



**HAL**  
open science

## Organic-inorganic hybrids for photonics

Daniela Coelho de Oliveira

► **To cite this version:**

Daniela Coelho de Oliveira. Organic-inorganic hybrids for photonics. Atomic Physics [physics.atom-ph]. Université d'Angers, 2006. Portuguese. NNT: . tel-00112529

**HAL Id: tel-00112529**

**<https://theses.hal.science/tel-00112529>**

Submitted on 9 Nov 2006

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**Manuscrit en portugais**

**THESE**

En co-tutelle

Pour obtenir les grades de

Docteur de l'UNESP (Universidade Estadual Paulista  
Júlio de Mesquita Filho), Sao Paulo, Brésil  
Spécialité : Physique

Docteur de l'université d'Angers  
Spécialité : Physique

Présentée et soutenue publiquement par

**Daniela Coelho de Oliveira**

le 16 juin 2006

à Araraquara, Brésil

**Couches minces hybrides  
organiques-inorganiques  
pour la photonique**

**Composition du jury**

**Rapporteurs**

Mr. Cid de Araújo

Professeur, Recife (Brésil)

Mr. Alain Fort

Directeur de recherche CNRS, Strasbourg

**Examineurs**

Mr. Sidney Ribeiro

Professeur, Araraquara (Brésil), *Directeur de thèse*

Mr. Jean-Michel Nunzi

Professeur, Angers, *Directeur de thèse*

Mr. Denis Gindre

Maître de Conférences, Angers

UNESP – UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
CAMPUS DE ARARAQUARA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM QUÍMICA

Filmes finos híbridos orgânicos-inorgânicos para fotônica

**DANIELA COELHO DE OLIVEIRA**

Tese de doutorado

2006

DANIELA COELHO DE OLIVEIRA

Filmes finos híbridos orgânicos-inorgânicos para fotônica

Tese apresentada ao Instituto de Química, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Química

Prof. Dr. Sidney J. L. Ribeiro (orientador)

Prof. Dr. Jean-Michel Nunzi (orientador)

Araraquara

2006

*Às pessoas que eu amo...*

*Às pessoas que me amam...*

*Só por elas isso tudo foi possível !*

## AGRADECIMENTOS

- Ao meu orientador Dr. Sidney José Lima Ribeiro pela orientação, pela força e por mostrar que possibilidades existem a todo momento;
- Je remercie mon directeur de thèse Dr. Jean-Michel Nunzi du laboratoire POMA (Propriétés Optiques des Matériaux et Applications) de l'Université d'Angers, France, pour avoir accepté de diriger ce travail en cotutelle;
- Je remercie le professeur Dr. Denis Gindre du laboratoire POMA pour sa gentillesse et pour son aide constante à la fois sur le plan professionnel et personnel lors de mon séjour en France;
- Un grand merci à Adrien Vésperini du laboratoire POMA, pour son amitié et pour son aide lors des mesures et analyses réalisées pendant cette thèse;
- Je remercie le rapporteur Alain Fort, pour avoir accepté de lire ma thèse dans un si bref délai;
- Agradeço o professor Cid Bartolomeu de Araújo por aceitar ser também relator mesmo sabendo que o tempo seria curto;
- Alessia Quatela, mi amica italiana, te voglio bene;
- Katherine Pacheco, mi querida amiga venezolana, gracias por la compañía alegre, por la fuerza e por los momentos inolvidables que pasamos en Angers.
- A professora Dra. Lucila Cescato do Instituto de Física Gleb Wataglin (IFGW) da UNICAMP pelo auxílio em seu laboratório mas principalmente pelo carinho, amizade e receptividade demonstrada desde o primeiro dia em que conversamos (o mundo precisa de mais pessoas assim);
- Aos professores Dr. Luiz Carlos Guedes Valente, Dra. Adriana Triques e Dr. Marco Cremona da PUC-Rio de Janeiro pelo auxílio nos testes iniciais de obtenção de redes de difração e pela colaboração nas discussões;
- Ao professor Dr. Máximo Siu Li do Instituto de Física da USP de São Carlos pela colaboração em várias ocasiões na caracterização de amostras e pelas sugestões durante o trabalho;
- Ao professor Dr. Karim Dahmouche, atualmente na PUC do Rio de Janeiro, pelo auxílio nas discussões de dados, durante diversas ocasiões;
- A professora Dra. Rogéria Rocha Gonçalves atualmente na Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras da USP de Ribeirão Preto, pelo auxílio no laboratório e principalmente pela amizade, alegria e incentivo;
- Ao Gaël Poirier e ao Fernando Sigoli pelo auxílio com traduções;

- Ao professor Dr. Younes Messaddeq e a Dra. Sandra Helena Messaddeq pelo incentivo em diversos momentos;
- Aos professores da banca, pelas sugestões que já vieram e que virão;
- A FAPESP pelo apoio financeiro;
- Aos funcionários do IQ sempre muito carinhosos;
- A todos os amigos dos mezaninos que conheci durante esses quatro anos de pós-graduação na Unesp de Araraquara;
- Ao Neto, pelas diferentes formas de apoio e incentivo e pela companhia durante todos esses anos;
- A minha família que sempre torce por mim.

## RESUMO

Este trabalho mostra a preparação e caracterização de materiais híbridos orgânicos inorgânicos com o objetivo de aplicações no ramo da fotônica. São descritas as teorias que envolvem a preparação dos materiais e alguns resultados de outros trabalhos já publicados envolvendo o mesmo material de partida. A estrutura do material obtido após hidrólise e condensação, na presença de diferentes quantidades de zircônio, são caracterizadas, além das partículas formadoras deste material e a influência do zircônio no híbrido U600 puro a partir de análises de difração e espalhamentos de raios X. Além disso, por espectroscopia na região do infravermelho, são estudadas as ligações típicas do material e as modificações estruturais decorrentes da adição da fase inorgânica. São analisadas ainda as características do material por curvas de ressonância magnética nuclear e espectroscopia de luminescência, onde são abordadas a luminescência intrínseca do material e a influência do zircônio nessa luminescência. Ainda por luminescência foi estudada a introdução do íon európio, que confere novas propriedades e permite também uma avaliação estrutural complementar do material. São mostradas diversas aplicações do material estudado sob a forma de filmes finos, como a obtenção de redes de difração por holografia, litografia, e a obtenção do efeito laser em filmes dopados com rodamina 6G.



## ABSTRACT

This work shows the preparation and characterization of organic-inorganic hybrid materials to photonic applications. We show the theory that involves the preparation of these materials and shows some results of other works previously published involving similar initial materials. The material obtained after hydrolysis and condensation reactions in presence of different zirconium concentrations and the particles of these materials and also influence of the zirconium on pure hybrid U600 were characterized using X-ray analyses (diffraction and scattering). Moreover, the typical bondings of the material and the structural modifications due to addition of the inorganic phases were studied by infrared spectroscopy. By RMN the material characteristics were analyzed. The optical characteristics of this material including the intrinsic luminescence of the material and the influence of zirconium in this luminescence were studied by luminescence spectroscopy. The introduction of europium ion that gives new properties and it permits a complementary study of the material. Finally, some applications of the material are shown as a thin film, and diffraction gratings obtained by holography, lithography, and the laser effect in rhodamine-doped films were characterized.

## RÉSUMÉ

Ce travail présente la préparation et la caractérisation de matériaux hybrides organiques inorganiques pour applications en la photonique. On décrit la théorie associée à la préparation des matériaux et présente quelques résultats d'autres travaux déjà publiés pour les mêmes matériaux de départ. On détaille la structure du matériau obtenu après hydrolyse et condensation, en présence de différentes quantités de zirconium. Les analyses de rayons X mettent en évidence les particules formatrices de ce matériau et l'influence du zirconium sur la forme de cette particule. La spectroscopie dans la région de l'infrarouge a permis l'étude des liaisons caractéristiques du matériau et les modifications structurales liées à l'addition de la phase inorganique. Les caractéristiques du matériau ont été analysées par résonance magnétique nucléaire. Les caractéristiques spectroscopiques du matériau sont détaillées; la luminescence intrinsèque du matériel et l'influence du zirconium dans cette luminescence sont abordées. C'est montré que l'introduction de l'ion europium confère de nouvelles propriétés et permet aussi une évaluation structurale complémentaire du matériau. Finalement on présente diverses applications du matériau étudié sous la forme de couche mince, comme l'obtention de réseaux de diffraction par holographie, lithographie, et l'obtention de l'effet laser dans les films dopés avec rhodamine 6G.

## LISTA DE FIGURAS

**Figura 1.1** Representação da obtenção de híbridos de classe I e II a partir de uma fase orgânica (traços) e uma fase inorgânica (pontos).

**Figura 2.1.1** Síntese do híbrido U600.

**Figura 2.1.2** Representação da reação de hidrólise do híbrido U600, onde PEG<sub>500</sub> = Polietilenoglicol (-CH<sub>2</sub>-CH<sub>2</sub>-O-), peso molecular 500.

**Figura 2.1.3** Representação da reação de condensação do híbrido U600.

**Figura 2.1.4** Estrutura do complexo formado entre o alcóxido de zircônio e o ácido metacrílico.

**Figura 2.1.5** Representação do cluster Zr<sub>6</sub>O<sub>4</sub>(OH)<sub>4</sub>(OMc)<sub>12</sub>, onde os átomos de zircônio estão destacados em rosa.

**Figura 2.1.6** Representação do cluster [Zr<sub>6</sub>O<sub>4</sub>(OH)<sub>4</sub>(OMc)<sub>7</sub>(OAc)<sub>5</sub>]<sub>2</sub>, com estrutura semelhante ao da figura anterior.

**Figura 2.1.7** Estrutura do cluster Zr<sub>6</sub>(OH)<sub>4</sub>O(OMc)<sub>12</sub>(PrOH)<sub>3</sub>McOH; as ligações de hidrogênio dos ácidos metacrílicos foram omitidos para maior clareza.

**Figura 2.1.8** Estrutura do cluster Zr<sub>6</sub>(OH)<sub>4</sub>O<sub>4</sub>(OBz)<sub>12</sub>(PrOH)<sub>4</sub>BzOH. As ligações de hidrogênio do ácido benzóico foram omitidas para maior clareza.

**Figura 2.2.1** Arranjo experimental utilizado na coleta de dados de SAXS no LNLS: (A) Fonte de luz, (B) amostra, (C) anteparo, (D) distância entre amostra e detector; (E) detector, (F) ponto de detecção do ângulo mínimo e (G) ponto de detecção do ângulo máximo.

**Figura 2.2.2** Curvas de SAXS das amostras (a)U600, (b) Z15, (c) Z40, (d) Z50 (e) Z60, (f) Z75 e (g)Z85.

**Figura 2.2.3** Ajustes realizados nas curvas experimentais de SAXS utilizando-se o modelo de Beaucage: (a) U600, (b) Z15, (c) Z40, (d) Z50, (e) Z60, (f) Z75, (g) Z85.

**Figura 2.3.1** Difratoograma de raios X dos compostos U600 puro e contendo diferentes concentrações de zircônio: (a) U600, (b)Z15, (c)Z25, (d)Z40, (e)Z50, (f)Z60, (g)Z75, (h)Z85 e (i) Zr puro.

**Figura 2.3.2** Ajuste gaussiano aos picos a baixos ângulos das curvas dos compostos obtidos; (a) híbrido U600 puro e (b) Z15 a Z85.

**Figura 2.3.3** Posição do pico a baixos ângulos e distância entre heterogeneidades em função da concentração de zircônio nas amostras.

**Figura 2.3.4** Esquema da morfologia dos di-ureasis; R indica o raio dos domínios siliciosos nanométricos (que pode ser estimado por medidas de SAXS) e d<sub>s</sub> a distância média entre estes domínios.

**Figura 2.3.5** Difratoogramas dos compostos híbridos contendo diferentes relações Zr:Si na região de altos ângulos (2θ>10), com ajustes de curvas gaussianas.

**Figura 2.4.1** Espectros de transmissão no infravermelho: (a)híbrido U(600) e precursores (b) jeffamine e (c) isotreos.

- Figura 2.4.2** Espectros de transmissão na região do infravermelho para as amostras (a) U600 puro e contendo diferentes concentrações de zircônio (b)Z15, (c)Z25, (d)Z40, (e)Z50, (f)Z60, (g)Z75, (h)Z85 e (i) Z100.
- Figura 2.4.3** Espectros de transmissão na região do infravermelho. Detalhe da região de 4000 a 2500  $\text{cm}^{-1}$ ; (a)U600, (b)Z25, (c) Z50 e (d) Z75.
- Figura 2.4.4** Espectro de transmissão na região do infravermelho: (a) U600, (b)Z25, (c) Z50 e (d) Z75.
- Figura 2.4.5** Desconvolução das bandas da região amida I e amida II do híbrido U600.
- Figura 2.4.6** Desconvolução das bandas amida I e amida II, Z15 (a) a Z85 (g)
- Figura 2.4.7** Representação das pontes de hidrogênio presentes nos di-ureais U600, onde R e R' representam os componentes orgânicos e inorgânicos na estrutura do híbrido.
- Figura 2.4.8** Desconvolução das bandas do U600 na região 100-1200 $\text{cm}^{-1}$ .
- Figura 2.4.9** Desconvolução das bandas na região de poliéter dos compostos Z15-Z85.
- Figura 2.5.1** Curvas de RMN de  $^{29}\text{Si}$  de sólidos (Z15 a Z85, indicados na figura).
- Figura 2.6.1** Estrutura da matriz híbrida de zircônio e silício obtida a partir de alcóxido de zircônio coordenado a ácido metacrílico e do híbrido U600. (a) híbrido U600; (b) matriz formada pelas reações de hidrólise e condensação do híbrido U600; (c) matriz com baixa concentração de zircônio; (d) matriz com alta concentração de zircônio.
- Figura 3.1.1** Espectros de emissão obtidos para o híbrido U600. Os números indicam o comprimento de onda (nm) de excitação. A desconvolução em componentes gaussianas é discutida no texto.
- Figura 3.1.2** Variação da posição de máximo da componente gaussiana de maior energia em função do comprimento de onda de excitação ( $\lambda_{\text{EXC}}$ ).
- Figura 3.1.3** Espectros de emissão obtidos para as amostras Z15, Z50 e Z75 para diferentes comprimentos de onda de excitação; para Z15, a=330, b=340, c=350, d=360, e=370, f=380, g=390, h=409, i=429, j=466nm; para Z50 e Z85, a=300, b=310, c=320, d=330, e=360, f=370, g=380, h=390, i=405, j=420, l=430, m=450, n=480nm.
- Figura 3.1.4** Espectros de emissão obtidos sob excitação em 350 nm para: (a) U600; (b) Z15; (c) Z25; (d) Z40; (e)Z50; (f) Z60; (g) Z75; (h) Z85.
- Figura 3.2.1** Representação dos níveis de energia do íon  $\text{Eu}^{3+}$ .
- Figura 3.2.2** Ordem de grandeza (valores aproximados) das energias associadas aos hamiltonianos originados da teoria da perturbação aplicada à configuração  $4f^6$  do íon európio; conf= configuracional, re= repulsão eletrônica, so= spin-órbita
- Figura 3.2.3** Espectros de emissão obtidos para: (a) solução aquosa de  $\text{Eu}^{3+}$ ; (b) sol Z50: $\text{Eu}^{3+}$   $\lambda_{\text{EXC}}= 345\text{nm}$ ; (c) sol Z50  $\lambda_{\text{EXC}}= 394\text{nm}$  e (d) sol Z50  $\lambda_{\text{EXC}}= 464\text{nm}$ .
- Figura 3.2.4** Espectros de excitação do (a) solução de cloreto de európio em solução e (b) sol Z50: $\text{Eu}^{3+}$

- Figura 3.2.5** Decaimento de emissão em função do tempo para (a) Z40:Eu<sup>3+</sup>; (b) Z50:Eu<sup>3+</sup> e (c) Z60:Eu<sup>3+</sup> ( $\lambda_{\text{EXC}}=394 \text{ nm}$  e  $\lambda_{\text{EM}}= 612 \text{ nm}$ ).
- Figura 3.2.6** Espectros de emissão ( $\lambda_{\text{EXC}}= 350\text{nm}$ ) (a) complexo [Eu(TTA)<sub>3</sub>(H<sub>2</sub>O)<sub>2</sub>] puro e (b-f) híbridos dopados com Eu-TTA, sendo (b) Z15, (c) Z40, (d) Z50, (e) Z60 e (f) Z85.
- Figura 3.2.7** Espectros de excitação (a)[Eu(TTA)<sub>3</sub>(H<sub>2</sub>O)<sub>2</sub>], e materiais dopados com o complexo: (b) híbrido U600, (c) Z15, (d) Z40, (e)Z50, (f) Z60, (g) Z85, com emissão fixada em 614nm.
- Figura 3.2.8** Curvas de decaimento do estado excitado <sup>5</sup>D<sub>0</sub> dos íons európio contidos nas amostras indicadas.
- Figura 4.1** Esquema de acoplamento de um feixe de luz incidente sobre um guia de onda planar na superfície do qual foi construída uma rede de difração. (a) acoplamento do feixe do exterior para dentro do guia. (b) acoplamento do feixe do guia para o exterior.
- Figura 4.2** Princípio da retroação distribuída: o meio (índice N) possui uma periodicidade representada no gráfico  $2I_0 \times z$ ; as curvas  $m=1, 2$  e  $4$  representam o campo elétrico das ondas de ordem  $m$  que podem se propagar nesse meio.
- Figura 4.1.1** Representação do experimento de exposição das amostras sob lâmpada de Hg utilizando-se máscaras.
- Figura 4.1.2** Microscopia óptica das redes de difração de uma amostra, obtidas por litografia: as escalas são idênticas nas figuras (a), (b) e (c), variando-se apenas o aumento.
- Figura 4.1.3** Representação da medida de eficiência de difração por transmissão: laser He-Ne (L), rede de difração gravada no filme (R) e detector posicionado nas ordens +1 e -1 (D).
- Figura 4.1.4** Parâmetros da máscara: a = tamanho da parte escura; b = tamanho da parte clara; d = tamanho da parte escura+clara.
- Figura 4.2.1** Representação (a) da medida de eficiência de difração em função do tempo (onde L1=laser no UV, L2=laser He-Ne, E=espelho de Lloyd e D=detector) e (b) detalhe do espelho de Lloyd.
- Figura 4.2.2** Eficiência de difração em função do tempo de gravação das redes das amostras (a)Z85, (b)Z50 e (c)Z15. Potência do laser usado para gravação das redes = 400mW.
- Figura 4.3.1** (a) Montagem utilizada para obtenção de redes de difração: F=filme, E=espelho, R=rede de difração, L=laser; (b)esquema de produção de uma rede de difração pela interferência de duas ondas planas - o período  $\Lambda$  é definido pelo ângulo  $\theta$ .
- Figura 4.3.2** Imagem de AFM da formação das redes por exposição ao laser por 45s escala 0-100 $\mu\text{m}$ .
- Figura 4.3.3** Imagem de AFM das redes formadas por exposição ao laser por 45s; escala 0-10 $\mu\text{m}$ .
- Figura 4.3.4** Imagem de AFM das redes formadas por exposição ao laser por 4min; escala 0-5 $\mu\text{m}$ .
- Figura 4.3.5** Imagem de AFM das redes formadas por exposição ao laser por 45s; escala 0-3 $\mu\text{m}$ .
- Figura 4.4.1** Interferência construtiva e destrutiva gerada por duas ondas que interagem.

- Figura 4.4.2** Reflexão nos planos semi-refletores sucessivos de uma rede de Bragg.  $E_0$  é o campo incidente,  $E_1$  e  $E_2$  os campos refletidos e  $E_t$  o campo transmitido.
- Figura 4.4.3** (a) Estrutura da rodamina 6G; (b) espectro de emissão da rodamina 6G, na amostra Z50, com excitação em 532nm.
- Figura 4.4.4** Arranjo experimental utilizado na obtenção do efeito laser DFB em filmes dopados com rodamina 6G.
- Figura 4.4.5** Variação do ângulo(a) e do comprimento de onda do laser(b) em função do período da grade formada ( $m =$  ordem).
- Figura 4.4.6** Imagem capturada pela câmera CCD, escala em pixels. (a) imagem exportada, (b) espectro correspondente.
- Figura 4.4.7** Gráfico resultante obtido pelo tratamento de imagens pelo Matlab.
- Figura 4.4.8** Modos possíveis de um laser corante com uma cavidade de tamanho "L" .
- Figura 4.4.9** Emissão laser da amostra Z75 dopada com rodamina 6G variando-se a ordem  $k$ ; (a) e (b)  $k=4$  com ângulo próximo a  $20^\circ$ ; (c) e (d)  $k=3$  com ângulo próximo a  $27^\circ$ ; (e) e (f)  $k=2$  com ângulo próximo a  $43,3^\circ$ .
- Figura 4.4.10** Emissão laser da amostra Z25 ( $n=1,51$ ).
- Figura 4.4.11** Formação de picos lasers em amostras da composição Z75 para diferentes espessuras ( $th$ ) indicadas na figura.
- Figura 4.4.12** Modos guiados obtidos por m-lines da amostra Z75, utilizando-se laser de 543,5nm; as espessuras dos filmes são (a)  $3\mu\text{m}$  e (b)  $1,5\mu\text{m}$ .
- Figura I.1** Guia de onda planar; o sistema é infinito nas direções  $y$  e  $z$ ;  $n$  é o índice de refração ( $n_2 > n_3 > n_1$ ).
- Figura I.2** Trajetória do feixe luminoso em função do número do modo. À direita estão representadas as distribuições relativas do campo elétrico nas diferentes regiões.
- Figura I.3** Configuração para o acoplamento via prisma.
- Figura I.4** Espectro m-lines da amostra Z75 com laser He-Ne operando em 632,8nm.

