

ESTE EXEMPLAR É A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR EDUARDO ONO
E APROVADA PELA
COMISSÃO JULGADORA EM 27/07/04


ORIENTADOR

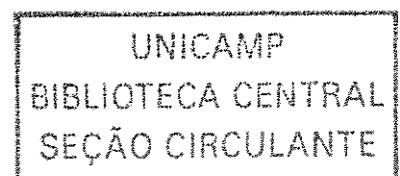
**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

Automação e controle para fabricação de preformas VAD para fibras ópticas de alta uniformidade geométrica

Autor: **Eduardo Ono**

Orientador: **Carlos Kenichi Suzuki**

07/04



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

Automação e controle para fabricação de preformas VAD para fibras ópticas de alta uniformidade geométrica

**Autor: Eduardo Ono
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, 27 de julho de 2004
S.P. – Brasil**

UNIDADE	BC
Nº CHAMADA	
	T/UNICAMP
	On6a
V	EX
TOMBO BC/	62502
PROC.	16-66-05
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	11,00
DATA	10/3/05
Nº CPD	

Bib. id. 342916

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

On6a	<p>Ono, Eduardo</p> <p>Automação e controle para fabricação de preformas VAD para fibras ópticas de alta uniformidade geométrica / Eduardo Ono. --Campinas, SP: [s.n.], 2004.</p> <p>Orientador: Carlos Kenichi Suzuki. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.</p> <p>1. Fibras ópticas. 2. Automação. 3. Controle automático. 4. Vapor-deposição. I. Suzuki, Carlos Kenichi. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.</p>
------	--

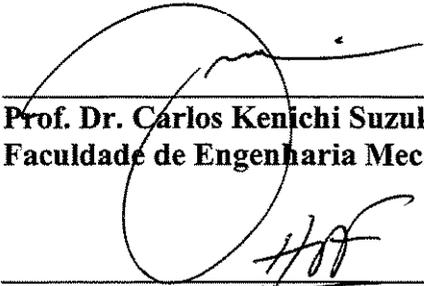
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

Dissertação de Mestrado Acadêmico

**Automação e controle para fabricação de
preformas VAD para fibras ópticas de alta
uniformidade geométrica**

Autor: **Eduardo Ono**

Orientador: **Carlos Kenichi Suzuki**



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

Prof. Dr. Hugo Luís Fragnito
Instituto de Física Gleb Wataghin – UNICAMP



Prof. Dr. João Maurício Rosário
Faculdade de Engenharia Mecânica – UNICAMP

Campinas, 27 de julho de 2004

Agradecimentos

Este trabalho não poderia ter sido concluído sem a colaboração inestimável daqueles a quem presto minha gratidão:

- Ao meu orientador, Prof. Dr. Carlos K. Suzuki, que me mostrou os caminhos a serem seguidos.
- Ao Prof. Dr. Delson Torikai e Dr. Edson H. Sekiya pela amizade e valiosas discussões.
- Aos colegas do Laboratório Ciclo Integrado de Quartzos (LIQC), Prof. Dr. Armando H. Shinohara, Carlos Q. Hiramatsu, Daniela Y. Ogata, Edmilton Gusken, Fábio B. Pinho, Prof. Dr. Masahiro Tomiyama, Nadia Marcuz, Prof. Dr. Raul F. Cuevas, Rone C. Morales e principalmente à Juliana S. Santos, pelos momentos agradáveis e paciência durante todo o tempo em que estivemos juntos.
- Ao colega Cláudio R. Silveira pelo apoio técnico laboratorial.
- À colega Rita H. B. Jacon por conduzir as medidas de FRX.
- Ao Prof. Masahiro Motoshige pela consultoria técnica e valiosas discussões.
- Ao Prof. Hiroshi Shimizu pela confecção dos maçaricos VAD utilizados neste trabalho.
- Ao grande amigo Benício B. Bernardes.
- A todos os professores e colegas do departamento que de forma direta ou indireta contribuíram para minha formação.
- Ao LNLS, LME/UNICAMP, pela disponibilização de equipamentos e infra-estrutura.
- A CAPES, CNPq, FAPESP, FINEP/PADCT-III, LNLS pelo suporte financeiro.

“Compartilhar o conhecimento é uma forma de alcançar a imortalidade.”

(Dalai Lama)

Resumo

ONO, Eduardo. *Automação e controle para fabricação de preformas VAD para fibras ópticas de alta uniformidade geométrica*. Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2004.

Um novo processo VAD (“Vapor-phase Axial Deposition”), em desenvolvimento no Laboratório Ciclo Integrado do Quartzo – LIQC, FEM, UNICAMP, introduz uma série de inovações tecnológicas e maior viabilidade econômica sobre os atuais processos de fabricação de fibra óptica. Para a produção de uma fibra de alta qualidade, a uniformidade geométrica da preforma porosa, gerada na etapa de deposição do processo, possui grande relevância na uniformidade das características da fibra final, tais como a atenuação e a dispersão. Para o controle da geometria da preforma em deposição, desenvolveu-se um sistema em LabVIEW, para a plataforma PC, para atuar continuamente e em tempo real na etapa de deposição de modo a manter o diâmetro da preforma constante. Em sua essência, o sistema de controle realimentado, baseado no controlador PID, atua na velocidade do mecanismo de posicionamento da preforma em função do valor do diâmetro na região inferior da preforma. Esse diâmetro é obtido pelo processamento da imagem adquirida por uma câmera de vídeo CCD da região da preforma em deposição. Embora tenha sido desenvolvido para a escala laboratorial, o sistema mostrou bom desempenho e estabilidade, podendo ser empregado na produção industrial em grande escala de preformas para fibra óptica. Nesse sistema, variações dimensionais no diâmetro da preforma da ordem de 0,3 mm são corrigidos, obtendo-se uma precisão cinco vezes maior quando comparado a sistemas convencionais, favorecendo uma menor incidência de rejeitos de produção de preformas e, conseqüentemente, menor custo de produção.

Palavras-chave

VAD, automação, fibra óptica, LabVIEW, preforma.

Abstract

ONO, Eduardo. *Automation and control for VAD preforms fabrication for optical fibers with high geometrical uniformity*. Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2004.

An advanced VAD (Vapor-phase Axial Deposition) technique has been developed at Laboratory of Integrated Quartz Cycle – LIQC – FEM – UNICAMP. It introduces a series of technological innovations with a greater economical viability over actual optical fiber manufacturing processes. For a high quality optical fiber production, several steps and process parameters must be carefully set. The geometrical uniformity of the preform during the deposition stage is one of the most important parameter for the final uniformity, which determines the characteristics of the final fiber in terms of attenuation and dispersion. To control the preform geometry during the deposition, a computer system based on LabVIEW platform was developed, to act continuously and in real time on the deposition stage, in order to maintain constant the preform diameter. In its essence, the feedback system, based on PID controller, acts on the speed of the preform positioning mechanism, according to the value of the diameter detected in the deposition region. This diameter is obtained through the image processing grabbed from a CCD video camera. Although, it was developed in a laboratorial scale, the system showed a good performance and stability, which can be applied on an industrial mass production scale for fiber optics. In this system, dimensional variations in the order of 0.3 mm on the preform diameter can be corrected, that corresponds to a precision about 5 times better than that achieved by conventional industrial systems, with a benefit of a lower incidence of production rejects and, therefore, a lower production cost.

Key words

VAD, automation, optical fiber, LabVIEW, preform.

Índice

ÍNDICE	I
LISTA DE FIGURAS	III
LISTA DE TABELAS	V
NOMENCLATURA.....	VI
CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO 2 FUNDAMENTOS	3
2.1 PERSPECTIVA HISTÓRICA DA COMUNICAÇÃO ÓPTICA	3
2.2 A FIBRA ÓPTICA	3
2.2.1 <i>Tipos Básicos de Fibra Ópticas</i>	5
2.2.2 <i>Índice de Refração</i>	5
2.2.3 <i>Perfil de Índice de Refração</i>	8
2.2.4 <i>Abertura Numérica</i>	9
2.2.5 <i>Perda de Sinal em Fibras Ópticas</i>	10
2.3 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE FIBRAS ÓPTICAS	10
2.3.1 <i>Processo PCVD</i>	11
2.3.2 <i>Processo MCVD</i>	12
2.3.3 <i>Processo OVD</i>	13
2.3.4 <i>Processo VAD</i>	14
2.4 OBTENÇÃO DE PREFORMAS DE SÍLICA–GERMÂNIA PELO MÉTODO VAD	15
2.4.1 <i>Controle da Geometria da Preforma</i>	16
CAPÍTULO 3 MATERIAIS E MÉTODOS	18
3.1 INFRA-ESTRUTURA E TECNOLOGIA VAD NO LIQC	18
3.1.1 <i>Câmara de Deposição</i>	18
3.1.2 <i>Maçaricos VAD</i>	20
3.2 SISTEMA DE CONTROLE DA DEPOSIÇÃO.....	21
3.2.1 <i>Câmara Laboratorial</i>	21

3.2.2	<i>Câmara Piloto-Industrial</i>	22
3.3	FERRAMENTAS PARA A AUTOMAÇÃO	25
3.3.1	<i>LabVIEW</i>	25
3.3.2	<i>Método de Detecção da Borda da Preforma</i>	25
3.3.3	<i>Controlador PID</i>	26
3.4	CARACTERIZAÇÃO DO PERFIL DE CONCENTRAÇÃO DE GeO_2	27
3.4.1	<i>Preparação de Amostras</i>	27
3.4.2	<i>Medidas da concentração de GeO_2 por FRX</i>	27
CAPÍTULO 4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	29
4.1	SISTEMA DE CONTROLE NA CÂMARA LABORATORIAL	29
4.2	SISTEMA DE AUTOMAÇÃO E CONTROLE NA CÂMARA PILOTO-INDUSTRIAL	31
4.2.1	<i>Automação para o Controle da Uniformidade Geométrica da Preforma</i>	32
4.2.2	<i>Deposição de “Soot-overcladding”</i>	36
4.2.3	<i>Rotação da Preforma</i>	37
4.2.4	<i>Monitoramento da Temperatura da Superfície de Deposição da Preforma</i>	39
4.3	CARACTERIZAÇÃO DO PERFIL DE CONCENTRAÇÃO DE GeO_2	40
4.3.1	<i>Influência do Processo de Desidratação no Perfil de Concentração de GeO_2</i>	41
CAPÍTULO 5	CONCLUSÕES	45
5.1	SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS	46
	TRABALHOS PUBLICADOS	47
	REFERÊNCIAS	49

Lista de Figuras

Figura 2.1. Espectro da radiação eletromagnética.....	4
Figura 2.2. Tipos de fibra e respectivos perfis de índice de refração e modo de propagação.....	5
Figura 2.3. Densidade da sílica–germânia em função da fração molar de GeO ₂ (HUANG, 1978). ..	6
Figura 2.4. Índice de refração do vidro de sílica–germânia para $\lambda = 0,5893$ em função da fração molar de GeO ₂ (HUANG, 1978). ..	6
Figura 2.5. Índice de refração do vidro de GeO ₂ em função do comprimento de onda.....	7
Figura 2.6. Método para auto posicionamento da preforma utilizando-se um laser (NAKAHARA, 1983). ..	17
Figura 3.1. Câmara piloto industrial.....	19
Figura 3.2. Maçaricos VAD de várias geometrias.	20
Figura 3.3. Maçarico M11-5V de cinco vias.....	21
Figura 3.4. Diagrama esquemático da câmara de deposição piloto-industrial.....	23
Figura 3.5. Diagrama com os parâmetros para detecção da borda (HANKS, 1998).....	26
Figura 3.6. Porta-amostra utilizado nas medidas de FRX.....	28
Figura 4.1. Interface do software para acionamento de motores de passo desenvolvido em Delphi.	30
Figura 4.2. Preforma depositada com controle manual de posicionamento.....	30
Figura 4.3. Forno utilizado para desidratação e consolidação da preforma.	31
Figura 4.4. Janelas de interface que compõe o sistema de automação e controle VAD.	32

Figura 4.5. Deposição da preforma porosa.	33
Figura 4.6. Imagem da superfície de deposição da preforma com a linha de referência posicionada.	34
Figura 4.7. Interface do módulo de imagem com os controles para o posicionamento da linha de referência, ajuste do “setpoint” e das margens.	35
Figura 4.8. Preforma depositada com controle automatizado.	36
Figura 4.9. Controle da uniformidade do diâmetro no processo de “soot-overcladding”	37
Figura 4.10. Interface do módulo de rotação para o controle da velocidade e sentido de rotação da preforma.	38
Figura 4.11. “Clusters” de germânio (linhas brancas) decorrentes do efeito de rotação.	39
Figura 4.12. Janela de interface do módulo de temperatura.	40
Figura 4.13. Perfil de concentração de GeO ₂ da preforma D183.	41
Figura 4.14. Efeito da desidratação no perfil da concentração de GeO ₂ em regiões extremas da preforma.	42
Figura 4.15. Efeito da remoção de GeO ₂ na etapa de desidratação.	42
Figura 4.16. Perfis de GeO ₂ ao longo da preforma D222 não desidratada. As distâncias indicadas são referentes ao extremo inferior da preforma.	43
Figura 4.17. Perfis de GeO ₂ ao longo da preforma D236 não desidratada. As distâncias indicadas são referentes ao extremo inferior da preforma.	44

Lista de Tabelas

Tabela 2.1. Coeficientes de Sellmeier para o vidro de SiO_2 e GeO_2	7
Tabela 3.1. Hardware básico utilizado para o controle da deposição da câmara laboratorial.	22
Tabela 3.2. Hardware utilizado para a automação da câmara piloto-industrial.	24
Tabela 3.3. Softwares utilizados para a automação da câmara piloto-industrial.	24

Nomenclatura

FRX	Espectroscopia de Fluorescência de Raios-X
Ge	Germânio
GeCl ₄	Tetracloroeto de germânio
GeO ₂	Germânia (dióxido de germânio)
MCVD	“Modified Chemical-Vapor Deposition”
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
OVD	“Outside Vapor Deposition”
PCVD	“Plasma Chemical-Vapor Deposition”
PID	Proporcional–Integral–Derivativo
Si	Silício
SiCl ₄	Tetracloroeto de silício
SiO ₂	Sílica (dióxido de silício)
VAD	“Vapor-phase Axial Deposition” (deposição axial em fase vapor)
VADACS	“VAD Automation and Control System” (Sistema de controle e automação VAD)

Capítulo 1

Introdução

O advento da era da informação representou um grande impacto na sociedade moderna. No âmbito da Tecnologia da Informação, a popularização da Informática e principalmente da Internet introduziram novos meios de comunicação e de transferência de informações. Na área das telecomunicações, a crescente demanda por maior largura de banda a transferência ultra rápida de um grande volume de informações impulsionou o desenvolvimento de novas tecnologias nos sistemas de comunicação.

A substituição dos cabos metálicos pela fibra óptica veio suprir a todas essas necessidades, introduzindo a geração dos sistemas ópticos de comunicação. Nos últimos 20 anos, o sistema de comunicação óptica evoluiu com espantosa velocidade, introduzindo novas tecnologias de transmissão e amplificação do sinal óptico. Nesse mesmo período, os processos de fabricação de fibras ópticas também acompanharam essa rápida evolução, sendo fundamentais para o avanço de todo o sistema de comunicação.

Dentre os processos de fabricação de fibras ópticas utilizados atualmente, o método conhecido como VAD (“Vapor-phase Axial Deposition”) tem mostrado ser bastante versátil e de baixo custo (SUZUKI, 1998). Neste contexto, o Laboratório Ciclo Integrado de Quartzos – LIQC, pertencente à Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP, iniciou em 1996 um projeto pioneiro em toda a América Latina para o desenvolvimento da tecnologia VAD no país (SUZUKI, 2000). Porém, a não disponibilidade de equipamentos VAD comerciais na época determinou que todo o desenvolvimento de toda a tecnologia necessária para o domínio do processo fosse feito integralmente no LIQC.

