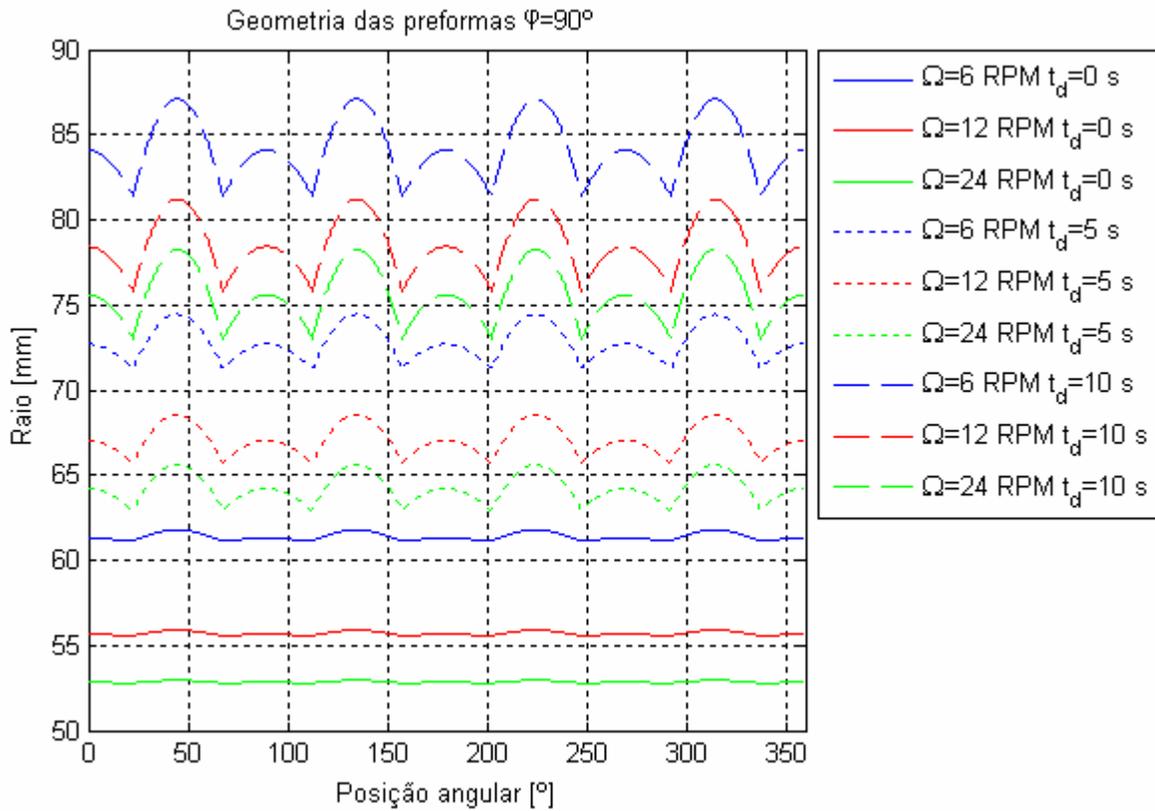


Figura 4.17. Efeito dos parâmetros de processo na variação do raio de uma preforma para $\varphi = 90^\circ$.

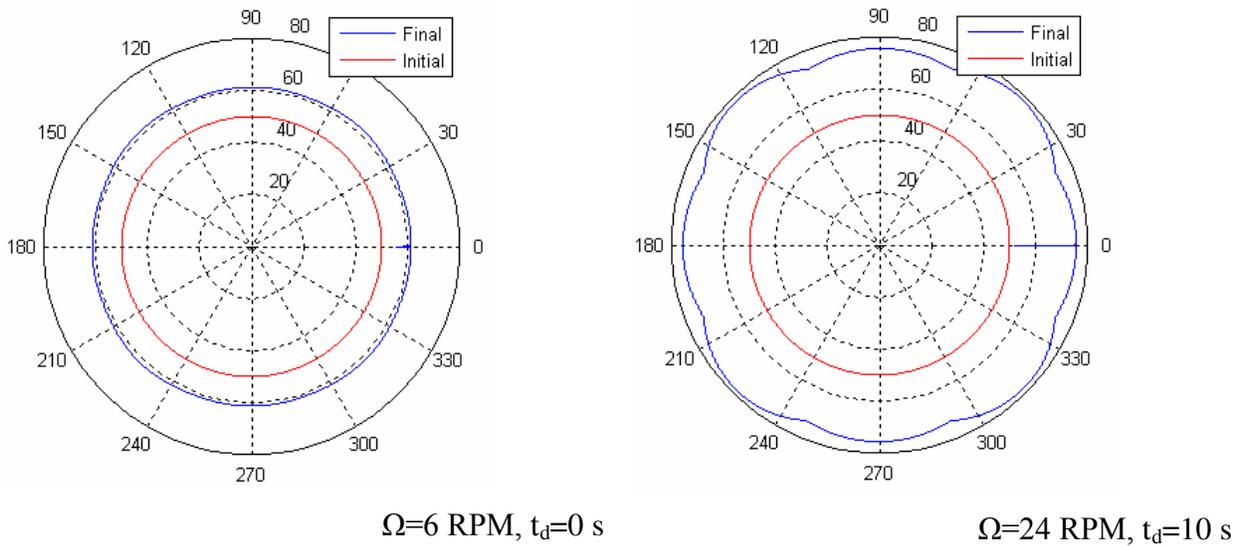


Figura 4.18. Geometrias de preformas obtidas para $\varphi = 90^\circ$.

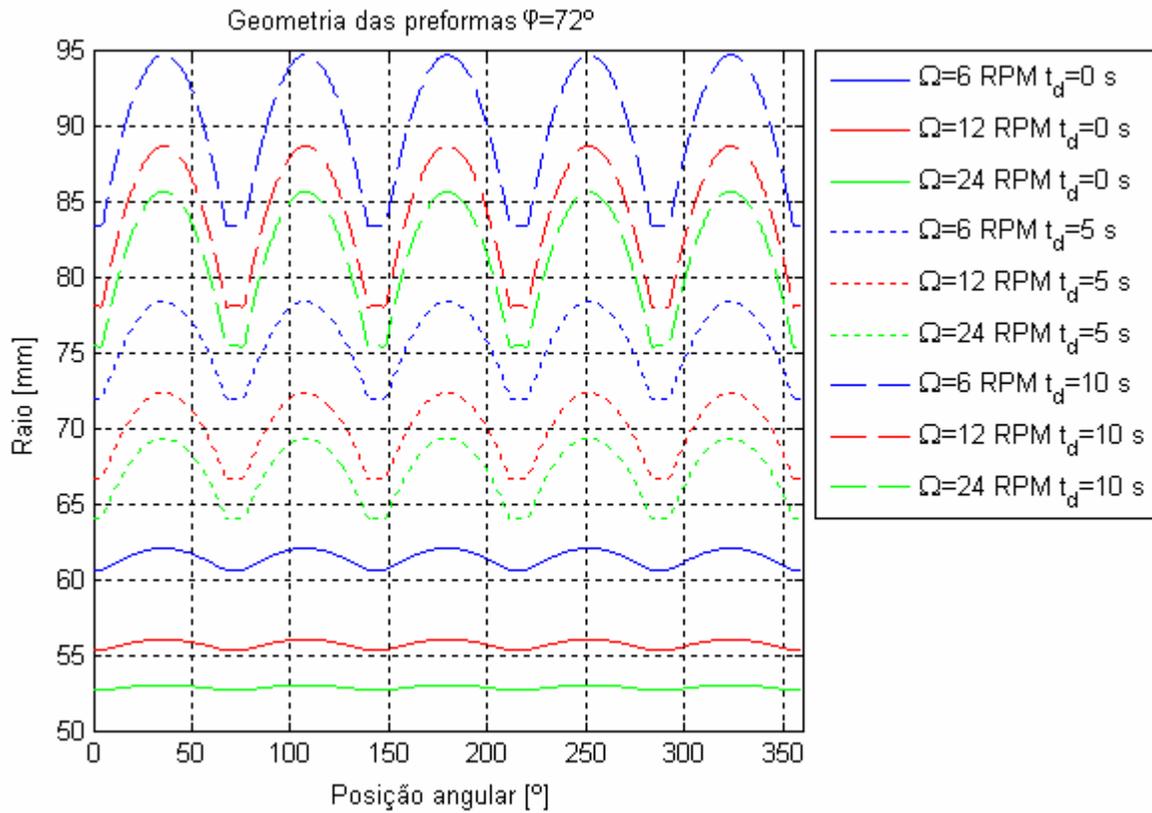


Figura 4.19. Efeito dos parâmetros de processo na variação do raio de uma preforma para $\varphi = 72^\circ$.

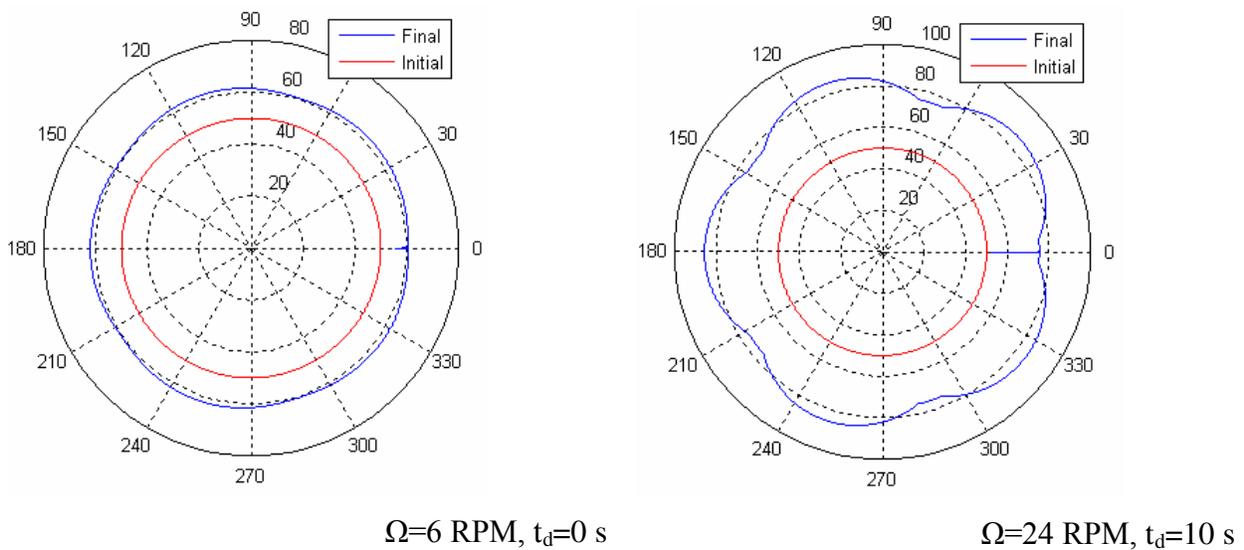


Figura 4.20. Geometrias de preformas obtidas para $\varphi = 72^\circ$.

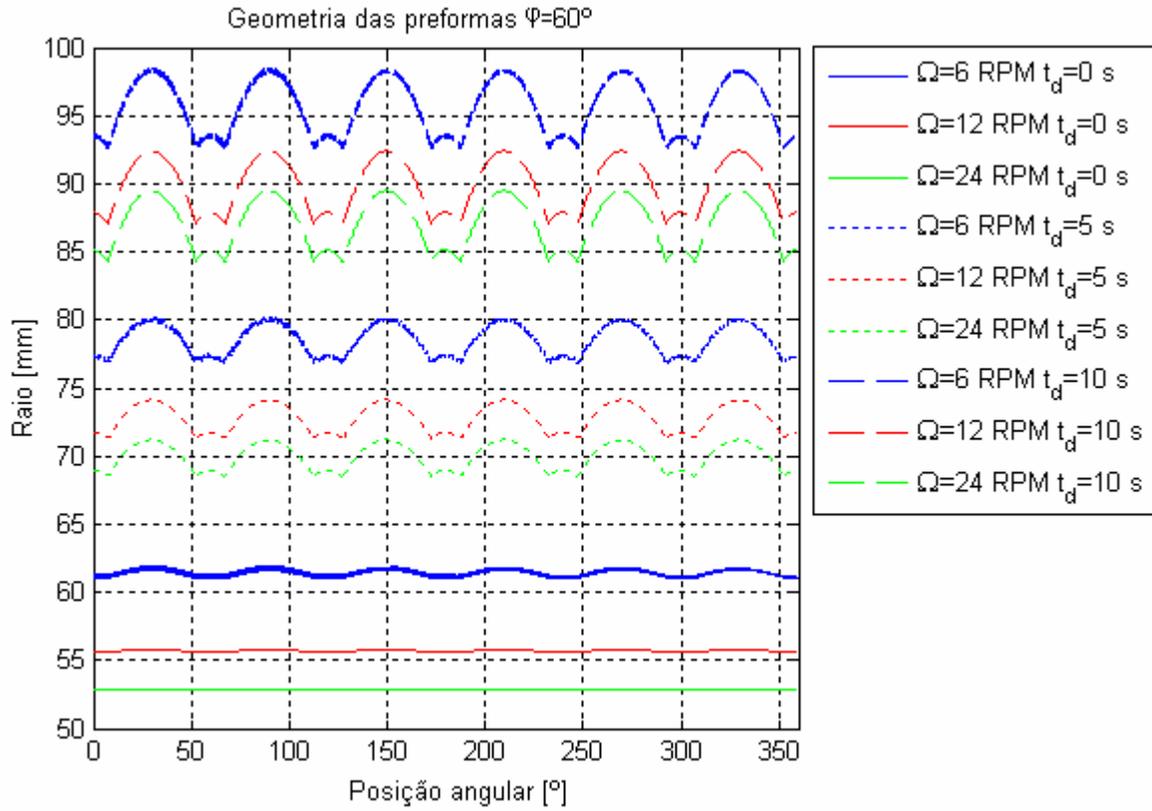


Figura 4.21. Efeito dos parâmetros de processo na variação do raio de uma preforma para $\phi = 60^\circ$.