## LISTA DE TABELAS

- Tabela 2.2.1** Parâmetros obtidos a partir das curvas apresentadas,  $k$  utilizando-se o modelo de Beaucage
- Tabela 2.3.1** Posição do primeiro pico de difração das amostras e distância das unidades estruturais obtidas a partir do pico em baixos ângulos.
- Tabela 2.3.2** Valores do comprimento de correlação ( $L_c$ ) obtidos a partir do pico a baixos ângulos ( $2\theta < 10^\circ$ ) e altos ângulos ( $2\theta \sim 20^\circ$ ).
- Tabela 2.4.1** Atribuições referentes às bandas dos espectros de transmissão no infravermelho dos compostos U600, jeffamine e isotreos.
- Tabela 2.4.2** Atribuições das bandas do espectro de transmissão na região do infravermelho do composto U600.
- Tabela 2.4.3** Posição das principais bandas obtidas através da desconvolução das curvas na região onde são coincidentes as bandas amida I e amida II com as bandas C=C e COO<sup>-</sup> do zircônio com o ácido metacrílico (AMA).
- Tabela 2.5.1** Porcentagens de T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub> e T<sub>3</sub> e grau de condensação obtidos de RMN de Si de amostras com diferentes relações Zr:Si.
- Tabela 3.2.1** Valores de tempo de vida médio obtidos para os híbridos contendo o complexo [Eu(tta)<sub>3</sub>(H<sub>2</sub>O)<sub>2</sub>].
- Tabela 3.2.1** Tempos de vida experimentais e teóricos, eficiência quântica e o cálculo do número de moléculas de água para os híbridos
- Tabela 4.1.1** Potências dos feixes de laser medidas nas ordens de difração de uma rede.
- Tabela 4.3.1** Distâncias horizontal (período) e vertical (altura) das redes formadas nos filmes expostos ao laser e analisados por microscopia de força atômica.
- Tabela 4.4.1** Ângulos teóricos para obtenção de emissão laser da rodamina 6G em filmes híbridos
- Tabela I.1** Valores obtidos dos índices de refração dos guias de onda híbridos contendo Zr e U600.

## SUMÁRIO

1.	O PROCESSO SOL-GEL E MATERIAIS HÍBRIDOS.	15
1.1.	Estado da arte, motivação e objetivos.	18
2.	CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL.	21
2.1.	Preparação das amostras.	22
2.2.	Espalhamento de raios X a baixos ângulos (SAXS).	28
2.3.	Difração de raios X.	33
2.4.	Espectroscopia vibracional na região do infravermelho.	39
2.5.	Ressonância Magnética Nuclear	52
2.6.	A estrutura da matriz híbrida.	55
3.	LUMINESCÊNCIA.	59
3.1.	Híbridos U600-ZrAMA.	59
3.2.	Híbridos U600-ZrAMA-Eu <sup>3+</sup> .	63
4.	APLICAÇÕES	75
4.1.	Redes de difração por litografia: lâmpada.	77
4.2.	Redes de difração por holografia: laser contínuo.	81
4.3.	Redes de difração por holografia: laser pulsado.	82
4.4.	Redes dinâmicas e lasers DFB.	86
5.	CONCLUSÕES, CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS.	99
6.	REFERÊNCIAS.	102
	ANEXO I: CARACTERIZAÇÃO DOS FILMES POR ESPECTROSCOPIA M-LINES.	110



## CAPÍTULO 1.

### O PROCESSO SOL-GEL E MATERIAIS HÍBRIDOS.

O processo sol-gel para a síntese de compostos híbridos (orgânico-inorgânicos) tem ganhado interesse em muitos campos de pesquisa para muitas aplicações, por possibilitar a combinação adequada de propriedades dos compostos orgânicos com a rigidez e resistência de compostos inorgânicos.

O processo sol-gel descreve uma rota química para a preparação de materiais sólidos a partir de hidrólise e condensação de precursores líquidos. *Sol* é uma suspensão coloidal de partículas em um líquido. Estas partículas podem sofrer reações de condensação e se o produto formado se estende a toda solução, pode haver a formação de um *gel*. A eliminação do solvente leva ao *xerogel*. Quando o solvente é removido em condições supercríticas, materiais com baixa densidade e alta área superficial (aerogéis) podem ser obtidos. A partir de cada fase podem ser obtidos muitos materiais diferentes como filmes, que podem ou não ser densificados, cerâmicas, xerogéis, aerogéis, fibras, partículas, etc, o que estende as possíveis aplicações para o processo sol-gel. [AVNIR, 1995; GONÇALVES, 2001]

As várias características do processo sol-gel (precursores organometálicos, solventes orgânicos, baixa temperatura) permitem a introdução de moléculas orgânicas "frágeis" em matrizes inorgânicas. Componentes orgânicos e inorgânicos podem ser misturados em escala molecular levando a formação dos chamados nanocompósitos híbridos. Esses híbridos são extremamente versáteis em sua composição, preparação, propriedades mecânicas e ópticas [LEBEAU, 1999].

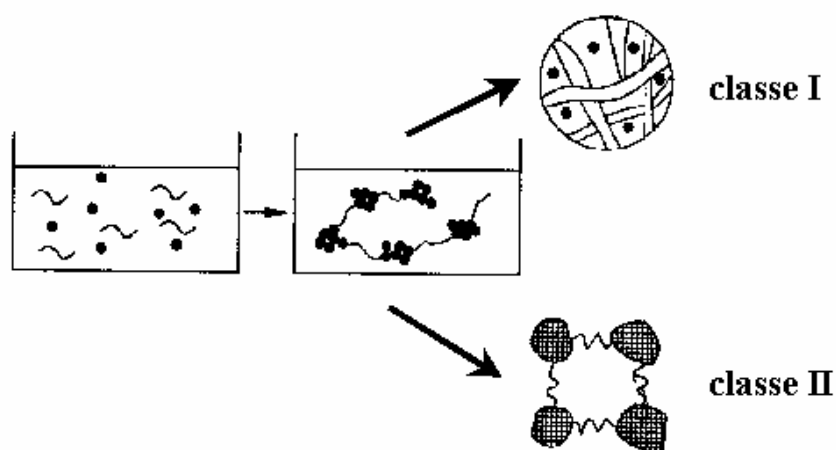
A metodologia sol-gel tem sido largamente utilizada no desenvolvimento desses materiais híbridos, especialmente na forma de guias de onda planares para o uso em circuitos ópticos integrados [ORIGNAC, *et al.* 2001; BENATSOU, *et al.*, 1997; STROHHÖFER, *et al.*, 1998; DUVERGER, *et al.*, 1999; ORIGNAC, *et al.*, 1999; SHIMIDT, 1994; SOREK, *et al.*, 1993; RIBEIRO, *et al.*, 2000]. Algumas das importantes razões para isso são: a possibilidade do controle do tamanho da partícula do material precursor; o controle relativamente simples do índice de refração e da densificação do material. Em geral, é possível produzir partículas com tamanho suficientemente pequeno para manter as perdas ópticas em níveis aceitáveis [STROHHÖFER, *et al.*, 1998; DUVERGER, *et al.*, 1999; ORIGNAC, *et al.*, 1999; SHIMIDT, 1994; SOREK, *et al.*, 1993; RIBEIRO, *et al.*, 2000; ALMEIDA, *et al.*, 1997]. Além disso, as propriedades de estado sólido das nanopartículas podem dar ao sistema

propriedades especiais de índice de refração, aumento da resistência mecânica e controle de parâmetros ópticos [STROHHÖFER, *et al.*, 1998; BARALDI, 2003; CHANG, 2002; SCHMIDT, 1997, CHEN, *et al.*, 1998; OUBAHA, *et al.* 2003].

As propriedades de interesse podem ser obtidas de acordo com a metodologia de preparação desses materiais, pois é conhecido que a estrutura micro e macroscópica é dependente das condições de hidrólise e condensação a que são submetidos os precursores, entre elas o pH, volume de água e solvente. Quando o pH é baixo, a hidrólise é mais lenta e o material tende a apresentar uma estrutura polimérica linear; com o aumento do pH, a hidrólise torna-se mais rápida, o que provoca a formação de partículas aglomeradas poliméricas (clusters) ligados entre si [BRINKER, 1990]

O controle do aspecto final do material torna-se um pouco mais complicado quando se trata de materiais híbridos, posto que existe um número maior de variáveis a serem estudadas. O importante é que se obtenha materiais com tamanho de partículas que não provoque espalhamento de luz expressivo, para que o material seja transparente, propriedade fundamental para aplicações em fotônica.

Os materiais híbridos têm sido mais estudados recentemente para este tipo de aplicação. Eles são classificados em dois tipos, segundo *Sanchez e Ribot* [SANCHEZ, *et al.*, 1994]: (i) classe I, onde os componentes orgânicos e inorgânicos estão apenas unidos fisicamente, não existe ligação química; uma parte pode conter a outra encapsulada, ou seja, interagem fracamente, através de ligações de hidrogênio, forças de *Van der Waals* ou eletrostáticas; e (ii) classe II, onde os constituintes estão mais fortemente ligados do que na classe I, através de ligações covalentes. A figura 1.1 é uma representação dos dois diferentes tipos de híbridos possíveis a partir de uma mistura de uma fase inorgânica (pontos) com uma fase orgânica (traços).



**Figura 1.1:** Representação da obtenção de híbridos de classe I e II a partir de uma fase orgânica (traços) e uma fase inorgânica (pontos).

A combinação adequada das condições de processamento com a escolha apropriada dos precursores orgânicos e inorgânicos permite o sinergismo das propriedades buscando sintonização fina

das dimensões dos domínios inorgânicos, da topologia e da morfologia dos materiais, tornando-se potenciais candidatos para aplicações em optoeletrônica, janelas inteligentes, armazenamento óptico de informação, dispositivos baseados em óptica não linear, revestimentos protetores, ou aplicações mecânicas e biológicas. Apesar das aplicações comerciais serem ainda escassas, existem alguns híbridos já comercialmente disponíveis e utilizados como precursores na produção de dispositivos.

Em materiais para fotônica é essencial o controle do índice de refração (além de transparência e homogeneidade), para a definição da propriedade de guiar a luz. Em materiais híbridos é possível o controle local do índice de refração, ou seja, pode-se conseguir um gradiente de índices em uma pequena porção do material. Lentes de Grin (do inglês "gradient index lenses") podem ser obtidas desse controle [OLIVEIRA, *et al.*, 1996].

Filmes finos ou depósitos em diferentes substratos preparados pela metodologia sol-gel têm sido utilizados como sensores ópticos, como hospedeiros para cristais líquidos, em tecnologia para uso com lasers, em aplicações para energia solar, em óptica não linear, como protetores ópticos (como anti-reflexão, filtros para raios ultravioleta e infravermelho), superfícies refletoras e materiais termocrômicos e fotocrômicos [VILLEGAS, 2001].

Depósitos obtidos por sol-gel para fins ópticos são preparados a temperatura ambiente. Porém a completa densificação, desejável para a otimização das propriedades ópticas, só é conseguida com tratamentos térmicos realizados a temperaturas moderadas. Os híbridos orgânicos-inorgânicos podem eventualmente ser densificados a temperatura ambiente, quer seja pela ação da luz em grupos fotopolimerizáveis, que seja pelo tratamento térmico a temperaturas menores que 200°C. Pode-se portanto incorporar outros grupos orgânicos como moléculas de corantes, moléculas fotoativas, etc, o que seria impossível no material obtidos por exemplo da hidrólise de um alcóxido como tetraetilortossilicato [VILLEGAS, 2001].

A presença de uma parte orgânica permite variar a composição, a micro ou nanoestrutura e conseqüentemente, as propriedades dos materiais híbridos. O esqueleto inorgânico pode ser modificado partindo-se de diferentes alcóxidos, com diferentes grupos funcionais, que influenciam propriedades ópticas, mecânicas e térmicas, ou com a presença de monômeros ou polímeros orgânicos, que respondem pela flexibilidade e processabilidade. A parte inorgânica pode constituir-se de partículas que são mais ou menos dispersáveis em determinado meio dependendo-se da parte orgânica a que se está associada [SCHOTTNER, 2001].

Dentre esses materiais híbridos com propriedades controláveis de acordo com a cadeia orgânica, destacam-se os compostos di-ureasis, que tem sido estudados nos últimos anos [ANDRÉ, 2001; BERMUDEZ *et al.*, 1999, 2001; CARLOS *et al.*, 2000a,b, 2001a,b, 2003, 2004; FERREIRA, *et al.*, 2001, 2003; GONÇALVES *et al.*, 2002; MOLINA *et al.*, 2003b, 2004; RIBEIRO *et al.*, 2000]. Os compostos di-ureasis são assim chamados por possuírem uma parte orgânica, um siloxano,

ligada a uma parte orgânica, um polióxido de etileno, via uma ponte de uréia. São portanto, híbridos de classe II.

Esses materiais são bastante versáteis e têm sido muito utilizados por vários motivos: (a) suas ligações Si-O e Si-C são estáveis, (b) os precursores utilizados são reativos, puros e homogêneos, (c) a sua estrutura final pode ser controlada através de parâmetros como quantidade de água e/ou álcool durante a hidrólise, temperatura, tipo de catalisador, tipo de solvente, (d) a presença do silício confere boa resistência mecânica, boa estabilidade térmica e caráter amorfo, (e) filmes e monolitos de várias espessuras podem ser preparados e (f) é possível acrescentar grupos orgânicos a baixas temperaturas de processamento [BERMUDEZ, 1999]. A variedade de grupos que podem ser acrescentados é imensa, pois aumenta a possibilidade de aplicações desses materiais, inclusive para fins ópticos.

Os di-ureasis podem ser preparados a partir de precursores como siloxanos modificados por um grupo propil isocianato e o polímero polióxido de etileno modificado por grupos amina. A reação entre os grupos amina (do polímero) e isocianato do siloxano é a responsável pela ligação entre a parte orgânica e a parte inorgânica dos di-ureasis. Em trabalhos publicados nos últimos anos estes materiais são denominados pela sigla U(Y) onde U refere-se a uréia e Y indica o peso molecular aproximado do polímero utilizado [ANDRÉ, 2002; CARLOS *et. al.*, 2001b; CORREIA, *et al.*, 2002].

### **1.1. Estado da arte, motivação e objetivos.**

O interesse nos híbridos orgânicos-inorgânicos está associado a síntese de materiais multifuncionais avançados, formados pela união de componentes orgânicos e inorgânicos num só material a uma escala nanométrica. O sinergismo que surge da união dos componentes individuais nos híbridos orgânicos-inorgânicos pode suprir perspectivas no estudo de materiais e novas tecnologias, unindo interesses como facilidades de preparação e processabilidade com propriedades facilmente controláveis.

O estudo de novos materiais tem sido reportado na literatura em relação a vários aspectos, como aplicações em fotônica de híbridos orgânicos-inorgânicos baseados em siloxanos e nanocompósitos, e sua estrutura e propriedades têm sido estudadas paralelamente a diversos sistemas híbridos [RIBEIRO *et. al.*, 2000; GONÇALVES *et. al.*, 2002; NAJAFI *et. al.*, 1998; ANDRÉ, 2002]. Muitos trabalhos têm sido publicados em relação a híbridos funcionalizados pelo grupo amina como os aminosis, obtidos a partir do 3-aminopropiltriétoxisilano ou APTES, [BEKIARI *et. al.*, 1998a; BEKIARI *et. al.*, 1998b] e também os di-ureasis [FERREIRA *et. al.*, 1999; CARLOS *et. al.*, 1999; CARLOS *et. al.*, 2001b; CARLOS, *et. al.*, 2000a,b] e di-uretanosis [CARLOS *et. al.*, 2004] obtidos a partir do 3-isocianatopropiltriétoxisilano ou ICP TES.

Em trabalhos anteriores [ANDRÉ, 2002], os híbridos orgânicos-inorgânicos do tipo di-ureasis e di-uretanosis foram caracterizados estrutural e morfológicamente, e ainda tiveram suas propriedades de luminescência estudadas. [CARLOS *et. al.*, 2004; CARLOS *et. al.*, 2000a; FERREIRA *et. al.*, 1999; FERREIRA *et. al.*, 2001]. Dentre esses materiais, caracterizados como emissores de luz branca, se destaca o interesse tanto na otimização das propriedades intrínsecas do material quanto o seu uso como matrizes para emissores contendo complexos de terras raras. Assim, os trabalhos avançaram no sentido de se determinar as propriedades de luminescência dessas matrizes híbridas modificadas ou não por complexos de íons lantanídeos, do estudo de propriedades mecânicas, do controle da cristalinidade e do limite de dopagem desses materiais com sais, complexos e óxidos de interesse [CORREIA *et. al.*, 2002; CORREIA *et. al.*, 2003]. Dentre os trabalhos voltados para o estudo das propriedades ópticas e espectroscópicas desses materiais, muitos foram publicados demonstrando a interação dessas matrizes com complexos do tipo  $\beta$ -dicetonatos, que atuam como antenas no processo de transferência de energia para íons como o európio, que são emissores de luz visível. Os mecanismos de transferência de energia que ocorrem entre a matriz e os íons  $\text{Eu}^{3+}$  têm origem em dois processos distintos: banda de transferência de carga e centros emissores da rede (grupos NH e domínios de silício). Foram publicados também trabalhos envolvendo lantanídeos emissores na região do infravermelho, como neodímio e érbio [CARLOS *et. al.*, 2000a; FERREIRA *et. al.*, 2003; CORREIA *et. al.*, 2003; ANDRÉ, 2002]. Visto que di-ureiasis são emissores de luz branca, o estudo espectroscópico visa atualmente obter num só material emissão sintonizável entre a região espectral do visível e do infravermelho [CARLOS *et. al.*, 2000a; FERREIRA *et. al.*, 2003].

Posteriormente, os trabalhos publicados em relação aos di-ureasis voltaram-se para o estudo estrutural utilizando-se técnicas como absorção, difração e espalhamento de raios X (EXAFS, DRX e SAXS respectivamente) e ainda espectroscopia vibracional na região do infravermelho e absorção na região do UV-Vis, bem como espectroscopia com íon európio visando o estudo estrutural do material [MOLINA, 2003a]. Foi demonstrado que esses híbridos dopados com pequenas quantidades de íons európio possuem estrutura fractal contendo pequenas partículas de síloxano, e que para dopagens maiores, a estrutura se modifica, podendo-se observar a formação de agregados apresentando correlação espacial entre si.

Em relação às aplicações voltadas para a fotônica, algumas publicações relataram que é possível a obtenção de guias de onda planares e guias em forma de canais de boa qualidade, quando são adicionados em quantidades variadas materiais fotossensíveis como o  $\gamma$ -metacriloxipropiltrimetoxissilano ou MPTMS [MOLINA, 2003a; MOLINA *et. al.*, 2005].

Assim, do conjunto de resultados obtidos desses e de outros trabalhos com materiais híbridos, foi demonstrada a necessidade do conhecimento mais detalhado da estrutura dos di-ureasis, para possibilitar o controle de suas propriedades e para conhecer a sua compatibilidade com aplicações de

alta tecnologia unindo-se com materiais promissores que têm sido estudados recentemente [NAJAFI *et. al.*, 1998]. Além disso, tornou-se necessário o conhecimento do potencial de aplicação desses materiais em fotônica e em matrizes para lasers, dopados ou não com íons lantanídeos e ainda com outros materiais, como corantes.

O objetivo deste trabalho consiste em estudar sistematicamente os materiais propostos [MOLINA, 2003a] em que consistem basicamente do híbrido ureasil e do alcóxido de zircônio modificado por ácido metacrílico. A adição da fase rica em zircônio possibilita o controle das propriedades locais do material, e o ácido metacrílico confere propriedades fotossensíveis que possibilita aplicações na confecção de guias de onda planares e redes de difração pela ação da luz. A adição de corantes orgânicos ou complexos de íons lantanídeos permite estender o campo de aplicações para luminóforos mais eficientes e materiais para lasers DFB.

## CAPÍTULO 2.

### CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL.

A caracterização das interações químicas existentes em materiais híbridos, o grau de cristalinidade e a correlação entre as diferentes fases é de fundamental importância no controle de suas propriedades físico-químicas. Neste capítulo a estrutura local dos híbridos di-ureasil-zircônio será abordada utilizando-se técnicas de difração de raios X [KICKELBICK *et. al.*, 1999; CORREIA *et. al.*, 2002; SCHUBERT *et. al.*, 2002; CARLOS *et. al.*, 2003; CORREIA *et. al.*, 2003; GONÇALVES *et. al.*, 2004; MOLINA *et. al.*, 2005; SILVA, 2002], espalhamento de raios X a baixos ângulos (SAXS) [DAHMOUCHE, *et. al.*, 2002; DAHMOUCHE *et. al.*, 2001; KAMMLER *et. al.*, 2005; BEAUCAGE, *et. al.*, 1995; ANDRÉ, 2002; SILVA, 2002], espectroscopia na região do infravermelho [CORREIA *et. al.*, 2002; CIN *et. al.*, 2002; BERMUDEZ *et. al.*, 1999; SILVERSTEIN, 2000; BERMUDEZ *et. al.*, 2001; MOLINA, 2003a; MOLINA *et. al.*, 2003b; TADANAGA *et. al.*, 2000] e ressonância magnética nuclear de estado sólido [OUBAHA *et. al.*, 2003; CARLOS *et. al.*, 2000b]. As medidas de difração de raios X foram realizadas utilizando-se um equipamento Siemens D-5000 no IQ-Unesp. As medidas de espalhamento de raios X a baixos ângulos foram realizadas no Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS) em Campinas-SP. Foram utilizados um monocromador de Si (111) e comprimento de onda  $\lambda=1,608\text{Å}$ . Um detector sensível a raios X e um analisador multicanal foram usados para registrar a intensidade SAXS. As medidas de absorção na região do infravermelho foram realizadas no espectrômetro de Transformada de Fourier FT - IR Perkin Elmer Spectrometer Spectrum 2000 no IQ-Unesp. Os espectros foram coletados na faixa de  $4000\text{-}400\text{ cm}^{-1}$  com resolução de  $4\text{ cm}^{-1}$  e 50 scans. As amostras (~2 mg) foram dispersas em aproximadamente 400 mg brometo de potássio Merck e preparadas as pastilhas. A linha de base foi obtida para todos os casos onde a absorção não foi significativamente detectada. Antes de se obter os espectros, as pastilhas foram deixadas em dessecador a vácuo contendo sílica gel como secante por uma noite. As medidas de ressonância magnética nuclear foram realizadas no equipamento Varian 300MHz (7,4T) – Unity Inova, sonda de 7mm CPMAS, com rotor de Zr e referência de TMOS.