Dentre as várias etapas do processo VAD, a principal constitui-se na deposição de uma preforma de formato cilíndrico com grandes dimensões, porém, com as mesmas características da fibra final. Uma das grandes dificuldades durante essa etapa é o controle da geometria da preforma, de modo que o corpo cilíndrico mantenha o diâmetro uniforme.

O presente trabalho refere-se ao desenvolvimento e implantação de um sistema de automação e controle em LabVIEW para o processo de deposição VAD, visando a produção de preformas para fibras ópticas com alto grau de uniformidade geométrica. Nesse sistema foram utilizadas técnicas de aquisição e tratamento de imagem e controlador PID para a realimentação de todo o sistema.

Capítulo 2

Fundamentos

2.1 Perspectiva Histórica da Comunicação Óptica

Em 1854, o físico britânico Tyndall descobriu que a luz podia ser transmitida através da fibra óptica devido ao fenômeno da reflexão interna total. Durante os anos 50, as fibras ópticas de grande diâmetro (1,0 a 2,0 mm) foram utilizadas na medicina em endoscópios para visualização de partes internas do corpo humano. Naquela época, as fibras ópticas forneciam um canal ótico muito mais confiável e versátil do que o ar, porém, produziam uma perda de 1000 dB/km, muito maior que a perda no ar. Em 1966, Kao e Hockham, da Standard Telecommunication Laboratory, na Inglaterra, perceberam que as grandes perdas resultavam de impurezas no material da fibra e publicaram o primeiro artigo sobre a possibilidade de transmissão de informações por fibras ópticas com perdas inferiores a 20 dB/km (ARUMUGAM, 2001). Em 1970, a “Corning Glass Works” desenvolveu o processo ISD (“Inside Soot Deposition”), com o qual foi produzida a primeira fibra com perda inferior a 20 dB/km ($\lambda = 0,63 \mu\text{m}$) usando como material a sílica pura (KAPRON, 1970). A esse nível de perda, a distância entre as repetidoras de cabos óticos tornou-se comparável as usadas por sistemas de cabos de cobre, tornando a comunicação ótica uma realidade.

2.2 A Fibra Óptica

A *fibra óptica* é um guia de luz de alta capacidade. Basicamente, a fibra óptica é formada por dois cilindros concêntricos, o núcleo (“core”) por onde percorre a luz e a casca óptica

("clad"). No núcleo, o germânio é normalmente utilizado como principal elemento dopante, porém, outros elementos, como o alumínio, também são utilizados. Alternativamente, a casca, geralmente constituída de sílica, também pode ser dopada com flúor para diminuir o índice de refração e aumentar a diferença de índice de refração entre o núcleo e a casca. A faixa espectral utilizada para a comunicação óptica está indicada na Figura 2.1.

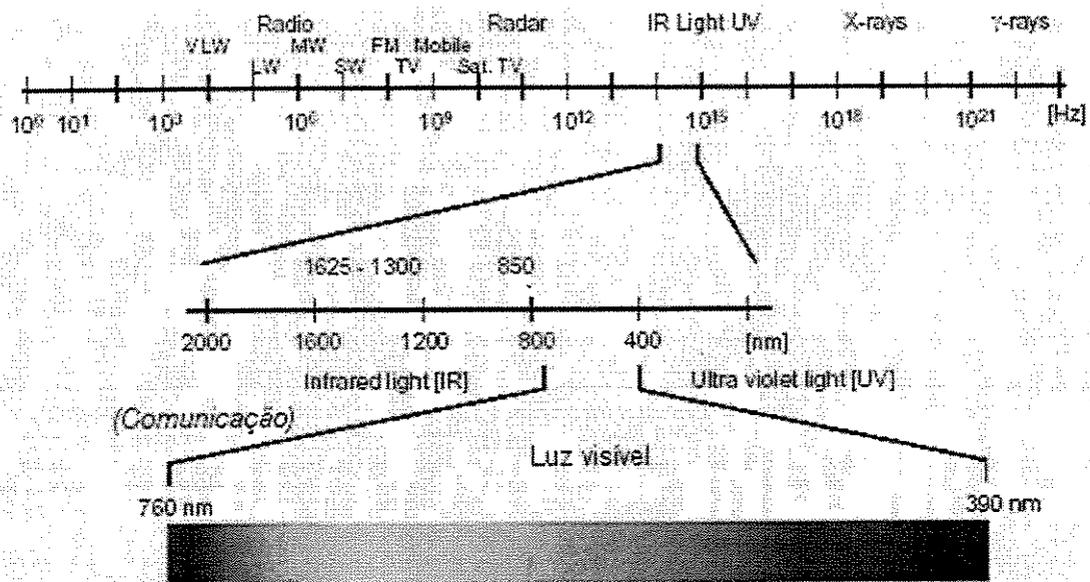


Figura 2.1. Espectro da radiação eletromagnética.

Com relação à tecnologia convencional de comunicação por fios de cobre, dentre as inúmeras vantagens da fibra óptica, podemos destacar:

- O peso da fibra óptica é quase insignificante. Para se produzir 100 km de fibra são necessários apenas 2,7 kg de sílica vítrea.
- A sílica vítrea é um material não condutor de eletricidade e, portanto, não sofre efeitos de interferência eletromagnética e também não interfere em outros equipamentos.
- Expectativa de vida em torno de 25 anos.

2.2.1 Tipos Básicos de Fibra Ópticas

A tecnologia de fabricação e fibras ópticas passou por grandes evoluções nos últimos 20 anos. Atualmente, os grandes fabricantes de fibra possuem diversos tipos de fibras, algumas para uso bastante específico. Entretanto, existem basicamente três tipos de fibras: i) monomodo (“single-mode”), multimodo (“multi-mode”) e as fibras especiais Figura 2.2.

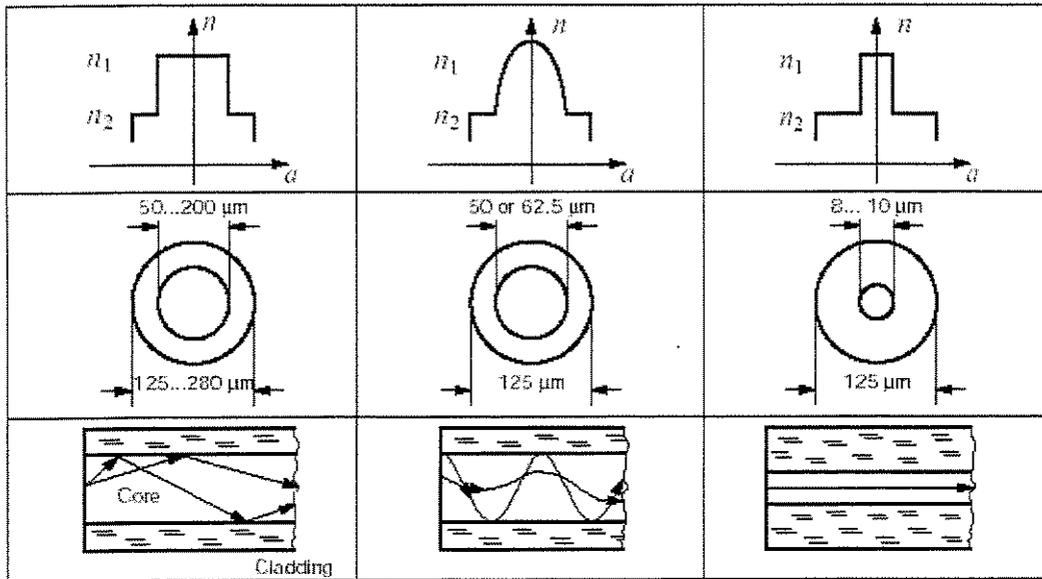


Figura 2.2. Tipos de fibra e respectivos perfis de índice de refração e modo de propagação.

2.2.2 Índice de Refração

O confinamento da luz no interior da fibra óptica é possibilitado pelo princípio da refração e da reflexão total da luz. Para isso, é necessário que a fibra possua em seu núcleo um índice de refração maior que o da casca. O aumento do índice de refração no núcleo é possível através da adição de elementos dopantes durante o processo de fabricação. Atualmente, o germânio é utilizado como principal elemento dopante.

A introdução do germânio na forma de óxido na matriz de sílica produz uma alteração na densidade (Figura 2.3) e no índice de refração do material (Figura 2.4).

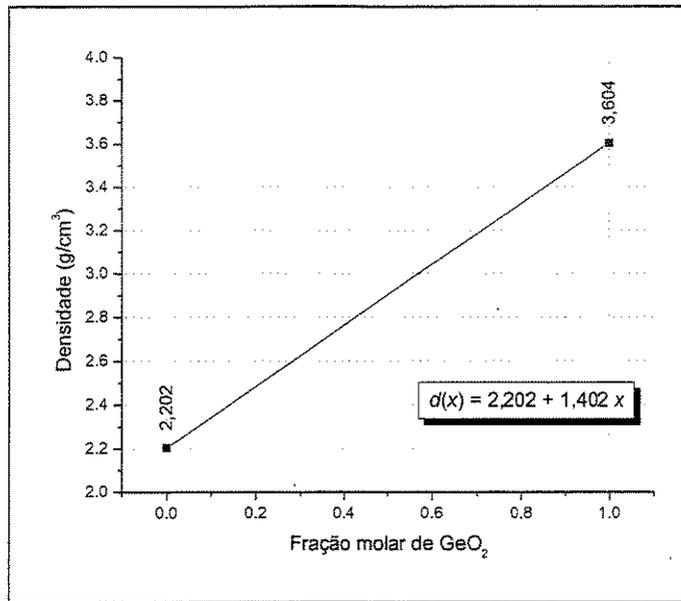


Figura 2.3. Densidade da sílica-germânia em função da fração molar de GeO₂ (HUANG, 1978).

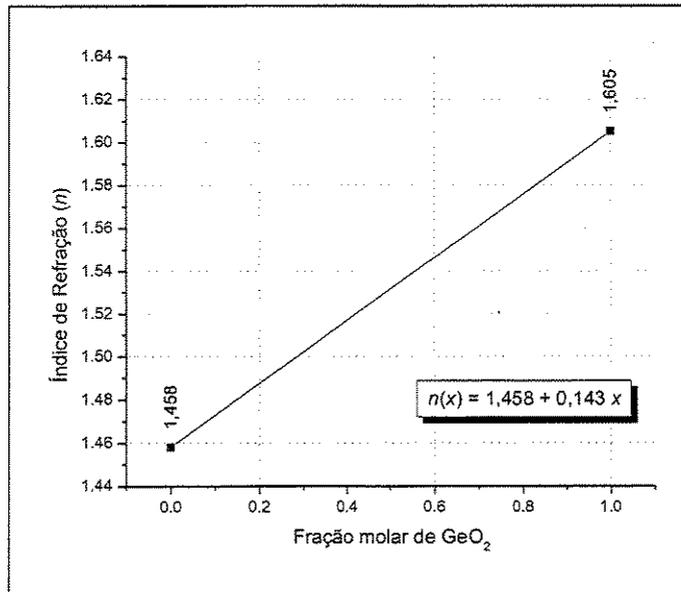


Figura 2.4. Índice de refração do vidro de sílica-germânia para $\lambda = 0,5893$ em função da fração molar de GeO₂ (HUANG, 1978).

Para o caso do vidro de germânia (100% GeO₂), o índice de refração em função do comprimento de onda não apresenta comportamento linear sob um grande espectro de comprimento de onda (Figura 2.5).

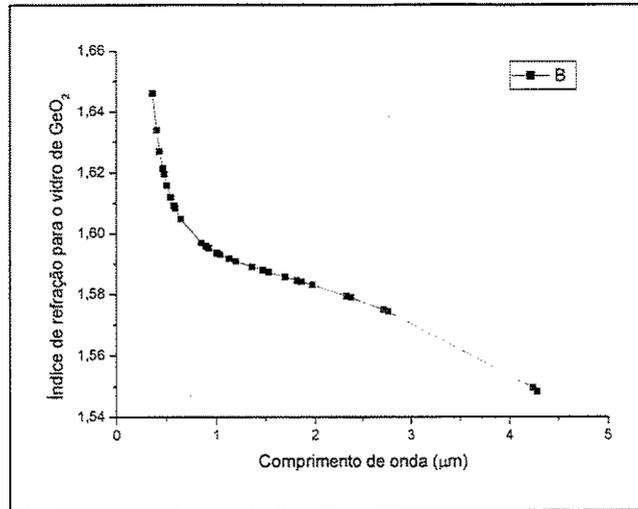


Figura 2.5. Índice de refração do vidro de GeO₂ em função do comprimento de onda.

É possível obter o valor do índice de refração da sílica-germânia em função da fração molar de GeO₂ através da seguinte fórmula (FLEMING, 1984):

$$n^2 - 1 = \sum_{i=1}^3 \frac{[SA_i + X(GA_i - SA_i)] \cdot \lambda^2}{\lambda^2 - [SI_i + X(GI_i - SI_i)]^2}, \quad (1)$$

onde *SA*, *SI*, *GA* e *GI* são os coeficientes de Sellmeier para o SiO₂ e GeO₂, respectivamente, e *X* a fração molar de GeO₂.

Os valores para os coeficientes de Sellmeier também dependem da fração molar dos elementos que compõem o vidro. Para o caso dos vidros de sílica pura e germânia pura, esses valores são dados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1. Coeficientes de Sellmeier para o vidro de SiO₂ e GeO₂.

	<i>A</i> ₁	<i>I</i> ₁	<i>A</i> ₂	<i>I</i> ₂	<i>A</i> ₃	<i>I</i> ₃
SiO ₂	0,690230	0,068763	0,408997	0,115823	0,882693	9,819476
GeO ₂	0,806866	0,0689726	0,718158	0,153966	0,854168	11,841931

Apesar da equação (1) indicar uma relação não-linear entre o índice de refração do vidro de sílica-germânia em função da concentração de GeO₂, para o intervalo de comprimento de onda utilizado na comunicação óptica essa relação é praticamente linear (FLEMING, 1984). Neste caso,

é possível estimar o índice de refração através dos valores dos índices de refração dos vidros de SiO_2 e GeO_2 .

2.2.3 Perfil de Índice de Refração

Quando o índice de refração de uma fibra óptica é função de sua posição radial, aplica-se o termo *perfil de índice de refração*, sendo que as propriedades ópticas mais relevantes de uma fibra dependem basicamente de seu perfil de índice de refração (NOUCHI, 2003). Alguns parâmetros relacionados com o perfil do índice de refração são fundamentais para se definir características básicas para a propagação do sinal óptico.

A diferença de índice de refração normalizada Δ é dada por:

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \quad (2)$$

onde n_1 é o índice de refração no centro do núcleo e n_2 o índice de refração da casca.

Para pequenas diferenças entre n_1 e n_2 , é válida a relação:

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \cong \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (3)$$

Para fibras de índice degrau, o índice de refração n é dado por:

$$n = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (4)$$

Para fibras de índice gradual, o índice de refração para a região do núcleo, $r \leq a$, é dado por (IZAWA, 1987):

$$n(r) = n_1 \left[1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a} \right)^\alpha \right]^{1/2} \cong n_1 \left[1 - \Delta \left(\frac{r}{a} \right)^\alpha \right], \quad (5)$$

onde n_1 é o índice de refração no centro do núcleo, Δ a diferença de índice de refração normalizada, r a posição radial a partir do eixo, a o raio do núcleo e α o parâmetro expoente do perfil de índice.