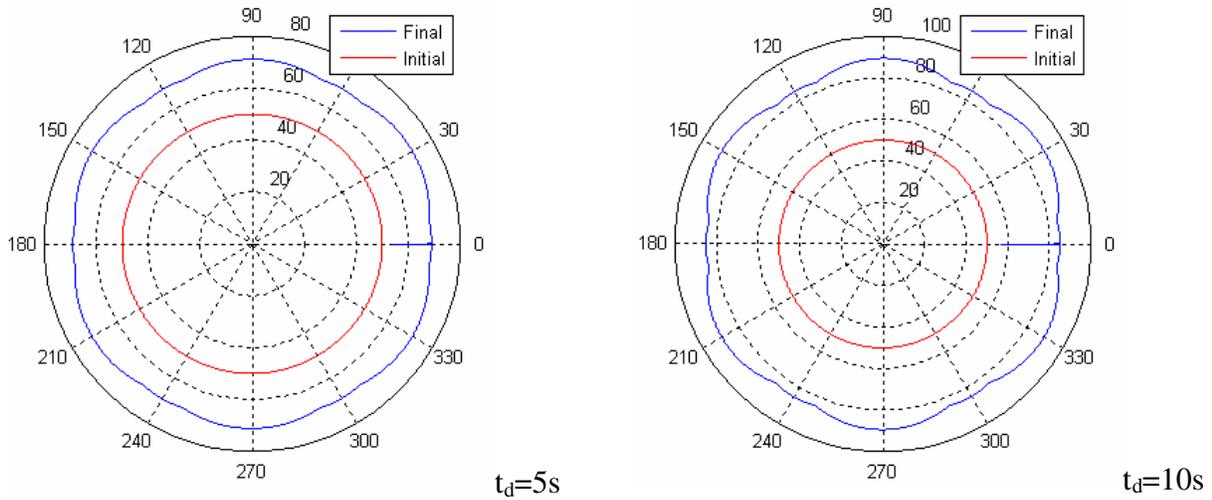


Figura 4.22. Geometrias de preformas obtidas para $\phi = 60^\circ$ e $\Omega = 24$ RPM.

4.2. Deposição de preformas

4.2.1. Desempenho do sistema de controle de rotação

Os testes realizados com o sistema de automação revelaram resultados diferentes conforme o método de controle da velocidade angular escolhido. Aplicando-se o método de variação da velocidade de acordo com o tempo, o motor apresentou um erro grande de posicionamento angular após um certo período de operação, com uma defasagem de cerca de 6° a cada 30 voltas completas, um resultado contrastante com precisão do motor de passo. A geometria de uma preforma depositada com esta metodologia, tanto no caso poroso quanto no transparente, apresentou-se circular, não oferecendo utilidade na fabricação de PMF. O principal problema observado neste caso é o erro de sincronização do controle de pulsos para o motor, com o relógio do computador. Os atrasos devido ao tempo de processamento da CPU (lembrando-se que o software de controle de rotação é executado simultaneamente ao sistema de monitoramento de diâmetro da preforma), conjugados com o tempo de resposta de hardware acarretaram nas falhas de sincronização. Este problema poderia ser corrigido através da utilização de um *encoder* para a realimentação do posicionamento angular. Entretanto, esta medida não foi necessária, visto que o método de variação de velocidade em função do tempo foi abandonado neste projeto, devido às suas desvantagens.

Em contrapartida, o método de variação da velocidade em função do ângulo mostrou-se extremamente eficaz, apresentando um erro de posicionamento nulo, o que garante a geometria não-circular da preforma. A variação de velocidades também não provocou sobreaquecimento no motor como era esperado, visto que o motor era habilitado e desabilitado várias vezes durante um longo período de tempo, provando que o método pode ser utilizado sem que ocorra qualquer problema no motor de passo. Desta forma, todas as preformas produzidas para este projeto, com exceção de uma, foram depositadas com o método de variação da velocidade em função do ângulo.

Analisando o comportamento do software desde o início de sua implementação até o final do projeto, praticamente não foram observados problemas durante a sua operação, comprovando

a sua robustez. O custo de processamento da CPU para o funcionamento do programa mostrou-se relativamente baixo, o que permitiu que o programa pudesse ser executado juntamente com os outros softwares utilizados pelo laboratório (como, por exemplo, o software responsável pelo monitoramento e controle da translação da preforma e outros aplicativos, como processadores de imagens e softwares auxiliares ao sistema operacional) sem que ocorresse nenhuma interferência entre eles.

4.2.2. Deposição e consolidação de preformas elípticas

Foram produzidas 7 preformas elípticas, utilizando diferentes valores para as variáveis de processo. Para fins de identificação, as preformas foram nomeadas com a letra ‘P’ seguida de sua numeração. Os resultados estão expressos em função dos valores de D , d , e ϵ , sendo que aplica-se o sub-índice $_{soot}$ para preformas porosas e $_{cons}$ para preformas consolidadas.

A preforma P001 foi depositada utilizando o método de controle da velocidade em função do tempo, cujos problemas já foram discutidos no tópico anterior. Em virtude do erro de posicionamento acumulado, o resultado final foi uma preforma circular, o que demonstra a ineficiência desta sistemática de controle. Esta deposição foi efetuada com um fluxo de SiCl_4 de 150 sccm (cm^3/min) e um fluxo de GeCl_4 de 50 sccm. As variáveis de processo utilizadas foram $\Omega = 25$ RPM e $t_d = 0$ s. A **Figura 4.23** apresenta a imagem de P001 durante a deposição, onde não foi constatada nenhuma diferença de diâmetros.

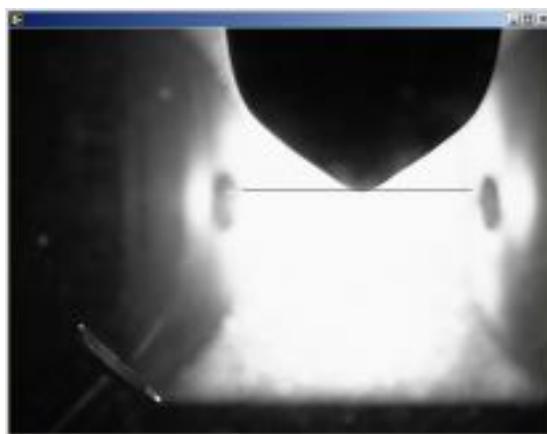


Figura 4.23. Imagem da preforma P001 durante a deposição.

A partir da preforma P002, apresentada na **Figura 4.24**, foi utilizado o software de controle de velocidade de acordo com o posicionamento angular. A deposição foi realizada com um fluxo de SiCl_4 de 106 sccm e um fluxo de GeCl_4 de 39 sccm, $\Omega = 25$ RPM e $t_d = 0$ s. Contudo, o processo foi interrompido devido ao entupimento do maçarico. Até o momento em que foi realizado, observou-se uma diferença pronunciada entre os diâmetros da preforma, comprovando a efetividade do método.

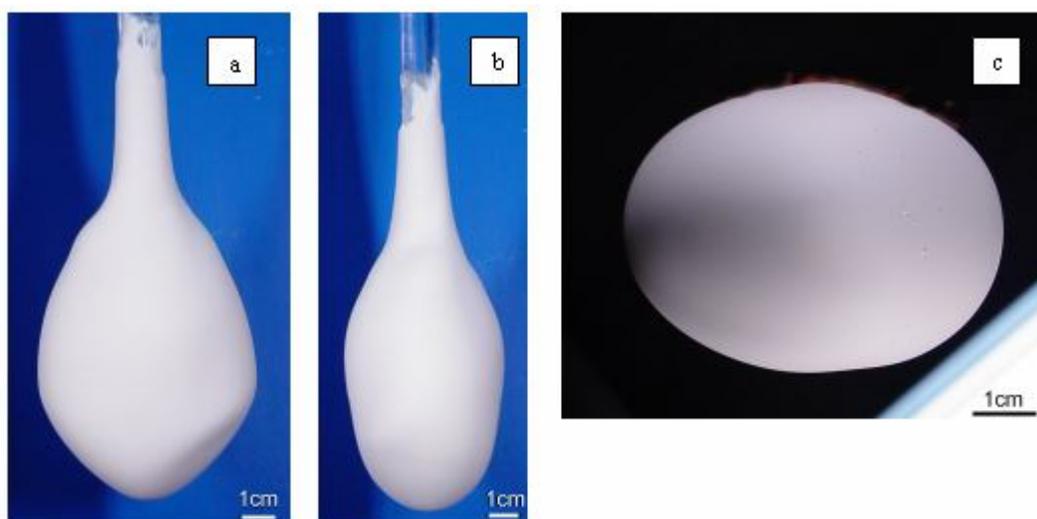


Figura 4.24. Preforma P002: diâmetro máximo (a), diâmetro mínimo (b) e vista inferior da preforma soot (c).

As mesmas condições de P002 foram repetidas em P003. Desta vez, o processo foi realizado sem interrupções, permitindo a continuidade das análises. No caso do soot, obteve-se $D_{\text{soot}} = 60,88$ mm e $d_{\text{soot}} = 46,15$ mm, resultando em $\epsilon_{\text{soot}} = 1,32$. Após a consolidação, as dimensões da preforma foram alteradas para $D_{\text{cons}} = 25,22$ mm, $d_{\text{cons}} = 22,02$ mm e $\epsilon_{\text{cons}} = 1,15$. A **Figura 4.25** mostra a imagem de P003 durante a deposição, enquanto a **Figura 4.26** ilustra a geometria ao final do processo.

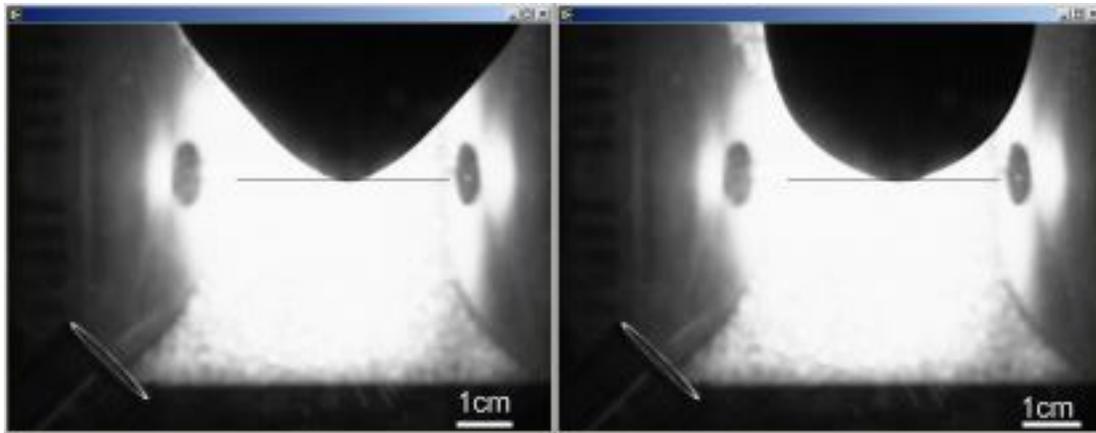


Figura 4.25. Imagem da preforma P003 durante a deposição: posições de diâmetro máximo (esquerda) e mínimo (direita).

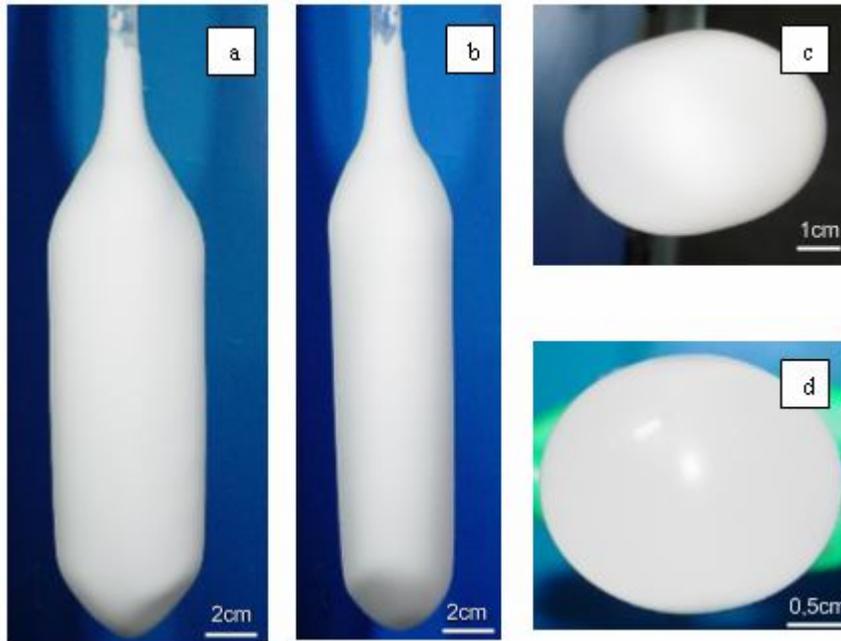


Figura 4.26. P003: diâmetro máximo (a), diâmetro mínimo (b) e vista inferior da preforma *soot* (c). Em (d), a vista inferior da preforma pós-consolidada (transparente).

Uma vez comprovada a eficácia do método, iniciou-se o estudo do efeito das variáveis de processo na geometria final da preforma. A preforma P004, ilustrada na **Figura 4.27**, foi depositada com fluxo de SiCl_4 de 140 sccm, fluxo de GeCl_4 de 48 sccm e $\Omega = 25$ RPM. Com o intuito de otimizar o número de experimentos, o valor de t_d foi ajustado para 3 valores diferentes durante a deposição, implicando em 3 intervalos com diferentes diâmetros ao longo do

comprimento da preforma. Para P004-I, que corresponde à região próxima à extremidade inferior, utilizou-se $t_d = 0$ s, resultando em $D_{soot} = 55,36$ mm, $d_{soot} = 42,17$ mm e $\varepsilon_{soot} = 1,31$. No caso de P004-II, relativo à região intermediária, foi aplicado um atraso de 5 s, e a geometria obtida foi de $D_{soot} = 63,08$ mm, $d_{soot} = 42,62$ mm e $\varepsilon_{soot} = 1,48$. Finalmente, para P004-III, situada na região superior, utilizou-se $t_d=10$ s e, resultando em $D_{soot} = 64,44$ mm, $d_{soot} = 40,62$ mm e $\varepsilon_{soot} = 1,59$. Devido à indisponibilidade do equipamento na ocasião, P004 não foi consolidada.