## 2.1. Preparação das amostras.

### Preparação do híbrido U600.

A síntese do híbrido U600 foi realizada conforme descrito na literatura. Em um balão de fundo redondo foram adicionados 19,0mL (0,033 mols) de o,o-bis(2-aminopropil)polietilenoglicol 500 (jeffamine) dissolvidos em 40mL de tetrahidrofurano, e 17,5mL (0,066mols) de 3-isocianatopropiltrióxissilano 95% (*isotreos*) vagarosamente sobre a mistura inicial. Após refluxo a 80°C por 24H o solvente foi extraído e o di-ureasil obtido (U600) foi armazenado. A figura 2.1.1 a seguir esquematiza a síntese:

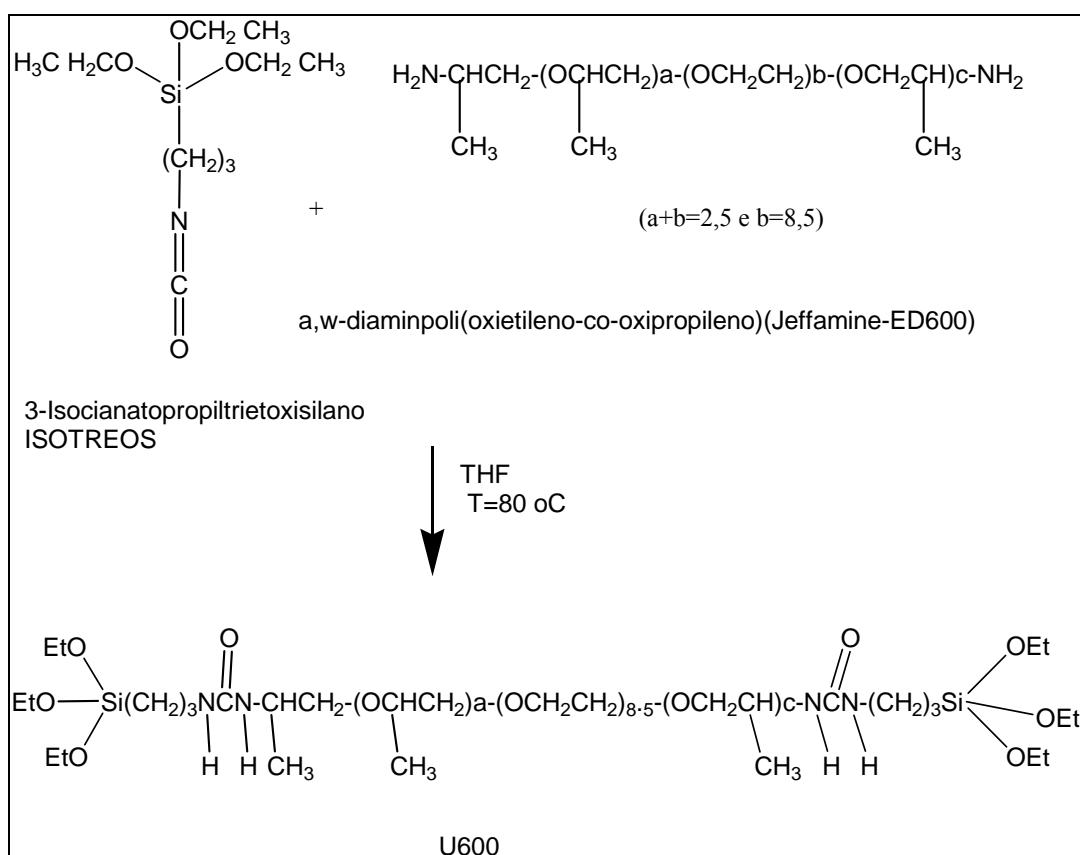


Figura 2.1.1: Síntese do híbrido U600.

As figuras 2.1.2 e 2.1.3 representam as reações de hidrólise e condensação deste precursor híbrido que levam ao ureasil que foi então misturado ao precursor de zircônio.

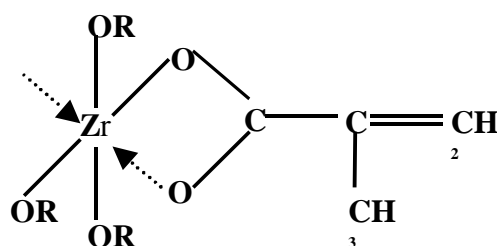
A modificação do alcóxido de zircônio com ácido metacrílico é proposta na literatura para o sistema fotossensível que vem sendo mais utilizado na última década [SCHMIDT, *et. al.*, 1991]. A suspensão de nanopartículas é adicionada ao siloxano modificado por grupos acrilato (metacrilopropiltrióxissilano - MPTS). Esta composição é então utilizada para a preparação de filmes e posterior densificação pela ação da luz sobre os grupamentos acrilato presentes. A densificação pela





## Preparação dos híbridos U600-ZrAMA.

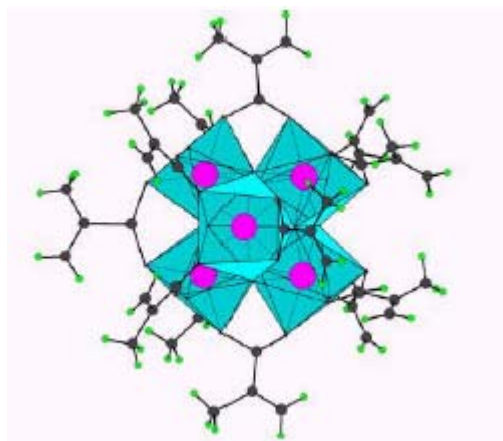
A figura 2.1.4 ilustra o complexo formado pelo interação do ácido metacrílico (AMA) com o alcóxido de zircônio. Na literatura este sistema tem sido estudado sistematicamente e variando-se as condições experimentais pelo menos três espécies poliméricas diferentes tem sido caracterizadas. [KICKELBICK, *et al.*, 1999; TRIMMEL, *et al.*, 2000; SCHUBERT, 2004].



**Figura 2.1.4:** Estrutura do complexo formado entre o alcóxido de zircônio e o ácido metacrílico.

O tamanho e a forma dos clusters pode ser influenciado até certo ponto pelas condições reacionais. O parâmetro mais importante é a relação molar alcóxido/ácido carboxílico. Para uma determinada proporção, o mesmo cluster é obtido com alta reprodutibilidade [SCHUBERT, 2004].

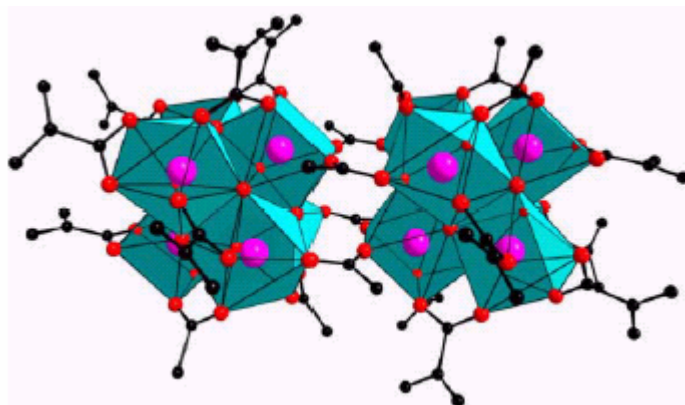
A figura 2.1.5 mostra o cluster  $[Zr_6(OH)_4(OAc)_{12}]_2$  (Mc = grupo metacrilato) obtido quando são utilizadas baixas concentrações de ácido metacrílico (1 a 4 vezes em excesso em relação à concentração de Zr). Aos raios X, a estrutura cristalina do cluster formado é ortorrômbica [KICKELBICK *et al.*, 1999]



**Figura 2.1.5:** Representação do cluster  $Zr_6O_4(OH)_4(OMc)_{12}$ , onde os átomos de zircônio estão destacados em rosa. [extraído de SCHUBERT, 2004]

O cluster representado nesta figura ( $Zr_6O_4(OH)_4(OMc)_{12}$ ) pode ser obtido com reprodutibilidade quando se utiliza tetrabutoxido de zircônio como reagente de partida. A estrutura espacial do zircônio é octaédrica [SCHUBERT, 2004]. Ao redor dos átomos de zircônio têm-se os octaedros formados pelo alcóxido, e as estruturas em preto e verde são os metacrilatos ligados.

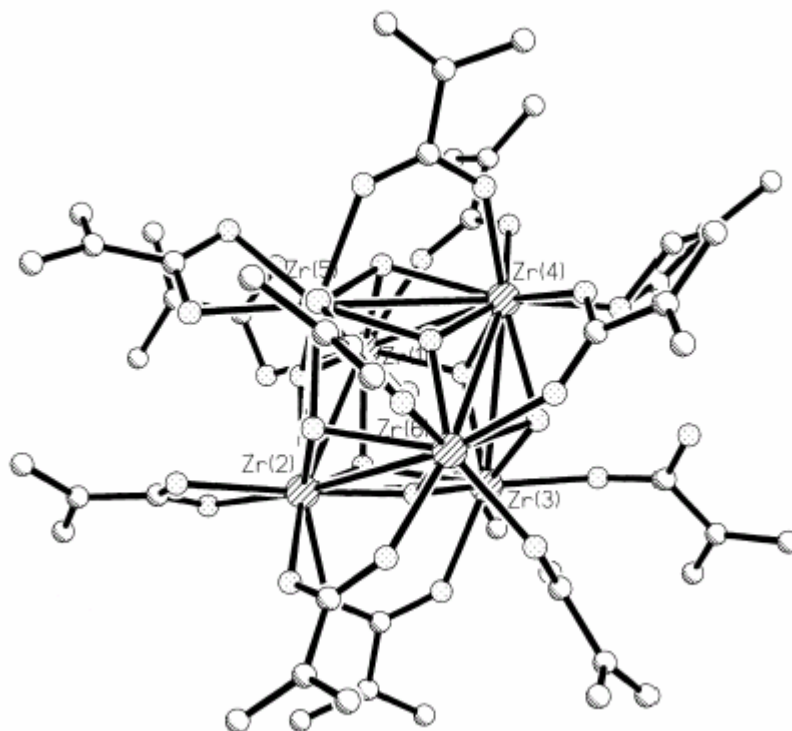
A figura 2.1.6 mostra o cluster  $[\text{Zr}_6\text{O}_4(\text{OH})_4(\text{OMc})_7(\text{OAc})_5]_2$ , obtida a partir da mesma relação molar de  $\text{Zr}:\text{AMA} = 1:4$ , substituindo-se o ácido metacrílico por outro ácido carboxílico.



**Figura 2.1.6:** Representação do cluster  $[\text{Zr}_6\text{O}_4(\text{OH})_4(\text{OMc})_7(\text{OAc})_5]_2$ , com estrutura semelhante ao da figura anterior. [extraído de SCHUBERT, 2004]

Quando o ácido metacrílico é substituído por ácido acrílico, ácido propiônico ou ácido vinilacético sob as mesmas condições experimentais, são obtidos clusters diméricos como mostra essa figura. As estruturas dos clusters diméricos consistem dos mesmos clusters centrais  $\text{Zr}_6\text{O}_4(\text{OH})_4$  monoméricos. No entanto, os ligantes carboxilatos alteram suas ligações mudando o modo de coordenação e construindo duas unidades do cluster para formar o dímero [SCHUBERT, 2004]. Aumentando-se aos poucos a concentração de ácido metacrílico há a formação de outro tipo de estrutura. Porém, em concentrações intermediárias, também pode ser observada esta estrutura dimérica, quando a concentração de ácido metacrílico é de aproximadamente 6,5 vezes a de zircônio [KICKELBICK *et. al.*, 1999].

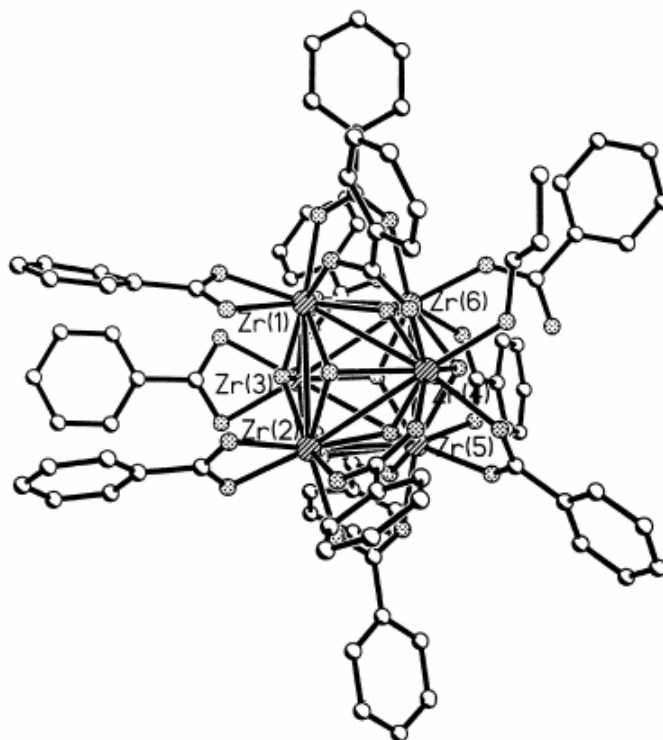
O segundo tipo de estrutura pode ser obtido quando se utiliza aproximadamente 9 vezes o excesso de ácido metacrílico. A figura 2.1.7 mostra o aspecto do cluster.



**Figura 2.1.7:** Estrutura do cluster  $Zr_6(OH)_4O(OMc)_{12}(PrOH)_3McOH$ ; as ligações de hidrogênio dos ácidos metacrílicos foram omitidos para maior clareza. [extraído de KICKELBICK *et. al.*, 1999]

A estrutura observada é  $Zr_6(OH)_4O(OMc)_{12}(PrOH)_3McOH$  (Mc = metacrilato, Pr = propanol do alcóxido de partida, tetrapropóxido de zircônio). Enquanto a molécula de propanol permanece ligada ao núcleo do cluster, as moléculas de ácido metacrílico são unidas por ligações de hidrogênio à sua periferia. A diferença entre a estrutura mostrada na figura anterior e da mostrada nesta figura é que uma ligação do grupo metacrilado da primeira é convertida em um ligante monodentado e o aumento das distâncias Zr-O mostra que não há mais grupos propóxidos e sim moléculas de propanol coordenadas [KICKELBICK *et. al.*, 1999].

A terceira estrutura pode ser obtida quando se adiciona um excesso de 20 vezes o ácido benzóico. A figura 2.1.8 mostra o aspecto do cluster obtido.



**Figura 2.1.8:** Estrutura do cluster  $Zr_6(OH)_4O_4(OBz)_{12}(PrOH)_4BzOH$ . As ligações de hidrogênio do ácido benzóico foram omitidas para maior clareza. [extraído de KICKELBICK *et. al.*, 1999]

A estrutura e a composição do cluster foi determinada por difração de raios X [KICKELBICK *et. al.*, 1999]. A diferença entre esta estrutura e a segunda mostrada é que aqui existe um ácido extra ligado na região periférica do cluster.

Todas essas estruturas são consideradas formadoras de  $ZrO_2$ , e estão estabilizadas por átomos de hidrogênio ou por ligantes carboxilados [KICKELBICK *et. al.*, 1999].

Para o complexo Zr:AMA 1:1 o tamanho da região rica em zircônio no complexo é de aproximadamente 1 nm [SCHUBERT, 2001]. Os clusters formados pelos complexos também são abordados nas análises estruturais apresentadas.

Os filmes foram preparados variando-se a relação molar Zr:Si. A hidrólise dos compostos U600 e tetrapropóxido de zircônio foi realizada separadamente. As quantidades de água utilizadas foram as mínimas necessárias para o prosseguimento da reação: relações molares de Si:H<sub>2</sub>O=4,0:0,5 e Zr:H<sub>2</sub>O=4,0:0,5, adicionadas sob a forma de solução de HCl 0,1mol/L. O solvente utilizado foi o butanol, pois amostras com grandes quantidades de zircônio não podiam ser obtidas utilizando-se etanol. A identificação das amostras foi realizada considerando-se a quantidade de zircônio em relação ao total de Zr+Si, ou seja, Z25 contém 25% de Zr em relação ao total Zr+Si=100, e portanto Z25 corresponde a Zr:Si = 25:75.

Para o estudo estrutural por espectroscopia, os sóis foram dopados com o íon európio (1,7% Eu/ (Zr+Si)) a partir de solução de cloreto de európio ou do complexo [Eu(TTA)<sub>3</sub>(H<sub>2</sub>O)<sub>2</sub>]; foram dopados ainda com rodamina 6G na concentração de 1mg de rodamina por 1g de U600+TPZ, ou seja,

aproximadamente  $10^{-4}$  mol/L. Dos sóis preparados foram obtidos géis e filmes a partir da secagem a  $80^{\circ}\text{C}$  por aproximadamente 15H.

Foram obtidos filmes multicamadas a partir dos sóis recém-preparados para todas as composições variando-se número de camadas e tratamento térmico. Os depósitos foram realizados pela técnica de *dip-coating* com velocidade de 100cm/min; o tratamento térmico foi realizado entre cada depósito à temperatura de  $80^{\circ}\text{C}$  durante 15 a 20 minutos. O número de camadas obtidas foi otimizado para que houvesse ao menos um modo guiado no infravermelho. Os substratos utilizados foram de borossilicato, lavados com solução de extran, água destilada e propanol. Foram determinadas as características ópticas dos filmes e características espectroscópicas dos filmes dopados com európio ou rodamina, através de espectros de excitação e emissão. Os espectros foram obtidos à temperatura ambiente.

## 2.2. Espalhamento de raios X a baixos ângulos (SAXS).

A técnica de espalhamento de raios X a baixos ângulos (SAXS, das iniciais das palavras em inglês Small-Angle X-ray Scattering) é uma técnica útil para o estudo de estruturas de nanohíbridos devido à natureza desordenada desses materiais e o contraste de densidade eletrônica entre a matriz orgânica e a parte inorgânica [DAHMOUCHE, *et. al.*, 2002]. O espalhamento a baixos ângulos ocorre em materiais onde há esse contraste. As partículas podem se comportar como uma solução diluída, caso estejam suficientemente separadas, ou apresentar algum tipo de correlação espacial. Essa técnica pode dar informações estruturais para partículas limitadas a certos tamanhos, aproximadamente entre  $10\text{\AA}$  e  $1000\text{\AA}$  pois quanto maior o tamanho da partícula, menor o ângulo de espalhamento, e assim a medida fica limitada pelo ângulo.

A amplitude de uma onda espalhada elasticamente por um átomo é proporcional a  $e^{iqr}$  onde o vetor de espalhamento  $q$  é  $q=k-k_0$  sendo  $k$  o vetor de onda espalhado e  $k_0$  o vetor de onda incidente e  $r$  é a distância do átomo. Considerando que o ângulo de espalhamento é  $2\theta$  e o comprimento de onda é  $\lambda=2\pi/k$  então tem-se:

$$q = \frac{4\pi}{\lambda} \sin \frac{\theta}{2} \quad (\text{eq. I})$$

A curva obtida da análise de SAXS é dada pela intensidade de espalhamento  $I(q)$  em função do vetor de espalhamento  $q$ . Como será visto a seguir, para sistemas que apresentam correlação espacial entre as partículas como é o caso dos híbridos estudados, a curva  $I(q)$  apresenta um pico devido às interferências das ondas espalhadas, e a distância média entre as partículas,  $d$ , pode ser obtida a partir do máximo do pico,  $q_{\text{máx}}$ :

$$d=2\pi/q_{\text{máx}} \quad (\text{eq. II})$$

Para a análise dos dados o sistema pode ser aproximado a um modelo de uma matriz homogênea com baixa concentração (sistema diluído) de partículas coloidais esféricas de distribuição espacial aleatória. As partículas devem ser idênticas, com centro de simetria, e densidade eletrônica  $\rho_p$ , diluídas em uma matriz de densidade eletrônica  $\rho_m$ . Assim, quando os valores de  $q$  tendem a zero, a intensidade espalhada depende apenas do tamanho das partículas, e a intensidade de espalhamento pode ser dada pela lei de Guinier:

$$I(q)=G \exp(q^2 Rg^2/3) \quad (\text{eq. III})$$

No caso de partículas esféricas,  $Rg=(3/5)^{1/2}R$ , sendo  $R$  o raio da partícula [DAHMOUCHE *et al.*, 2001]. O parâmetro  $G$  é dado por  $G=N(\rho_p-\rho_m)^2V^2$ , sendo  $N$  o número de partículas,  $V$  o volume de partículas e  $\rho_p$  e  $\rho_m$  as densidades eletrônicas da partícula e da matriz. Essa lei pode ser aplicada para baixos valores de  $q$ , pois a altos  $q$  a curva tem um comportamento oscilatório devido ao fato que as partículas na realidade não são esféricas.