Quando $\alpha = 1$, o índice de refração varia radialmente de forma praticamente linear. Para $\alpha \rightarrow \infty$, o índice apresenta uma variação brusca entre o núcleo e a casca. Para $\alpha = 2$, a fibra apresenta índice de perfil parabólico.

2.2.4 Abertura Numérica

A *abertura numérica* (AN) é um parâmetro relacionado com o ângulo de abertura do cone da luz incidente na fibra e que será guiado. Para as fibras amplificadoras para a banda-C, esse valor deve ser em torno de 0,2.

Para fibras de índice degrau, a abertura numérica é dada por:

$$AN = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}, \quad (6)$$

onde n_1 é o índice de refração do núcleo e n_2 o índice de refração da casca. Para a sílica pura, $n_2 = 1,458$.

Para fibras de índice gradual, a abertura numérica é dada por:

$$AN(r) = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \cdot \left[1 - \left(\frac{r}{a} \right)^\alpha \right]^{1/2} \cong n_1 (2\Delta)^{1/2} \cdot \left[1 - \left(\frac{r}{a} \right)^\alpha \right]^{1/2}. \quad (7)$$

A classificação dos tipos de fibras é feita conforme a variação do índice de refração da fibra. Nas fibras denominadas *multimodo* (MMF em inglês), o núcleo possui um diâmetro muito maior quando comparado ao comprimento de onda de luz guiada. Na fibra monomodo (SMF em inglês), o diâmetro do núcleo é bem menor e apenas um único modo é transmitido, podendo ocorrer duas polarizações ortogonais da onda guiada. O comportamento da fibra como multimodo ou monomodo depende de vários parâmetros ópticos (índice de refração, abertura numérica, perfil de índice de refração do núcleo, etc.), do comprimento de onda e do diâmetro do núcleo.

2.2.5 Perda de Sinal em Fibras Ópticas

A aplicação da fibra óptica nas telecomunicações tornou-se viável com a redução da perda do sinal para menos de 20 dB/km. Atualmente, o avanço tecnológico dos processos de fabricação possibilitou a fabricação de fibras com atenuação abaixo de 0,2 dB/km em $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$. Acredita-se que o limite teórico para a sílica vítrea seja de 0,15 dB/km, decorrente da perda por espalhamento Rayleigh (OHMORI, 1983).

A *atenuação* ou *perda de sinal* em fibras ópticas pode ser classificada em absorção e dispersão. Basicamente, a *absorção* limita a distância do enlace e *dispersão* limita a largura de banda do enlace. A atenuação é normalmente medida em dB/km e a dispersão em ps/(nm·km).

Na região do infravermelho e além (5-50 μm) ocorrem fortes bandas de absorção devido às oscilações de unidades estruturais como Si-O (9,2 μm), P-O (8,1 μm), B-O (7,2 μm) e Ge-O (11,0 μm) no interior da matriz vítrea. Na região do ultravioleta, transições eletrônicas causam fortes bandas de absorção.

A absorção por impurezas é causada principalmente devido a presença de grupos de hidroxilas (OH) que estão ligados na estrutura vítrea, cujas vibrações fundamentais ocorrem entre 2,7 μm e 4,2 μm , dependendo da posição da hidroxila na estrutura da matriz vítrea (PLOTNICHENKO, 2000).

2.3 Processos de Fabricação de Fibras Ópticas

A sílica vítrea é encontrada em um vasto campo de aplicações, tanto nos setores industriais quanto de pesquisa, devido as suas extraordinárias propriedades físico-químicas. Dentre essas propriedades destacam-se a resistência ao choque térmico, durabilidade, alta resistência à deformação sob calor, alta pureza química e conseqüentemente alta resistência à radiação. Essas são propriedades específicas da sílica vítrea e não são encontradas em nenhum outro material amorfo (FANDERLIK, 1991). Na área da comunicação óptica, a sílica vítrea é notoriamente reconhecida como o melhor material para confecção de fibras de transmissão devido à baixa atenuação óptica, alta resistência mecânica e excelente durabilidade, possuindo uma excelente

transparência óptica sobre uma ampla região de comprimento de onda próxima ao infravermelho e ultravioleta (IKUSHIMA, 2000).

A sílica natural (quartzo) não pode ser usada diretamente para a produção de fibra óptica. O quartzo e minérios de quartzo contêm quantidades inaceitáveis de impurezas, principalmente metálicas. Ao invés disso, a sílica natural é utilizada para a produção do tetracloreto de silício (SiCl_4), através da redução com carbono e posterior reação com o cloro. A destilação fracionada garante que o SiCl_4 produzido seja ultra puro.

Na década de 1930, J. F. Hyde desenvolveu um processo para a produção de sílica vítrea de alta pureza, denominado processo de deposição de “soot”, consistindo basicamente na reação de cloretos em fase vapor. A grande vantagem do processo de deposição de “soot” era o seu potencial para a produção de sílica vítrea de alta pureza sob uma temperatura mais baixa que o seu ponto de fusão (HYDE, 1942). Desde então, a produção de sílica vítrea teve avanços significativos, particularmente para as novas áreas de tecnologia como a optoeletrônica e fotônica.

Para a fabricação da fibra óptica, utiliza-se basicamente a sílica (SiO_2) de alta pureza, onde seu núcleo é dopado para aumentar o índice de refração. Atualmente existem quatro principais métodos para fabricação de preformas para fibra óptica – PCVD, MCVD, OVD e VAD. Desses métodos, apenas o PCVD não é baseado no processo de deposição de “soot”.

2.3.1 Processo PCVD

O processo *PCVD* (“Plasma Chemical-Vapor Deposition”) foi desenvolvido por um grupo de pesquisadores (Dieter Küppers, Hans Lydtin e Ludwig Rehder) na Alemanha, na década de 70. Desde então, esse processo mantém-se em constante aprimoramento para atender as novas demandas exigidas pelos fabricantes de cabos ópticos.

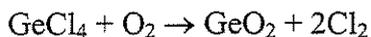
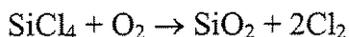
O gás sob o estado de plasma apresenta alta energia, boa condutividade elétrica e alta viscosidade quando comparado a um gás no estado normal. O processo *PCVD* utiliza a alta energia do plasma para oxidar o SiCl_4 , o GeCl_4 , e o C_2F_4 , sendo que a deposição dos óxidos resultantes ocorre diretamente na forma vítrea e não como “soot”. Como as camadas depositadas

são bastante finas, é possível um controle bastante preciso do perfil de índice de refração da preforma. O plasma é gerado por uma cavidade de microondas (ressonador), que trabalha com alta frequência (aproximadamente 2,5 GHz). É necessário manter uma pressão baixa no interior do tubo durante o processo (entre 10 e 30 Torr). Gera-se então um plasma de baixa pressão dentro do tubo substrato, fazendo com que o SiCl_4 , o GeCl_4 , o C_2F_4 e o O_2 reajam entre si, formando os óxidos dopantes.

O tubo permanece em rotação constante durante todo o processo. Existe ainda um sistema de aquecimento externo ao longo de toda a extensão do tubo, que o mantém aquecido a uma temperatura uniforme de aproximadamente 1200 °C. Após a deposição das camadas sobre o tubo substrato, procede-se ao colapsamento do tubo, obtendo-se a preforma núcleo.

2.3.2 Processo MCVD

O processo *MCVD* (“Modified Chemical-Vapor Deposition”) foi desenvolvido pela Bell Laboratories, nos EUA no início dos anos 80. Nesse processo, vapores de SiCl_4 e GeCl_4 são inseridos com oxigênio (O_2) no interior de um tubo de sílica. Esses vapores químicos são aquecidos a temperaturas elevadas (~1600 °C) por uma chama proveniente de um maçarico externo ao tubo. Da reação de oxidação resulta a deposição da sílica e germânia em camadas. As reações de oxidação seguem as equações abaixo:



(8)

Durante todo o processo, o tubo permanece em rotação constante e é aquecido externamente por um maçarico de $\text{H}_2\text{-O}_2$, o qual se move paralelamente ao tubo. O “soot” é sinterizado logo em seguida devido ao movimento de translação do maçarico. Com a continuidade do processo, tem-se a deposição de camada por camada de vidro, até que se atinja a espessura desejada.

No Brasil, o processo *MCVD* é utilizado por todo o parque industrial de fibras ópticas. Entretanto, uma de suas desvantagens é a necessidade da importação dos tubos de sílica, que correspondem a quase 70% do custo total de produção (SUZUKI, 2000).

2.3.3 Processo OVD

O processo *OVD* (“*Outside Vapor-phase Deposition*”) foi desenvolvido pela Corning Glass, nos EUA, no início dos anos 70. Neste processo, a deposição de “soot” ocorre sobre a superfície de um bastão inicial (alvo), no interior de uma câmara fechada, onde existe um maçarico especial, com chama à base de H_2 e O_2 , no qual há um tubo central por onde sai o vapor de $SiCl_4$ e $GeCl_4$. A reação de oxidação do $SiCl_4$ e $GeCl_4$ ocorre através de hidrólise, isto é, inicialmente forma-se vapor d’água, como conseqüência da reação do H_2 e O_2 e, em seguida, esse vapor d’água reage com os tetracloreto, tendo como subprodutos dessa reação SiO_2 , GeO_2 e HCl , conforme as equações a seguir:



Ao final do processo de deposição, retira-se o bastão inicial e obtém-se uma preforma porosa (denominada de “preforma-soot”) com um furo central, a qual é colocada em um forno próprio para serem feitos os processos de desidratação e consolidação da preforma, transformando o “soot” poroso em vidro totalmente transparente.

O forno de desidratação/consolidação possui atmosfera controlada, com gases hélio (He) e cloro (Cl_2), cuja temperatura durante o processo é da ordem de 1500 °C. O Cl_2 possui papel fundamental durante o processo de desidratação, uma vez que além de remover as moléculas de OH, também retira impurezas metálicas (cromo, níquel, etc.) presentes na “preforma-soot”. O He substitui o ar atmosférico presente nos poros do “soot”, permitindo maior facilidade de consolidação da preforma, evitando a retenção de bolhas durante o processo de consolidação (os átomos de He são muito menores quando comparados aos átomos que constituem o ar atmosférico). O furo central resultante da retirada do bastão inicial permanece mesmo após a

consolidação da preforma, sendo colapsado somente durante o processo de puxamento da preforma em fibra óptica.

2.3.4 Processo VAD

O processo *VAD* (“Vapor-phase Axial Deposition”) foi concebido no Japão em 1977 (IZAWA, 1977), por um grupo da NTT Ibaraki Electrical e coordenado por Tatsuo Izawa (IZAWA, 2000). No princípio, o processo foi denominado “vapor-phase Verneuil method”, em alusão ao método Verneuil, utilizado para produção de sílica vítrea.

A principal característica do processo VAD é a deposição axial, no qual partículas muito finas de sílica (“soot”) são depositadas axialmente sobre um alvo em rotação movendo-se para cima e em baixa velocidade.

As reações de hidrólise e oxidação em chama são dadas por:



O desenvolvimento do processo VAD ofereceu a possibilidade de várias importantes vantagens, relacionadas com a produção em massa e o desempenho da fibra óptica.

Para efeito de estudo, o processo VAD pode ser dividido basicamente em três etapas: i) deposição, ii) desidratação e iii) consolidação. Frente aos demais processos de fabricação, a etapa de deposição da preforma porosa na direção axial é um dos aspectos diferenciais do processo VAD, ao passo que os processos de desidratação e consolidação são semelhantes. Em uma última etapa, a preforma consolidada é “puxada” sob alta temperatura (> 2000 °C) em uma torre de puxamento (IMOTO, 1989), onde adquire o diâmetro final (~125 µm).

2.3.4.1 Desidratação

A *desidratação* é um processo termo-químico (~1200 °C) em ambiente de cloro utilizado para a remoção de hidroxilas e impurezas em preformas porosas (SANADA, 1996). Durante a

etapa de deposição, uma grande quantidade de moléculas de água e íons OH provenientes da reação em chama de H_2-O_2 é incorporada na preforma porosa. As hidroxilas (OH) causam absorção em 2,73 μm , com absorção de segundos harmônicos em 1,39 μm , 1,24 μm e 0,95 μm , faixas utilizadas para a transmissão óptica. Atualmente, a concentração máxima aceitável de hidroxilas presentes em fibras ópticas está em torno de 1 ppb (CHIDA, 1982).

2.3.4.2 *Consolidação*

Na etapa de consolidação, a preforma é submetida a um tratamento térmico (~ 1500 °C), na qual resulta em um material transparente e totalmente livre de bolhas. O gás hélio é comumente utilizado devido a sua alta difusividade, facilitando o calapsamento das bolhas (IZAWA, 2000).

2.4 **Obtenção de Preformas de Sílica–Germânia pelo Método VAD**

Durante a etapa da deposição VAD, finas partículas de óxido produzidas pela reação de hidrólise e oxidação em chama são depositadas na superfície da extremidade inferior do substrato, produzindo uma preforma porosa. A introdução de um elemento dopante na matriz de sílica influencia na sua viscosidade e no seu índice de refração. Em particular, o germânio tem sido largamente empregado como principal elemento dopante para formar um perfil de índice de refração no núcleo da fibra óptica.

Basicamente, o perfil do índice de refração é formado a partir da distribuição radial de GeO_2 na preforma (SANADA, 1995). Porém, o perfil de concentração de GeO_2 na preforma porosa é diferente do perfil da preforma consolidada, uma vez que a densidade no “soot” não é constante ao longo do raio (INADA, 1982). Para que uma fibra possua excelente qualidade de transmissão, é fundamental que seu perfil de índice seja uniforme em toda extensão da preforma. O principal fator que causa flutuações no índice de refração é a não-uniformidade da geometria da preforma, sendo que o diâmetro da preforma o parâmetro mais relevante.

Um outro fator é a variação da temperatura da superfície de deposição da preforma. O processo de dopagem com germânio envolve reações complexas, que podem formar partículas de germânia amorfa ou cristalina, assim como partículas de sílica-germânia, a partir de uma mistura

homogênea de haletos de silício e germânio (SEKIYA, 2000). Nas fibras ópticas fabricadas pelo método VAD existe uma flutuação do perfil de índice de refração que é causada principalmente pela flutuação da temperatura da superfície de deposição da preforma (OKAMOTO, 1981). Existem métodos de monitoramento da temperatura da superfície de deposição da preforma para se estimar o perfil de índice de refração da fibra final durante a etapa de deposição, considerando-se as densidades da preforma porosa e da consolidada (CHIDA, 1983).

2.4.1 Controle da Geometria da Preforma

O controle do perfil da concentração de GeO_2 é uma das grandes dificuldades da deposição VAD, tanto na direção radial quanto na direção longitudinal (SANADA, 1995). A etapa de deposição no processo VAD envolve um grande número de parâmetros. Apesar da maioria desses parâmetros estarem inter-relacionados, a distância alvo-maçarico possui uma maior relevância na uniformidade geométrica da preforma (SEKIYA, 2001). Uma vez que as partículas estão sendo depositadas, a preforma deve ser continuamente posicionada de forma a manter a distância alvo-maçarico constante, a fim de se obter um diâmetro uniforme da preforma. Vários métodos têm sido aplicados nas indústrias para esse controle, sendo que o mais utilizado é o controle realimentado (“feedback”). Em sistemas convencionais de controle, um feixe de laser é geralmente utilizado para o controle da geometria da preforma (Figura 2.6). Neste caso, o feixe de laser entra em contato com a face de deposição, de forma que a velocidade do mecanismo de ascensão da preforma possa ser controlada de modo a manter constante a intensidade do laser transmitido e, conseqüentemente, manter constante a distância alvo-maçarico .