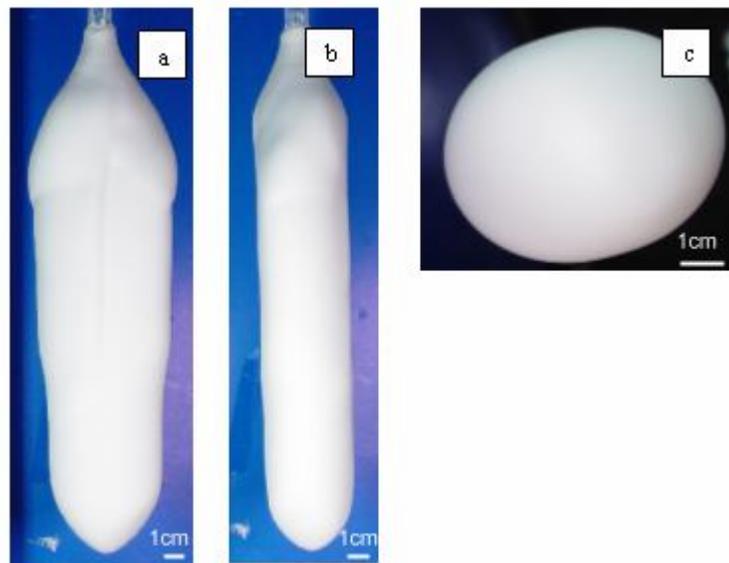


Figura 4.27. Preforma P004: diâmetro máximo (a), diâmetro mínimo (b) e vista inferior da preforma soot (c).

A preforma P005, apresentada na **Figura 4.28**, foi produzida com o intuito de refinar a análise no intervalo de t_d entre 0 e 5 s. Dessa forma, adotou-se um fluxo de SiCl_4 de 140 sccm, fluxo de GeCl_4 de 48 sccm e $\Omega = 25$ RPM. A partir do mesmo procedimento de P004, foram implementadas 3 condições de t_d . Para P005-I, com $t_d = 1$ s, obteve-se $D_{soot} = 58,61$ mm, $d_{soot} = 42,87$ mm e $\varepsilon_{soot} = 1,37$. No caso de P005-II, cujo $t_d = 3$ s, os resultados obtidos foram $D_{soot} = 63,73$ mm, $d_{soot} = 44,59$ mm e $\varepsilon_{soot} = 1,43$. Finalmente, para P005-III, foram obtidos $D_{soot} = 67,75$ mm, $d_{soot} = 45,02$ mm e $\varepsilon_{soot} = 1,48$. Após a consolidação, a geometria da preforma foi alterada para, $D_{cons} = 27,56$ mm, $d_{cons} = 20,88$ mm e $\varepsilon_{cons} = 1,32$ no caso de P005-I. Para P005-II, os resultados foram $D_{cons} = 29,38$ mm, $d_{cons} = 20,88$ mm e $\varepsilon_{cons} = 1,41$. Na região remanescente, P005-III, aferiu-se $D_{cons} = 30,19$ mm, $d_{cons} = 20,88$ mm e $\varepsilon_{cons} = 1,46$.

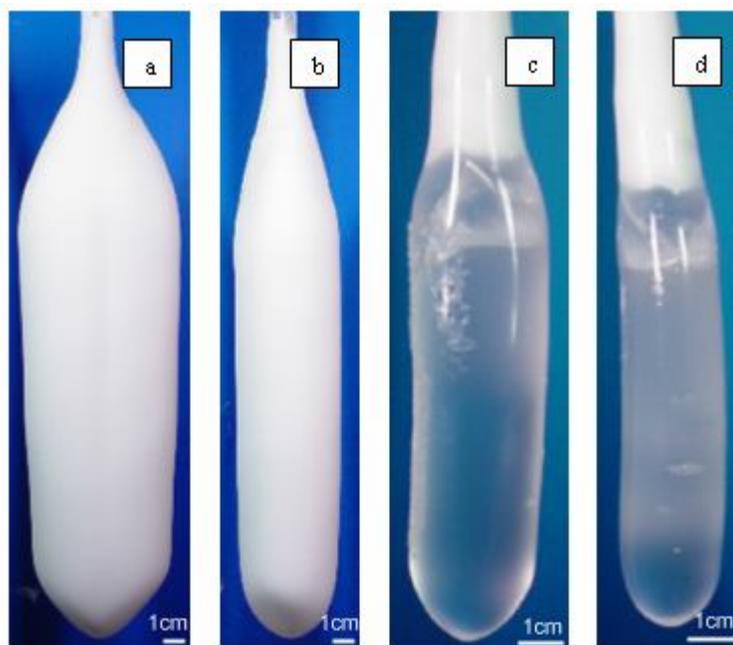


Figura 4.28. Preforma P005: diâmetro máximo da preforma *soot* (a) e consolidada (c), e diâmetro mínimo da preforma *soot* (b) e consolidada (d).

A análise do efeito de Ω foi realizada através da deposição de P006, ilustrada na **Figura 4.29**. Empregou-se fluxos de SiCl_4 de 140 sccm e GeCl_4 de 48 sccm, com $t_d = 0$ s. Neste caso, foram utilizadas 3 condições de Ω diferentes para cada região. Para P006-I, com $\Omega = 25$ RPM, obteve-se $D_{\text{soot}} = 60,21$ mm, $d_{\text{soot}} = 50,5$ mm e $\epsilon_{\text{soot}} = 1,19$. No caso de P006-II, onde foi aplicado $\Omega = 20$ RPM, o resultado obtido foi $D_{\text{soot}} = 60,21$ mm, $d_{\text{soot}} = 49,7$ mm e $\epsilon_{\text{soot}} = 1,21$. Enfim, no caso de P006-III, foi utilizado $\Omega = 15$ RPM, resultando em $D_{\text{soot}} = 58,85$ mm, $d_{\text{soot}} = 48,24$ mm e $\epsilon_{\text{soot}} = 1,22$. Devido à indisponibilidade do forno, esta preforma também não foi consolidada.

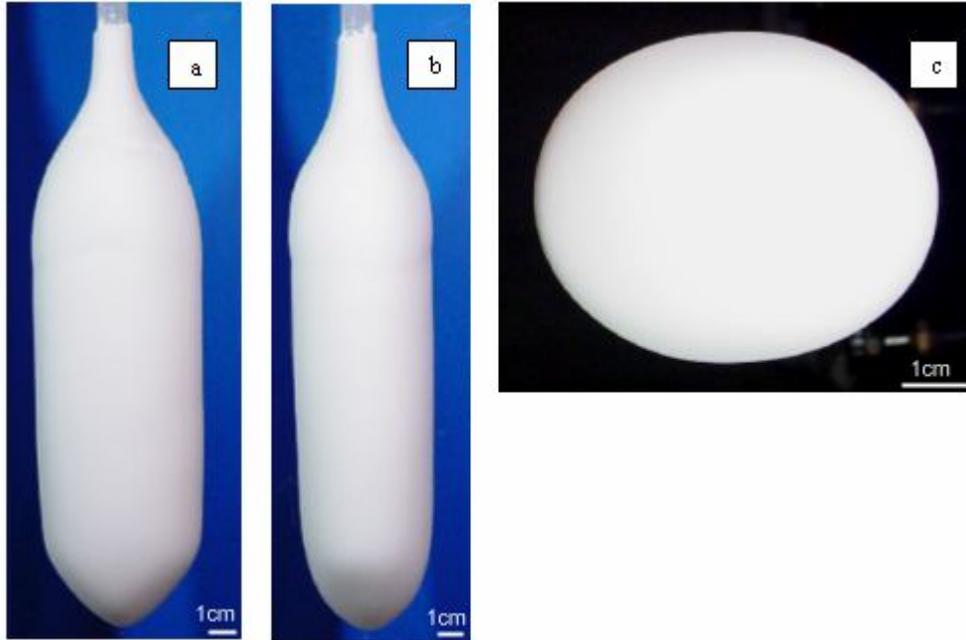


Figura 4.29. Preforma P006: diâmetro máximo (a), diâmetro mínimo (b) e vista inferior da preforma *soot* (c).

No caso da deposição da preforma P007, representada na **Figura 4.30**, cujo processo foi realizado com fluxo de SiCl_4 de 140 sccm e de GeCl_4 de 48 sccm, optou-se por utilizar valores elevados para todas as variáveis de processo. Dessa forma, o experimento foi conduzido atribuindo uma única condição ao longo da preforma, com $\Omega = 35$ RPM e $t_d = 10$ s. Os resultados obtidos para a preforma *soot* foram $D_{\text{soot}} = 56,84$ mm, $d_{\text{soot}} = 37,76$ mm e $\epsilon_{\text{soot}} = 1,51$. Após a consolidação, a geometria final da preforma foi caracterizada por $D_{\text{cons}} = 22,79$ mm, $d_{\text{cons}} = 15,62$ mm, e $\epsilon_{\text{cons}} = 1,46$.

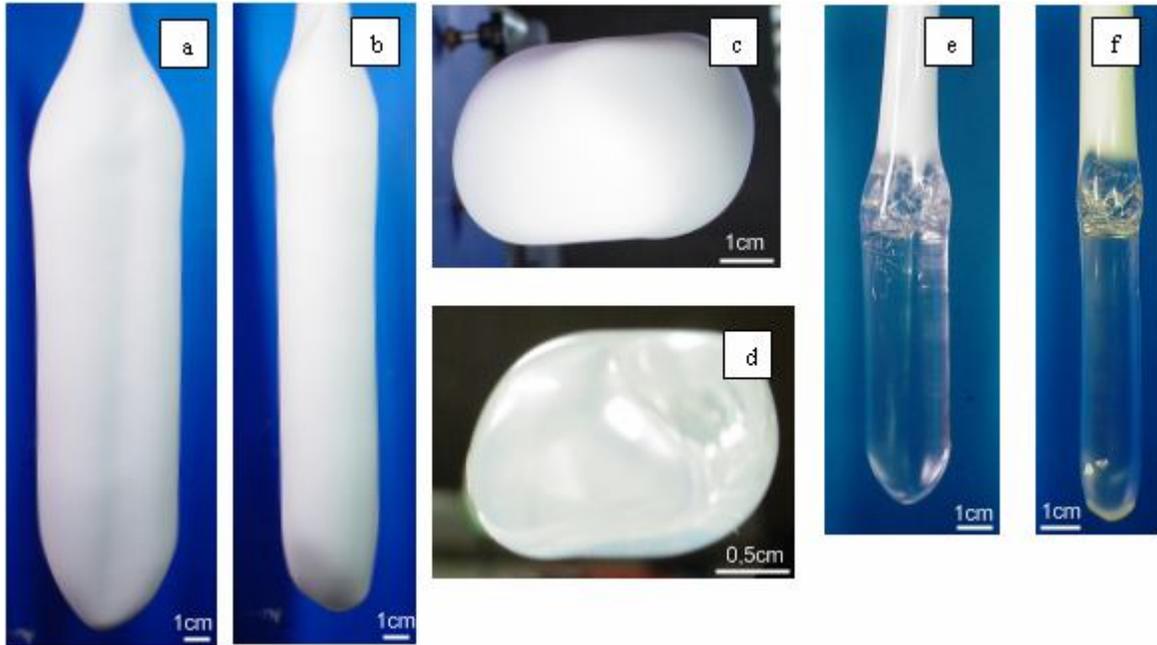


Figura 4.30. Preforma P007: diâmetro máximo das preformas *soot* (a) e consolidada (e), e diâmetro mínimo das preformas *soot* (b) e consolidada (f). Observa-se também a vista inferior das preformas *soot* (c) e consolidada (d).

Uma sùmula dos parâmetros geométricos obtidos de maior relevância é apresentada na **Tabela 4.1**. É importante ressaltar, entretanto, que as possíveis discrepâncias entre os valores de ϵ teóricos e experimentais são produto das simplificações adotadas durante a modelagem matemática. Esta tabela também informa a eficiência do processo de deposição η em porcentagem, calculada por

$$\eta = \frac{m_{soot}}{0,54 V_{SiCl_4} + 0,91 V_{GeCl_4}} \cdot 100, \quad (4.1)$$

onde m_{soot} é a massa de *soot* depositada em gramas, e V_{SiCl_4} e V_{GeCl_4} são os volumes consumidos de tetracloreto de silício e germânio em mililitros, respectivamente.

Tabela 4.1. Geometrias obtidas na deposição de preformas elípticas, através da atribuição de diferentes parâmetros de processo.

Preforma	Ω [RPM]	t_d [s]	η [%]	ϵ_{soot}	ϵ_{cons}
P001	25	0	67,03	-	-
P002	25	0	-	-	-
P003	25	0	89,54	1,32	1,15
P004-I	25	0	88,89	1,31	-
P004-II	25	5	88,89	1,48	-
P004-III	25	10	88,89	1,59	-
P005-I	25	1	84,00	1,37	1,32
P005-II	25	3	84,00	1,43	1,41
P005-III	25	5	84,00	1,48	1,46
P006-I	25	0	76,24	1,19	-
P006-II	20	0	76,24	1,21	-
P006-III	15	0	76,24	1,22	-
P007	35	10	74,85	1,51	1,46

4.2.3. Estudo do efeito dos parâmetros de processo na deposição de preformas elípticas

O efeito de t_d sobre a geometria de preformas *soot* é apresentado na **Figura 4.31**. Observa-se que a proporção de diâmetros é incrementada juntamente com o aumento do valor de t_d aplicado, confirmando os resultados obtidos através simulação. Também foi constatado que a utilização de tempos de “delay” elevados acarretou na formação de depressões nas posições de velocidade máxima, de sorte que o nível de deformação da geometria é proporcional ao valor de t_d , uma vez que as depressões foram suavizadas quando aplicados atrasos menores ou iguais a 3 s.