Para altos valores de  $q$ , aplica-se a lei de Porod:

$$I(q)=B/q^4 \quad (\text{eq. IV})$$

onde  $B=2\pi r^2 \epsilon N(\rho_p-\rho_m)^2 S$  [KAMMLER *et al.*, 2005]. O termo  $S$  é a área da interface entre as duas fases por unidade de volume;  $\rho_p$  e  $\rho_m$  são as densidades eletrônicas da partícula e da matriz, respectivamente.

Beaucage e colaboradores [BEAUCAGE, *et al.*, 1995] desenvolveram uma equação geral que pode ser facilmente aplicada para sistemas híbridos. Seu modelo considera partículas aproximadamente esféricas com tamanhos próximos, que exibem comportamentos de acordo com as leis de Guinier e Porod ao mesmo tempo. A equação consiste de dois componentes:

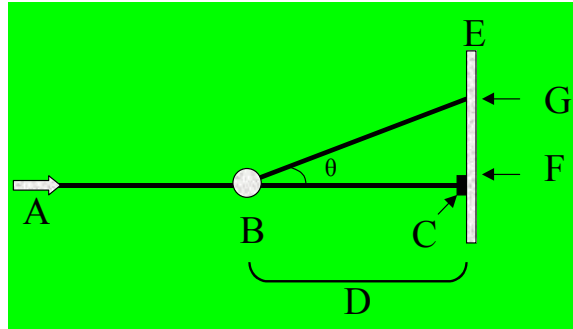
$$I(q) = \left\{ G.e^{-R^2 \frac{q^2}{3}} + B. \left[ \frac{\left( \text{erf}\left( q. \frac{Rg}{\sqrt{6}} \right) \right)^3}{q} \right]^P \right\} \left\{ \frac{1}{1 + K \frac{3. \{ \text{sen}(q.d) \} - \{ (q.d).(\cos(q.d)) \}}{(q.d)^3}} \right\} \quad (\text{eq.V})$$

O primeiro termo é um decaimento de forma gaussiana da intensidade de espalhamento a baixos valores de  $q$ . Este termo depende do raio de giro da partícula ( $Rg$ ) e é constituído do fator de forma de Guinier ( $G$ ) e do termo de Porod ( $P$ ). O segundo termo consiste de um fator que considera a estrutura do material, de onde se pode obter o fator de compacidade, denominado  $K$  ( $K_{\text{máx}}=5,9$  - para estruturas esféricas altamente compactas).

A partir desta equação são obtidos o raio de giro da partícula ( $Rg$ ), que é maior que o raio da partícula, e distância entre as partículas espalhadoras ( $d$ ), que pode ser obtida ainda através de difratogramas de raios X calculando-se a partir do primeiro pico de difração pela relação de Bragg,  $d=(2\text{sen}\theta)/\lambda$ .

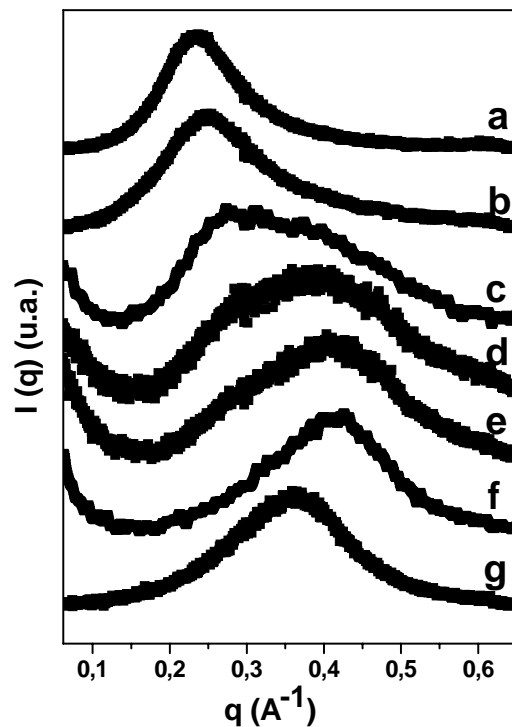
Esse modelo teórico fornece uma curva que pode ser ajustada aos dados experimentais obtidos. Quando mais próximo o ajuste, mais próxima é a estrutura real do modelo teórico. Se o ajuste não é adequado, outros modelos podem ser utilizados para que se descubra a real estrutura do material híbrido estudado.

As medidas de espalhamento de raios X a baixos ângulos foram realizadas no Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS) em Campinas – SP, conforme a figura 2.2.1:



**Figura 2.2.1:** Arranjo experimental utilizado na coleta de dados de SAXS no LNLS: (A) Fonte de luz, (B) amostra, (C) anteparo, (D) distância entre amostra e detector; (E) detector, (F) ponto de detecção do ângulo mínimo e (G) ponto de detecção do ângulo máximo.

A figura 2.2.2 mostra as curvas obtidas de SAXS (normalizadas) para os híbridos:



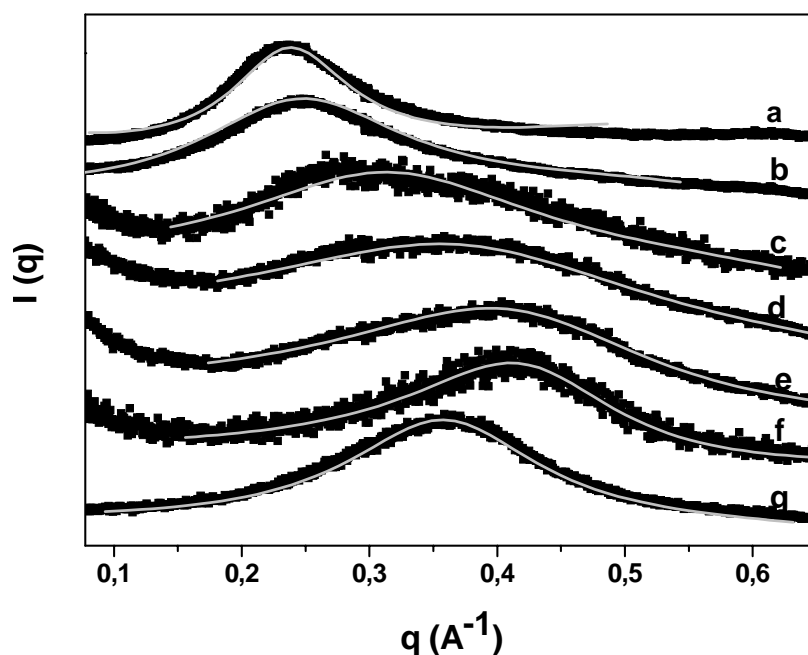
**Figura 2.2.2:** Curvas de SAXS das amostras (a)U600, (b) Z15, (c) Z40, (d) Z50 (e) Z60, (f) Z75 e (g)Z85.

Como já conhecido na literatura a curva obtida para o híbrido puro apresenta um pico de interferência associado à existência de correlação espacial entre nanodomínios de Si localizados nas



extremidades das cadeias. A introdução de uma pequena quantidade de Zr-AMA (Z15) leva a um deslocamento do pico para maiores valores de  $q$ . Para as amostras Z40, Z50 e Z60 aparece uma segunda componente no pico de correlação para valores de  $q$  de aproximadamente  $0,4\text{\AA}^{-1}$ . O alargamento do pico de correlação indica maior dispersão na distância entre as partículas. Observa-se também a contribuição importante do espalhamento para baixos valores de  $q$  indicando a existência de heterogeneidades maiores, que também espalham raios X. O pico torna-se mais fino com o aumento da quantidade de zircônio inserido na matriz a partir da amostra Z75 (curva f). Isso indica que altos teores de zircônio contribuem para a organização do sistema. Para a amostra Z85 observa-se o deslocamento do pico de correlação para menores valores de  $q$ .

A amostra preparada sem o híbrido U600 (Zr puro) também apresentou um pico de correlação. O contraste observado provavelmente foi devido aos átomos de zircônio em relação à estrutura orgânica referente ao ácido metacrílico coordenado, utilizado na preparação de todas as amostras. As distâncias entre as partículas ( $d=2\pi/q_{\text{máx}}$ ), o raio de giro ( $R_g$ ) e o fator de compacidade ( $k$ ) foram obtidos das análises das curvas de SAXS. A figura 2.2.3 mostra o ajuste obtido utilizando-se a equação de Beaucage [BEAUCAGE, *et. al.*, 1995].



**Figura 2.2.3:** Ajustes realizados nas curvas experimentais de SAXS utilizando-se o modelo de Beaucage: (a) U600, (b) Z15, (c) Z40, (d) Z50, (e) Z60, (f) Z75, (g) Z85.

São apresentados na tabela 2.2.1 os valores das distâncias entre as partículas ( $d$ ), do raio de giro ( $R_g$ ) e do fator de compacidade ( $k$ ), obtidos a partir do ajuste realizado na figura 2.2.2:

**Tabela 2.2.1:** Parâmetros obtidos a partir das curvas apresentadas,  $k$  utilizando-se o modelo de Beaucage [BEAUCAGE *et. al.*, 1995].

Amostra	Rg (Å)	k	d (Å)
U600	4,1	5,2	26,6
Z15	3,9	2,7	25,3
Z40	1,9	2,1	22,9
Z50	2,4	1,7	16,2
Z60	3,8	3,3	15,3
Z75	5,1	5,2	14,8
Z85	3,1	5,3	17,2

As distâncias obtidas para os domínios siliciosos calculadas a partir do pico de SAXS mostram um valor de 26,6Å para o híbrido U600 puro. Para os híbridos contendo zircônio a distância varia entre 14,8 e 25,3Å. Esses resultados estão de acordo com a literatura, onde foram obtidos valores aproximados para híbridos ureasis de cadeias de tamanhos variados: 27,1Å para o U600, 29,1Å para o U900 e 40Å para o U2000 [ANDRÉ, 2002].

Considerando-se a curva obtida para a amostra com 15% de Zr (curva b), o pico de correlação diminui de intensidade, podendo indicar uma dispersão das espécies de zircônio na região polimérica orgânica. Pelo alargamento do pico em relação ao híbrido puro, pode-se sugerir que o Zr afeta a conformação das cadeias poliméricas, e portanto a distância entre os centros de Si varia mais quando o teor de zircônio é baixo.

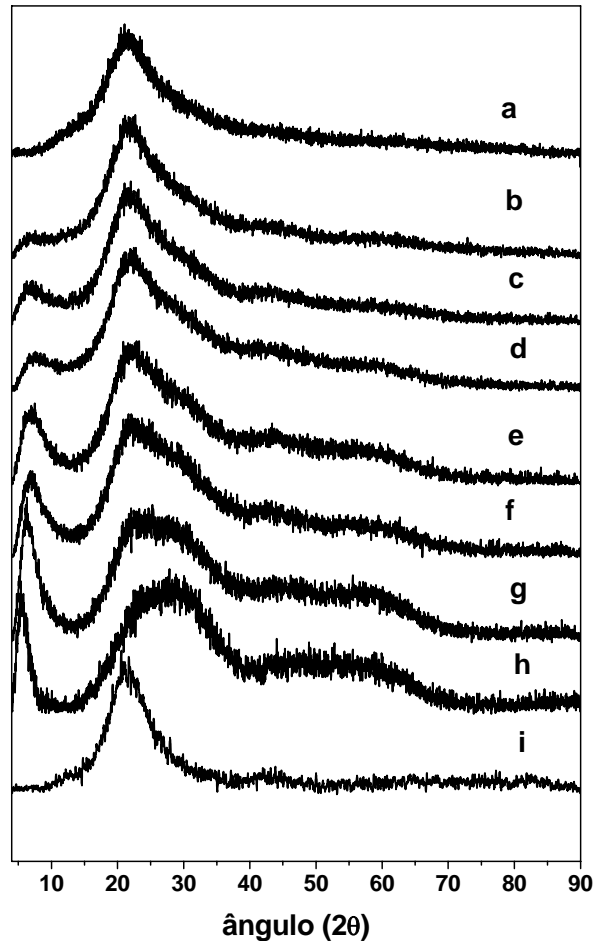
Nas amostras com 40 a 60% de Zr (curvas c, d, e), o aumento do valor de  $q$  máximo indica que a distância entre heterogeneidades diminui, o que pode ser explicado pela atuação do Zr na parte polimérica, onde há formação de agregados mais compactos, diminuindo a distância entre as partículas, podendo ainda haver formação de  $ZrO_2$ . Nas amostras com 75 e 85% de Zr (curvas f, g) a largura do pico diminui novamente, e as distâncias menores entre heterogeneidades indicam que o contraste responsável pelo espalhamento agora é entre o Zr e o resto do material.

O aumento do raio de giro não acompanha o aumento do teor de zircônio. Isso indica que o zircônio adicionado coordena-se preferencialmente ao redor das partículas de siloxanos, contribuindo efetivamente para o aumento do tamanho das partículas dos domínios siliciosos, mas que também pode se coordenar em outros locais; essa dispersão no tamanho do Rg também pode indicar a formação de precipitados de  $ZrO_2$ , que influenciam no contraste do material e nos resultados dos tamanhos de partículas.

As distâncias entre as heterogeneidades diminuem com o aumento do teor de zircônio. Se houvesse deposição de zircônio apenas ao redor dos domínios siliciosos, ocorreria apenas aumento do raio de giro, sem alteração das distâncias. A variação da distância pode ser um indício de que há também ligação do zircônio na fase polimérica, pois esses depósitos poderiam induzir um maior envelhecimento do polímero causando então a diminuição das distâncias entre os domínios siliciosos.

### 2.3. Difração de raios X.

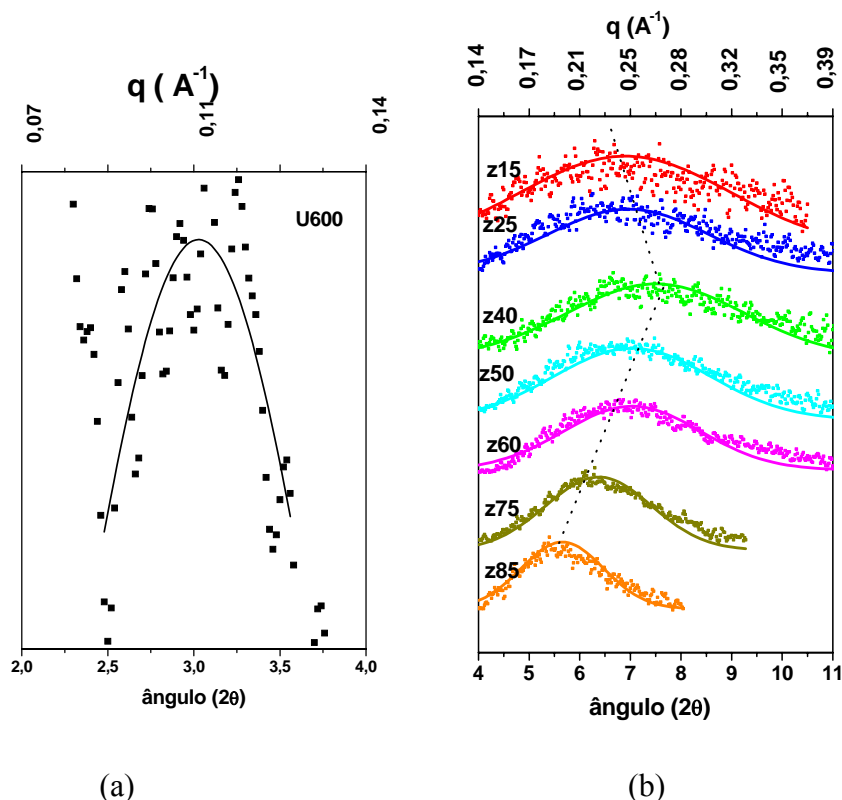
As medidas de difração de raios X foram realizadas utilizando-se um equipamento Siemens D-5000 em com radiação  $K_{\alpha}$  de Cu ( $\lambda=1.54\text{\AA}$ ), com coleta de dados a cada  $0,02^{\circ}$  durante 3s no intervalo de 2 a  $90^{\circ}$ . As amostras foram analisadas na forma de pó e foram submetidas a tratamento térmico de  $70^{\circ}\text{C}$  por 6H antes das análises. A figura 2.3.1 mostra os difratogramas para o híbrido puro e para diferentes concentrações de zircônio.



**Figura 2.3.1:** Difratograma de raios X dos compostos U600 puro e contendo diferentes concentrações de zircônio: (a) U600, (b) Z15, (c) Z25, (d) Z40, (e) Z50, (f) Z60, (g) Z75, (h) Z85 e (i) Zr puro.

Como pode ser observado, o difratograma do híbrido U600 caracteriza-se por uma banda larga na região de  $2\theta=21^{\circ}$  aproximadamente. Na região de baixos ângulos ( $2\theta < 10^{\circ}$ ) existe um pico de baixa intensidade quase não pode ser detectado na amostra do híbrido U600 puro, mas observa-se a dependência da posição e intensidade deste pico de correlação com a adição do sol de zircônio. Esse pico corresponde ao pico de correlação entre os domínios de siloxano, já observado nas medidas de SAXS. Até 40% de zircônio há um deslocamento para ângulos maiores. Acima desta concentração a intensidade relativa deste pico aumenta e ele é deslocado para ângulos menores.

A figura 2.3.2 mostra o ajuste gaussiano aos difratogramas obtidos, na região de baixos ângulos:



**Figura 2.3.2:** Ajuste gaussiano aos picos a baixos ângulos das curvas dos compostos obtidos; (a) híbrido U600 puro e (b) Z15 a Z85.

Os ajustes mostrados foram realizados em função do vetor de espalhamento  $q=(4\pi/\lambda).\text{sen}\theta$ , onde  $\theta$  é ângulo de espalhamento e  $\lambda$  é comprimento de onda da radiação utilizada. O aumento de intensidade do pico de correlação em  $2\theta < 10^\circ$  sugere o aumento do contraste de densidades eletrônicas entre as espécies responsáveis pelo espalhamento e o restante da matriz. No híbrido puro essas espécies têm sido identificadas como domínios siliciosos resultantes das reações de hidrólise e condensação. O aumento do contraste de densidades eletrônicas pode ser explicado considerando que as espécies ricas em zircônio interagem diretamente com os domínios siliciosos contribuindo para o aumento da densidade eletrônica nessa região. Considerando-se a parte orgânica da estrutura do híbrido U600 existem dois sítios de coordenação possíveis para as interações com as espécies de zircônio sem se considerar a possível heterocondensação Zr-O-Si. Um deles é a região do grupo uréia (-NH-C=O-NH-) localizado próximo aos nanodomínios de silício, no início e no fim da cadeia. A outra região é a dos grupamentos poliéter, na região da cadeia mais distante dos centros de silício. De fato como será visto a seguir a análise dos espectros de absorção no infravermelho sugere a interação das espécies de zircônio com os grupos uréia da matriz híbrida.

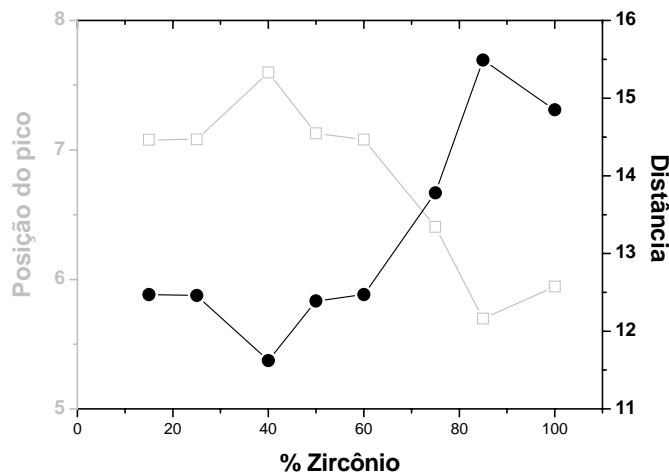
Da mesma forma que nas curvas de espalhamento de raios x a distância entre as unidades estruturais pode ser obtida aplicando-se a lei de Bragg:

$$d_s = \frac{\lambda}{2\text{sen}\theta} \quad (\text{eq. VI})$$

onde  $d_s$  é a distância no espaço real,  $\lambda$  é o comprimento de onda da radiação utilizada (1,54Å) e  $\theta$  é o ângulo de difração. Os resultados estão apresentados na tabela 2.3.1 e na figura 2.3.3.

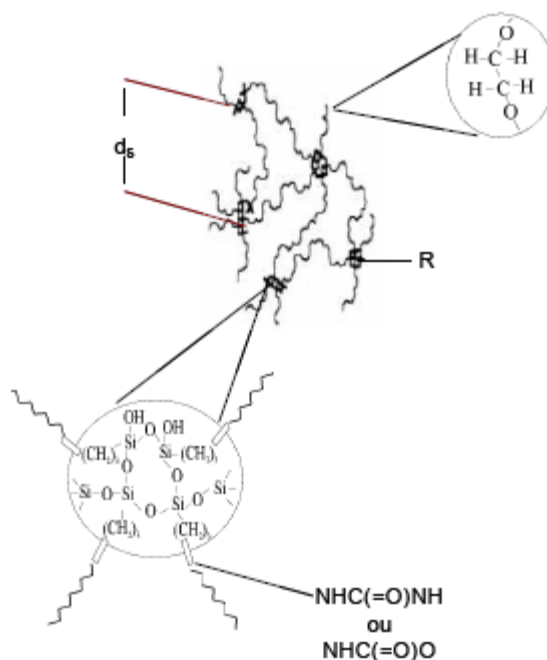
**Tabela 2.3.1:** Posição do primeiro pico de difração das amostras e distância das unidades estruturais obtidas a partir do pico em baixos ângulos.