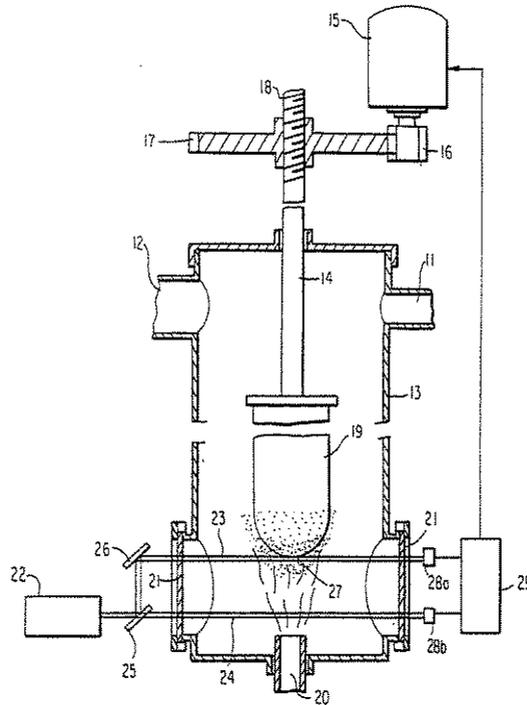


Figura 2.6. Método para auto posicionamento da preforma utilizando-se um laser
(NAKAHARA, 1983).

Entretanto, este sistema possui algumas desvantagens: (i) o diâmetro final da preforma não pode ser medido durante a deposição, ou seja, não há flexibilidade para produção de preformas de geometrias distintas; (ii) a intensidade do laser pode vir a ser ofuscada por partículas provenientes da reação, etc. O ambiente agressivo de deposição da preforma – os gases produzidos na reação produzem uma atmosfera corrosiva – e a alta temperatura também dificultam a instalação de dispositivos de controle como sensores e outros dispositivos. Além disso, a superfície da preforma não pode sofrer contato mecânico e a medida deve ser contínua ao longo de toda etapa de deposição.

Capítulo 3

Materiais e Métodos

3.1 Infra-estrutura e Tecnologia VAD no LIQC

A realização de vários projetos relacionados com o desenvolvimento da tecnologia VAD no LIQC possibilitou a aquisição de uma ampla infra-estrutura, permitindo que as etapas de deposição, desidratação e consolidação fossem realizadas em escala laboratorial no próprio LIQC. Somente a etapa de puxamento não é realizada no LIQC, visto a necessidade de uma torre de puxamento em nível industrial. Essa última etapa tem sido realizada com o auxílio de parcerias com indústrias locais, em particular, com a XTAL Fibras Ópticas, atual XTAL Fiber Core.

3.1.1 Câmara de Deposição

A etapa de deposição da preforma ocorre no interior de uma câmara, confeccionada em aço inox de alta resistência à corrosão, evitando a contaminação por impurezas externas e possibilitando o controle dos gases liberados na reação.

No decorrer do desenvolvimento da tecnologia VAD no LIQC foram adquiridas duas câmaras de deposição, a primeira em escala laboratorial, com auxílio da FAPESP, e a segunda em escala piloto-industrial, com auxílio da FINEP/PADCT.

A primeira câmara foi adquirida no início do projeto para estudo dos parâmetros básicos envolvidos no processo. Essa câmara dispunha apenas de um sistema mecânico para

posicionamento e rotação da preforma, controlados por dois motores do tipo DC. A velocidade da rotação era mantida constante e o controle da velocidade de deslocamento do alvo era feito manualmente através de um potenciômetro.

A segunda câmara, em escala piloto-industrial, foi adquirida para a produção de preformas de até 600 mm de comprimento e 80 mm de diâmetro. A câmara foi projetada no LIQC e confeccionada no Japão pela empresa IKOMA Instrument Co. (Figura 3.1). No projeto foram especificados componentes de hardware para possibilitar a automação do processo de deposição baseado em um computador tipo PC. A câmara é dotada de um sistema de controle de fluxo de gases e cloretos, um sistema mecânico de alta precisão para posicionamento do alvo e dos maçaricos, um sistema para aquisição da temperatura e da imagem do “soot” em deposição através de uma câmera CCD.

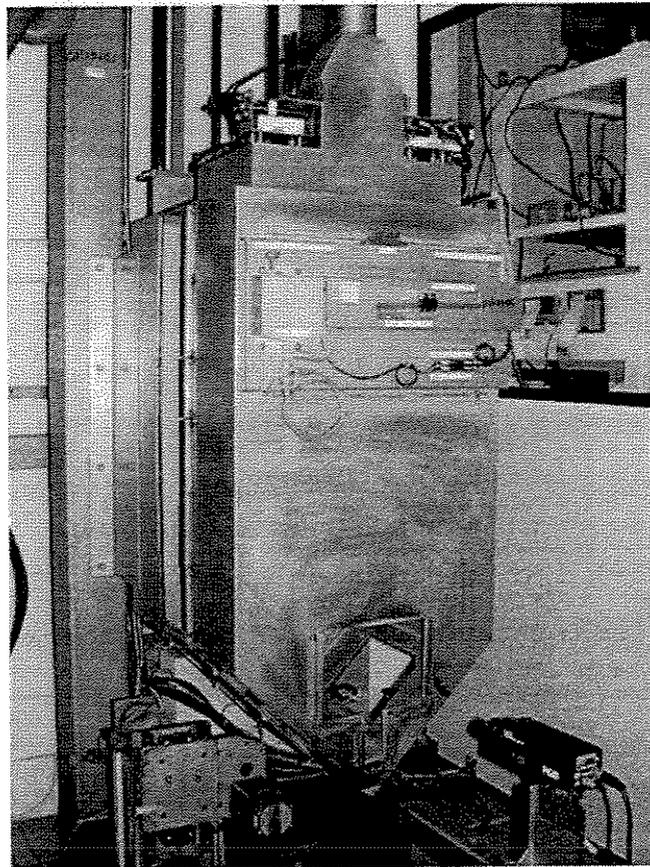


Figura 3.1. Câmara piloto industrial.

3.1.2 Maçaricos VAD

A síntese da sílica-germânia a partir da hidrólise e oxidação dos cloretos SiCl_4 e GeCl_4 é realizada em chama de hidrogênio-oxigênio. Maçaricos especiais, geralmente confeccionados em sílica pura, são utilizados para se evitar a contaminação do material. O tipo e a geometria desses maçaricos são muito importantes para a eficiência de deposição e para as características do perfil de germânia da preforma porosa. Para cada tipo de maçarico, há um conjunto de parâmetros que, quando combinados, conduzem a uma deposição estável, com alta eficiência e com um perfil de dopagem desejado (OGATA, 2001). Tratando-se de uma área altamente especializada, os maçaricos foram confeccionados pelo Prof. Hiroshi Shimizu, especialista japonês em tecnologia de maçaricos VAD. Durante sua permanência na Unicamp, por 16 meses, foram projetados e confeccionados vários tipos de maçaricos (Figura 3.2).

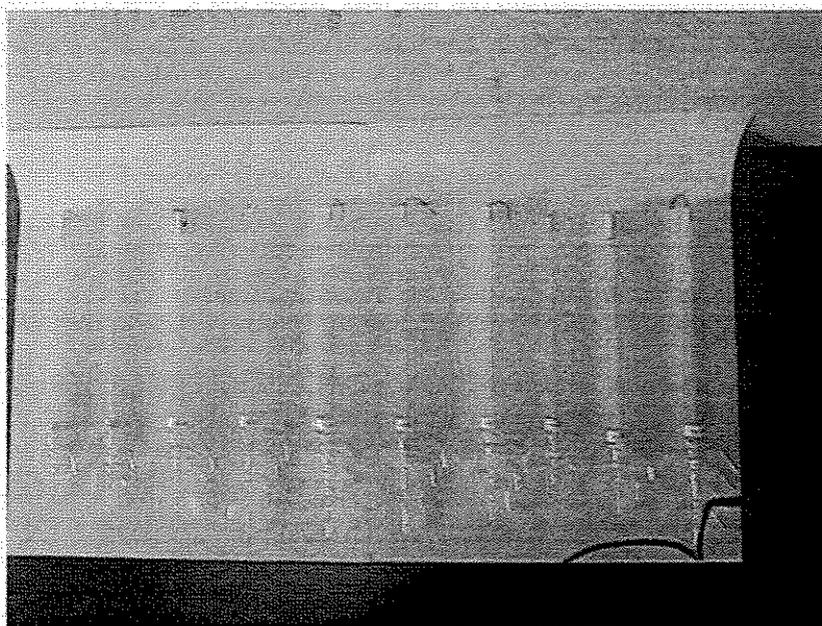


Figura 3.2. Maçaricos VAD de várias geometrias.

O principal maçarico utilizado para a deposição das preformas foi o M11-5V (Figura 3.3), de cinco vias. Para este maçarico, a seqüência da distribuição dos gases utilizados, da via central para a mais externa, foi $\text{SiCl}_4 + \text{GeCl}_4$, N_2 , H_2 , N_2 e O_2 .

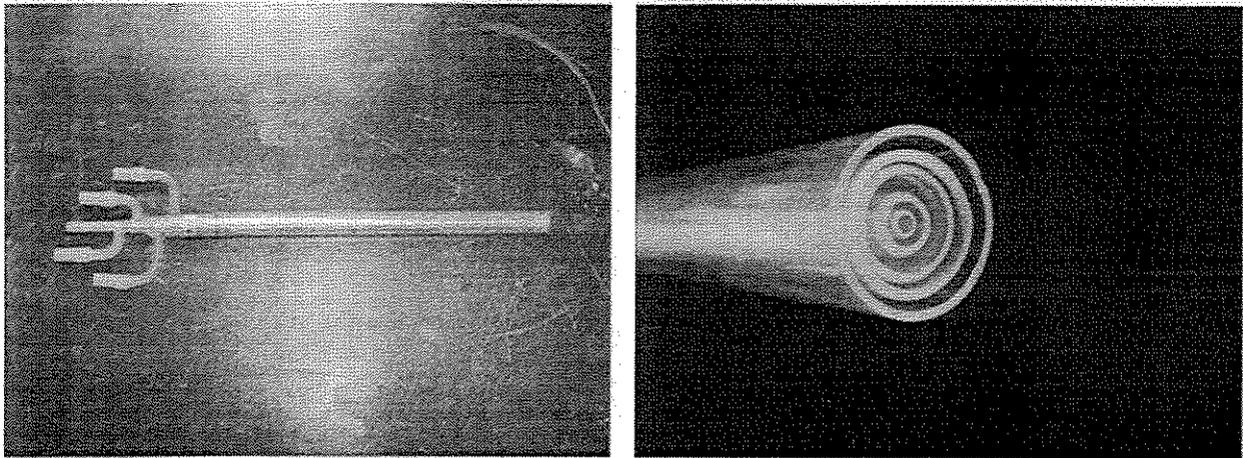


Figura 3.3. Maçarico M11-5V de cinco vias.

3.2 Sistema de Controle da Deposição

3.2.1 Câmara Laboratorial

Inicialmente, a velocidade do mecanismo de posicionamento da preforma na câmara laboratorial era controlada por um servo motor, sendo que a velocidade era corrigida manualmente ao longo de toda a etapa de deposição. Algumas modificações foram feitas para possibilitar o controle através de um micro-computador, onde o servo motor foi substituído por um motor de passo de 4 fases de maior precisão. Para o controle do motor de passo foi adquirida a placa R+, desenvolvida pela empresa Symphony Educacional, para interface com um micro-computador tipo PC. Essa placa possui capacidade para o acionamento simultâneo de até 03 motores de passo e utiliza a saída paralela do PC para comunicação. Um micro-computador equipado com processador AMD K6-2 de 475 MHz foi adquirido para acionamento da placa.

3.2.1.1 Hardware e Software

Para o controle de deposição da câmara laboratorial, foram adquiridos alguns hardwares básicos para o posicionamento e rotação da preforma durante a etapa de deposição (Tabela 3.1).

Tabela 3.1. Hardware básico utilizado para o controle da deposição da câmara laboratorial.

Hardware	Descrição
Placa Symphony R+	Placa de interface entre o PC e o motor de passo, com suporte para até 3 motores simultâneos.
Motor de passo	Motor de passo de 4 fases.
Micro PC	Micro computador para geração do sinal de controle para a placa Symphony.

Uma das dificuldades de programação encontrada foi ocasionada pela interface com a porta paralela da placa R+. Como o compilador Delphi não possui componentes nativos para comunicação com a porta paralela, foi utilizado código em linguagem Assembly para o acesso à porta. Porém, a rotina utilizada restringe a utilização do software para as plataformas Windows 95/98.

3.2.2 Câmara Piloto-Industrial

A câmara de deposição piloto-industrial foi projetada com todos os recursos necessários para a automação do posicionamento da preforma (Figura 3.4). Em sistemas que utilizam lasers ou outros dispositivos para detecção da posição da preforma, é fato que uma câmera de vídeo é indispensável para o monitoramento contínuo do processo de deposição. Sob esse aspecto, foi projetado um sistema de controle e automação do processo de deposição VAD sem a necessidade de sistemas de detecção adicionais para o controle da uniformidade geométrica da preforma (SUZUKI, 2002). A mesma câmera (CCD) utilizada para o monitoramento é também utilizada para a detecção do diâmetro da preforma. Dessa forma, reduziu-se o custo da infra-estrutura e da manutenção.

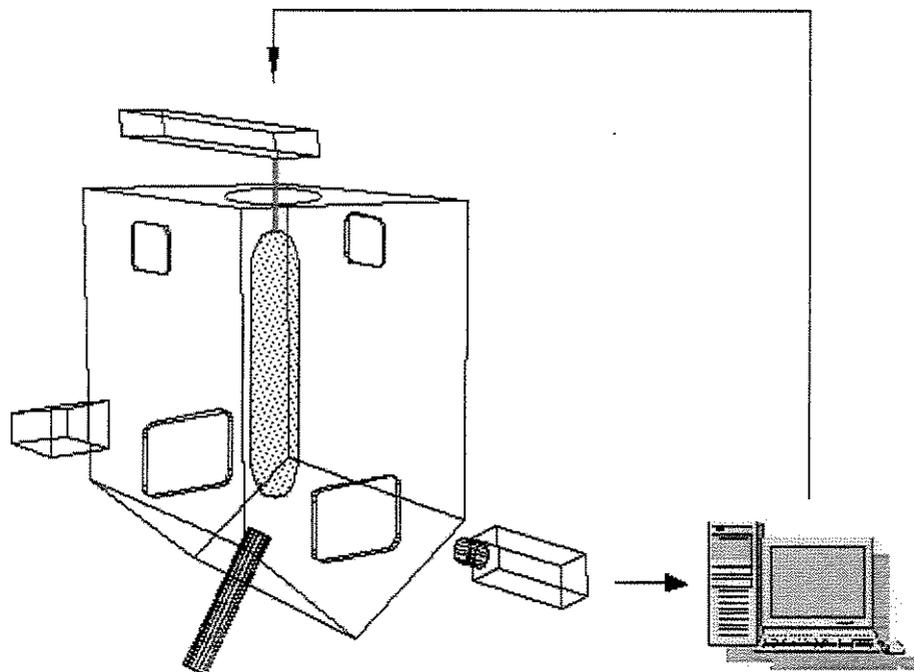


Figura 3.4. Diagrama esquemático da câmara de deposição piloto-industrial.