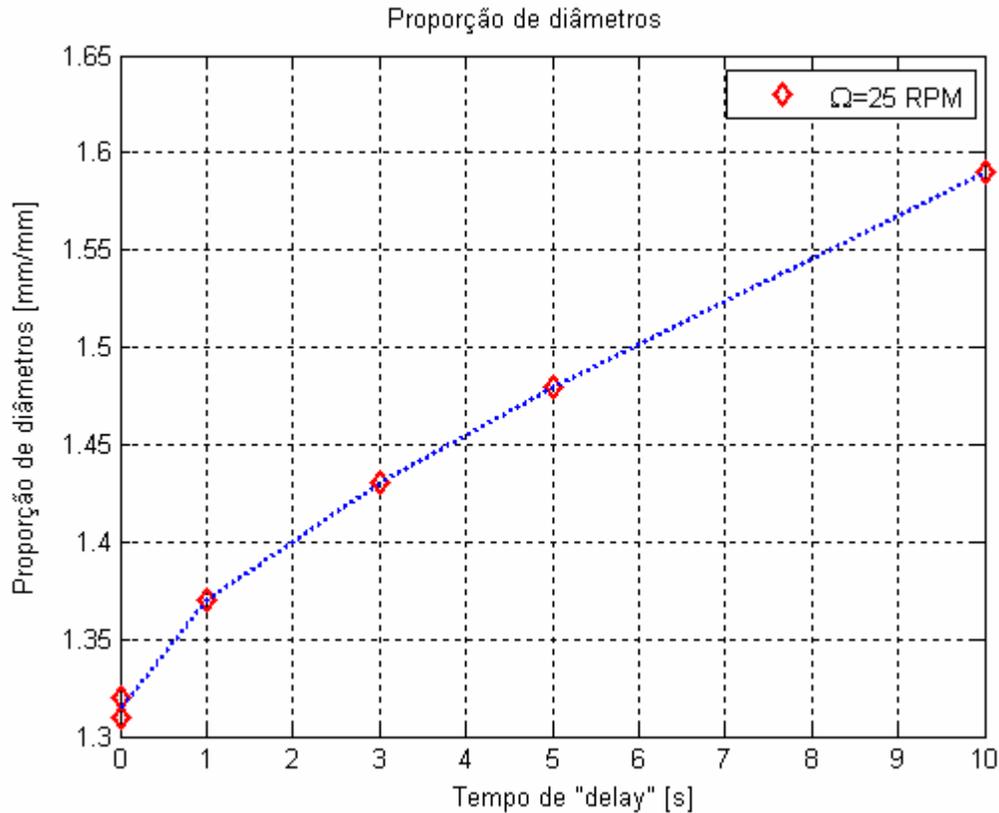


Figura 4.31. Efeito tempo de “delay” sobre a geometria de uma preforma *soot* elíptica.

Por sua vez, o efeito da variação de Ω é ilustrado na **Figura 4.32**. Assim como observado durante as simulações, o aumento de Ω implica na redução de ε . Ademais, considerando o intervalo de 15 a 25 RPM, a magnitude deste decréscimo é sutil quando comparada à variação proporcionada pela variação de t_d . Dessa forma, considerando o compromisso entre o valor de Ω e o perfil de distribuição de dopante, é seguro afirmar que a atribuição de velocidades elevadas não prejudica de forma significativa na geometria de preformas elípticas. A respeito desta ponderação, a comparação entre as preformas P004-I e P007 demonstra que o aumento de $\Omega = 25$ RPM para $\Omega = 35$ RPM implica uma diferença relativamente pequena entre as geometrias, ainda mais considerando a diferença entre os valores de η , inerentes à flutuações no processo.

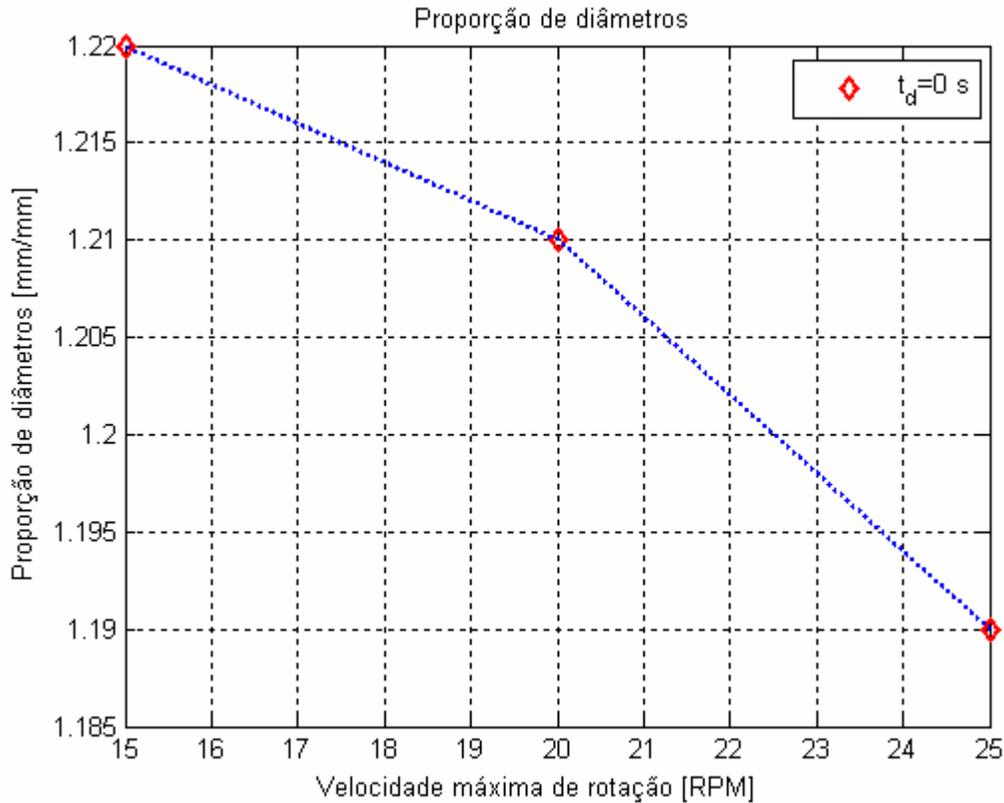


Figura 4.32. Efeito da velocidade máxima de rotação sobre a geometria de uma preforma *soot* elíptica.

Em relação ao efeito da consolidação sobre a geometria das preformas, um comparativo entre os valores de ϵ_{soot} e ϵ_{cons} é apresentado na **Tabela 4.1**. Este estudo demonstra que a proporção de diâmetros da preforma é preservada mesmo após o tratamento termoquímico. Entretanto, no caso de P003, mesmo com a preservação da geometria elíptica, a magnitude de ϵ sofreu uma redução significativa, o que demonstra a dificuldade de controle da geometria em preformas consolidadas, uma vez que as flutuações no tratamento termoquímico, como, por exemplo, o desgaste dos componentes do reator, podem afetar a redução de diâmetros com maior ou menor intensidade.

Outro aspecto interessante decorre do fato de que as depressões formadas pela aplicação de valores elevados de t_d são suavizadas após a consolidação. Este resultado demonstra que os efeitos de deformação de geometria gerados na deposição podem ser compensados na preforma final. Contudo, conforme observado em P007, a consolidação apenas atenua as depressões, o que

não implica necessariamente na modificação do formato para uma geometria perfeitamente elíptica.

Tabela 4.2. Comparativo entre a geometria de preformas *soot* depositadas e pós-consolidadas.

Preforma	ϵ_{soot}	ϵ_{cons}	$\epsilon_{soot} / \epsilon_{cons}$
P003	1,32	1,15	1,15
P005-I	1,37	1,32	1,04
P005-II	1,43	1,41	1,01
P005-III	1,48	1,46	1,01
P007	1,51	1,46	1,03

4.2.4. Deposição e consolidação de preformas não-circulares

Para verificar a validade do método de deposição de preformas com não-circulares, foram realizados experimentos utilizando valores de φ iguais a 120° e 90° , o que resultaria em preformas triangular e quadrangular, respectivamente.

A preforma P008, foi depositada com fluxo de SiCl_4 igual a 140 sccm e GeCl_4 de 48 sccm. Os valores selecionados para as variáveis de processo foram $\varphi = 120^\circ$, $\Omega = 25$ RPM e $t_d = 5$ s. O experimento foi conduzido com sucesso, conforme registrado na **Figura 4.33**, com eficiência de 84,45 %. Observou-se a formação de 3 posições com maior e menor taxa de deposição, o que resultou em uma geometria aproximadamente triangular, conforme antevisto através das simulações. Devido ao valor de t_d selecionado, foi constatada a formação de depressões nas posições de velocidade máxima. Entretanto, após o tratamento termoquímico, ocorreu a suavização destas irregularidades, bem como a manutenção da geometria triangular. O resultados experimentais são apresentados na **Figura 4.34**.

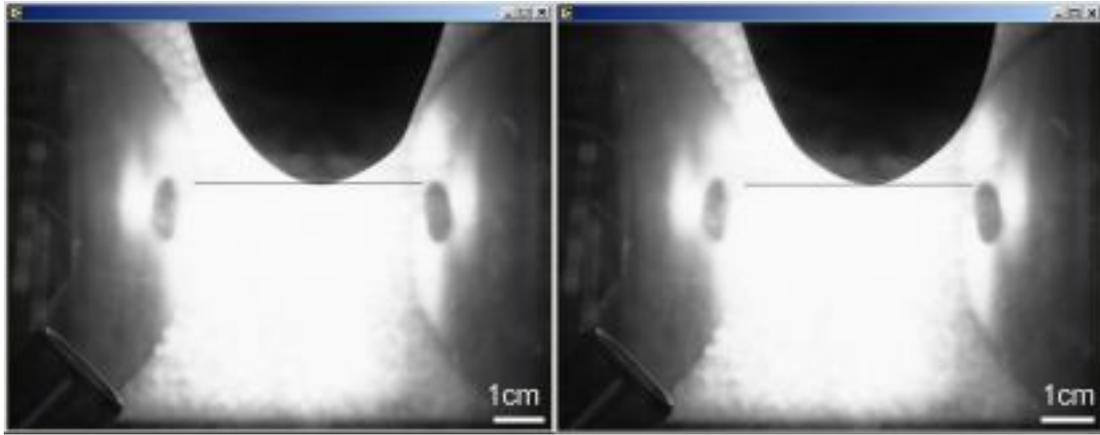


Figura 4.33. Imagem da preforma P008 durante a deposição.

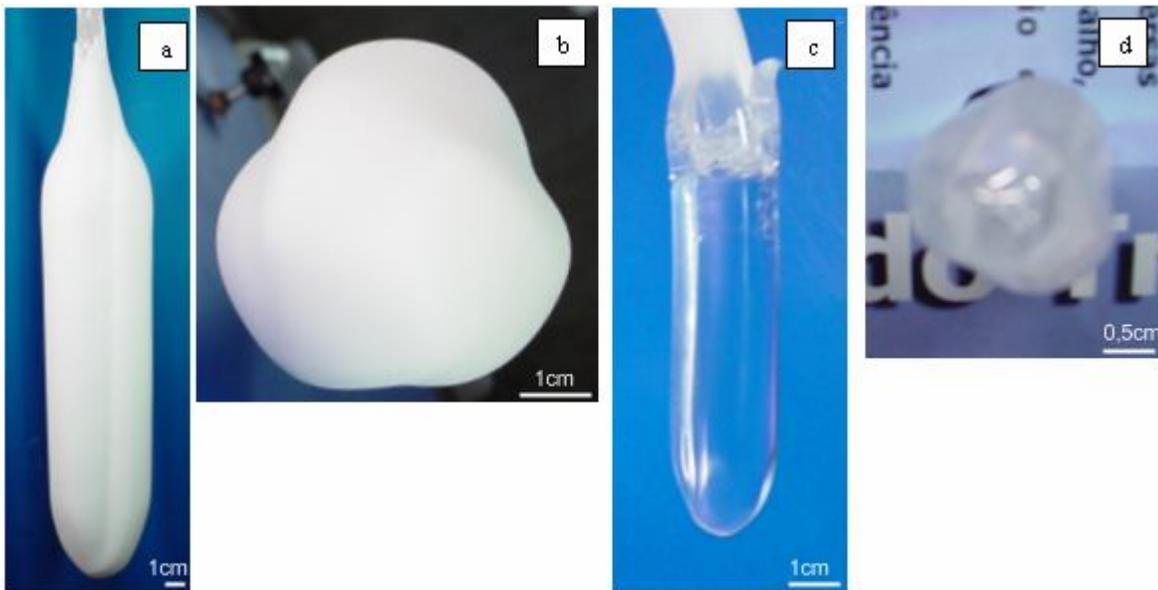


Figura 4.34. Preforma P008: vistas lateral (a) e inferior (b) da preforma *soot* e vistas lateral (c) e inferior (d) da preforma consolidada.

No caso da preforma P009, depositada com fluxo de SiCl_4 igual a 140 sccm e GeCl_4 de 48 sccm, utilizou-se $\varphi = 90^\circ$, $\Omega = 25$ RPM e $t_d = 0$, com o intuito de produzir uma geometria quadrangular. Apesar da elevada eficiência da deposição, $\eta = 86,76\%$, e da constatação de uma diferença nos diâmetros da preforma entre as posições de velocidade máxima e repouso durante o processo, ilustrado na **Figura 4.35**, não foi possível visualizar a não-circularidade após retirar a preforma *soot* da câmara de deposição. Apesar de indesejado, este problema pôde ser previsto através das simulações, cujos resultados mostraram que, para esta configuração de φ e de

posicionamento do maçarico, ocorre uma interferência entre as camadas de *soot* depositadas, tornando muito sutil a diferença entre os diâmetros máximo e mínimo da preforma. Este efeito poderia ser amenizado através da modificação dos parâmetros do maçarico, com possíveis perdas na eficiência do processo. Contudo, após a consolidação foi possível notar que a extremidade inferior da preforma apresentava posições de maior e menor diâmetro, embora este resultado não possa ser observado através da análise de imagem. Isso se deve ao fato de que o VAD é um método de deposição axial e radial, enquanto que a simulação concerne um modelo apenas radial, devido a hipóteses simplificadoras. A geometria de P009 é ilustrada na **Figura 4.36**.

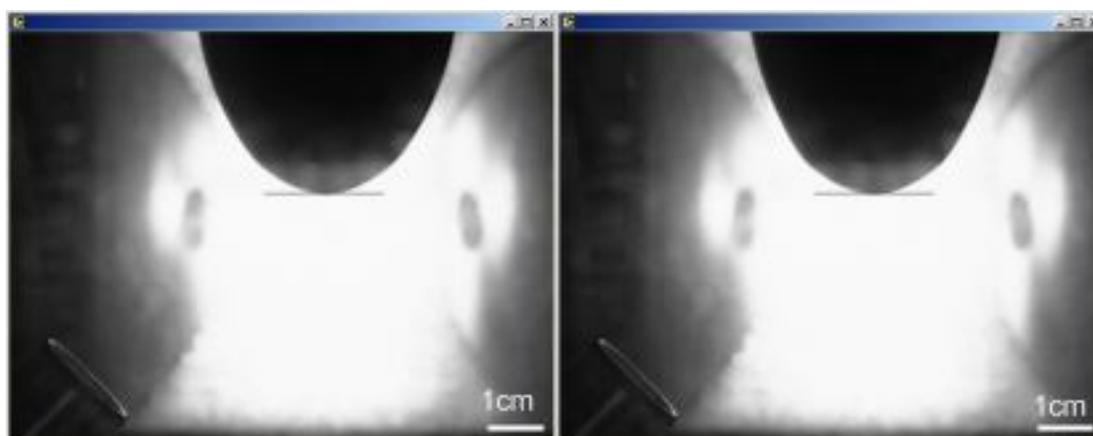


Figura 4.35. Imagem da preforma P009 durante a deposição: posições de diâmetro máximo (esquerda) e mínimo (direita).