Amostra	Relação molar Zr:Si	Posição do pico ( $2\theta$ )	Distância (Å) $d_s = \lambda / (2\text{sen}\theta)$
<i>U600 puro</i>	<i>0:100</i>	<i>3,028</i>	<i>29,1</i>
Z15	15:85	7,079	12,5
Z25	25:75	7,082	12,5
Z40	40:60	7,597	11,6
Z50	50:50	7,128	12,4
Z60	60:40	7,080	12,5
Z75	75:25	6,405	13,8
Z85	85:15	5,697	15,5
<i>Zr puro</i>	<i>100:0</i>	<i>5,945</i>	<i>14,9</i>



**Figura 2.3.3:** Posição do pico a baixos ângulos e distância entre heterogeneidades em função da concentração de zircônio nas amostras.

O valor obtido para o híbrido U600 (29,1 Å) concorda com o obtido por SAXS e com valores anteriormente descritos na literatura, correspondendo às distâncias entre nanodomínios de silício separados pelas cadeias poliméricas. A figura 2.3.4 extraída de [ANDRÉ, 2002] mostra de maneira esquemática a estrutura proposta para os diureiasis.



**Figura 2.3.4:** Esquema da morfologia dos di-ureais; *R* indica o raio dos domínios siliciosos nanométricos (que pode ser estimado por medidas de SAXS) e  $d_s$  a distância média entre estes domínios [ANDRÉ, 2002].

Os centros espalhadores de raios X considerados são os nanodomínios de Si em destaque na figura; esses centros são os responsáveis pelo espalhamento de raios X a baixos ângulos, e pelo mesmo pico que aparece na difração de raios X em aproximadamente  $2\theta=3^\circ$ . Os nanodomínios ricos em Si apresentam uma certa ordem que dá origem ao pico largo de difração observado em ângulos maiores ( $2\theta\sim 21^\circ$ ). A ordem de grandeza dessas estruturas pode ser comparada a planos cristalinos de silício dentro de uma nanopartícula.

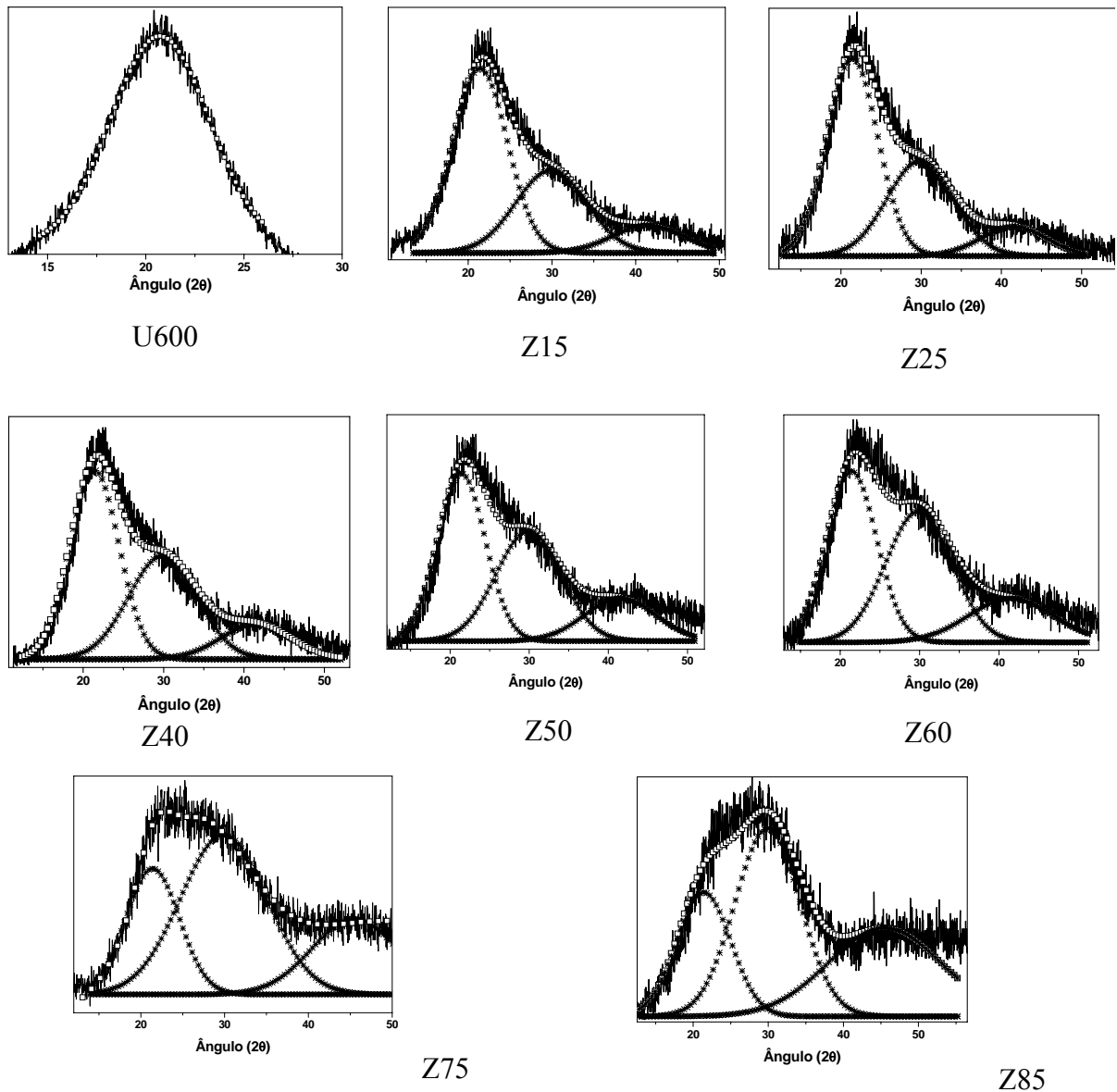
Esse valor encontrado para o híbrido puro é de  $4,07\text{\AA}$  e está próximo aos obtidos pela literatura, onde se têm  $4,2\text{\AA}$  para o U600,  $4,4\text{\AA}$  para o U900 e  $4,1\text{\AA}$  para o U2000, além de  $4,2\text{\AA}$  para a sílica vítrea [ANDRÉ, 2002]. Esses valores são maiores do que o comprimento das ligações Si-O ( $1,62\text{\AA}$ ), Si-Si ( $3,12\text{\AA}$ ) e O-O ( $2,65\text{\AA}$ ), o que indica a existência de ordem à uma distância maior do que a primeira esfera de coordenação [ANDRÉ, 2002].

O comprimento de correlação  $L_c$ , ou seja, a distância ou o comprimento ao longo do qual a unidade estrutural considerada existe, pode ser estimados a partir da fórmula de Sherrer [ALVES *et al.*, 2000]:

$$L_c = 0,9\lambda/B\cos\theta_B \quad (\text{eq. VII})$$

onde  $L_c$  é o comprimento de correlação,  $\lambda$  é o comprimento de onda da radiação ( $1,54\text{\AA}$ ),  $B$  é a largura do pico, em radianos, onde o valor da intensidade corresponde à metade da intensidade máxima e  $\theta_B$  é o ângulo onde a intensidade é máxima. As distâncias  $d_s$  na ordem de  $4\text{\AA}$  e os comprimentos de correlação  $L_c$  calculados a partir dos mesmos picos no difratograma estão relacionados às regiões dentro dos nanodomínios de silício, que contribuem para a formação da banda em ângulos maiores.

O difratograma obtido para o híbrido U600 apresenta também um ombro que pode ser identificado na banda larga, relativo a segunda ordem do pico principal, em  $2\theta=43,6^\circ$ . Com a adição do sol de zircônio, pode-se observar o alargamento das bandas do híbrido U600 e o aparecimento de novas bandas. A banda em  $2\theta=21,4^\circ$  ( $d=4,14\text{\AA}$ ) corresponde aos nanodomínios de silício também observados para o híbrido puro. A segunda ordem desse pico pode ser observada em  $2\theta=42,8^\circ$ . Uma banda com máximo em  $2\theta=29,9^\circ$  ( $d=2,98\text{\AA}$ ) é identificada nos compostos contendo zircônio; a segunda ordem dessa banda pode ser observada nos compostos contendo alto teor de Zr (Z75 e Z85 da figura 2.3.1) na região de  $2\theta=59,8^\circ$ . Essa banda intermediária entre as bandas do silício (em  $21,4$  e  $42,8^\circ$ ) pode ser atribuída a nanodomínios de zircônia monoclinica que são formados com o aumento da concentração de zircônio; isso pode ser confirmado observando-se o aumento da intensidade dessa banda com o aumento do teor de zircônio nas amostras. A figura 2.3.5 mostra essa região dos difratogramas com os ajustes gaussianos realizados:



**Figura 2.3.5:** Difratogramas dos compostos híbridos contendo diferentes relações Zr:Si na região de altos ângulos ( $2\theta > 10$ ), com ajustes de curvas gaussianas.

O comprimento de correlação  $L_c$  também pode ser estimado a partir da fórmula de Sherrer [ALVES *et. al.*, 2000]. Os valores de  $L_c$  para os picos a baixos ângulos correspondem à distância entre os domínios de silício (partículas maiores); os valores de  $L_c$  para os picos a altos ângulos correspondem à distância entre os pequenos centros de silício dentro das partículas maiores. A tabela 2.3.2 mostra os valores obtidos.



**Tabela 2.3.2:** Valores do comprimento de correlação ( $L_c$ ) obtidos a partir do pico a baixos ângulos ( $2\theta < 10^\circ$ ) e altos ângulos ( $2\theta \sim 20^\circ$ ).

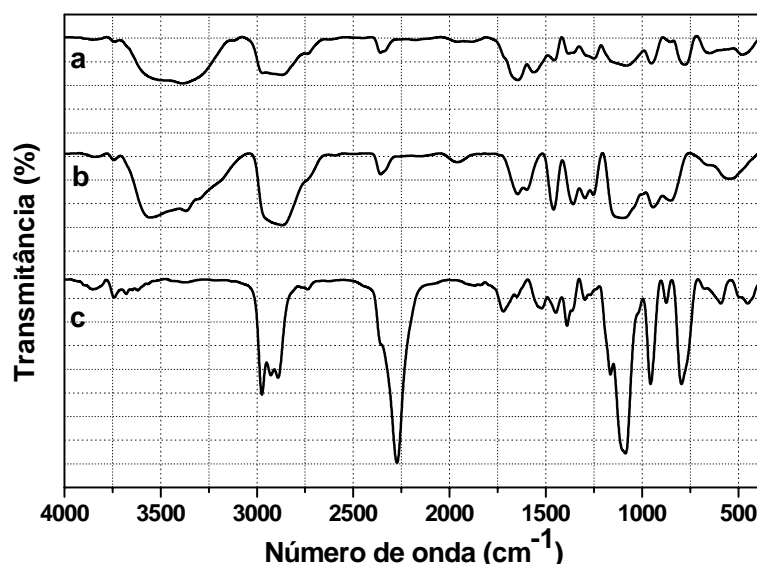
Amostras	( $L_c$ ) para pico a altos ângulos (Å)	( $L_c$ ) para pico a baixos ângulos (Å)
<i>U600</i>	24	106
<i>Z15</i>	24	41
<i>Z25</i>	25	55
<i>Z40</i>	33	47
<i>Z50</i>	27	53
<i>Z60</i>	25	60
<i>Z75</i>	25	77
<i>Z85</i>	22	106
<i>Z100</i>	-	126

Calculando-se os comprimentos de correlação  $L_c$  para os picos a baixos ângulos, pode-se afirmar que os valores entre 41 e 106Å mostram a distância para a qual essas unidades estão correlacionadas, e contribuem para a formação do pico de espalhamento. Com a adição de zircônio, o comprimento de correlação aumenta, o que indica que o zircônio contribui para o aumento da ordem ao longo do sistema.

Para os picos a altos ângulos, o comprimento de correlação encontrado varia entre 22 a 33Å. A variação do comprimento de correlação aumenta com o aumento de zircônio até a amostra Z40 e depois diminui. Esses valores estão de acordo com a literatura, onde os comprimentos de correlação para os híbridos U600, U900 e U2000 são respectivamente 16,6Å, 16,1Å e 20,5Å [ANDRÉ, 2002]. Esse fato está de acordo com os dados de SAXS onde há indicações de que o Zr afeta a conformação estrutural da parte polimérica pois os centros de silício estão mais próximos a partir de uma certa concentração de Zr (amostra Z40). Mas o aumento do  $L_c$  não ocorre de forma linear com o aumento do teor de Zr, o que indica que não há interações diretas Zr-Si nessa escala de tamanhos. Como será demonstrado a seguir, as curvas de RMN de  $^{29}\text{Si}$  também mostram que não há heterocondensação Zr-O-Si.

## 2.4 Espectroscopia vibracional na região do infravermelho.

A figura 2.4.1 mostra o espectro do composto híbrido sintetizado, U600, e de seus precursores: o,o-bis(2-aminopropil)polietilenoglicol 500 (Jeffamine) e 3-isocianatopropiltrióxissilano (Isotreos). A tabela 2.4.1 indica as atribuições relativas a esta figura.



**Figura 2.4.1:** Espectros de transmissão no infravermelho: (a) híbrido U(600) e precursores (b) jeffamine e (c) isotreos

**Tabela 2.4.1:** Atribuições referentes às bandas dos espectros de transmissão no infravermelho dos compostos U600, jeffamine e isotreos.

bandas (cm <sup>-1</sup> )	atribuição	bandas (cm <sup>-1</sup> )	atribuição
967	Si-O-Et	1648	amida I (CO)
1074	Si-O-Et	1650-1515	amida II (NH <sub>2</sub> e NH)
1157	Si-O-Et	2273	isocianato - NCO
1592	δ NH <sub>2</sub>	3361	v <sub>ass</sub> NH <sub>2</sub>

Para a confirmação da síntese do híbrido U600 podem-se considerar como indicativas as bandas do grupo isocianato (presente no isotreos), e as bandas características para a amida resultante (bandas "Amida I" e "Amida II") [CORREIA *et. al.*, 2002]. A banda em 2273cm<sup>-1</sup>, característica do grupo isocianato - NCO [CIN *et. al.*, 2002], desaparece quando o U(600) é sintetizado. A reação deste grupo terminal com o grupo amina da Jeffamine leva a formação do híbrido com a "ponte de uréia" unindo as partes orgânica e inorgânica. As bandas fracas da jeffamine que aparecem em 3361 e 1592cm<sup>-1</sup> correspondem respectivamente ao estiramento assimétrico e deformação dos grupos NH<sub>2</sub> terminais (que não estão presentes nem no U600 nem no isotreos) [BERMUDEZ *et. al.*, 1999]. No U600 nota-se que a banda de 1592cm<sup>-1</sup> desaparece, o que indica novamente que houve ligação para formar a ponte de uréia. As bandas características do precursor isotreos, a primeira forte aparecendo em 1074 cm<sup>-1</sup> e duas outras de média intensidade em 1157 e 967cm<sup>-1</sup>, correspondem às vibrações do grupo etóxi [BERMUDEZ *et. al.*, 1999]; no U600, essas bandas são encobertas pelas bandas mais intensas de estiramento C-O (também presentes na jeffamine) estiramento C-C e deformação δ<sub>r</sub> do CH<sub>2</sub>, que estão na mesma região.

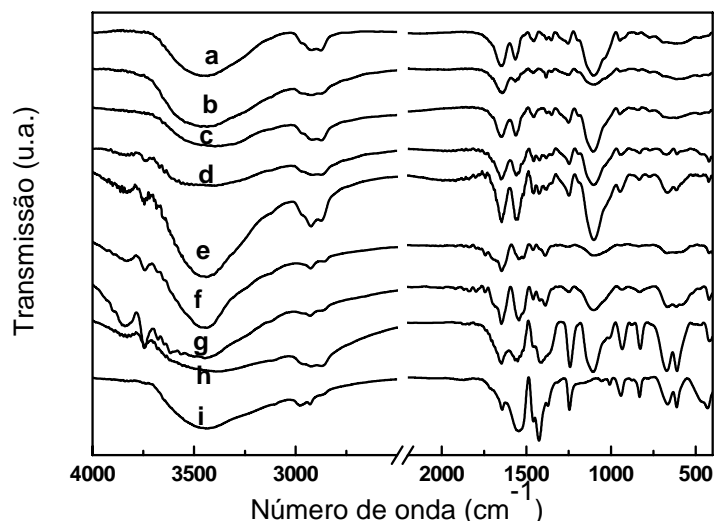
As bandas correspondentes aos grupos amida (Amida I e Amida II) são de difícil atribuição pois envolvem a contribuição de diferentes movimentos como o estiramento C=O, estiramento C-N e

deformação C-C-N. As posições destas bandas variam com o grau de ligações de hidrogênio possíveis de existirem no híbrido e com o estado físico do composto [SILVERSTEIN, 2000]. Muitos autores, como *Jada* [apud. BERMUDEZ *et. al.*, 1999], que atribuiu uma banda em  $1635\text{cm}^{-1}$  no espectro da 1,3-dimetiluréia, e *Iijima et al.* [apud. BERMUDEZ *et. al.*, 1999] que atribuíram a banda de  $1650\text{cm}^{-1}$  do espectro da poliuréia, têm investigado em detalhes a absorção de infravermelho das amidas. Como mencionado acima as amidas têm suas bandas conhecidas na literatura como "banda de amida I", que pode de uma maneira simplista ser atribuída à absorção da carbonila, e "banda de amida II", que da mesma maneira é atribuída à deformação angular de  $\text{NH}_2$  ou  $\text{NH}$ . De acordo com *Bermudez et al.* [BERMUDEZ *et. al.*, 1999], o espectro das amidas é drasticamente modificado quando o comprimento da cadeia é alterado, mas é possível atribuir a banda de  $1648\text{cm}^{-1}$  à "Amida I" do híbrido U600. As bandas de "Amida II" ocorrem na região de  $1650\text{-}1515\text{cm}^{-1}$  [BERMUDEZ *et. al.*, 1999]; em sólidos em suspensão ou em pastilhas, ocorrem entre  $1655\text{-}1626\text{cm}^{-1}$  [SILVERSTEIN, 2000], sendo muitas vezes encoberta pela banda de amida I.

De acordo com as modificações observadas no espectro de infravermelho, pode-se afirmar que o híbrido U600 foi obtido satisfatoriamente.

Para os compostos híbridos de Zr e Si, os resultados obtidos pela difração de raios X sugerem a interação das espécies de zircônio nas proximidades dos domínios siliciosos de tal maneira que pelo menos para baixas concentrações de zircônio os centros espalhadores são os mesmos que aqueles presentes no híbrido puro, com o contraste aumentado pela presença dos átomos de zircônio. Não há indício de heterocondensação envolvendo os domínios siliciosos e espécies de zircônio e portanto existem basicamente duas regiões na parte polimérica da rede com as quais a interação com espécies de zircônio é mais provável. Uma delas é a região da ponte de uréia localizada próxima aos domínios ricos em silício, e a outra região é a da cadeia de poliéter ao longo da parte polimérica. Para esclarecer esta questão foi realizada a investigação do espectro do híbrido e dos compostos contendo zircônio, na região do infravermelho [BERMUDEZ *et. al.*, 1999; BERMUDEZ *et. al.*, 2001; MOLINA *et. al.*, 2003b].

Os espectros dos compostos contendo diferentes relações molares de Zr:Si são apresentados na figura 2.4.2.



**Figura 2.4.2:** Espectros de transmissão na região do infravermelho para as amostras (a) U600 puro e contendo diferentes concentrações de zircônio (b) Z15, (c) Z25, (d) Z40, (e) Z50, (f) Z60, (g) Z75, (h) Z85 e (i) Z100.

As bandas na região amida I ( $\sim 1670\text{ cm}^{-1}$ ) e amida II ( $\sim 1565\text{ cm}^{-1}$ ) são coincidentes com as bandas de C=C do ácido metacrílico ( $1650\text{ cm}^{-1}$ ) e de  $\text{COO}^-$  ( $1550\text{ cm}^{-1}$ ) formado entre o Zr-n-propóxido e o ácido metacrílico [TADANAGA *et. al.*, 2000]. Portanto essa região é de difícil atribuição.

A região correspondente a heterocondensação de Zr-O-Si, em aproximadamente  $1080\text{ cm}^{-1}$ , é encoberta pela banda relativa a  $\nu\text{CO}$ , não sendo possível por essa técnica determinar se ocorreu ou não a heterocondensação.

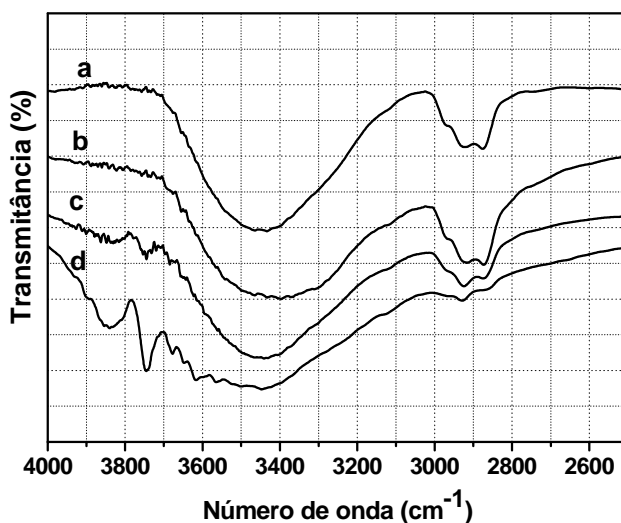
A intensidade das bandas em aproximadamente  $1150$ ,  $1300$ ,  $1320$ ,  $1420$  e  $1450\text{ cm}^{-1}$  aumenta com o aumento da quantidade de zircônio. Esse aumento é devido ao aumento da concentração do grupo metacrilato, ligado ao átomo de zircônio adicionado ao híbrido. O alargamento das bandas na região de  $1500$  a  $1200\text{ cm}^{-1}$  é devido à distribuição aleatória dos grupos metacrilato entre as estruturas do híbrido U600.