Um sistema realimentado, baseado na plataforma LabVIEW da National Instruments, foi desenvolvido para atuar de forma automática no mecanismo de ascensão da preforma, conforme a taxa de crescimento da mesma, de forma a manter o diâmetro constante ao longo da preforma (ONO, 2003). Nesse sistema, a imagem da região inferior da preforma, que corresponde à região onde ocorre a deposição das partículas, é adquirida em tempo real através de uma câmera CCD posicionada no lado externo da câmara de deposição. Para a detecção do diâmetro através da imagem digital, foi utilizado um sistema para detecção da distância entre dois pontos pertencentes a borda da preforma, através das diferenças de contraste da imagem monocromática da preforma. Um controle para o posicionamento de uma linha horizontal digital com largura de 1 pixel, denominada “linha de referência”, foi inserido na interface do software de controle para se estabelecer o diâmetro de referência. Nessa interface estão presentes também a imagem da preforma sendo depositada e os controles dos motores de passo e dos parâmetros PID. No início de cada deposição, o usuário/operador deve estabelecer uma posição para a “linha de referência” sobre a imagem da preforma, conforme as características da região de deposição. Uma vez que a região de deposição da preforma possui um perfil relativamente cônico, estudou-se alguns parâmetros que determinam a melhor posição para a “linha de referência”. Com relação a uma reta tangente à superfície da preforma, é possível de se verificar que a “linha de referência” deve

ser posicionada ligeiramente abaixo do ponto de interseção à reta tangente cuja inclinação seja igual a 1. De fato, para uma inclinação $\alpha = 1$, temos que a variação de um pixel na imagem corresponde a uma variação Δx na horizontal superior a uma variação Δy na vertical. No desenvolvimento desse sistema foram utilizadas ferramentas de detecção de bordas do pacote IMAQ Vision, da National Instruments. Uma vez determinado o diâmetro em uma posição na região de deposição, um controlador PID calcula automaticamente a velocidade do mecanismo de ascensão da preforma.

Os componentes de *hardware* e *software* utilizados para a automação do processo de deposição VAD da câmara piloto-industrial estão descritos na Tabela 3.2 e na Tabela 3.3.

Tabela 3.2. Hardware utilizado para a automação da câmara piloto-industrial.

Hardware	Descrição
NI PCI-MIO-16E-4	Placa para aquisição de sinal analógico/digital (aquisição de temperatura).
NI IMAQ Board PCI-1408	Placa para aquisição de imagem digital (câmera CCD).
NI PCI-Step-4CX	Placa de interface para acionamento de até 4 motores de passo (controle da rotação e posicionamento da preforma).

Tabela 3.3. Softwares utilizados para a automação da câmara piloto-industrial.

Software	Descrição
LabVIEW 5.1.1 (full)	Plataforma LabVIEW para desenvolvimento de aplicativos.
IMAQ Vision 5.0	Pacote para tratamento de imagem.
PID Control Toolkit 5.0	Pacote para o controle PID.
Value Motion VI's 4.3	Pacote para o controle do movimento (motores de passo).

3.3 Ferramentas para a Automação

3.3.1 LabVIEW

Desenvolvido pela National Instruments Corporation, o *LabVIEW*[®] (“Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench”) é uma das mais flexíveis plataformas para desenvolvimento de softwares de instrumentação e análise disponíveis atualmente no mercado. Em uso desde 1986, o LabVIEW tem sido empregado com sucesso em sistemas de instrumentação em áreas como controle de processo, monitoramento médico, testes de produção e simulação (KODOSKY, 1991). Em contraste com os tradicionais softwares que utilizam linguagens de programação textuais, como o C/C++, uma das mais notáveis características do LabVIEW é a utilização de uma linguagem de programação totalmente visual (gráfica) denominada *G*, baseada no paradigma de fluxo de dados e na estrutura de diagramas de bloco (ANDRADE, 1998), a estrutura natural de projeto comum aos cientistas e engenheiros (PETRE, 1999).

Programas desenvolvidos em LabVIEW são chamados de *Instrumentos Virtuais* ou simplesmente *VI's* (“Virtual Instruments”). Cada *VI* possui três partes principais: o painel frontal, o diagrama de blocos e os ícones de conexão. O painel frontal possui a mesma função do painel de um instrumento real, representando a interface para as operações interativas de entrada e saída. As entradas são feitas através dos *controles* e as saídas através dos *indicadores*. O LabVIEW oferece uma série de controles e indicadores para serem usados; botões, chaves e gráficos, estão disponíveis na forma de componentes possibilitando ao programador a construção de uma interface bastante próxima a de um instrumento real (JAMAL, 1994).

3.3.2 Método de Detecção da Borda da Preforma

Para a detecção da borda da preforma utilizou-se o *VI* “IMAQ Edge Tool”, disponível no pacote IMAQ Vision, que utiliza três parâmetros – *contrast*, *width* e *steepness* – para localizar bordas em uma imagem.

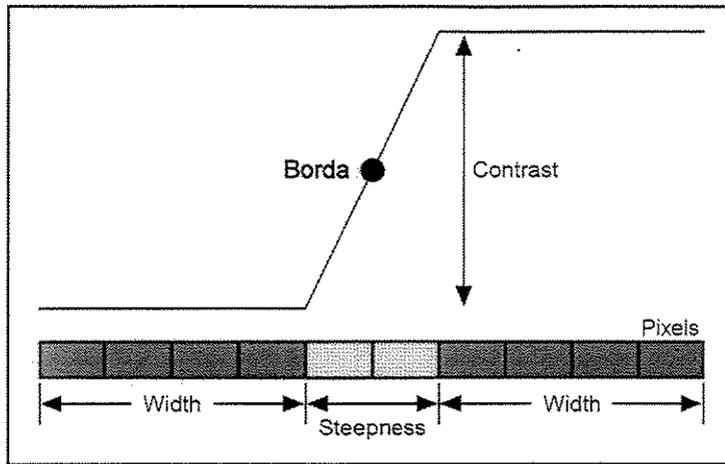


Figura 3.5. Diagrama com os parâmetros para detecção da borda (HANKS, 1998).

3.3.3 Controlador PID

Em um sistema realimentado, um *controlador automático* compara o valor de processo VP com o valor desejado SP (“setpoint”), determina o desvio $e(t) = SP - VP$, e produz um sinal de controle que reduz o desvio a um valor próximo de zero. A maneira pela qual o controlador automático produz o sinal de controle é denominada *ação de controle*. O controlador *PID* (Proporcional-Integral-Derivativo) é a combinação da ação de controle proporcional, ação de controle integral e ação de controle derivativo, possuindo as vantagens de cada uma das três ações de controle individuais (OGATA, 1985).

A equação de um controlador PID é dada por:

$$m(t) = K_p \cdot e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p \cdot T_d \frac{de(t)}{dt}, \quad (11)$$

onde as três parcelas na equação correspondem à ação proporcional, ação integral e ação derivativa, respectivamente. A constante K_p é o controle de ganho, T_i o tempo integral e T_d é o tempo derivativo.

Embora o controlador PID tenha apenas três parâmetros, geralmente não é fácil, sem um procedimento sistemático, obter os melhores valores – ajustes – para esses parâmetros (SKOGESTAD, 2003).

3.4 Caracterização do Perfil de Concentração de GeO₂

A maioria dos métodos existentes para a caracterização de preformas e fibras fornecem essencialmente informações sobre o índice de refração, além de outras propriedades como diâmetro do núcleo e a abertura numérica (STEWART, 1982). Porém, uma vez que o perfil de índice de refração da fibra é determinado pelo perfil de concentração de GeO₂ da preforma, foram realizadas medidas de Fluorescência de Raios-X para determinação do perfil da concentração de GeO₂.

3.4.1 Preparação de Amostras

Dentre as centenas de preformas depositadas sob diferentes condições de processo, obteve-se sucesso no puxamento da preforma D196, produzida sob condições idênticas as da preforma D183. Assim sendo, cerca de 20 preformas produzidas sob as mesmas condições de deposição da preforma D183 foram selecionadas para análise da uniformidade axial do perfil de concentração de GeO₂.

3.4.2 Medidas da concentração de GeO₂ por FRX

As medidas da concentração de GeO₂ foram realizadas em um equipamento de Espectroscopia de Fluorescência de Raios-X (FRX) da Rigaku International Co., modelo RIX3100, instalado na Faculdade de Engenharia Mecânica – UNICAMP (GUSKEN, 2001b). Um tubo de raios-X de ródio operando a 50 kV e 80 mA foi utilizado para a excitação primária das amostras, sendo o espectro GeK α analisado por um cristal de LiF (200).

As amostras foram obtidas de preformas consolidadas em forma de discos com espessura variando de 2,0 mm a 3,0 mm, cortadas transversalmente ao eixo da preforma. Utilizou-se um porta-amostra com máscara de 3,0 mm de diâmetro (Figura 3.6) e diafragma do espectrômetro ajustado para efetuar análises em uma área de 1,0 mm de diâmetro. O perfil radial da concentração de GeO₂ foi obtido deslocando-se a amostra com passos de 1,0 mm entre as medidas sob o diâmetro da amostra.

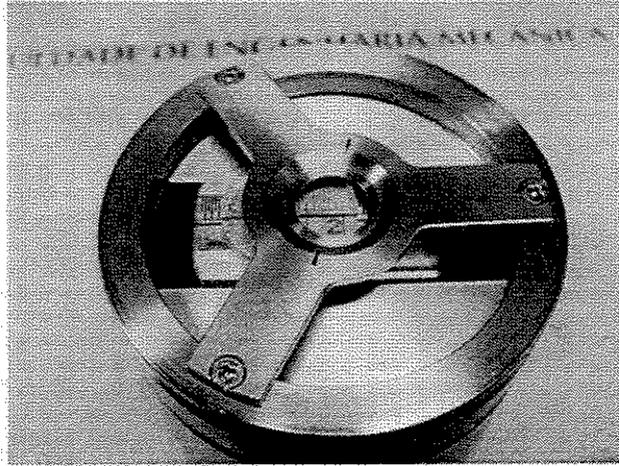


Figura 3.6. Porta-amostra utilizado nas medidas de FRX.

Para se determinar a menor diferença significativa na variação de concentração de GeO_2 entre as preformas analisadas, utilizou-se a fórmula seguinte para se determinar a fração molar do GeO_2 , uma vez que o equipamento de FRX está configurado para fornecer as concentrações em unidades de porcentagem em massa.

$$\begin{aligned} \text{GeO}_2 (\% \text{ mol}) &= \frac{\frac{\text{GeO}_2 (\% \text{ massa})}{104,6}}{\frac{\text{GeO}_2 (\% \text{ massa})}{104,6} + \frac{\text{SiO}_2 (\% \text{ massa})}{60,1}} \times 100 = \\ &= \frac{\text{GeO}_2 (\% \text{ massa})}{174 - 0,74 \times \text{GeO}_2 (\% \text{ massa})} \times 100 \end{aligned} \quad (12)$$

Capítulo 4

Resultados e Discussões

Anteriormente a implantação do sistema de automação no processo de deposição, o controle do posicionamento da preforma era feito de forma manual, ou seja, era necessário um operador para ajustar manualmente a velocidade do mecanismo de ascensão do sistema conforme a taxa de crescimento da preforma.

4.1 Sistema de Controle na Câmara Laboratorial

O posicionamento da preforma na câmara laboratorial era inicialmente realizado através do monitoramento da região inferior da preforma através de uma filmadora convencional, cuja imagem era reproduzida em um aparelho de TV de 14 polegadas. Entretanto, a pouca precisão do motor DC a baixas velocidades, associada à dificuldade da precisão do controle via potenciômetro acarretaram em resultados não satisfatórios.

Uma solução foi a substituição do motor DC por um motor de passo de quatro fases, sendo controlado por um microcomputador tipo PC. O interfaceamento entre o PC e o motor de passo foi realizado através da placa R+. Para o acionamento do motor de passo, foi desenvolvido o software *StpMotor* (Figura 4.1) utilizando-se o compilador Borland Delphi (versão 2.0) para a plataforma Windows 95/98.

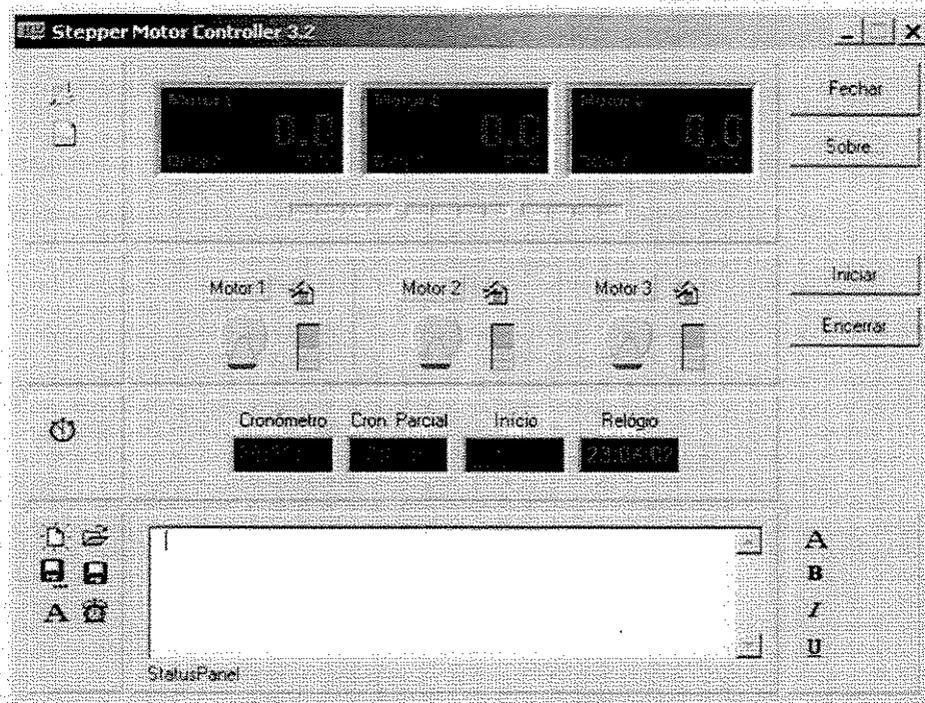


Figura 4.1. Interface do software para acionamento de motores de passo desenvolvido em Delphi.

Ainda assim, o sistema não permitiu a obtenção de resultados satisfatórios, principalmente pela dificuldade do operador em notar pequenas variações no diâmetro (Figura 4.2).

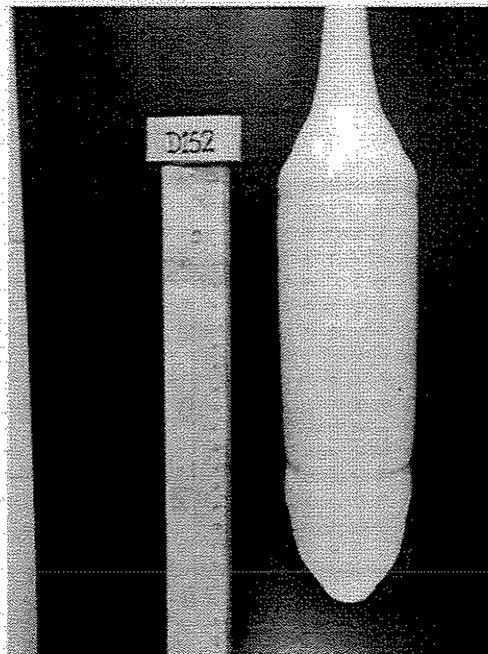


Figura 4.2. Preforma depositada com controle manual de posicionamento.