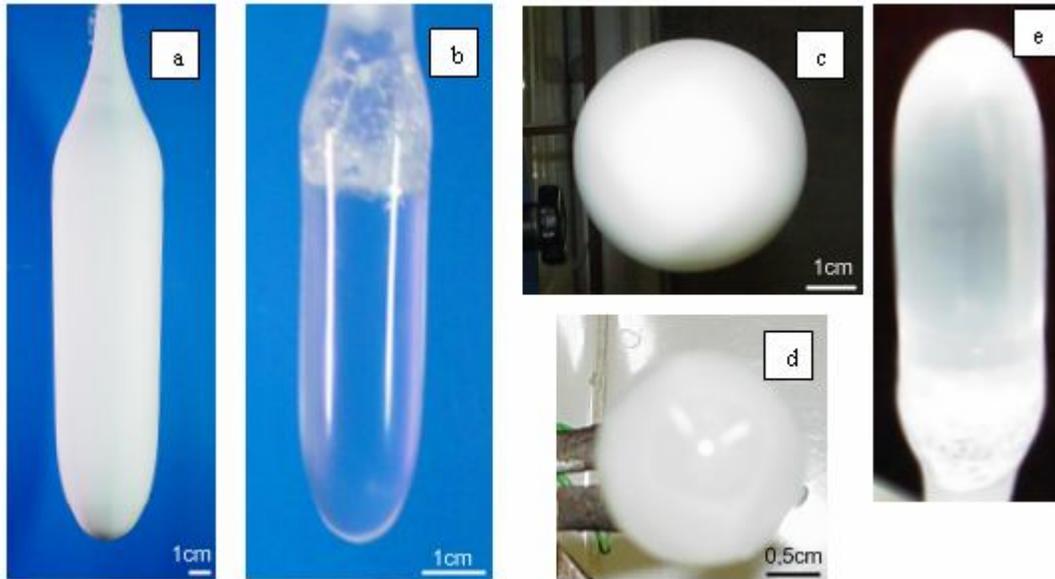
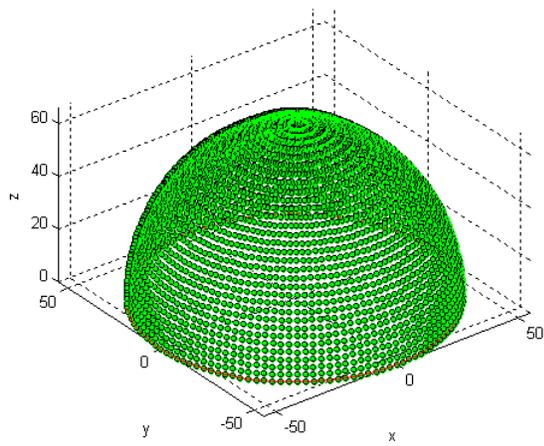


Figura 4.36. Preforma P009: vistas lateral (a) e inferior (c) da preforma *soot* e vistas lateral (b) e inferior (d) da preforma consolidada. Em (e), observa-se a não-circularidade na ponta da preforma consolidada.

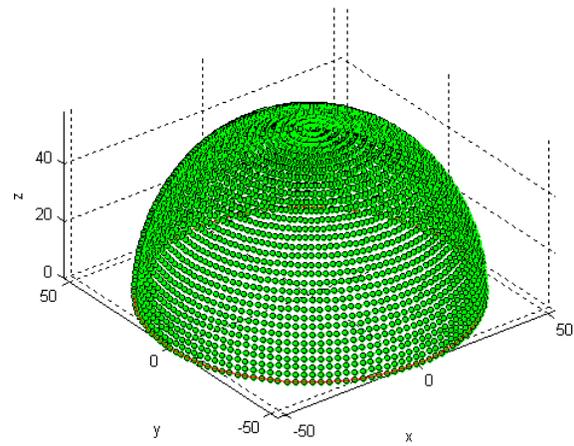
4.3. Simulação do modelo matemático tridimensional

4.3.1. Validação

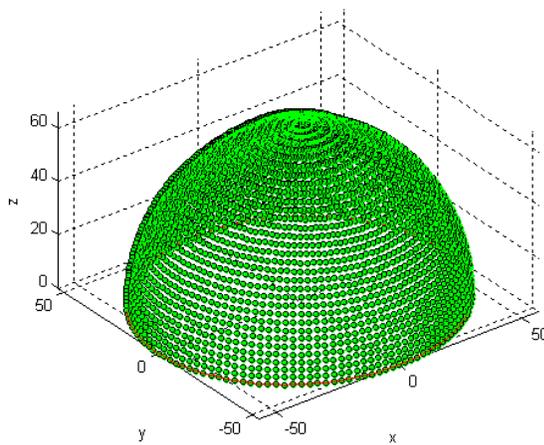
Para comprovar a funcionalidade do modelo, foram realizados testes de rotação constante e variável, com $\Omega = 6$ RPM, utilizando funções de distribuição de taxa de deposição polinomial e Gaussiana e sem tempos de “delay”. As geometrias obtidas em cada simulação são ilustradas na **Figura 4.37**. A variação do raio ao longo da circunferência para $\phi = 0$ também é apresentada na **Figura 4.38**. Observa-se que a metodologia foi implementada com sucesso, permitindo a simulação de preformas circulares e elípticas, de acordo com o tipo de rotação selecionado. Em relação à f_b , os resultados indicam que a função polinomial resulta em um incremento maior no diâmetro em comparação à função Gaussiana. Este efeito condiz com o esperado, considerando que os fatores de atenuação da função Gaussiana acarretam em uma menor quantidade depositada de *soot* ao longo de r_b e, portanto, apresenta uma melhor adequação aos ajustes experimentais. É importante ressaltar que os valores obtidos nesta simulação diferem daqueles apresentados pelo modelo matemático bidimensional, uma vez que a metodologia implementada no Módulo de deposição de *soot* é completamente diferente em ambos os casos.



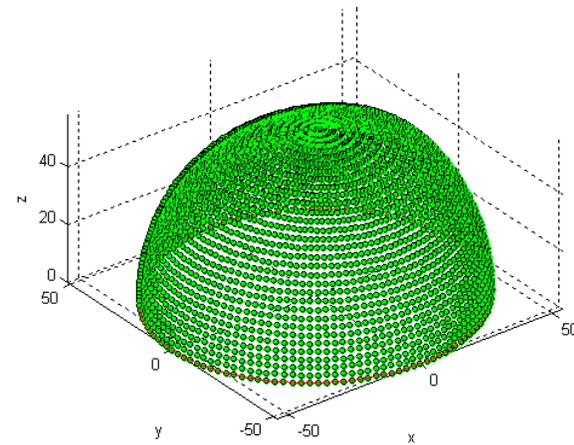
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.37. Geometria final das preformas obtidas por simulação: rotação constante com função polinomial (a) e Gaussiana (b), e rotação variável com função polinomial (c) e Gaussiana (d).

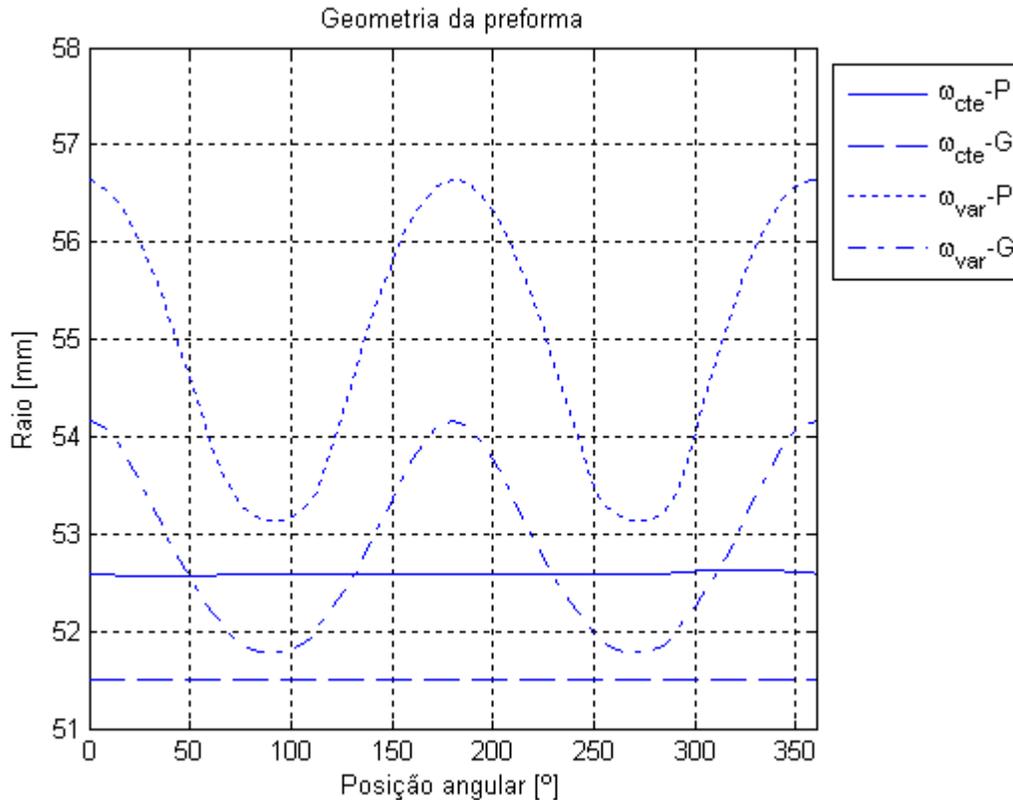


Figura 4.38. Variação do raio da preforma para as funções polinomial (P) e Gaussiana (G).

4.3.2. Estudo do efeito dos parâmetros de processo na simulação de preformas elípticas

O modelo matemático tridimensional foi aplicado na simulação de preformas elípticas, inicialmente fixando $\Omega = 6$ RPM e variando t_d entre 0, 5 e 10 s e, em seguida, configurando o valor de t_d para 0 s e alternando o valor de Ω entre 6, 12 e 24 RPM, sempre ajustando o tempo T de forma a proporcionar a simulação de uma revolução do alvo. A análise do raio da preforma, conforme mostra a **Figura 4.39**, permite afirmar que a diferença entre os diâmetros máximo e mínimo da preforma aumenta com o incremento de t_d e com a redução de Ω , acordando com os resultados obtidos previamente no modelo matemático bidimensional e nos testes experimentais. As condições de menor e maior diferença de diâmetros estão ilustradas na **Figura 4.40**. Observa-se que, para valores elevados de t_d , também há incidência de depressões nas posições angulares onde ocorre deposição de uma quantidade menor de *soot*.

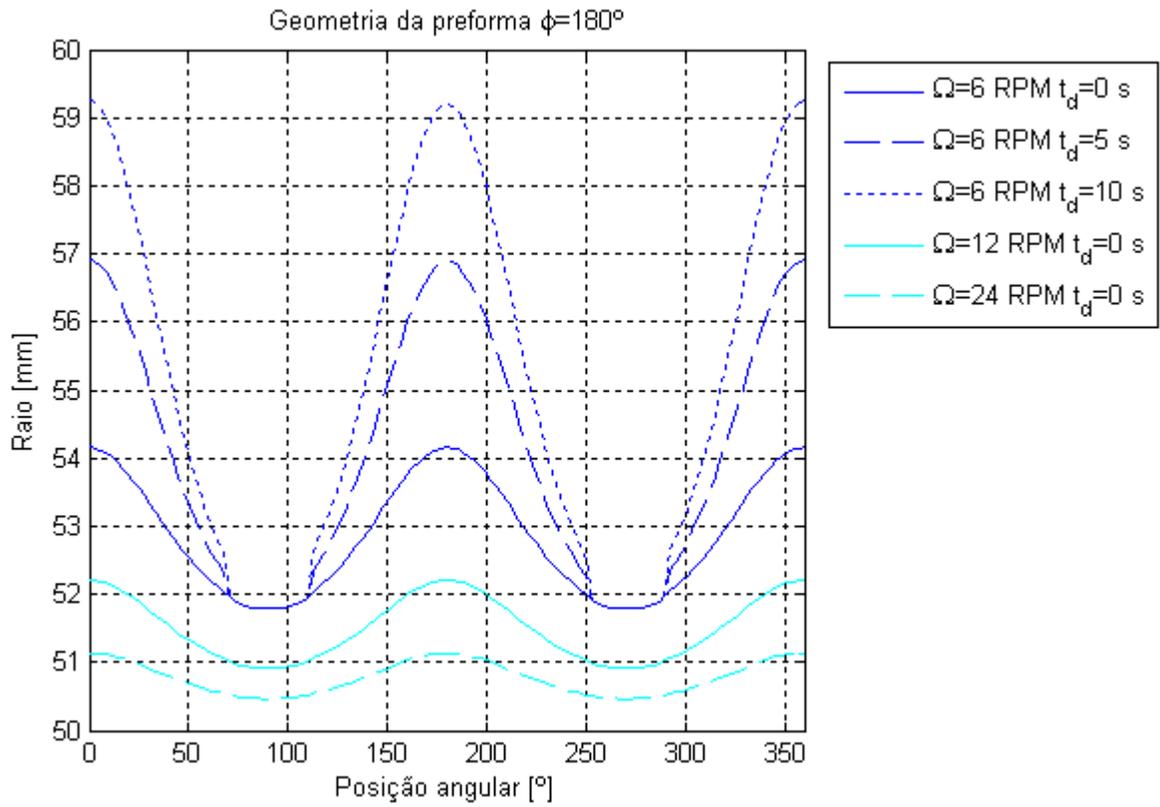


Figura 4.39. Efeito do tempo de “delay” e da velocidade máxima de rotação na geometria de preformas elípticas.