A tabela 2.4.2 resume as atribuições realizadas nos espectros da região do infravermelho que serão discutidas por regiões:

**Tabela 2.4.2:** Atribuições das bandas do espectro de transmissão na região do infravermelho do composto U600.

Bandas ( $\text{cm}^{-1}$ )	Atribuição	Bandas ( $\text{cm}^{-1}$ )	Atribuição
3749	Si-OH	1629	amida I
3648	Si-OH	1598	$\delta$ $\text{NH}_2$
3536	Si-OH	1564	amida II
3451	$\nu\text{NH}$ da região amida II	1550	$\text{COO}^-$ do Zr+AMA
3370	$\nu_a$ $\text{NH}_2$	1351	estrutura amorfa
3351	bandas de uréia	1151	$\nu\text{CO}$ e $\delta\text{CH}_2$
3116	bandas de uréia	1110	$\nu\text{CO}$
2972	$\nu_a\text{CH}_3$	1040	$\nu_a\text{C-N}$
2917	$\nu_a\text{CH}_2$	1037	$\nu\text{CC}$ , $\nu\text{CO}$ e $\delta\text{CH}_2$
2877	$\nu_s\text{CH}_2$	941	estrutura amorfa
1677	amida I	935	$\nu\text{CC}$ e $\delta\text{CH}_2$
1656	amida I	462	$\delta\text{COC}$ e $\delta\text{CCO}$ da cadeia polimérica
1650	$\text{C}=\text{C}$ do AMA		

A figura 2.4.3 mostra o espectro de transmissão do composto U600 e de amostras contendo diferentes teores de Zr na região de  $4000\text{-}2500\text{ cm}^{-1}$ :



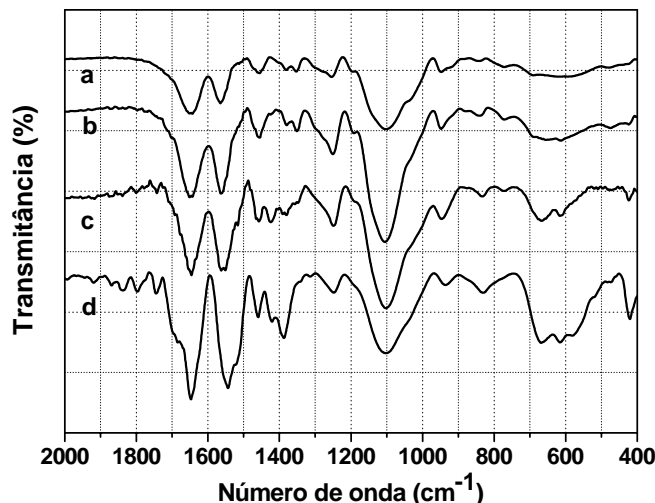
**Figura 2.4.3:** Espectros de transmissão na região do infravermelho. Detalhe da região de  $4000$  a  $2500\text{ cm}^{-1}$ ; (a)U600, (b)Z25, (c) Z50 e (d) Z75.

No espectro obtido para o híbrido U600 a banda em  $3451\text{ cm}^{-1}$  é atribuída ao estiramento  $\text{NH}_2$ ; a banda em  $2972\text{ cm}^{-1}$  corresponde ao estiramento assimétrico do grupo  $\text{CH}_3$  e as bandas em  $2917$  e  $2877\text{ cm}^{-1}$  correspondem a estiramentos de grupamentos  $\text{CH}_2$ , respectivamente assimétrico e simétrico.

Observando-se as bandas relativas aos estiramentos de grupos  $\text{CH}_2$  e  $\text{CH}_3$  ( $2972$ ,  $2917$  e  $2877\text{ cm}^{-1}$ ), podemos afirmar que o aumento de zircônio na matriz para as amostras mais concentradas (Z75 e Z85) também provoca a diminuição da intensidade das bandas nessa região em relação às outras

regiões na mesma amostra, o que também pode indicar que com o excesso de zircônio presente na matriz, pode ocorrer também a ligação de zircônio na região polimérica do híbrido U600.

A figura 2.4.4 mostra o espectro de transmissão no infravermelho do composto U600 e de amostras contendo diferentes teores de Zr na região de 2000-400 $\text{cm}^{-1}$ .



**Figura 2.4.4:** espectro de transmissão na região do infravermelho: (a) U600, (b) Z25, (c) Z50 e (d) Z75.

Na figura 2.4.4(a), a análise espectral dessa região pode fornecer informações sobre a característica amorfa do material [BERMUDEZ *et. al.*, 1999]. Algumas bandas são indicativas da presença de regiões desordenadas. A banda na região de 941  $\text{cm}^{-1}$  é na verdade composta de duas bandas indicativas do estado amorfo. Essa banda é detectada também nos compostos com cadeias médias, como o U900 (922 e 915  $\text{cm}^{-1}$  [BERMUDEZ *et. al.*, 1999]. Outras bandas são também indicativas do estado amorfo, mas normalmente não são detectadas (810 e 1322  $\text{cm}^{-1}$ ).

A banda fraca em 935  $\text{cm}^{-1}$  pode ser atribuída a modos de vibração de estiramento CC e torção  $\text{CH}_2$  da cadeia polimérica do híbrido puro U(600). As bandas fracas em 462  $\text{cm}^{-1}$  estão em uma região onde são atribuídas as vibrações de deformação COC e CCO da cadeia polimérica. As bandas mais fortes localizadas entre 1200 e 1000  $\text{cm}^{-1}$ , são também referentes às absorções mais intensas da cadeia polimérica do U(600); esta região inclui um ombro a 1151  $\text{cm}^{-1}$ , originado do acoplamento do estiramento CO e da torção do  $\text{CH}_2$ , uma banda forte característica próxima de 1110  $\text{cm}^{-1}$ , atribuída ao estiramento CO, e um pico de intensidade média próximo de 1037  $\text{cm}^{-1}$ , associado com uma mistura de estiramentos CC e CO e torção  $\text{CH}_2$  [BERMUDEZ *et. al.*, 1999].

Observando-se a região de 1351  $\text{cm}^{-1}$ , que é indicativa do caráter amorfo do híbrido U600, com o aumento da quantidade de Zr há a diminuição da intensidade dessa banda. Isso indica que o Zr contribui para a diminuição do caráter amorfo do híbrido U600, pois diminui sua mobilidade. Moléculas semi-rígidas tendem a formar regiões ordenadas, conferindo ao di-ureasil regiões de ordem

com pequeno alcance. Isso foi observado pelos difratogramas de raios X, onde a adição de Zr aumenta o grau de cristalinidade aos raios X, tendendo para formação de fases cristalinas de Zr onde este elemento é mais concentrado.

A banda na região de  $1040\text{ cm}^{-1}$  é encoberta pela banda mais forte em  $1110\text{ cm}^{-1}$  (estiramento CO). Essa banda em  $1040\text{ cm}^{-1}$  é a banda mais característica do estiramento assimétrico do grupo C-N, que corresponde a uma amina primária alifática ligando-se a um carbono  $\alpha$ .

#### *Bandas da região amina.*

Devido ao número de unidades ( $\text{OCH}_2\text{CH}_2$ ) repetidas na estrutura do híbrido, os grupos  $\text{NH}_2$  terminais dão origem a apenas duas bandas: uma em  $3370\text{ cm}^{-1}$  referente ao estiramento assimétrico, e outra em  $1598\text{ cm}^{-1}$  referente à deformação dos grupos [BERMUDEZ *et. al.*, 1999]. O estiramento simétrico não é detectado.

Outra banda muito característica das aminas primárias alifáticas ligadas a carbono  $\alpha$  também não pode ser vista no espectro do U600 puro. É a banda em  $1040\text{ cm}^{-1}$ , referente ao grupo C-N, que é encoberta pela banda em  $1110\text{ cm}^{-1}$ , referente ao estiramento CO. No entanto, quando são observados os espectros do U600 contendo zircônio, essa banda pode ser detectada por um ombro na posição  $1040\text{ cm}^{-1}$ . É observado também o alargamento da banda em  $1110\text{ cm}^{-1}$  e a diminuição da sua intensidade relativa, com o aumento do teor de zircônio.

#### *Bandas dos grupos silanóis.*

As bandas resultantes dos grupos silanóis residuais, Si-OH, usualmente estão presentes na região de  $3200\text{-}3600\text{ cm}^{-1}$  [BERMUDEZ *et. al.*, 1999]. Um conhecido alcóxido, o tetrametóxidosilano (TMOS), absorve em  $3750$ ,  $3660$  e  $3540\text{ cm}^{-1}$  segundo Orcel *et. al.* [apud. BERMUDEZ *et. al.*, 1999]. As bandas do estiramento dos silanóis nos espectros dos di-ureasis não são facilmente detectadas. Existe um alargamento nessa região, provocado pela quantidade de bandas, provenientes além do Si-OH, também dos estiramentos N-H de ligações cruzadas de uréia, e do estiramento O-H da água residual e/ou absorvida. Existe também uma outra região de absorção dos silanóis em  $830\text{-}950\text{ cm}^{-1}$  atribuída aos estiramentos C-C e  $\text{CH}_2$ , sendo identificadas em alcóxidos simples como o TMOS.

Quando se observam os espectros obtidos para os híbridos, é possível a identificação dessas bandas nas amostras com maior quantidade relativa de zircônio. Podem existir dois efeitos. (i) o zircônio interage com os grupos N-H por estar se ligando nessa região e (ii) os compostos com mais zircônio possuem mais silanóis residuais (não condensados) porque o zircônio reage com a água mais rapidamente que o silício. Assim, nas amostras contendo maior quantidade de zircônio, é possível observar algumas das bandas de silanóis residuais em  $3749$ ,  $3648$  e  $3536\text{ cm}^{-1}$ .

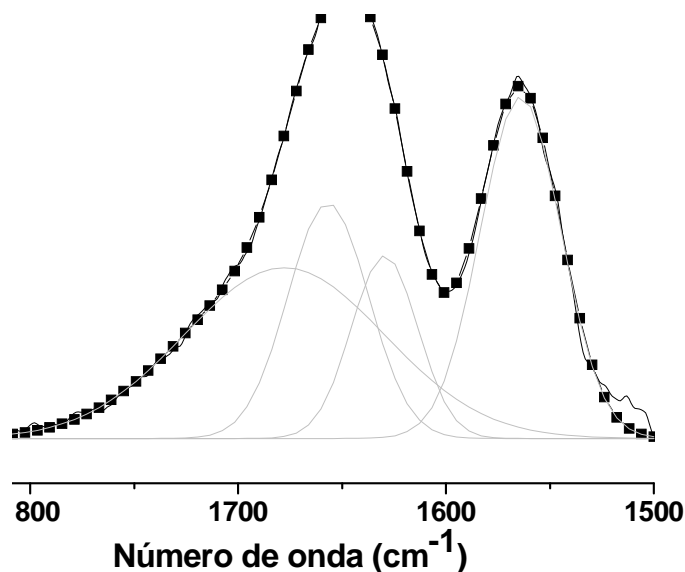
*Bandas dos grupos amida.*

Informações relativas a pontes de hidrogênio nas amostras de U600 contendo diferentes concentrações de zircônio podem ser obtidas da análise espectral das famílias dos nanohíbridos nas regiões espectrais referentes ao grupo amida. As chamadas regiões Amida I e Amida II também são sensíveis à coordenação dos íons lantanídeos com os átomos de oxigênio do grupo carbonila.

Nos di-ureasis os componentes individuais encontrados dentro da região de banda larga na região amida I evidenciam a presença de pontes de hidrogênio envolvendo interações entre grupos NH dos grupos uréia e átomos de oxigênio da carbonila de um grupo uréia vizinho ou ainda átomos de oxigênio do tipo éter dos segmentos poliméricos [BERMUDEZ, *et al.* 1999].

No espectro obtido para o híbrido puro U600 (figura 2.4.4a), na região amida I observa-se uma banda intensa em aproximadamente  $1646\text{ cm}^{-1}$ . Essa banda é bastante modificada com o aumento da quantidade de zircônio incorporada no híbrido (figura 2.4.4b).

Para determinar os valores das frequências das componentes das bandas, foi realizada a desconvolução em gaussianas pelo software Origin. A figura 2.4.5 mostra a desconvolução das bandas para o composto U600 na região conhecida como amida I e amida II.

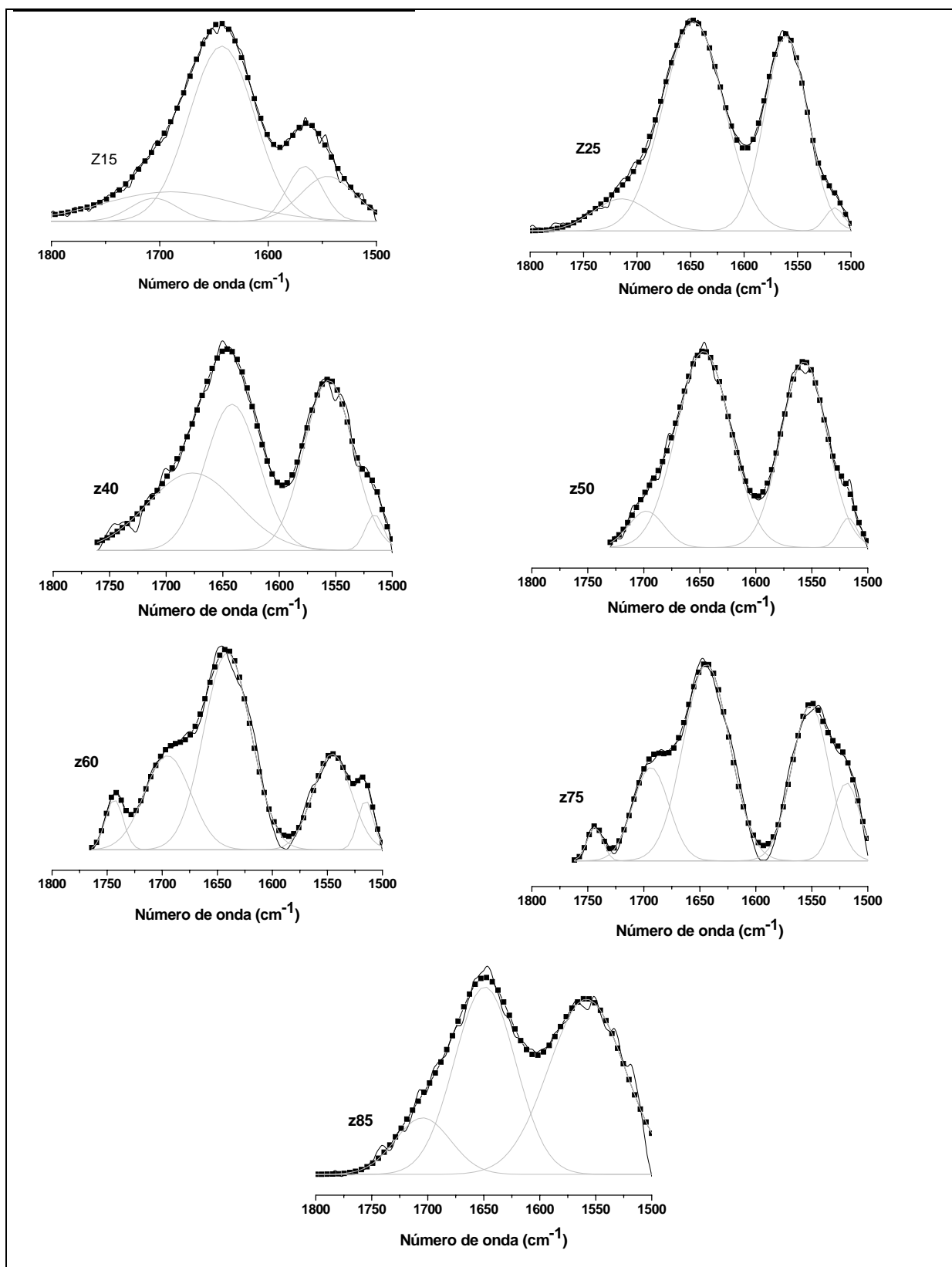


**Figura 2.4.5:** Desconvolução das bandas da região amida I e amida II do híbrido U600.

Para o composto U600 puro foram encontradas as bandas em  $1677$ ,  $1656$  e  $1629\text{ cm}^{-1}$  para a região amida I. Esta última, bastante intensa, é atribuída ao fenômeno de auto-ordenamento uréia-uréia possível pelo elevado número desses grupos neste compostos. As outras duas componentes da banda são atribuídas a movimentos vibracionais de interações menos ordenadas uréia-poliéter. Todos estes resultados sugerem que nem o grupo C=O nem N-H estão livres neste materiais [BERMUDEZ, *et al.* 1999]. A banda em  $1564\text{ cm}^{-1}$  foi atribuída para a região amida II.



Para os compostos contendo diferentes concentrações de zircônio, a figura 2.4.6 mostra a desconvolução das bandas nessa região.



*Figura 2.4.6: Desconvolução das bandas amida I e amida II, Z15 (a) a Z85 (g)*

Para os compostos contendo diferentes concentrações de zircônio, os resultados são apresentados na tabela 2.4.3:

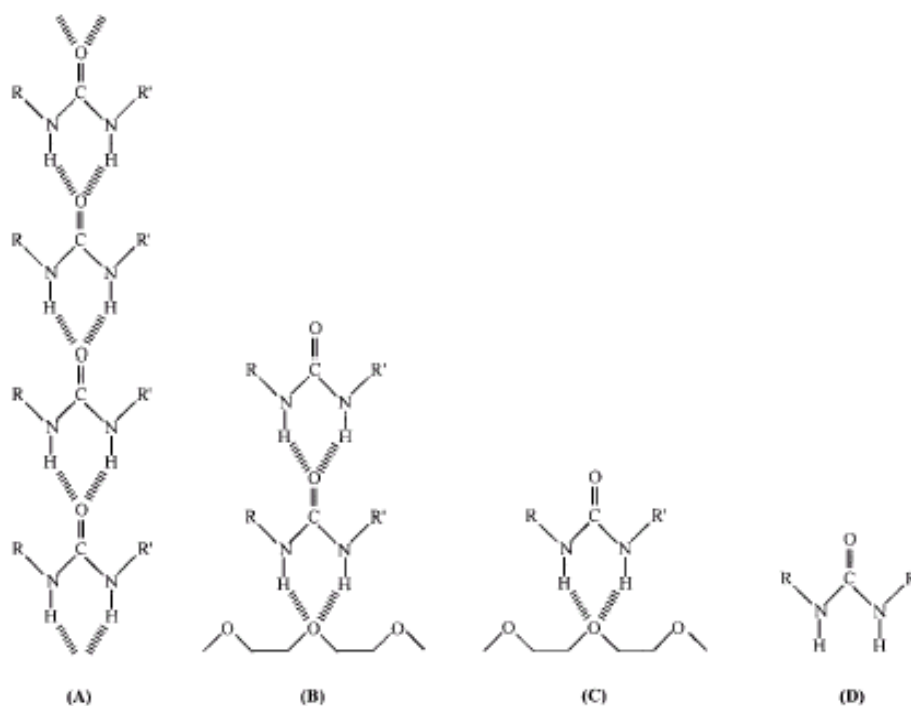
**Tabela 2.4.3:** Posição das principais bandas obtidas através da desconvolução das curvas na região onde são coincidentes as bandas amida I e amida II com as bandas C=C e COO<sup>-</sup> do zircônio com o ácido metacrílico (AMA).

<i>amostra</i>	<i>amida II</i>		<i>amida I</i>		
<b>U600 puro</b>	<b>1564</b>		<b>1630</b>	<b>1657</b>	<b>1678</b>
Z15	1545	1566	1643	1690	1705
Z25	1515	1561	1647		1715
Z40	1516	1556	1642	1677	
Z50	1517	1557	1647	1698	
Z60	1515	1545	1641	1695	1743
Z75	1519	1551	1644	1694	1744
Z85		1558	1649		1705
<b>Z100 (Zr puro)</b>		<b>1550</b>	<b>1640</b>		
	<i>bandas do Zr+AMA COO<sup>-</sup></i>		<i>bandas do Zr+AMA C=C</i>		

A banda em 1550 cm<sup>-1</sup> referente à coordenação do zircônio com o ácido metacrílico (COO<sup>-</sup>) aparece desde as primeiras composições contendo zircônio. A primeira banda da região amida II (em 1564 cm<sup>-1</sup>) vai sendo deslocada e desaparece na amostra com maior quantidade de zircônio (Z85). A sua área relativa no composto puro, que é em torno de 37%, cai para a metade na amostra contendo 15% de zircônio e depois para aproximadamente 3% para as outras amostras, até desaparecer. Ao mesmo tempo, a banda em 1566 cm<sup>-1</sup> no composto Z15, que é uma contribuição do Zr+AMA, passa de 11% da área total nesta amostra para 46% da área total na amostra Z50 e para 72% na amostra Z85, confirmando dessa maneira as atribuições realizadas.