Com a aquisição da câmara em nível piloto-industrial, o processo de deposição foi transferido para a nova câmara. O software, porém, tem sido utilizado na etapa de desidratação/consolidação para o acionamento de dois motores de passo que atuam na rotação e no posicionamento da preforma em um forno elétrico (Figura 4.3).

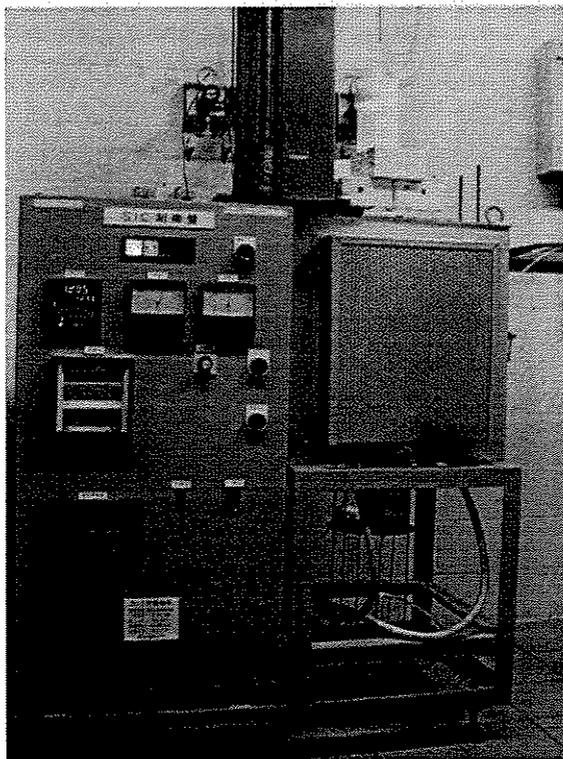


Figura 4.3. Forno utilizado para desidratação e consolidação da preforma.

4.2 Sistema de Automação e Controle na Câmara Piloto-Industrial

Para a automação e controle da uniformidade da preforma no processo de deposição na câmara piloto-industrial, foi desenvolvido um sistema em LabVIEW para a arquitetura PC. Esse sistema, denominado *VADACS* (“*VAD Automation and Control System*”), compreende o monitoramento e controle de vários parâmetros de processo através de uma interface intuitiva e “amigável”. Devido à complexidade e quantidade dos parâmetros envolvidos no processo, o sistema foi subdividido em vários módulos, cada qual possuindo sua própria janela de interface com controles específicos (Figura 4.4).

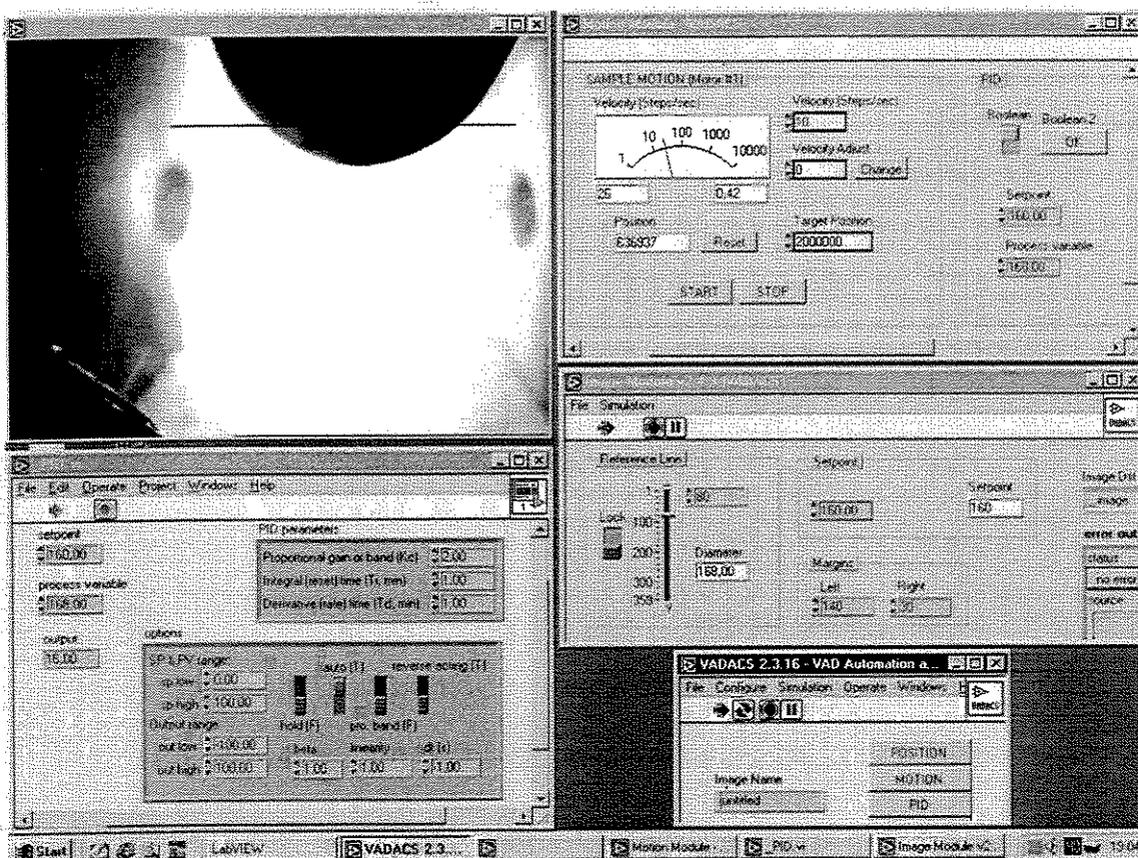


Figura 4.4. Janelas de interface que compõe o sistema de automação e controle VAD.

4.2.1 Automação para o Controle da Uniformidade Geométrica da Preforma

Durante a etapa de deposição (Figura 4.5), a imagem da superfície de deposição da preforma é adquirida por uma câmera CCD e exibida em uma janela do sistema. Uma fonte de luz de alta intensidade é posicionada em oposição à câmera CCD para prover um maior contraste na imagem da preforma.

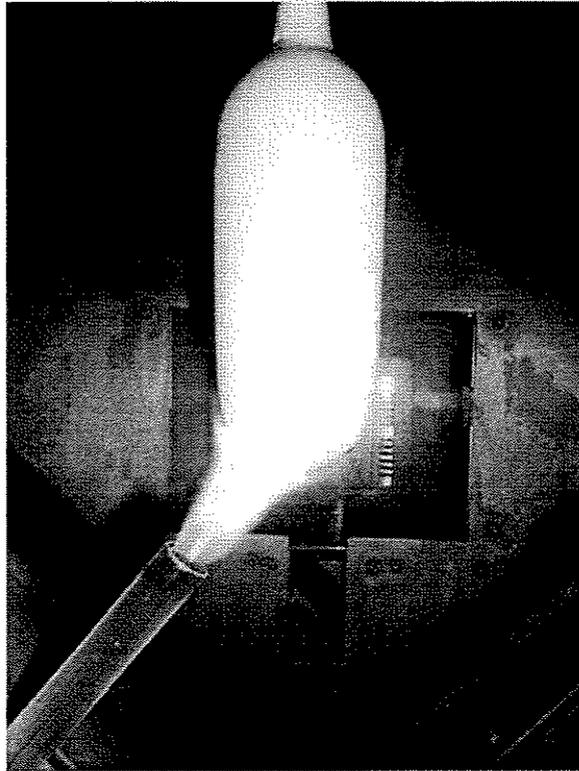


Figura 4.5. Deposição da preforma porosa.

Na imagem digital, a distância entre dois pontos extremos pertencentes à borda de uma secção transversal da preforma é detectada pelo software. Foi criado um controle que permite o usuário posicionar uma linha horizontal com espessura de 1 “pixel” sobre a imagem da preforma. Essa linha, denominada *linha de referência*, é utilizada para se determinar dois pontos extremos pertencentes à borda da preforma sob essa linha, com os quais é definido o *diâmetro de referência*, ou seja, a distância entre os dois pontos detectados (Figura 4.6).

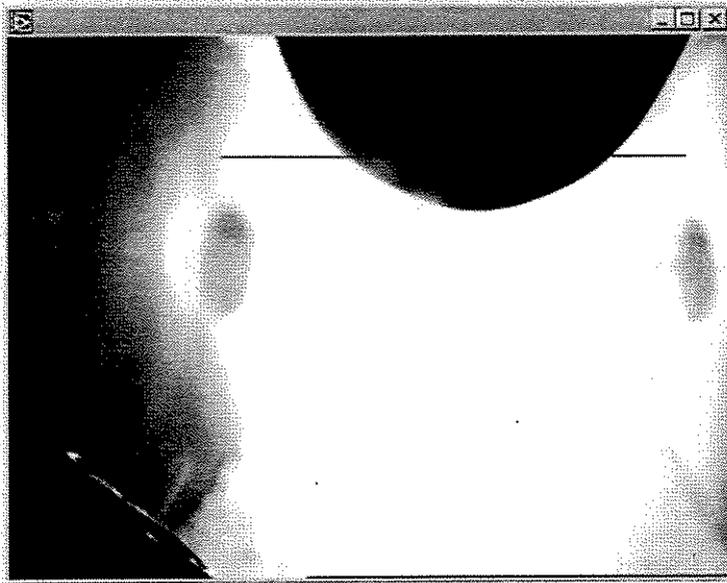


Figura 4.6. Imagem da superfície de deposição da preforma com a linha de referência posicionada.

Além da linha de referência, o usuário deve estabelecer também o valor do “setpoint”, valor desejado para o diâmetro de referência (Figura 4.7), conforme o diâmetro final. O valor do diâmetro de referência e do “setpoint” são utilizados pelo controlador PID, que estabelece o valor de correção da velocidade do mecanismo de posicionamento da preforma. Todo o processo de aquisição e tratamento de imagem, processamento do controlador PID e correção da velocidade é realizado em aproximadamente 200 ms.

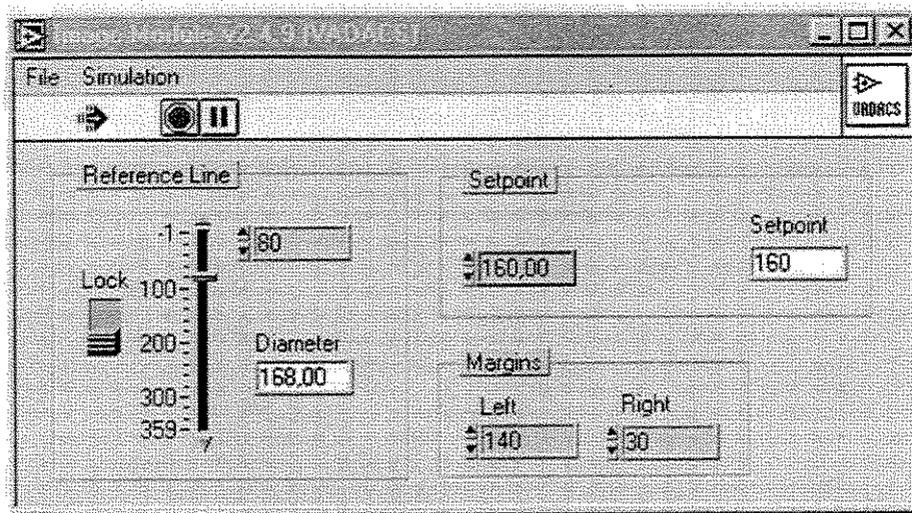


Figura 4.7. Interface do módulo de imagem com os controles para o posicionamento da linha de referência, ajuste do “setpoint” e das margens.

Para se estabelecer a melhor posição da linha de referência, considerou-se a família de retas tangentes à borda da imagem da preforma. Determinou-se que a linha de referência deve estar sempre posicionada abaixo do ponto da borda com a interseção da reta tangente cujo coeficiente angular seja igual a 1. De fato, sob esta condição, uma variação de Δx na horizontal corresponde a uma menor variação de Δy na vertical. Caso a linha de referência esteja posicionada exatamente sobre ponto de interseção com a reta de coeficiente angular igual a 1 ou sobre o ponto extremo inferior da preforma, a precisão do sistema será equivalente a de um sistema de controle tradicional a laser, que utiliza apenas o ponto extremo inferior da preforma como referência.

Em algumas deposições, o sistema apresentou problemas de estabilidade, quando ocorreram “congelamentos” ocasionais do sistema. Como esses eventos não puderam ser reproduzidos de forma sistemática, acredita-se que o problema não tenha origem no sistema desenvolvido. De fato, o problema foi completamente solucionado substituindo-se o sistema operacional Windows 98 pelo Windows 2000 Professional.

Com a implantação do sistema automatizado, foi analisada a uniformidade de cerca de 7 preformas produzidas sob mesmas condições de deposição. Dada a dificuldade para se medir o diâmetro das preformas porosas, mediu-se o diâmetro das preformas consolidadas. Uma vez que variações do diâmetro da preforma porosa se mantenham na preforma consolidada, estimou-se a variação do diâmetro da preforma porosa através da taxa de redução da preforma na direção

radial. As preformas consolidadas apresentaram diâmetro médio variando de 18 mm a 20 mm, com desvios menores que 1%, o que corresponde a variações de aproximadamente 0,36 mm a 0,40 mm na preforma porosa. As preformas depositadas com o sistema automatizado apresentaram geometria uniforme, mantendo o diâmetro dentro das especificações industriais. Em particular, para a amostra D182 ($\phi = 37 \pm 0,2$ mm) foi possível de se obter experimentalmente uma precisão 5 vezes superior aos processos atualmente em uso para o controle do diâmetro (Figura 4.8).

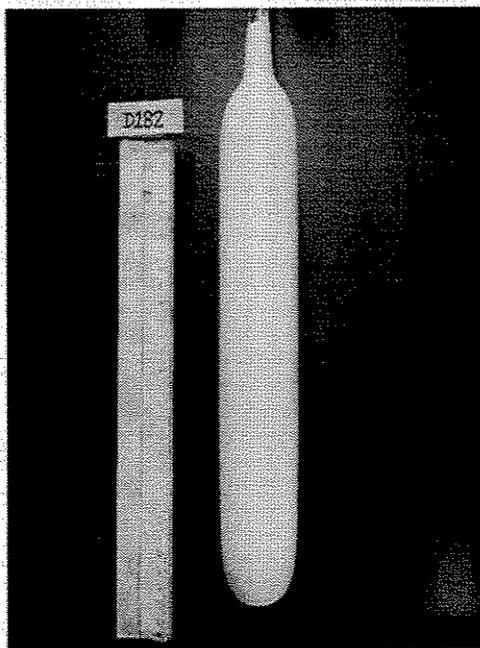


Figura 4.8. Preforma depositada com controle automatizado.

Assim sendo, com o sistema desenvolvido reduziu-se o efeito de uma das mais importantes variantes de todo o processo, tornando possível um estudo mais preciso da influência dos outros parâmetros envolvidos no processo.

4.2.2 Deposição de “Soot-overcladding”

Uma das vantagens do método VAD é a possibilidade da deposição de uma casca de “soot” sobre o núcleo já sinterizado ou parcialmente densificado. Nesse processo, denominado de “soot-overcladding”, o sistema foi empregado também com sucesso para o controle da uniformidade da casca (Figura 4.9). Essa técnica é comumente utilizada na fabricação de fibras do tipo

monomodo, largamente utilizadas no setor de telecomunicações para TV a cabo e transmissão a longas distâncias. Para esse tipo de fibra, é necessário que a razão dos diâmetros núcleo/casca seja em torno de 1:12, sendo necessárias sucessivas etapas até que a razão seja atingida.