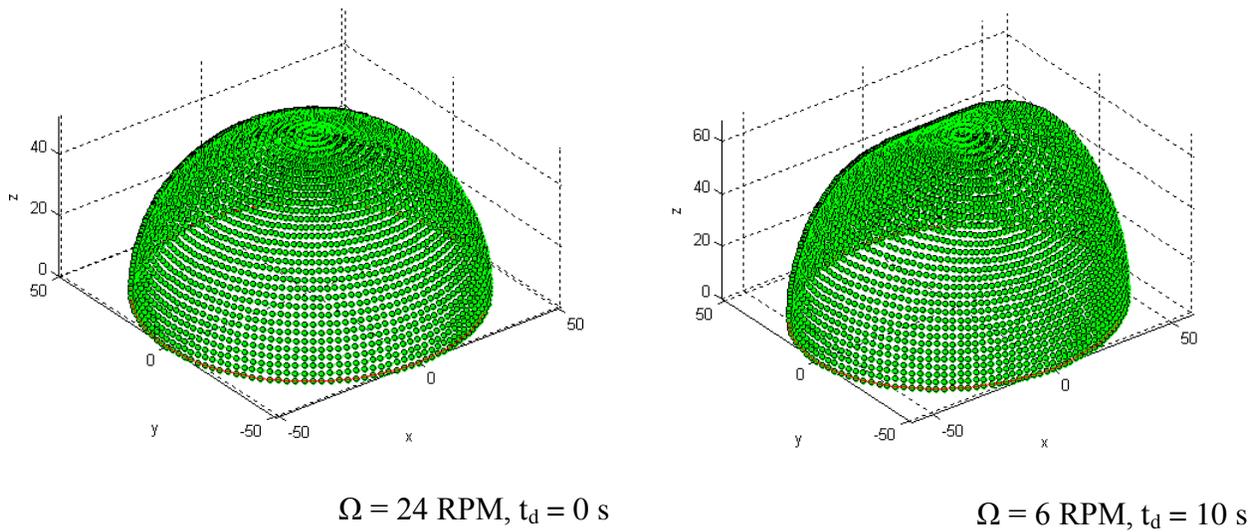


Figura 4.40. Preformas elípticas obtidas através do modelo matemático tridimensional.

4.3.3. Estudo do efeito dos parâmetros de processo na simulação de preformas não-circulares

As simulações foram conduzidas utilizando $\Omega = 6$ RPM e selecionando t_d entre 0, 5 e 10 s. Foram avaliados os ângulos de ciclo de 120° , 90° , 72° e 60° , com o intuito de produzir diferentes geometrias.

Para $\varphi = 120^\circ$, observou-se que o modelo matemático permite a simulação de preformas parcialmente triangulares, proporcionando diferenças de diâmetros maiores para $t_d = 10$ s, conforme ilustra a **Figura 4.41**. Entretanto, é possível notar algumas variações abruptas de diâmetro nas posições de menor deposição para valores de t_d não nulos. Possivelmente, este efeito pode ser explicado através da superposição de camadas adjacentes de *soot*, analogamente ao ocorrido no modelo bidimensional; atribuído à escolha do tipo de função de distribuição de *soot*, ou justificado em decorrência de erros de aproximação numérica durante o processamento. Entretanto, nota-se que estas imperfeições não são perceptíveis na inspeção da geometria tridimensional, apresentada na **Figura 4.42**.

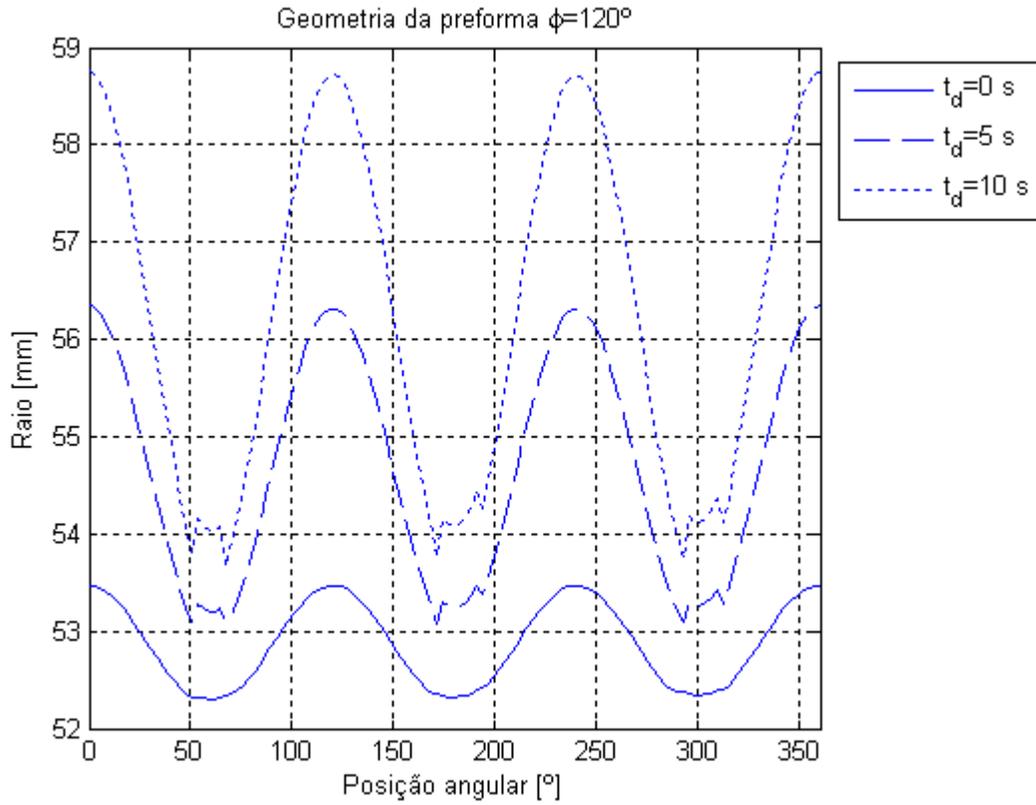


Figura 4.41. Efeito do tempo de “delay” na geometria da preforma para $\phi = 120^\circ$.

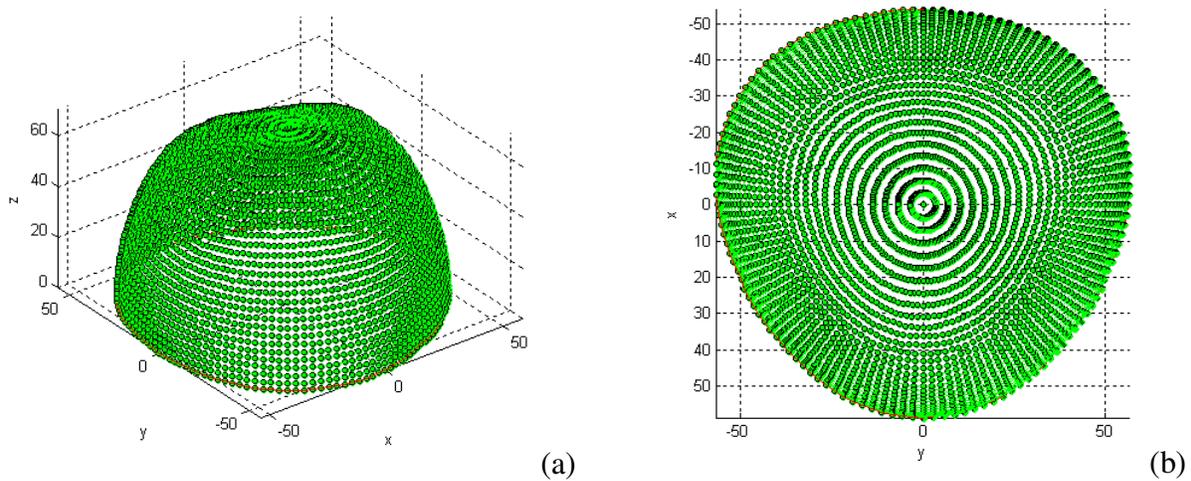


Figura 4.42. Geometria da preforma para $\phi = 120^\circ$, $\Omega = 6$ RPM e $t_d = 10$ s: vistas lateral (a) e superior (b).

Um resultado semelhante pôde ser encontrado para $\phi = 90^\circ$. A despeito das irregularidades no raio ao longo da circunferência da preforma, ilustrada na **Figura 4.43**, obteve-se uma

geometria aproximadamente quadrangular, como demonstra a **Figura 4.44**. Ao contrário do modelo bidimensional, o efeito de superposição de camadas adjacentes de *soot* não acarretou em uma atenuação abrupta da geometria. Esta informação supre a justificativa apresentada na deposição da preforma P009, quando se constatou uma variação de diâmetros na extremidade do alvo.

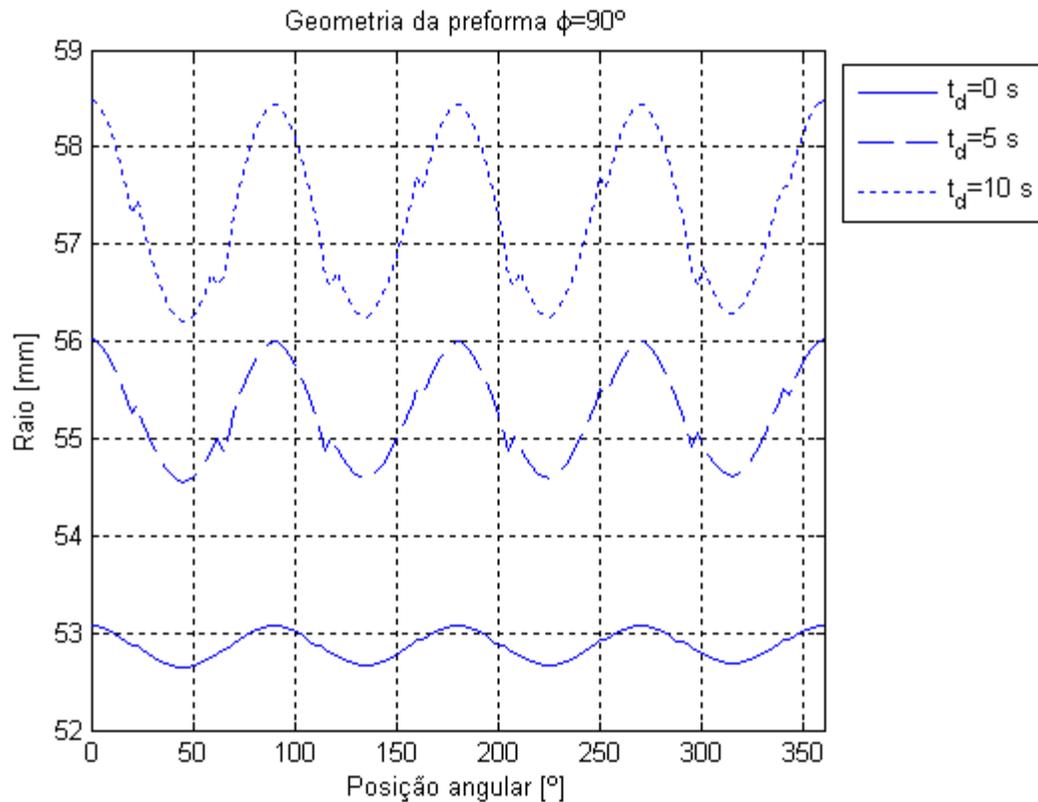


Figura 4.43. Efeito do tempo de “delay” na geometria da preforma para $\varphi = 90^\circ$.

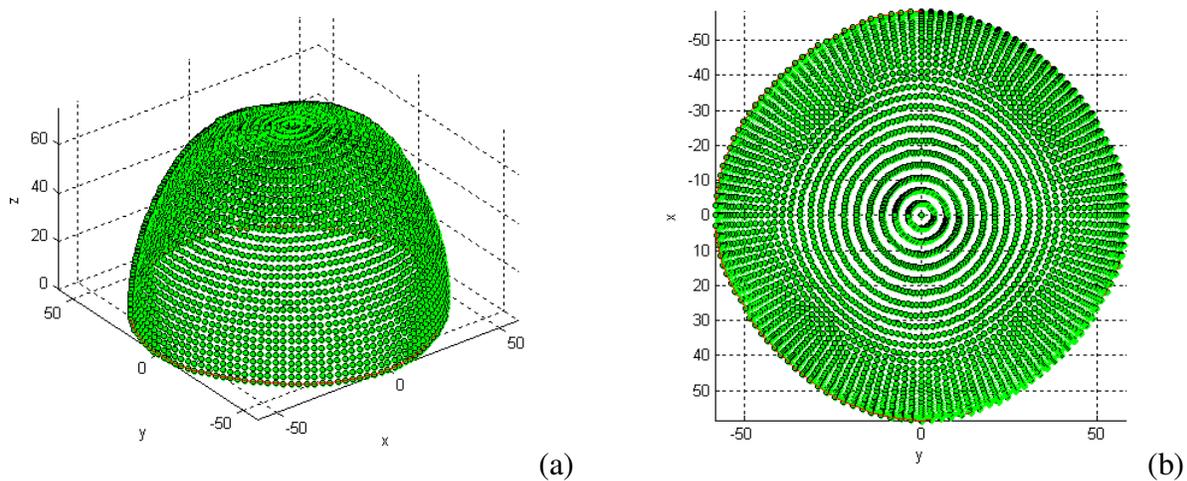


Figura 4.44. Geometria da preforma para $\varphi = 90^\circ$, $\Omega = 6$ RPM e $t_d = 10$ s: vistas lateral (a) e superior (b).

Entretanto, para $\phi = 72^\circ$ e $\phi = 60^\circ$, não foi possível obter geometrias não-circulares satisfatórias, conforme ilustrado da **Figura 4.45** à **Figura 4.48**, visto que diferença entre os raios máximo e mínimo da preforma é muito pequena, resultando em formas praticamente circulares, mesmo com a aplicação de tempos de “delay” elevados. Além disso, para $t_d = 5$ s e $t_d = 10$ s, foram constatadas irregularidades no raio ao longo da circunferência com padrão parcialmente definido, ocasionadas provavelmente devido a erros de aproximação do modelo. Para investigar este efeito, foram realizadas novas simulações com $\Omega = 6$ RPM e $t_d = 10$ s, para os casos $\phi = 72^\circ$ e $\phi = 60^\circ$, utilizando a função de distribuição de taxa de deposição polinomial. A despeito de este estudo proporcionar a obtenção de geometrias não-circulares com significativa diferença entre os diâmetros máximo e mínimo, observou-se que o formato final não se apresentou simetria em relação ao eixo, conforme apresentado na **Figura 4.49** e na **Figura 4.50**. Contudo, estima-se que, em deposições reais, o próprio sistema de controle poderia compensar a geometria da extremidade da preforma através da manutenção da distância alvo-maçarico, atenuando os defeitos constatados na simulação.