Para a região amida I, enquanto as bandas próximas a 1657 e 1678 cm<sup>-1</sup> desaparecem, a banda na região de 1630 (referente à amida I) que é coincidente com a banda em 1640 (referente ao Zr+AMA) tem sua intensidade diminuída e depois aumentada, dificultando a exata atribuição de suas componentes.

A adição do zircônio deve desfavorecer a formação de pontes de hidrogênio entre os grupos N-H do híbrido U600, entre os grupos uréia e poliéter. Isso se deve ao fato de haver menos N-H próximos com o aumento do teor de zircônio, tanto pela ocupação dessas regiões pelos átomos de zircônio, quanto pelo impedimento estérico causado pelo afastamento das cadeias. A figura 2.4.7 mostra a formação das pontes de hidrogênio nessa região.

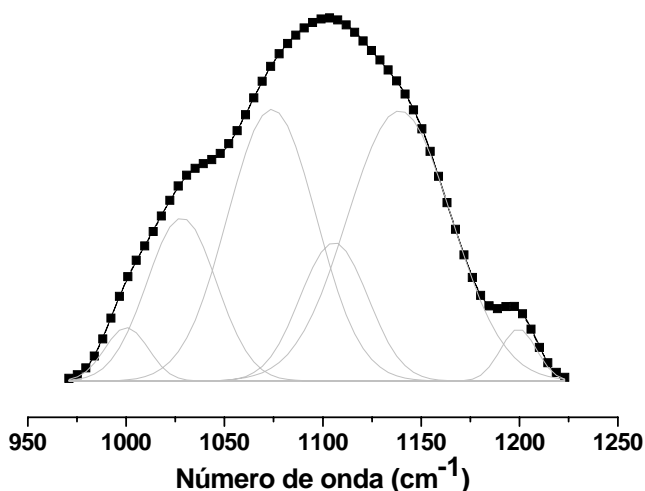


**Figura 2.4.7:** Representação das pontes de hidrogênio presentes nos di-ureas U600, onde R e R' representam os componentes orgânicos e inorgânicos na estrutura do híbrido. [MOLINA, 2003a]

A natureza exata das pontes de hidrogênio uréia-poliéter ainda não é bem conhecida. Na região denominada amida II ( $1500\text{-}1600\text{ cm}^{-1}$ ) apenas uma banda é observada no espectro do U600 puro, em  $1563\text{ cm}^{-1}$ . Essa banda de amidas secundárias acíclicas é formada por contribuições de vibrações N-H e C-N que interagem consideravelmente, originando uma forte absorção próximo de  $1550\text{ cm}^{-1}$ . Alguns espectros mostram essa banda constituída de duas componentes, principalmente nas amostras contendo maiores quantidades de zircônio. Essa componente pode ser atribuída à coordenação do zircônio com o ácido metacrílico ( $\text{COO}^-$ ), que aparece na figura 2.4.4b nas amostras com maiores quantidades de zircônio, e nas desconvoluções das curvas apresentadas na figura 2.4.6.

A banda em  $1255\text{ cm}^{-1}$  (figura 2.4.4a) aparece na região denominada amida III. Ela envolve o estiramento do grupo C-N, mas acopla-se com os modos de deformação do grupo N-H.

A região polioxiétileno do U600 apresenta suas bandas características centradas em  $1110\text{ cm}^{-1}$ . A desconvolução dessas bandas é apresentada na figura 2.4.8:

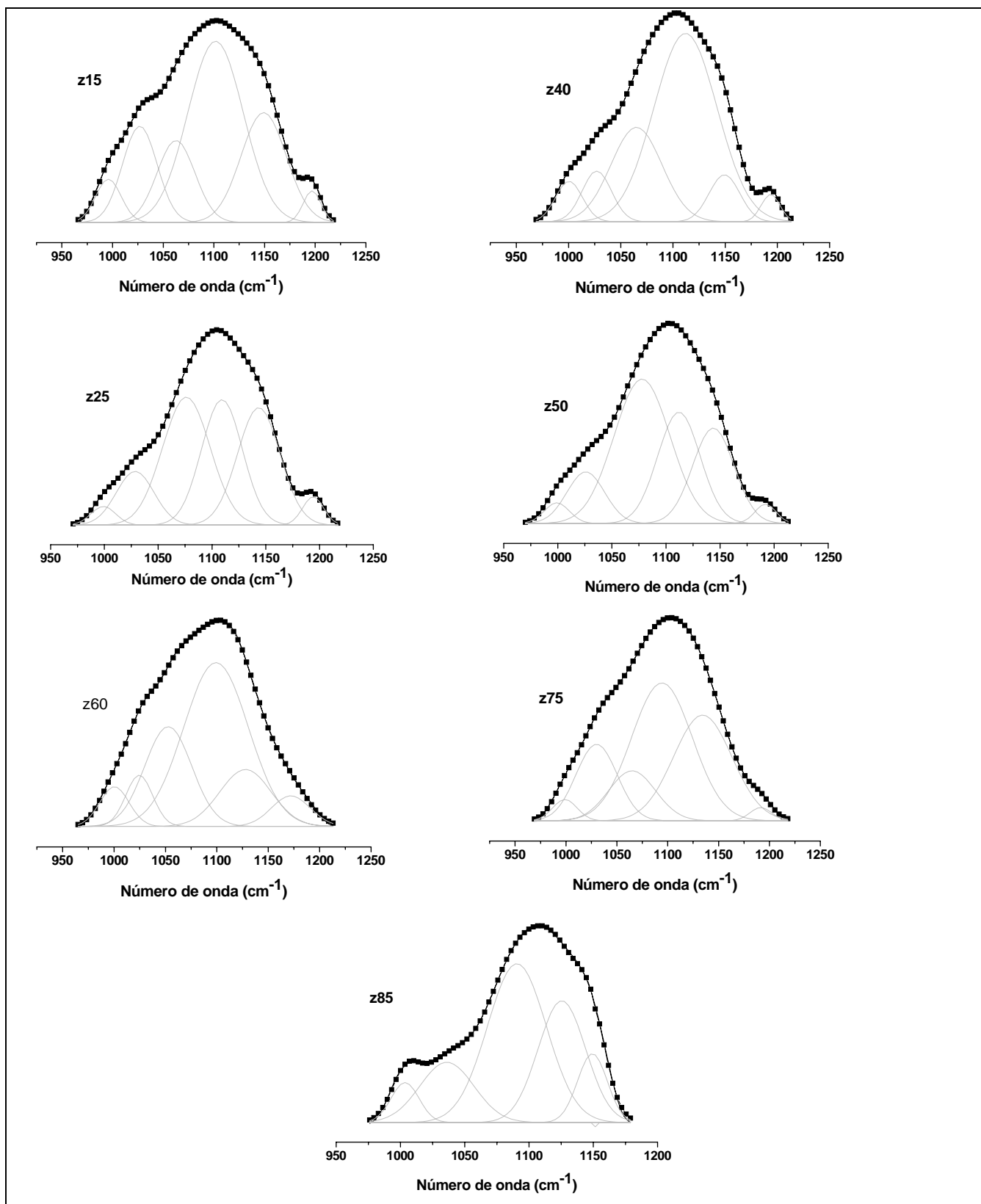


**Figura 2.4.8:** Desconvolução das bandas do U600 na região 100-1200 $\text{cm}^{-1}$ .

A região do estiramento CO ( $1110\text{ cm}^{-1}$ ) é uma das mais importantes para o estudo estrutural desses híbridos, pois através dela é possível saber se há a complexação entre o zircônio e as cadeias poliéter. A ligação de cátions à cadeia poliéter resulta em um deslocamento muito visível da banda para menores números de onda.

A figura 2.4.8 mostra que a banda do híbrido U600 está centrada em aproximadamente  $1110\text{ cm}^{-1}$  e possui um ombro em  $1140\text{ cm}^{-1}$ , que correspondem respectivamente ao modo vibracional do estiramento CO e ao acoplamento do estiramento CO e  $\text{CH}_2$  [MOLINA, *et al.* 2003b].

A figura 2.4.9 mostra a desconvolução das bandas da região poliéter dos compostos Z15-Z85.



**Figura 2.4.9:** Desconvolução das bandas na região de poliéster dos compostos Z15-Z85.

A intensidade do ombro em aproximadamente  $1140\text{ cm}^{-1}$  diminui com o aumento de zircônio para amostras até 60% de zircônio, e depois aumenta sua intensidade. A posição da banda vai de  $1139\text{ cm}^{-1}$  para o híbrido puro até  $1129\text{ cm}^{-1}$  para a amostra Z60, e depois aumenta para  $1149\text{ cm}^{-1}$  para a amostra Z85.

É conhecido da literatura [MOLINA, *et al.* 2003b] que com a coordenação de cátions pela cadeia poliéter o ombro observado na região de  $1100\text{ cm}^{-1}$  tem sua intensidade relativa aumentada. Esse aumento é uma evidência de que existe coordenação com os oxigênios do tipo éter da cadeia polimérica provavelmente pela substituição de moléculas de água. Como esse efeito é observado para as amostras estudadas aqui apenas a partir da concentração de 60% de zircônio, pode-se concluir que para as amostras menos concentradas, a ligação do zircônio ocorre preferencialmente nas regiões amida, próximas aos nanodomínios de silício. Com a saturação desse sítio, o zircônio passa a se ligar ao longo das cadeias de poliéter do híbrido.

## 2.5. Ressonância Magnética Nuclear

As análises de RMN de sólidos foram realizadas no equipamento Varian 500. A posição dos picos e a população relativa dos sítios de silício foram quantitativamente estimadas através da desconvolução das curvas obtidas. A notação  $T_n$  (onde  $n=1, 2$  ou  $3$ ) identifica o número de ligações Si-O-Si presentes. As estruturas correspondentes são  $(\text{SiO})\text{Si}(\text{CH}_2)_3(\text{OH})_2$  para  $T_1$ ,  $(\text{SiO})_2\text{Si}(\text{CH}_2)_3(\text{OH})$  para  $T_2$  e  $(\text{SiO})_3\text{Si}(\text{CH}_2)_3$  para  $T_3$  [FU *et. al.*, 2004]. A figura 2.5.1 mostra as curvas obtidas para amostras com diferentes razões Zr:Si.

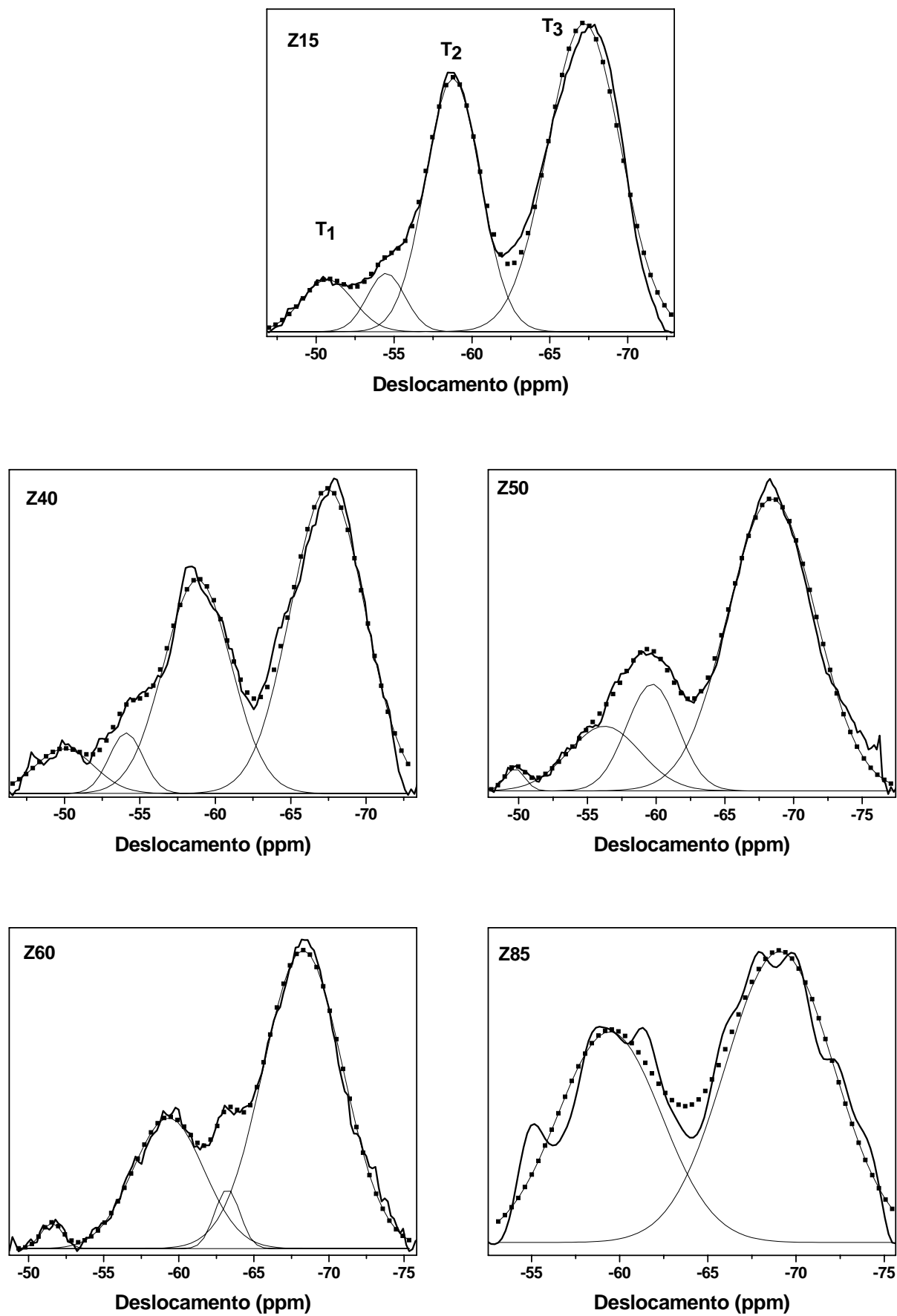


Figura 2.5.1: Curvas de RMN de  $^{29}\text{Si}$  de sólidos (Z15 a Z85, indicados na figura).

Várias espécies foram distinguidas e suas atribuições foram baseadas em dados da literatura [OUBAHA *et. al.*, 2003; CARLOS *et. al.*, 2000b]. T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub> e T<sub>3</sub> foram atribuídas respectivamente a -50,5 ppm, -59,4 ppm e -68,7 ppm aproximadamente (indicado na amostra Z15). O grau de condensação foi então calculado através da expressão  $C=1/3(\%T_1+2.\%T_2+3.\%T_3)$  [CARLOS *et. al.*, 2003].

A tabela 2.5.1 mostra os valores de deslocamentos químicos e do grau de condensação (C) de diferentes amostras:

**Tabela 2.5.1:** Porcentagens de T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub> e T<sub>3</sub> e grau de condensação obtidos de RMN de Si de amostras com diferentes relações Zr:Si.

amostra	T <sub>1</sub> (%)	T <sub>2</sub> (%)	T <sub>3</sub> (%)	C (%)
Z15	6,6	39,1	54,3	82,6
Z40	6,4	39,4	54,2	82,6
Z50	1,2	27,9	70,9	89,9
Z60	1,6	26,5	71,9	90,1
Z85	-	40,9	59,1	86,4

O RMN de <sup>29</sup>Si dos híbridos U600+Zr apresentam sinais alargados em três diferentes regiões, característicos de T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub> e T<sub>3</sub>, cujas posições variam de  $\delta = -45$  a  $-52$  ppm para T<sub>1</sub>,  $\delta = -58$  a  $-60$  ppm para T<sub>2</sub>, e  $\delta = -65$  a  $-68$  ppm para T<sub>3</sub> aproximadamente [CARLOS *et. al.*, 2000b]. A notação T<sub>n</sub> (onde n=1, 2 ou 3) identifica o número de ligações Si-O-Si presentes. As estruturas correspondentes são (SiO)Si(CH<sub>2</sub>)<sub>3</sub>(OH)<sub>2</sub> para T<sub>1</sub>, (SiO)<sub>2</sub>Si(CH<sub>2</sub>)<sub>3</sub>(OH) para T<sub>2</sub> e (SiO)<sub>3</sub>Si(CH<sub>2</sub>)<sub>3</sub> para T<sub>3</sub> [FU *et. al.*, 2004]. Em todas as amostras, as espécies T<sub>3</sub> são predominantes, indicando que o processo de condensação favorece a formação de estruturas ramificadas em detrimento de estruturas lineares, como também já reportado na literatura [ANDRÉ, 2002].

Pode-se observar que há variação na quantidade relativa de T<sub>3</sub>/T<sub>2</sub> quando são variadas as relações Zr:Si. Ocorre a aumento de T<sub>3</sub> e o diminuição de T<sub>2</sub>, indicando o aumento das reações de condensação do silício com o aumento de zircônio. Esse fato foi reportado por Oubaha e colaboradores [OUBAHA *et. al.*, 2003] onde a adição do zircônio nos sóis de MAPTMS (3-trimetoxissilano-propilmetacrilato) catalisa as reações de condensação, fazendo com que haja diminuição de até 50% na quantidade de espécies T<sub>0</sub> para formação de espécies T<sub>1</sub> e T<sub>2</sub>, que aumentam em até 30%.

A tabela também mostra os valores do grau de condensação das amostras. Esses valores indicam um alto grau de condensação para estes materiais. Há ainda aumento do grau de condensação com o aumento do teor de zircônio. Isso indica que a presença de zircônio contribui para a formação de estruturas mais compactas, como também foi observado pelos dados de SAXS. Na literatura, os valores do grau de condensação para o híbrido U600 puro pode chegar até a 96% modificando-se o processo de preparação, e o aumento da cadeia tem o efeito de diminuição do grau de condensação [CARLOS *et. al.*, 2000b]. Os valores obtidos são similares àqueles reportados para híbridos



preparados pelo mesmo processo sol-gel convencional [CARLOS *et. al.*, 2003] e também por solvólise [FU *et. al.*, 2004], e confirmam a similaridade com a estrutura desses materiais. Em contraste, na amostra Z85 um aumento do teor de zircônio resulta na diminuição do grau de condensação. Isso pode ocorrer devido ao excesso de grupos acrilatos provenientes do ácido metacrílico, usado para estabilizar o zircônio. Esses grupos podem polimerizar-se, diminuindo a mobilidade da estrutura, o que pode dificultar a condensação entre os grupos silanóis. Esse fato também foi relatado na literatura com híbridos U600+Zr+MAPTMS [MOLINA *et. al.*, 2004].

## 2.6. A estrutura da matriz híbrida.

O tamanho e a forma dos clusters de zircônio pode ser influenciado até certo ponto pelas condições reacionais. A adição de quantidades diferentes desses clusters de zircônio no híbrido U600 preparado resultou em uma matriz com características ligeiramente variáveis de acordo com a relação molar Zr:Si obtida, mas que possui características gerais que não dependem dessa relação.

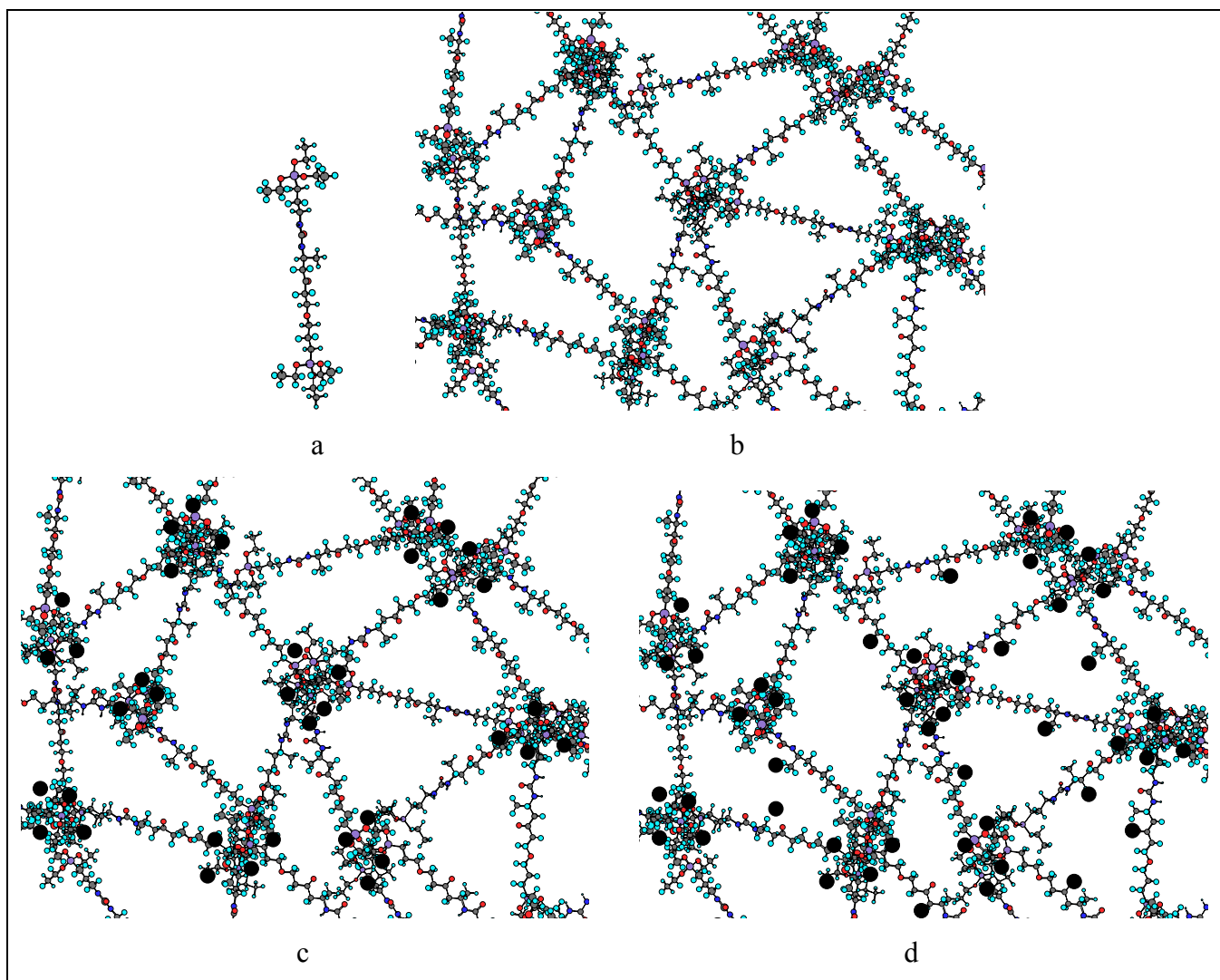
De acordo com dados obtidos das curvas de SAXS, a presença de um pico de correlação devido aos nanodomínios de siloxanos indica que a sua distribuição é aproximadamente homogênea, com distâncias constantes entre esses domínios. Esse fato era esperado, devido à estrutura e conformação do híbrido U600, que possui dois átomos de silício ligados por uma cadeia orgânica de distância constante. A distância entre os átomos de silício da mesma molécula pouco varia, mas pode ser influenciada pela conformação da cadeia. A distância entre átomos de silício entre cadeias diferentes depende das condições reacionais de hidrólise e condensação dos precursores.