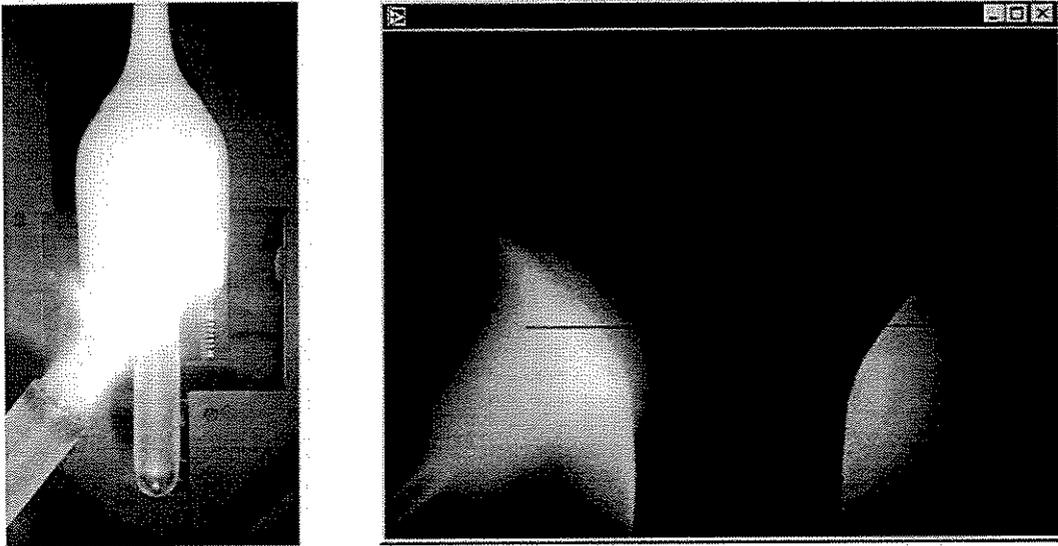


Figura 4.9. Controle da uniformidade do diâmetro no processo de “soot-overcladding”.

4.2.3 Rotação da Preforma

Uma vez que no processo de deposição a preforma deve estar continuamente em rotação com velocidade constante, foi criada uma interface para acionamento do motor de passo que controla a rotação da preforma. Nessa interface, o usuário/operador pode ajustar a velocidade do motor e o sentido do movimento, horário ou anti-horário (Figura 4.10).

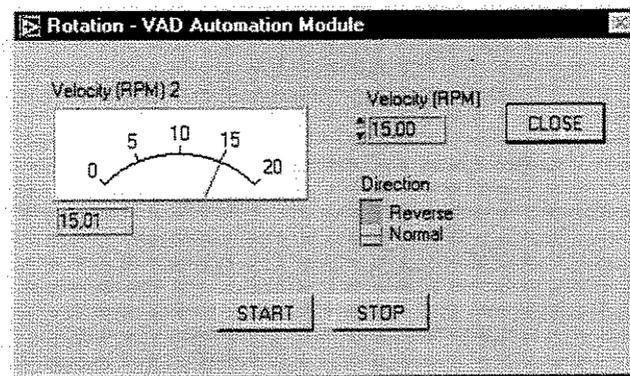


Figura 4.10. Interface do módulo de rotação para o controle da velocidade e sentido de rotação da preforma.

4.2.3.1 *Influência da rotação na estrutura da matriz de sílica-germânia*

A velocidade de rotação utilizada na deposição das preformas estudadas foi de 25 RPM a 30 RPM. Embora a velocidade de rotação da preforma não se mostre, à primeira vista, como um parâmetro relevante na etapa de deposição, estudos revelaram que a rotação tem influência significativa no mecanismo de agregação de germânia na matriz vítrea (ONO, 2002).

A deposição de germânia na preforma pode ocorrer em três formas distintas: i) na forma composta com as partículas de sílica, ii) na forma de “cluster” amorfo ou iii) na forma de “cluster” cristalino (GeO_2 hexagonal). Estando o maçarico inclinado em relação ao eixo da preforma, a rotação causa um gradiente de temperatura na superfície da preforma, favorecendo a formação de clusters com alta concentração de germânia. Uma micrografia, obtida por Microscopia Eletrônica de Varredura, da amostra D113 sinterizada revela a formação de “clusters” em faixas decorrentes do efeito da rotação (Figura 4.11).

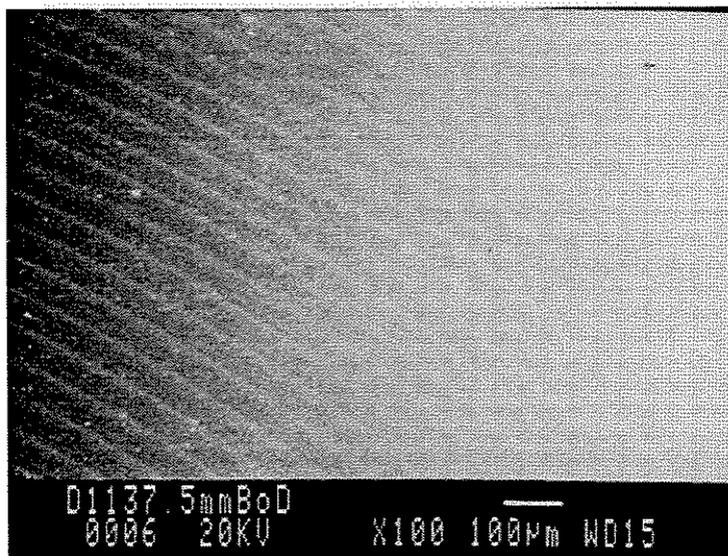


Figura 4.11. “Clusters” de germânio (linhas brancas) decorrentes do efeito de rotação.

Entretanto, sob tratamento térmico a temperaturas acima de 1700 °C, os “clusters” de germânio se diluem na matriz vítrea (GUSKEN, 2001a). Neste caso, acredita-se que a temperatura (~2100 °C) atingida na etapa de puxamento seja suficiente para diluir os “clusters” que são formados devido ao efeito de rotação da preforma.

A micrografia também confirma a estrutura espiral da distribuição de GeO₂ em torno do eixo da preforma, resultando que a natureza helicoidal da deposição VAD também produz variações tanto da direção radial quanto na direção axial do perfil de índice de refração da fibra final (POTKAY, 1985).

4.2.4 Monitoramento da Temperatura da Superfície de Deposição da Preforma

A temperatura da superfície de deposição é um dos principais parâmetros que influenciam no mecanismo de incorporação de GeO₂ na preforma. Para o monitoramento da temperatura da superfície de deposição foi criada uma interface para exibição da temperatura através de dois pirômetros ópticos em dois pontos distintos da superfície da preforma (Figura 4.12).

Através do monitoramento da temperatura durante a deposição da preforma foi também possível detectar ocasionais anomalias como flutuações na chama, entupimento do maçarico e

condensação dos gases na linha. A temperatura no centro da preforma foi também utilizada como um dos principais parâmetros de referência para a reprodutibilidade das condições de deposição.

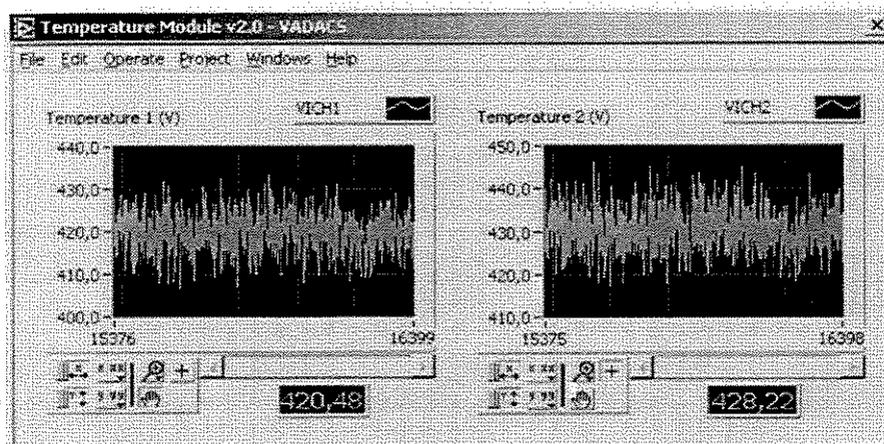


Figura 4.12. Janela de interface do módulo de temperatura.

4.3 Caracterização do Perfil de Concentração de GeO_2

Como a não-uniformidade do diâmetro da preforma é uma das principais causas na flutuação do perfil de GeO_2 ao longo da preforma (SEKIYA, 2001), realizou-se um estudo para verificar se a uniformidade do diâmetro é uma condição suficiente para a uniformidade axial do perfil de GeO_2 . Cerca de 10 preformas foram produzidas nas mesmas condições de processo da preforma D183 (Figura 4.13) para possibilitar uma análise comparativa.

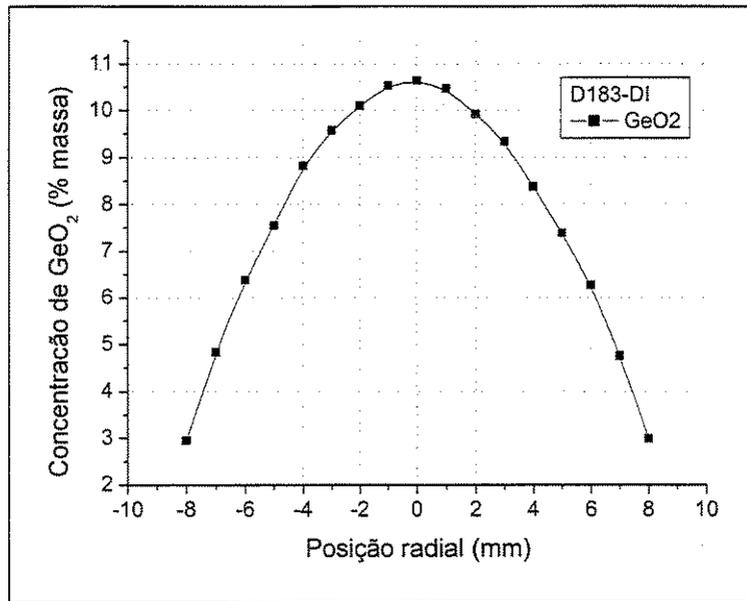


Figura 4.13. Perfil de concentração de GeO₂ da preforma D183.

4.3.1 Influência do Processo de Desidratação no Perfil de Concentração de GeO₂

As análises de FRX nas preformas desidratadas revelaram que, mesmo apresentando diâmetro uniforme, algumas amostras apresentaram variações significativas nos perfis de GeO₂ na direção axial. Em geral, foi observada uma maior remoção de GeO₂ na parte inferior e menor na parte superior das preformas (Figura 4.14).

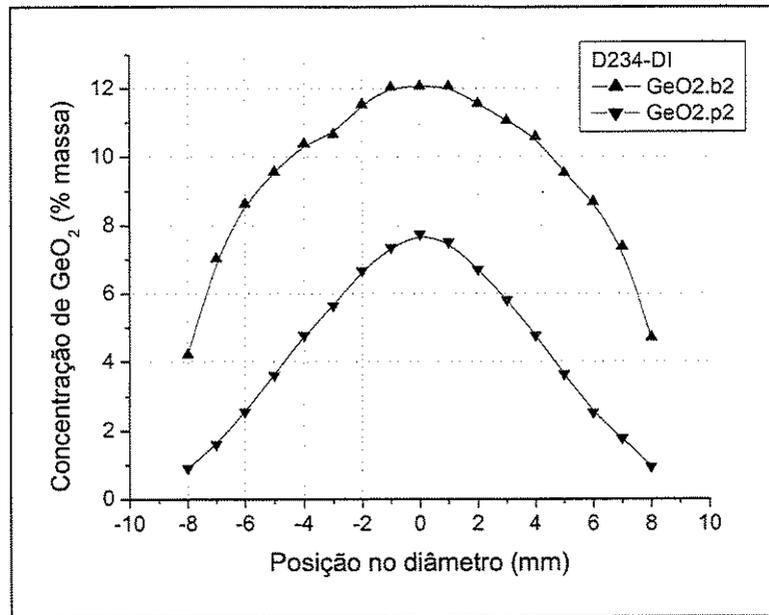


Figura 4.14. Efeito da desidratação no perfil da concentração de GeO₂ em regiões extremas da preforma.

Uma vez que no processo de desidratação ocorre uma remoção parcial de GeO₂, considerou-se a possibilidade da não-uniformidade na remoção axial de GeO₂ nessa etapa. Considerando-se esse efeito, optou-se pela caracterização das preformas não desidratadas, porém, produzidas nas mesmas condições de deposição e consolidação (Figura 4.15).

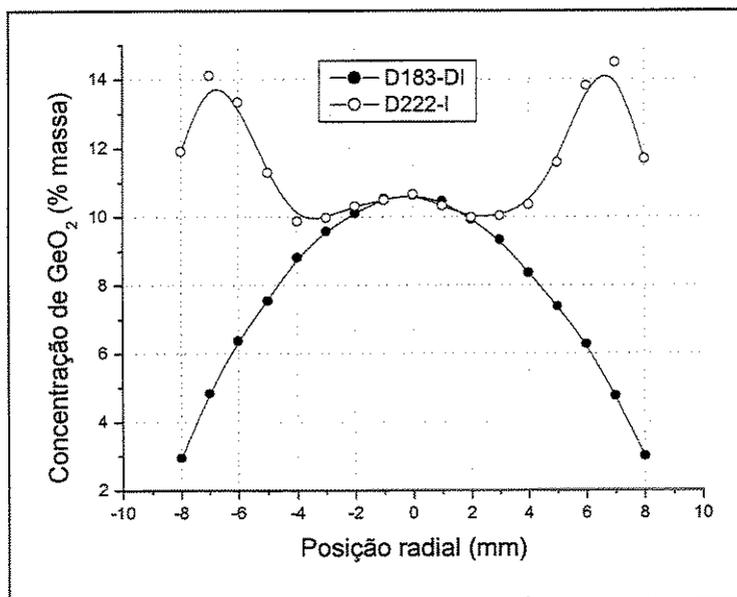


Figura 4.15. Efeito da remoção de GeO₂ na etapa de desidratação.

Neste caso, foi verificada a uniformidade do perfil de concentração de GeO_2 em algumas das preformas (Figura 4.16).

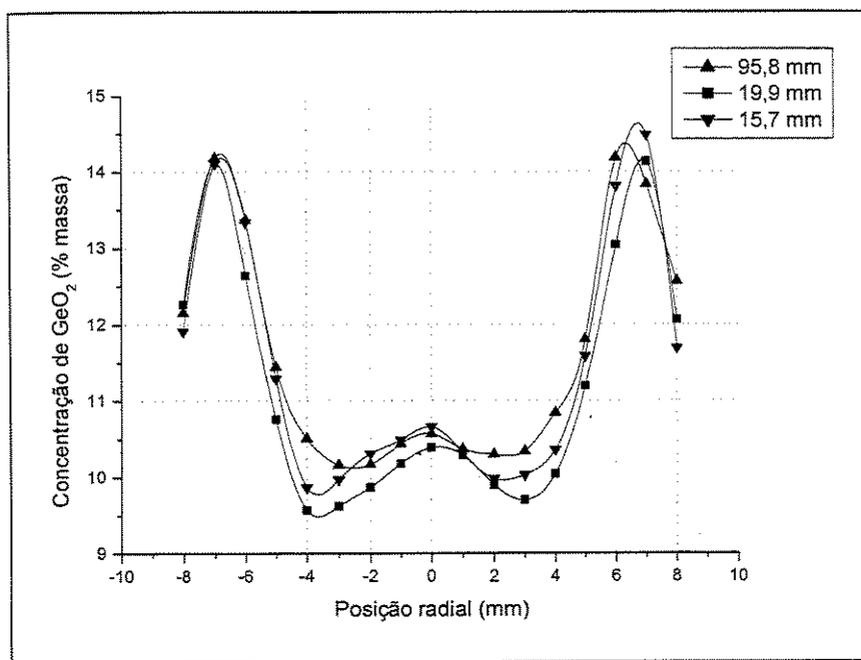


Figura 4.16. Perfis de GeO_2 ao longo da preforma D222 não desidratada. As distâncias indicadas são referentes ao extremo inferior da preforma.