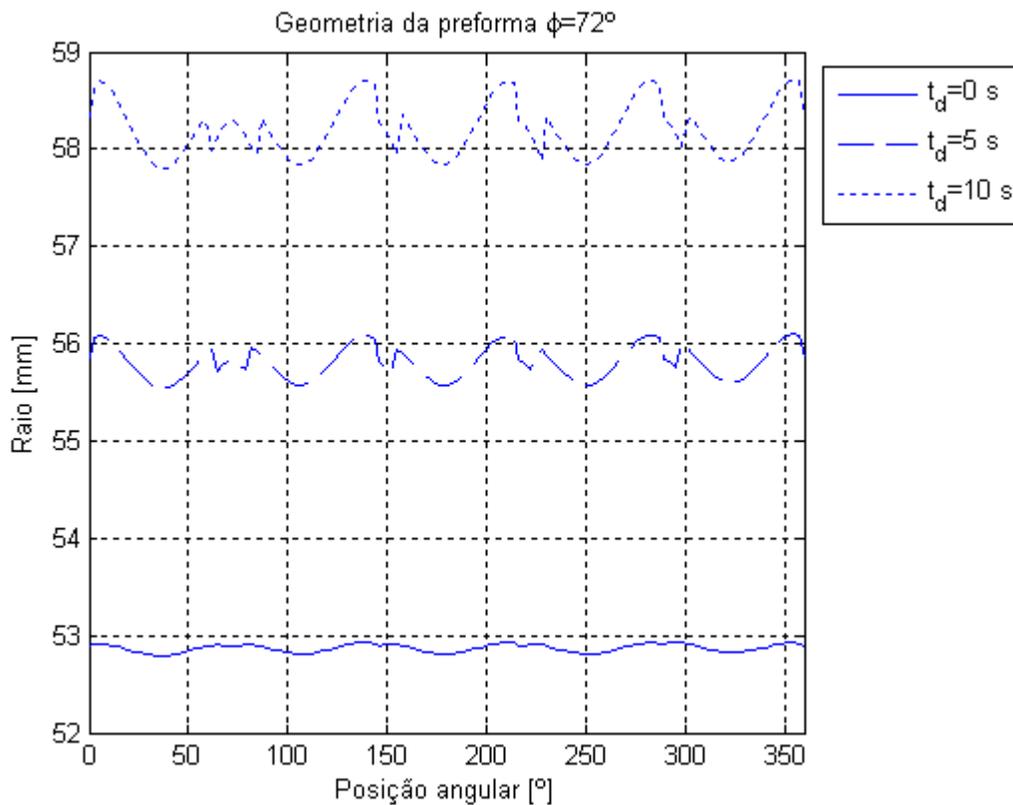


Figura 4.45. Efeito do tempo de “delay” na geometria da preforma para $\phi = 72^\circ$.

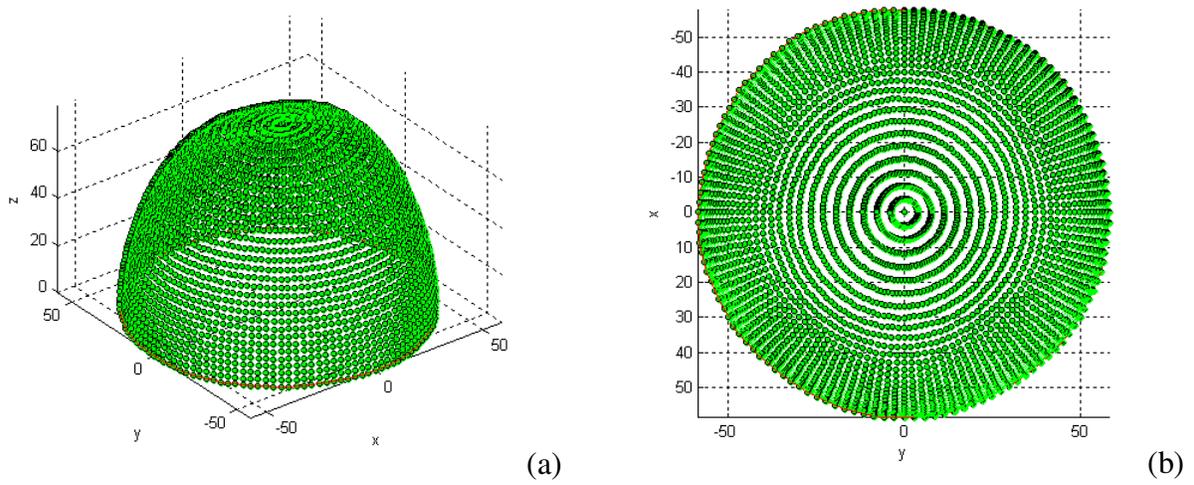


Figura 4.46. Geometria da preforma para $\phi = 72^\circ$, $\Omega = 6$ RPM e $t_d = 10$ s: vistas lateral (a) e superior (b).

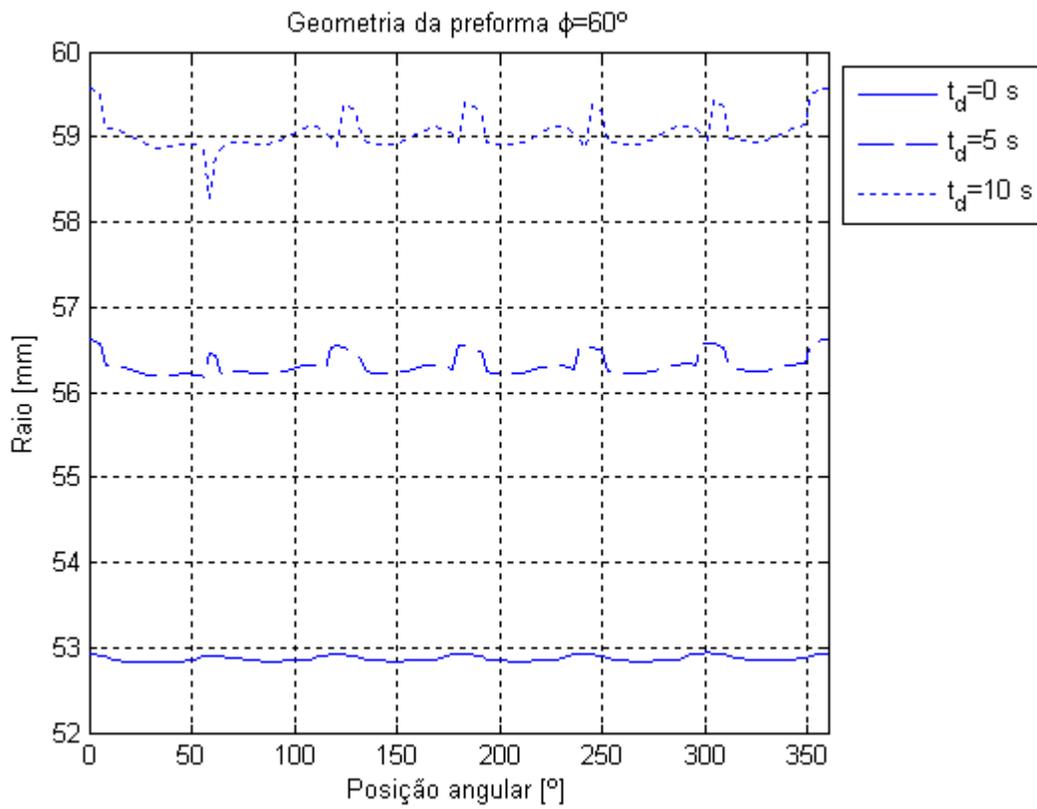


Figura 4.47. Efeito do tempo de “delay” na geometria da preforma para $\phi = 60^\circ$.

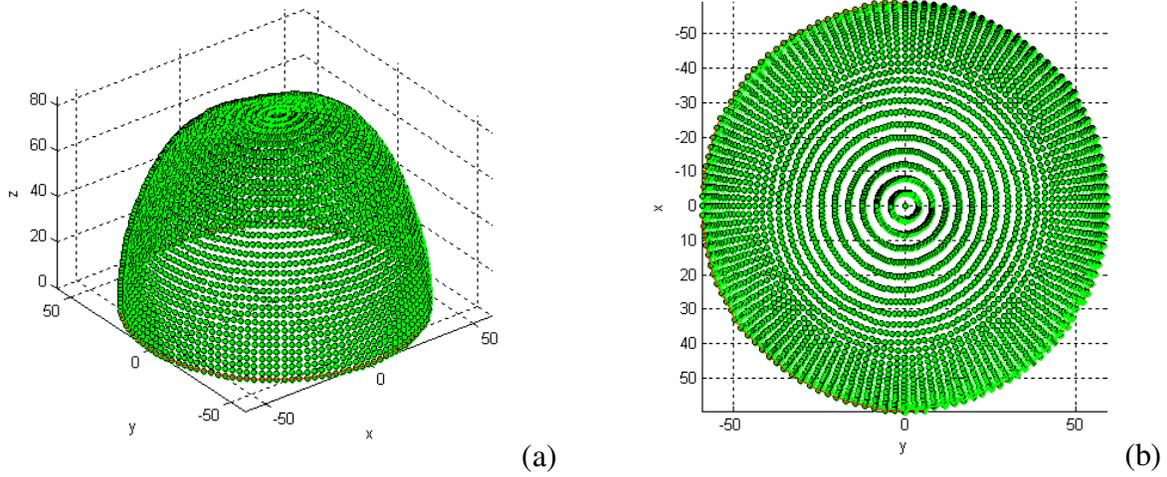


Figura 4.48. Geometria da preforma para $\varphi = 60^\circ$, $\Omega = 6$ RPM e $t_d = 10$ s: vistas lateral (a) e superior (b).

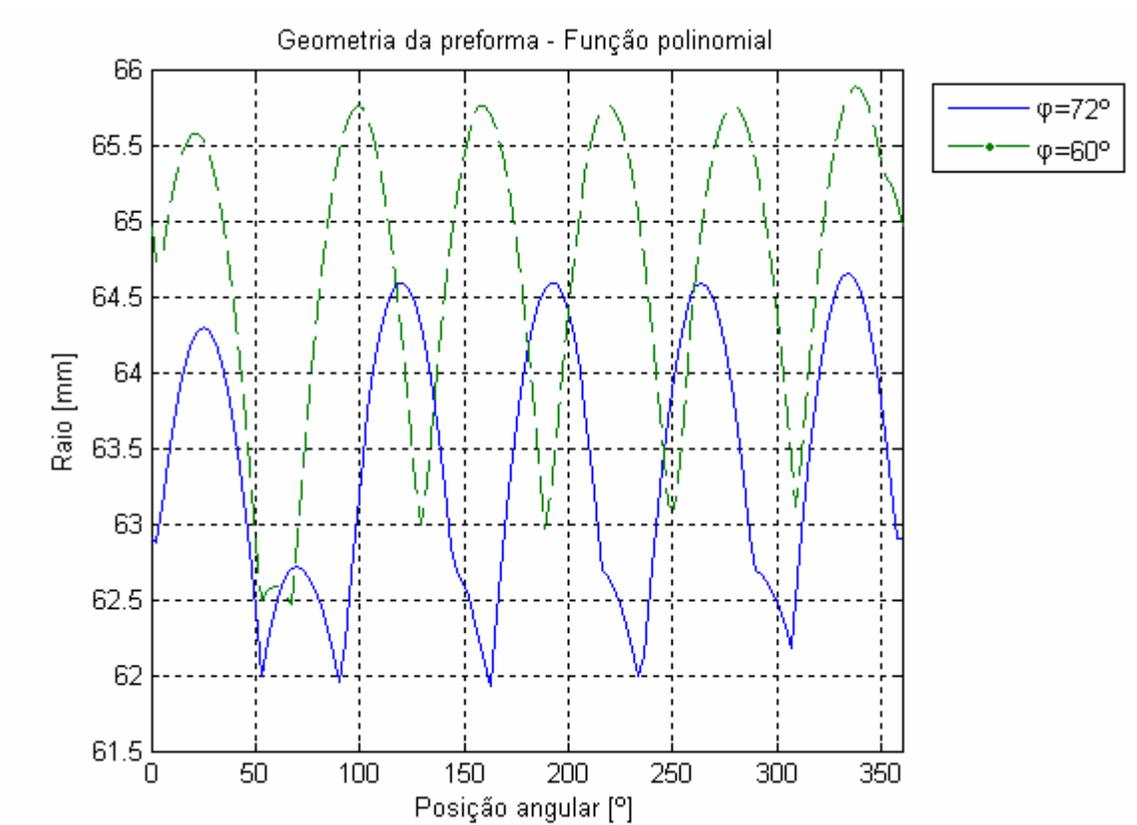
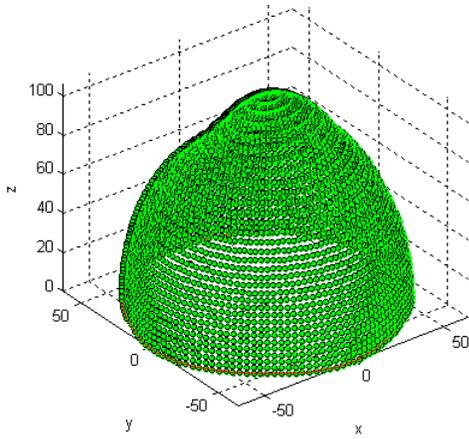
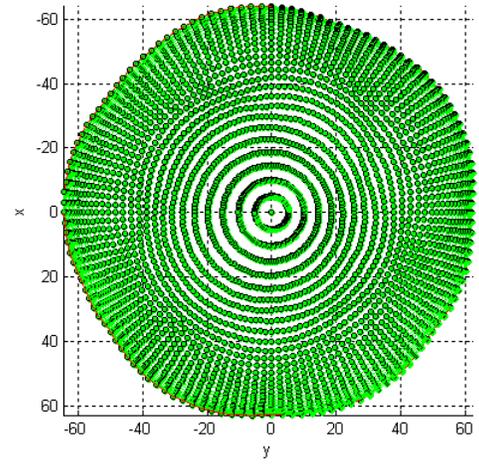


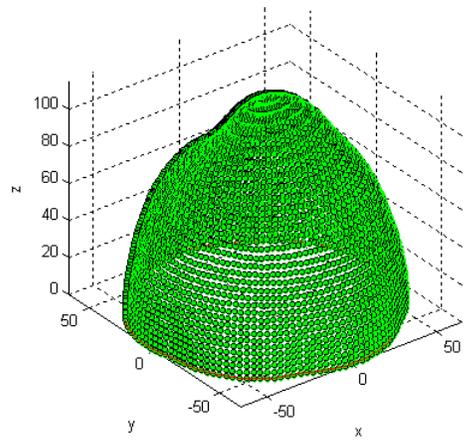
Figura 4.49. Geometria de preformas não-circulares simuladas através de função polinomial.



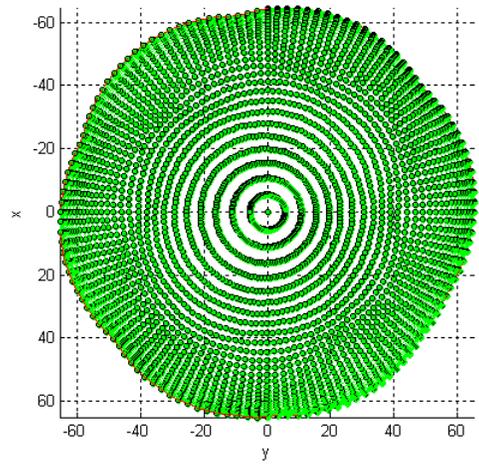
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.50. Geometria de preformas simuladas através de função polinomial com $\Omega = 6$ RPM e $t_d = 10$ s. $\varphi = 72^\circ$: vistas lateral (a) e superior (b). $\varphi = 60^\circ$: vistas lateral (c) e superior (d).

Capítulo 5

Conclusões

A metodologia proposta neste trabalho mostrou-se eficiente na fabricação de preformas elípticas e não-circulares, de sorte que a geometria foi mantida mesmo após a consolidação do *soot* através de tratamento termoquímico.

O sistema automatizado para controle da rotação durante a deposição foi implementado com sucesso, permitindo uma boa resolução no posicionamento angular do alvo, viabilizando a produção de geometrias não-circulares com simetria radial.

A simulação de modelos matemáticos também apresentou um bom desempenho, adequando-se aos resultados experimentais, mesmo com a adoção de hipóteses simplificadoras, principalmente em relação à modelagem de deposição do *soot*.

No caso de preformas elípticas, foi constatado, através do estudo dos parâmetros de processo, que a diferença entre os diâmetros máximo e mínimo da preformas pode ser incrementada através da implementação de valores elevados de t_d . Contudo, este ajuste de parâmetro leva também à formação de depressões nas posições de velocidade máxima, devido à interferência na superposição de camadas de *soot*. Entretanto, observou-se que estas irregularidades são atenuadas após a consolidação. Por outro lado, a implementação de t_d elevados pode acarretar em perdas no controle do perfil de dopagem, devido à variação na temperatura do alvo. Em relação à variação de Ω , pode-se afirmar que, em comparação ao t_d , o efeito desta variável não é tão significativo para a geometria da preforma, o que sugere a utilização de valores maiores a 15 RPM devido às conseqüências de Ω no perfil de dopagem.

Em relação à fabricação de preformas não-circulares, tanto as simulações quanto os resultados experimentais mostraram que o processo pode ser viabilizado para a produção de diversas geometrias. Apesar de comprovada a deposição de uma preforma triangular, não foi possível produzir uma matriz com formato quadrangular. Assim, para certas geometrias, os estudos indicaram a necessidade de ajuste de parâmetros do maçarico, com o intuito de prevenir os efeitos de interferência na superposição de camadas de *soot*.

A despeito dos problemas e obstáculos intrínsecos ao processo de pesquisa, pode-se afirmar que este trabalho foi concluído com sucesso, permitindo inclusive a redação de dois pedidos de patente, já depositados junto ao INPI.

5.1. Sugestões para próximos trabalhos

- Fabricação de fibra óptica mantenedora de polarização a partir das preformas produzidas;
- Estudo de *overcladding* não-circular sobre núcleo circular;
- Estudo dos parâmetros do maçarico para a fabricação de preforma quadrangular;
- Desenvolvimento e simulação de um modelo matemático completo para fabricação da preforma, considerando a deposição de *soot* nas direções radial e axial;
- Desenvolvimento de um software para medição da geometria da preforma durante a deposição, através de aquisição e tratamento de imagem ou com a utilização de um relógio comparador, o que propiciaria o levantamento do raio ao longo de toda a circunferência;
- Aprimoramento do software de controle de rotação;
- Aprimoramento do estudo de parâmetros de processo, agregando também variáveis como o perfil de aceleração e a aplicação de ciclos de velocidade de maior complexidade.

Trabalhos publicados

Fujiwara E., Ono E., Braga R. L. S., Suzuki C. K. Elliptical nucleous optical fiber design technique for advanced sensors. In: 5th International Conference on Mechanics and Materials in Design, Porto, *Proceedings*, 2006, pp.2-4.

Ono E, **Fujiwara E**, Suzuki C K A novel fabrication method of polarization-mantaining fiber for advanced sensors. In: IV International Symposium in Non-Crystalline Solids, Aracajú, *Proceedings*, 2007, pp.69.

Fujiwara E, Ono E, Suzuki C K Simulation study of deposition parameters for elliptical-shaped preforms by VAD for polarization-maintaining fibers. *AIP Conf. Proc.*, v.1055, pp.145-148, 2008.

Suzuki C.K., **Fujiwara E.**, Ono E., Braga R. L. S. *Processo, sistema de controle para fabricação de preforma de geometria elíptica, e fibra óptica produzida a partir desta técnica.* Universidade Estadual de Campinas, Campinas, INPI protocolo nº 018070054383, 2007.

Suzuki C. K., **Fujiwara E.**, Ono E. *Processo de produção de preforma não-circular, processo utilizando referido sistema e preforma de sílica obtida por meio do referido processo.* Universidade Estadual de Campinas, Campinas, INPI protocolo nº 018070045642, 2007.

Suzuki C. K., Gusken E., Mercado A. C., **Fujiwara E.**, Ono E. *Optical sensing system for liquid fuels.* Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Protocolo OMPI, PTC/BR2008/000231, 2008.

Referências Bibliográficas

Blakenship M., Deneka C. The outside vapor deposition method of fabricating optical waveguide fibers. *IEEE J. Quantum Electron.*, v.18, pp.1418-1423, 1982.

Birch R. D., Varnham M. P., Payne D. N., Tarbox E. J. Fabrication of polarization-maintaining fibers using gas-phase etching. *Electron. Lett.*, v.18, (24), pp.1036-1038, 1982.

Bonhert K., Gabus P., Nehring J., Brändle H. Temperature and vibration insensitive fiber-optic current sensor. *J. Lightwave Technol.*, v.20, (2), pp.267-276, 2002.

Borenstein J., Everett H. R., Feng L., Wehe D. Mobile robot positioning: sensors and techniques. *J. Robotic Syst.*, v.14, (4), pp.231-249, 1997.

Carter A., Tankala K., Seifert M. *Double-clad optical fiber for lasers and amplifiers*. Nufern, East Granby, CT (US), U.S. 6,687,445 B2. Feb 3, 2004.

Das G., Wit J. W. Y. L-band multiwavelength fiber laser using an elliptical fiber. *IEEE Photonics Technol. Lett.* V.14, (5), p.606-608, 2002.

Dianov E. M., Grudinin A. B., Gurjanov A. N., Gusovsky D. D., Harutjunian Z. E., Ignatjev S. V., Smirnov O. B. Circular core polarization-maintaining optical fibers with elliptical stress-induced cladding. *J. Lightwave Technol.*, v.10, (2), pp.118-124, 1992.

Dyott R. B., Day C. R., Brain M. C. Glass-fibre waveguide with a triangular core. *Electron. Lett.*, v.9, (13), 288-290, 1973.

- Fujiwara E., Ono E., Braga R. L. S., Suzuki C. K. Elliptical nucleous optical fiber design technique for advanced sensors. In: 5th International Conference on Mechanics and Materials in Design, Porto, *Proceedings*, 2006, pp.2-4.
- Fujiwara E., Ono E., Sekiya E. H., Suzuki C. K. Processo de eliminação de hidroxilas em sílica-germânia nanoestruturada para fibras ópticas. In: 49^o Congresso Brasileiro de Cerâmica, São Pedro, *Anais*, 2005, Ref. 12-06, pp.1-10.
- Hirai K., Hirose M., Haikawa Y., Takenaka T. The development of Honda humanoid robot. In: IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation, Leuven, *Proceedings*, 1998, pp.1321–1326.
- Horikoshi H. *Synthetic quartz glass for vacuum ultraviolet light, method of manufacturing the same and mask substrates for vacuum ultraviolet light using the same*. Tosoh Corp., Japan, JP. 2004-026586. Jan. 29, 2004.
- Hotate K. Future evolution of fiber optic gyros. *Opt. Rev.*, v.4, (1A), pp.28-34, 1997.
- Izawa T., Miyashita T., Hanawa F. *Continuous optical fiber preform fabrication method*. Nippon Telegraph and Telephone Public Corporation, Tokyo, Japan, U.S. 4,062,665. Dec. 13, 1977.
- Izawa T. Early days of VAD process. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, v.6, (6), pp.1120-1227, 2000.
- Izawa T., Sudo S. *Optical Fibers: Materials and Fabrication*. Tokyo: KTL Scientific Publishers, 1987, 186p.
- Jablonowski D. P. Fiber manufacture at AT&T with the MCVD process. *J. Lightwave Technol.*, v.LT-4, (8), pp.1016-1019, 1986.

- Jamal R. Graphical object-oriented programming with LabVIEW. *Nucl. Instrum. Methods*, v.352, (1-2), pp.438-441, 1994.
- Kajioka H., Yamada K., Nakamura M., Murakami K., Takuma Y. *Method of producing elliptic core type polarization-maintaining optical fiber*. Hitachi Cable LTD, Japan, U.S. 5,482,525. Jan. 9, 1996.
- Kimimichi Y., Takeyoshi T. *Production of elliptic-core type polarization plane maintaining optical fiber*. Hitachi Cable LTD, Japan, JP. 04-317432. Sep. 11, 1992.
- Méndez A. Specialty optical fibers tutorial: fundamentals, types, applications and trends. In: 1st Workshop on Specialty Optical Fibers and their Applications, São Pedro, 2008.
- Méndez A., Morse T. F. *Specialty Optical Fibers Handbook*. New York: Elsevier Academic Press, 2007, 798p.
- Mochizuki K., Namihira Y., Ejiri Y. Birefringence variation with temperature in elliptically clad single-mode fibers. *Appl. Opt.*, v.21, (23), pp.4223-4228, 1982.
- Murata H. Recent developments in vapor phase axial deposition. *J. of Light. Technol.*, v.LT-4, (8), pp.1026-1033, 1986.
- Nakaishi H. *Silica-based optical parts and their production*. Sumitomo Electric Ind. LTD, Japan, JP. 08-160240. Jun. 21, 1996.
- Noda J., Okamoto K., Sasaki Y. Polarization-maintaining fibers and their applications. *J. Lightwave Technol.*, v.LT-4, (8), pp.1071-1089, 1986.
- Okoshi T., Kikuchi K. *Coherent Optical Fiber Communications*. Tokyo: KTL Scientific Publishers, 1988, 278p.

Ono, Eduardo. *Automação e controle para a fabricação de preformas VAD para fibras ópticas de alta uniformidade geométrica*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2004, 53p. Dissertação (Mestrado).

Ono E., Sekiya E. H., Torikai E., Gusken E., Suzuki C. K. Sistema de automação para controle da uniformidade geométrica de preformas para fibra óptica. In: 2º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Uberlândia, *Anais*, 2003, Ref. COF03_0413, pp.1-7.

Paul A. *Chemistry of Glasses*. New York: Chapman and Hall, 1982, 380p.

Pavlath G. A. *Dual fiber optic gyroscope*. Litton Systems Inc., Bervelly Hills, CA (US), U.S. 4,997,282. Mar. 5, 1991.

Santos J. S., Ono E., Gusken E., Suzuki C. K. Correlation study between VAD preform deposition surface and germanium doping profile. *J. Lightwave Technol.*, v.24, (2), pp.831-837, 2006.

Schultz P. C. Fabrication of optical waveguides by the outside vapor deposition process. *Proc. IEEE*, v.68, (10), pp.1187-1980, 1980.

Sharon A., Lin S. Development of an automated fiber optic winding machine for gyroscope production. *Robot. Com-Int. Manuf.*, v.17, pp.223-231, 2001.

Shiraishi N. *Photomask and exposure method*. Nikon Corporation, Japan, U.S. 6,727,025. Apr. 27, 2004.

Stolen R. H., Ramaswamy V., Kaiser P., Pliebel W. Linear polarization in birefringent single-mode fibers. *Appl. Phys. Lett.*, v.33, (8), pp.699-701, 1978.

Suzuki C. K., Torikai D. Vitreous silica processing by vapor phase deposition for optical fiber preform. *Radiat. Eff. Defects Solids*, v.147, (1-2), pp.55-63, 1998.

- Suzuki C.K., Fujiwara E., Ono E., Braga R. L. S. *Processo, sistema de controle para fabricação de preforma de geometria elíptica, e fibra óptica produzida a partir desta técnica.* Universidade Estadual de Campinas, Campinas, INPI protocolo nº 018070054383, 2007a.
- Suzuki C. K., Fujiwara E., Ono E. *Processo de produção de preforma não-circular, processo utilizando referido sistema e preforma de sílica obtida por meio do referido processo.* Universidade Estadual de Campinas, Campinas, INPI protocolo nº 018070045642, 2007b.
- Watanabe M., Matsuda Y. Development of optical fiber technology in Japan. *IEEE Electr. Insul. Mag.*, v.8, (4), pp.5-15, 1992.
- Yamaguchi R., Miyamoto M., Oodashi T., Fukuda O. *Method of manufacturing a preform for asymmetrical optical fiber.* Fujikura LTD, Japan, U.S. 4,935,045. Jun. 19, 1990.
- Zhang F., Wit J. W. Y. Temperature and strain sensitivity measurements of high-birefringent polarization-maintaining fibers. *Appl. Opt.*, v.32, (13), pp.2213-2218, 1993.