Por outro lado, observou-se na amostra D236, não desidratada, a não-uniformidade axial do perfil de GeO_2 (Figura 4.17), causada principalmente por variações não controláveis nos parâmetros do processo, tais como, temperatura ambiente, pressão interna da câmara, etc...

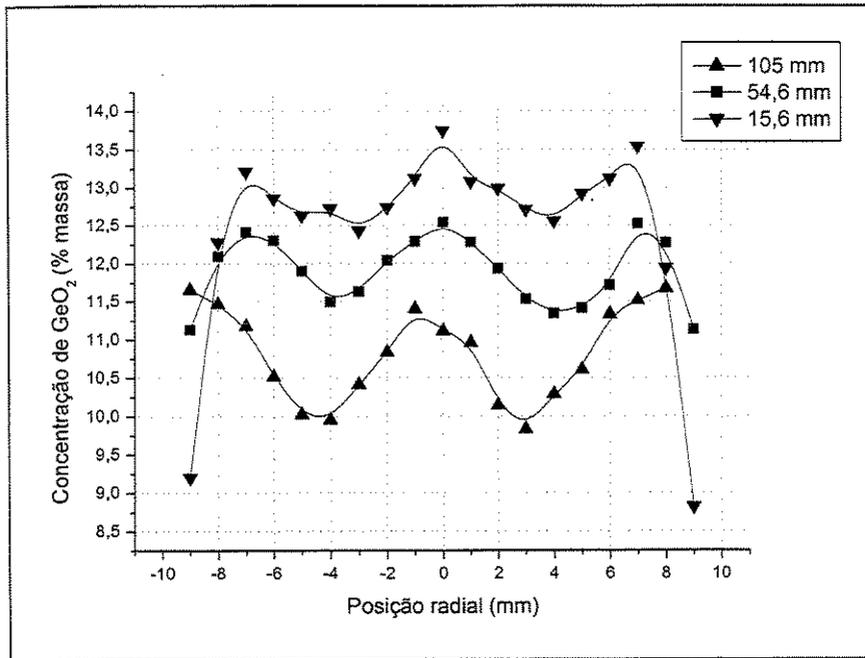


Figura 4.17. Perfis de GeO₂ ao longo da preforma D236 não desidratada. As distâncias indicadas são referentes ao extremo inferior da preforma.

Neste caso, verificou-se uma variação maior da temperatura no centro da preforma D236 ($440 \pm 4,7$ °C) do que na preforma D222 ($452 \pm 2,1$ °C), durante o processo de deposição. Na preforma D222, não houve variação significativa da concentração de GeO₂ e também da temperatura no centro da preforma.

Capítulo 5

Conclusões

A adoção da plataforma LabVIEW para a automação do processo VAD mostrou-se uma solução bastante eficiente como plataforma de desenvolvimento auxiliado por computador, contribuindo significativamente para o controle da uniformidade geométrica da preforma. O sistema mostrou um excelente desempenho, estabilidade e confiabilidade do sistema, além de facilitar a construção de uma interface bastante amigável para o usuário.

Em relação aos sistemas tradicionais de controle, o sistema desenvolvido possibilitou o controle da uniformidade geométrica da preforma com uma precisão 5 vezes superior, sendo que variações no diâmetro da ordem de 0,3 mm puderam ser corrigidas. Os resultados obtidos no controle da uniformidade de preformas produzidas em escala laboratorial mostraram um grande potencial do sistema para ser empregado na fabricação de preformas para fibra óptica em escala industrial, contribuindo para a diminuição dos rejeitos de preformas e para a redução do custo de produção.

A uniformidade geométrica da preforma mostrou ser essencial para a uniformidade axial do perfil de concentração de GeO_2 e, conseqüentemente, do perfil de índice de refração da fibra final. Porém, verificou-se que outros parâmetros de deposição também influenciam significativamente na uniformidade do perfil.

5.1 Sugestões para Próximos Trabalhos

Para os próximos trabalhos sugere-se o estudo sistemático dos principais parâmetros do processo de deposição para o controle do perfil de dopagem da preforma na direção radial e controle da uniformidade do perfil da direção axial, o que fundamental para a produção de preformas para fibras ópticas especiais.

Trabalhos Publicados

ONO, E., SANTOS, J.S., SEKIYA, E.H., JACON, R.H.B., SUZUKI, C.K. “Study of germanium clusters formation mechanism in preforms for optical fibers manufactured by the VAD method”, *Anais do LNLS – Activity Report 2002*, Campinas – SP, 2002.

ONO, E., SEKIYA, E.H., TORIKAI, D., GUSKEN, E., SUZUKI, C.K. “Sistema de automação para controle da uniformidade geométrica de preformas para fibra óptica”, *Anais do 2^o COBEF, Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação*, 18 a 21 de Maio de 2003, Uberlândia – MG, CD-ROM, 2003.

GUSKEN, E., SEKIYA, E.H., TOMIYAMA, M., ONO, E., CUEVAS, R.F., TORIKAI, D., SUZUKI, C.K. “Processo de fabricação do perfil de dopagem (núcleo) de preformas de SiO₂:GeO₂ para fibras ópticas pela técnica VAD”, *Anais do 2^o COBEF, Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação*, 18 a 21 de Maio de 2003, Uberlândia – MG, CD-ROM, 2003.

SUZUKI, C.K., TORIKAI, D., SEKIYA, E.H., OGATA, D.Y., TOMIYAMA, M., ONO, E., GUSKEN, E., CUEVAS, R.F., “Fibras ópticas no Brasil: Inovação tecnológica usando o método VAD”, *Anais do Sulmat 2000, Congresso em Ciência de Materiais*, 12 a 16 de Setembro de 2000, Joinville - SC, pp. 172-179, CD-ROM, 2000.

SUZUKI, C.K., TORIKAI, D., SEKIYA, E.H., ONO, E., “Processo de automação para fabricação de preforma porosa para fibra óptica”, Universidade Estadual de Campinas, SP, Patente requerida junto ao INPI sob protocolo No. PI0203755-6 em 12 de julho de 2002.

TOMIYAMA, M., CUEVAS, R.F., GUSKEN, E., ONO, E., GUZZO, P.L., SHINOHARA, A.H., SEKIYA, E.H., KELLERMANN, G., TORRIANI, I.L., SUZUKI, C.K. "Study of heterogeneities in SiO₂:GeO₂ preforms by SAXS", *Anais do LNLS – Activity Report 2001*, Campinas – SP, 2001.

TOMIYAMA, M., SEKIYA, E.H., GUSKEN, E., ONO, E., CUEVAS, R.F., SHINOHARA, A.H., SUZUKI, C.K. "Estudo da distribuição da heterogeneidade do "soot" em sílica-germânia por SAXS", *Anais do Sulmat 2002, Congresso em Ciência de Materiais do Mercosul*, 10 a 14 de Setembro de 2002, CD-ROM, 2002.

Referências

- ANDRADE, H.A., KOVNER, S. “Software synthesis from dataflow models for G and LabVIEW”, *Proceedings of the 32nd annual Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, Pacific Grove, CA, USA, November 1998.
- ARUMUGAM, M. “Optical fiber communication – An overview”. *Pramana – Journal of Physics*, v. 57(5-6), pp. 849-869, 2001.
- CHIDA, K., HANAWA, F., NAKAHARA, M. “Fabrication of OH-free multimode fiber by vapor phase axial deposition”, *J. Quantum Electron.*, v. 18(11), pp. 1883-1889, 1982.
- CHIDA, K., NAKAHARA, M., SUDO, S., INAGAKI, N., “On-line monitoring technique of the refractive-index profile in the VAD process”, *J. Lightwave Technol.*, v. 1(1), pp. 56-60, 1983.
- FANDERLIK, I. *Silica glass and its application*, 304 p., Elsevier, 1991.
- FLEMING, J.W. “Dispersion in GeO₂-SiO₂ glasses”, *Appl. Opt.*, v. 23(24), pp. 4486-4493, 1984.
- GUSKEN, E., TORIKAI, D., TOMIYAMA, M., JACON, R.H.B., SEKIYA, E.H., MOTOSHIGE, M., SUZUKI, C.K. “Temperature effect on the diffusion of germania clusters in VAD silica preform observed by SEM”, *Anais do LNLS – Activity Report 2001*, Campinas – SP, 2001.
- GUSKEN, E. “Estudo de preformas de sílica-germânia VAD para fibras ópticas por FRX e EXEFS”, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2001, 86 p., Dissertação (Mestrado).

- HANKS, J. "Using edge detection in machine vision gauging applications", National Instruments Application Note n. 125, 1998.
- HUANG, Y. Y., SARKAR, A. "Relationship between composition, density and refractive index for germânia silica glasses", *J. Non-Cryst. Solids*, v. 27, pp. 29-37, 1978.
- HYDE, J.F. "Method of making a transparent article of silica", Corning Glass Works, U.S. Patent No. 2.272.342, 1942.
- IKUSHIMA, A.J., FUJIWARA, T., SAITO, K. "Silica glass: A material for photonics", *J. Appl. Phys.*, v. 88(3), pp. 1201-1213, 2000.
- IMOTO, K., SUMI, M., TODA, G., SUGANUMA, T. "Optical fiber drawing method with gas flow controlling system". *J. Lightwave Technol.*, v. 7(1), pp. 115-121, 1989.
- INADA, K. "Recent progress in fiber fabrication techniques by vapor-phase axial deposition", *J. Quantum Electron.*, v. 18(10), pp. 1424-1431, 1982.
- IZAWA, T., MIYASHITA, T., HANAWA, F. "Continuous Optical Fiber Preform Fabrication Method". U.S. Patent No. 4.062.665, 1977.
- IZAWA, T., SUDO, S. *Optical Fibers: Materials and fabrication*, KTK Scientific Publishers, 186 p., 1987.
- IZAWA, T. "Early days of VAD process", *J. Selected Topics Quantum Electron.*, v. 6(6), pp. 1220-1227, 2000.
- JAMAL, R. "Graphical object-oriented programming with LabVIEW". *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A*, v. 352, pp. 438-441, 1994.
- KAPRON, F.P., KECK, D.B., MAURER, R.D. "Radiation losses in glass optical waveguide", *Appl. Phys. Lett.*, v. 17, pp. 423-425, 1970.

- KODOSKY, J., MACCRISKEN, J., RYMAR G. “Visual programming using structured data flow”, *Proceedings of the IEEE Workshop on Visual Languages*, October 1991.
- NAKAHARA, M. et al. “Process for producing optical fiber preform and apparatus therefor”, NTT, U.S Patent No. 4.419.116, 1983.
- NOUCHI, P., DE MONTMORILLON, L., SILLARD, P., BERTAINA, A., GUENOT, P. “Optical fiber design for wavelength-multiplexed transmission”, *C. R. Physique*, v. 4, pp. 29-39, 2003.
- OGATA, K. *Engenharia de Controle Moderno*. Editora Prentice/Hall do Brasil, 929 p., 1985.
- OGATA, D.Y. “Síntese e caracterização de preformas de sílica-germânia obtidas por deposição fase vapor (VAD)”, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2001, Tese (Doutorado).
- OHMORI, Y., MIYA, T., HORIGUCHI, M. “Transmission-loss characteristics of Al₂O₃-doped silica fibers”, *J. Lightwave Technol.*, v. 1(1), pp. 50-56, 1983.
- OKAMOTO, K., EDAHIRO, T., NAKAHARA, M. “Transmission characteristics of VAD multimode optical fibers”, *Appl. Opt.*, v. 20(13), pp. 2314-2318, 1981.
- ONO, E., SANTOS, J.S., SEKIYA, E.H., JACON, R.H.B., SUZUKI, C.K. “Study of germanium clusters formation mechanism in preforms for optical fibers manufactured by the VAD method”, *Anais do LNLS – Activity Report 2002*, Campinas – SP, 2002.
- ONO, E., SEKIYA, E.H., TORIKAI, D., GUSKEN, E., SUZUKI, C.K. “Sistema de automação para controle da uniformidade geométrica de preformas para fibra óptica”, *Anais do 2^o COBEF, Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação*, 18 a 21 de Maio de 2003, Uberlândia – MG, CD-ROM, 2003.
- PETRE, M., BLACKWELL, A.F. “Mental imagery in program design and visual programming”, *Int. J. Human-Computer Studies*, v. 51, pp. 7-30, 1999.

- PLOTNICHENKO, V.G., SOKOLOV, V.O., DIANOV, E.M. "Hydroxyl groups in germanosilicate glasses", *J. Non-Cryst. Solids*, v. 278, pp. 85-98, 2000.
- POTKAY, E. "Representation of the vapor-phase axial deposition helical layer structure through a 'spiral transformation'", *J. Appl. Phys.*, v. 57(5), pp. 1509-1517, 1985.
- SANADA, K., SHIOTA, T., INADA, K. "Studies of the chemical kinetics on the vapor phase axial deposition method". *J. Non-Cryst. Solids*, v. 188, pp. 275-284, 1995.
- SANADA, K., MORIYAMA, T., INADA, K. "Chlorination and vaporization of GeO₂ component in SiO₂:GeO₂ porous preform in dehydration process by VAD method and spontaneous formation of SiO₂ cladding layer during the dehydration by selective vaporization of GeO₂". *J. Non-Cryst. Solids*, v. 194, pp. 163-172, 1996.
- SEKIYA, E.H., TORIKAI, D., GUSKEN, E., OGATA, D.Y., CUEVAS, R.F., SUZUKI, C.K. "Crystalline and amorphous phases of GeO₂ in VAD silica-germania soot preform", *J. Non-Cryst. Solids*, v. 273, pp. 228-232, 2000.
- SEKIYA, E.H., "Estudo do processo de deposição e consolidação da preforma de sílica vítrea para fibras ópticas pelo método VAD", Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2001, 109 p., Tese (Doutorado).
- SKOGESTAD, S., "Simple analytic rules for model reduction and PID controller tuning", *J. Process Control*, v. 13, pp. 291-309, 2003.
- STEWART, W.J. "Optical fiber and preform profiling technology", *J. Quantum Electron.*, v. 18(10), pp. 1451-1466, 1982.
- SUZUKI, C.K., TORIKAI, D., "Vitreous silica processing by vapor phase deposition for optical fiber preform", *Radiation Effects & Defects in Solids*, v. 147, pp. 55-66, 1998.

SUZUKI, C.K., TORIKAI, D., SEKIYA, E.H., OGATA, D.Y., TOMIYAMA, M., ONO, E., GUSKEN, E., CUEVAS, R.F., “Fibras ópticas no Brasil: Inovação tecnológica usando o método VAD”, *Anais do Sulmat 2000, Congresso em Ciência de Materiais*, 12 a 16/09/2000, Joinville - SC, pp. 172-179, CD-ROM, 2000.

SUZUKI, C.K., TORIKAI, D., SEKIYA, E.H., ONO, E., “Processo de automação para fabricação de preforma porosa para fibra óptica”, Universidade Estadual de Campinas, SP, Patente requerida junto ao INPI sob protocolo No. PI0203755-6 em 12 de julho de 2002.

TOMIYAMA, M. “Síntese e caracterização de nanovidro de sílica para preforma de fibra óptica”, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2003, 127 p., Tese (Doutorado).