A adição de zircônio em diferentes concentrações foi analisada. Considerando-se a parte orgânica da estrutura do híbrido U600 existem dois sítios de coordenação possíveis para as interações com as espécies de zircônio sem se considerar a possível heterocondensação Zr-O-Si. Um deles é a região do grupo uréia (-NH-C=O-NH-) localizado próximo aos nanodomínios de siloxanos, no início e no fim da cadeia. A outra região é a dos grupamentos poliéter, na região da cadeia mais distante dos centros de silício. Pelas análises apresentadas, foi observado que ocorre ligação do zircônio na região do grupo uréia preferencialmente. Quando há saturação dessa região, ou seja, quando o teor de zircônio é alto, ocorre também formação de espécies ricas em ZrO<sub>2</sub> e ligação do zircônio na outra região da cadeia do U600, os grupamentos poliéter. Essa saturação parece ocorrer quando o teor de zircônio é de 50% (% molar em relação ao silício) onde são observadas mudanças importantes no comportamento das amostras pelas análises de SAXS e difração de raios X.

A introdução de Zr-AMA leva a um deslocamento do pico de SAXS para maiores valores de  $q$ , o que significa diminuição nas distâncias entre os centros de silício. O alargamento do pico também indica que há maior variação nas distâncias provocada pela presença de zircônio. O aumento do raio

das partículas não acompanha o aumento do teor de zircônio. Isso indica que, além do zircônio adicionado coordenar-se preferencialmente ao redor das partículas de siloxanos, o que realmente contribui para o aumento do tamanho das partículas dos domínio siliciosos, também pode se coordenar em outros locais; essa dispersão no tamanho das partículas também pode indicar a formação de precipitados de  $ZrO_2$ , que influenciam no contraste do material e nos resultados dos tamanhos de partículas.

A figura 2.6.1 mostra de maneira esquemática a estrutura sugerida.



**Figura 2.6.1.:** Estrutura da matriz híbrida de zircônio e silício obtida a partir de alcóxido de zircônio coordenado a ácido metacrílico e do híbrido U600. (a) híbrido U600; (b) matriz formada pelas reações de hidrólise e condensação do híbrido U600; (c) matriz com baixa concentração de zircônio, onde este liga-se preferencialmente à regiões ricas em silício; (d) matriz com alta concentração de zircônio, onde ocorre formação de  $ZrO_2$  na estrutura orgânica da matriz.

A diminuição das distâncias com o aumento do teor de zircônio também indica que ocorre formação de depósitos de  $ZrO_2$  na região polimérica, pois esses depósitos induzem um maior enovelamento do polímero causando então a diminuição das distâncias entre os domínios siliciosos.

As curvas de SAXS mostram ainda que, com o aumento do teor de zircônio, ocorre o aumento do contraste entre as espécies ricas em silício e o restante da matriz. Espécies siloxanos são as responsáveis pela formação do pico inicialmente, pois possuem alta densidade eletrônica em relação à matriz. Com o aumento da concentração de zircônio observa-se o aumento desse contraste. Portanto aqui também foi demonstrado que o zircônio está ligando-se na região do silício, pois o zircônio possui alta densidade eletrônica e o aumento do contraste indica que ele liga-se na região que já tem alta densidade eletrônica.

Por espectroscopia vibracional, observou-se que o aumento da quantidade de Zr provoca a diminuição do caráter amorfo do sistema, através da diminuição da intensidade das bandas referentes ao estado amorfo. Moléculas semi-rígidas tendem a formar regiões ordenadas, conferindo ao di-ureasil regiões de ordem com pequeno alcance, o que foi observado por SAXS. Nos difratogramas de raios X o aumento da cristalinidade do sistema também foi observado, através da formação e picos correspondentes às fases cristalinas de zircônio, com o aumento do teor de zircônio nas amostras.

Foi observado ainda nas curvas de infravermelho que o zircônio provoca o aumento de estruturas correspondentes à siloxanos residuais. Quando se observam os espectros obtidos para os híbridos, é possível a identificação dessas bandas nas amostras com maior quantidade relativa de zircônio. Podem existir dois efeitos. (i) o zircônio interage com os grupos N-H por estar se ligando nessa região e (ii) os compostos com mais zircônio possuem mais silanóis residuais (não condensados) porque o zircônio reage com a água mais rapidamente que o silício.

A adição do zircônio desfavorece a formação de pontes de hidrogênio entre os grupos N-H do híbrido U600, entre os grupos uréia e poliéter. Isso se deve ao fato de haver menos N-H próximos com o aumento do teor de zircônio, tanto pela ocupação dessas regiões pelos átomos de zircônio, quanto pelo impedimento estérico causado pelo afastamento das cadeias.

O último indício importante para confirmar que o zircônio liga-se tanto nas regiões ricas em silício quanto na região polimérica do híbrido relaciona-se com as bandas poliéter observadas nas curvas de infravermelho. O aumento da intensidade dessas bandas (que ocorre com o aumento do teor de Zr) é uma evidência de que existe coordenação com os oxigênios do tipo éter da cadeia polimérica provavelmente pela substituição de moléculas de água. Como esse efeito é observado para as amostras com mais zircônio, pode-se concluir que para as amostras menos concentradas, a ligação do zircônio ocorre preferencialmente nas regiões amida, próximas aos nanodomínios de silício. Com a saturação desse sítio, o zircônio passa a se ligar ao longo das cadeias de poliéter do híbrido.

Em relação à heterocondensação Zr-O-Si, por espectroscopia vibracional na região do infravermelho não foi possível determinar se esta ocorreu ou não. A região correspondente a heterocondensação de Zr-O-Si, em aproximadamente  $1080\text{ cm}^{-1}$ , é encoberta pela banda relativa a  $\nu\text{CO}$ . Mas as curvas de RMN de  $^{29}\text{Si}$  mostram que não há heterocondensação Zr-O-Si.

Pelas curvas de RMN também pode ser observado que em todas as amostras, as espécies  $T_3$  são predominantes, indicando que o processo de condensação favorece a formação de estruturas ramificadas em detrimento de estruturas lineares, como já reportado na literatura. O efeito catalítico do zircônio nas reações de condensação do silício também pôde ser observado por esses dados.

A estrutura assim obtida constitui-se de centros de silício dispersos com distâncias regulares, unidos por cadeias orgânicas que constituem o híbrido U600; nessa matriz, quando adicionado zircônio em baixa concentração, pode-se observar o aumento do contraste de densidades eletrônicas na estrutura. A ligação do zircônio na matriz ocorre via centros de silício, embora não haja heterocondensação Zr-O-Si. A mesma matriz, quando contém alta concentração de zircônio apresenta uma estrutura mais compacta, com tendência a formação de fase cristalina, e maior variação na distância entre os centros de silício, causada pelo enovelamento da cadeia orgânica devido à presença de zircônio na região poliéter e aos depósitos de  $ZrO_2$  na região polimérica da matriz.

## CAPÍTULO 3.

### LUMINESCÊNCIA.

A caracterização espectroscópica fornece informações importantes sobre a estrutura dos híbridos. Os híbridos “di-ureasis”, como já descrito na introdução desta tese, apresentam como característica principal uma banda de emissão que cobre praticamente toda a região do visível do espectro eletromagnético quando excitados no UV. Neste capítulo serão apresentados resultados relativos a esta emissão de banda larga e também a emissão de compostos de  $\text{Eu}^{3+}$  (cloreto e um betadiconato) e do corante rodamina 6G incorporados aos híbridos, bem como os efeitos observados devido a presença das nanopartículas de oxi-hidróxido de zircônio modificadas por ácido metacrílico [CARLOS *et. al.*, 2001a, 2003, 2004; FERREIRA *et. al.*, 1999, 2001; FU *et. al.*, 2004; GONÇALVES *et. al.*, 2004; MOLINA *et. al.*, 2005].

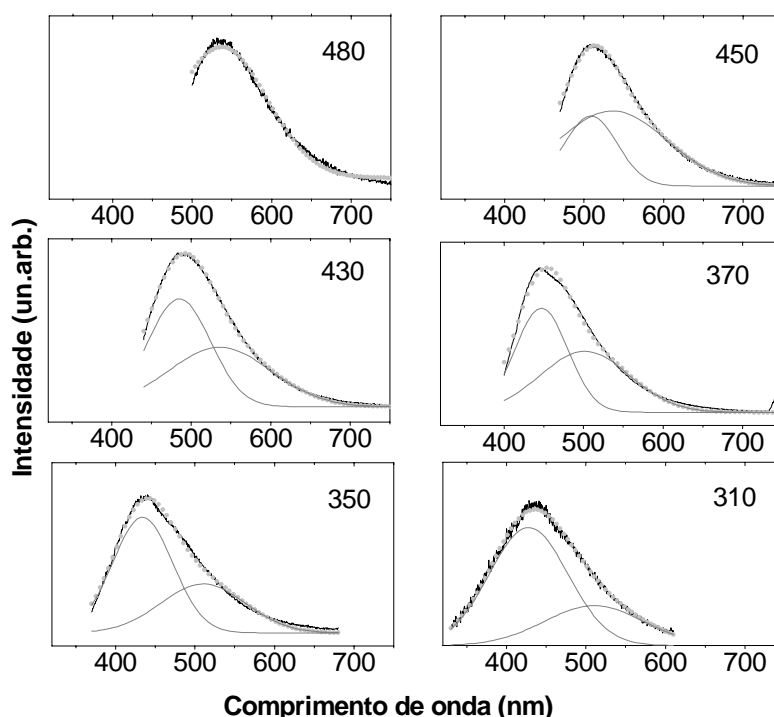
#### 3.1. Híbridos U600-ZrAMA.

Os espectros de emissão e excitação foram obtidos a temperatura ambiente utilizando-se um espectrofluorímetro SPEX Fluorolog F2121 com lâmpada de Xenônio contínua de 450W como fonte de radiação, monocromadores duplos SPEX modelo 1680 na excitação e emissão e fotomultiplicadora R928 Hamamatsu. As medidas de decaimento de emissão foram obtidas com os mesmos monocromadores utilizando-se lâmpada de Xe pulsada (5mJ/pulso de 3 $\mu$ s). As medidas foram processadas pelo fosforímetro SPEX mod. 19340.

##### *O híbrido U600.*

A figura 3.1.1 apresenta alguns espectros de emissão obtidos para o híbrido U600 para diferentes comprimentos de onda de excitação ( $\lambda_{\text{EXC}}$ ). Observa-se uma banda larga que cobre uma faixa apreciável da parte visível do espectro eletromagnético e que se desloca para comprimentos de onda maiores quando  $\lambda_{\text{EXC}}$  aumenta. A figura mostra também uma tentativa de desconvolução da banda larga em componentes gaussianas. Em concordância com observações anteriores [ANDRÉ, 2002; CARLOS *et. al.*, 2000a, 2001a, 2001b; DAHMOUCHE, *et. al.*, 2001] uma das componentes ao

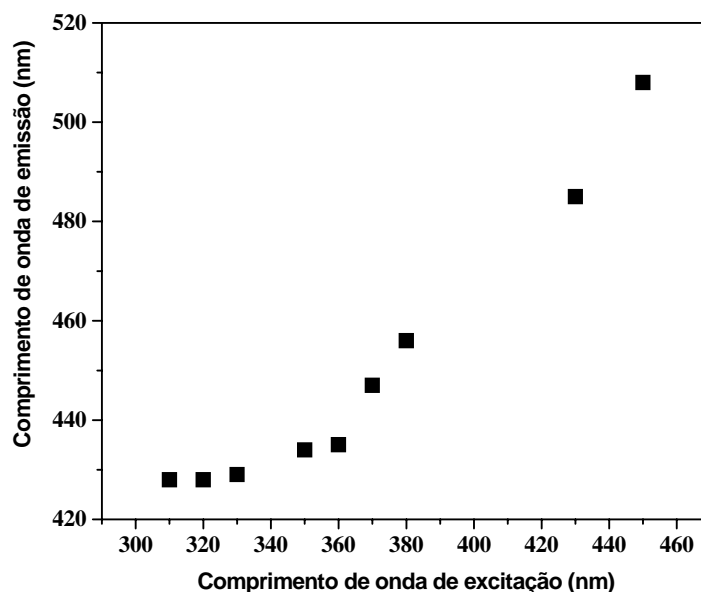
redor de 530 nm não tem sua posição apreciavelmente alterada com a variação no  $\lambda_{\text{EXC}}$ . O deslocamento da banda larga para maiores comprimentos de onda conforme  $\lambda_{\text{EXC}}$  aumenta se deve principalmente ao deslocamento da segunda componente de 428 nm (para  $\lambda_{\text{EXC}}=310$  nm) até 508 nm (para  $\lambda_{\text{EXC}}=450$  nm).



**Figura 3.1.1:** Espectros de emissão obtidos para o híbrido U600. Os números indicam o comprimento de onda (nm) de excitação. A desconvolução em componentes gaussianas é discutida no texto.

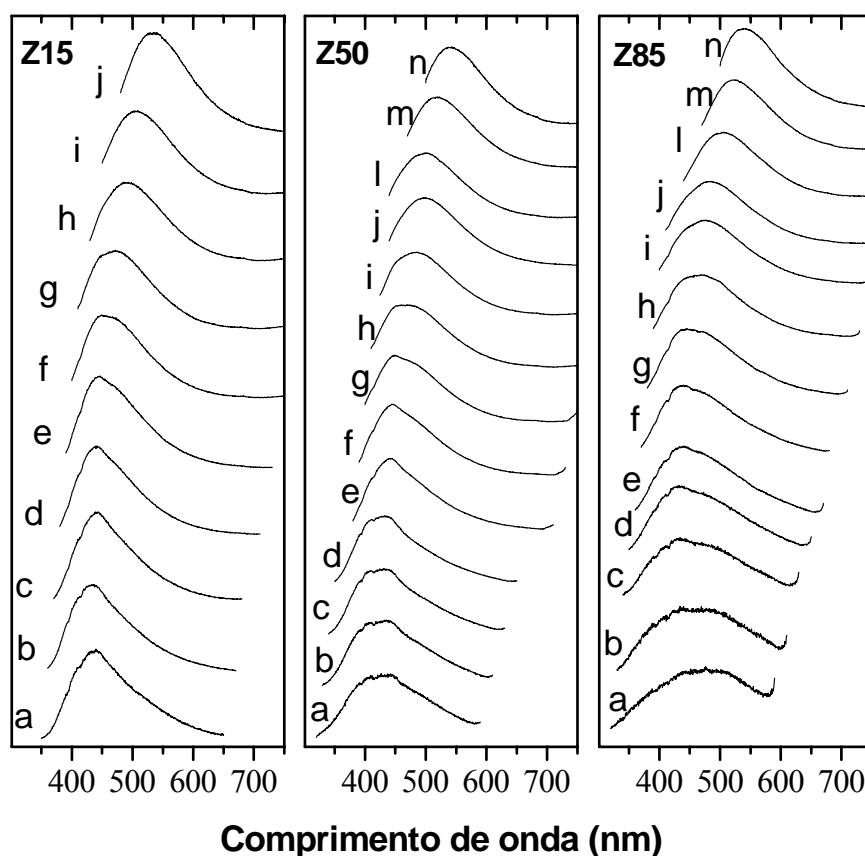
A figura 3.1.2 apresenta a posição do máximo para a componente gaussiana em função do  $\lambda_{\text{EXC}}$ . Observa-se que para valores de  $\lambda_{\text{EXC}}$  até aproximadamente 350 nm não há variação grande na posição da banda de emissão. Para maiores valores de  $\lambda_{\text{EXC}}$  a componente se desloca para menores valores de energia. Estes resultados estão em completo acordo com aqueles apresentados por Ferreira André [ANDRÉ, 2002] que estudou de maneira sistemática o processo. Processos de recombinação doador-aceitador parecem contribuir para o aparecimento da banda larga. A componente de menor energia está relacionada a grupos NH. A radiação induz processos de transferência de prótons gerando defeitos do tipo  $\text{NH}_2^+$  e  $\text{N}^-$  [ANDRÉ, 2002]. A componente da banda que se desloca em função do  $\lambda_{\text{EXC}}$  é atribuída a defeitos de oxigênio que se formam à medida que as reações de hidrólise e condensação vão se processando para a formação de grupos siloxanos. Ferreira André observa ainda a relação da posição desta banda com o tamanho dos domínios ricos em silício que pode ser determinado por SAXS como apresentado no capítulo 2 desta tese. O aumento do tamanho dos domínios está

associado a um deslocamento da banda para menores energias e a observação experimental desse deslocamento reforça portanto a sua atribuição.



**Figura 3.1.2:** *Variação da posição de máximo da componente gaussiana de maior energia em função do comprimento de onda de excitação ( $\lambda_{EXC}$ ).*

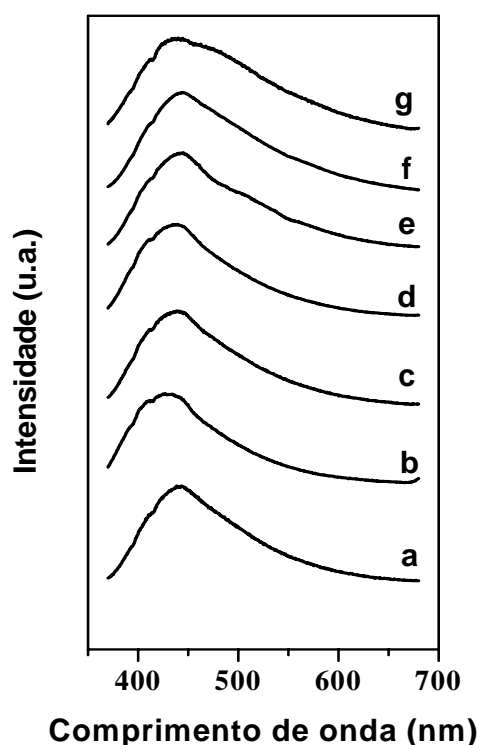
A figura 3.1.3 mostra os espectros de emissão obtidos para os híbridos U600-ZrAMA: Z15, Z50 e Z85 para diferentes comprimentos de onda de excitação. Observa-se essencialmente as mesmas características já observadas para a amostra U600 ou seja, com o aumento em  $\lambda_{EXC}$  a banda de emissão é deslocada para menores energias. O efeito da adição de ZrAMA é visível nos espectros obtidos para menores comprimentos de onda.



**Figura 3.1.3:** Espectros de emissão obtidos para as amostras Z15, Z50 e Z85 para diferentes comprimentos de onda de excitação; para Z15, a=330, b=340, c=350, d=360, e=370, f=380, g=390, h=409, i=429, j=466nm; para Z50 e Z85, a=300, b=310, c=320, d=330, e=360, f=370, g=380, h=390, i=405, j=420, l=430, m=450, n=480nm.

A figura 3.1.4 mostra os espectros obtidos para diferentes concentrações relativas de U600 e ZrAMA para um único comprimento de onda de excitação ( $\lambda_{\text{EXC}}=350$  nm). O alargamento que ocorre com o aumento da concentração relativa de ZrAMA pode ser devido a um aumento na contribuição para emissão total da componente de menor energia ao redor de 480 nm ou a uma diminuição na contribuição para a emissão total da componente de maior energia ao redor de 430 nm





**Figura 3.1.4:** Espectros de emissão obtidos sob excitação em 350 nm para: (a) U600; (b) Z15; (c) Z25; (d) Z40; (e) Z50; (f) Z60; (g) Z75; (h) Z85.

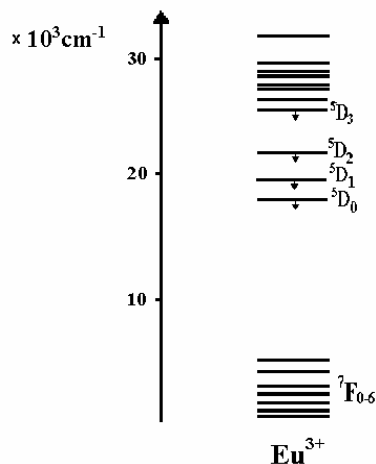
### 3.2 Híbridos U600-ZrAMA-Eu<sup>3+</sup>.

Os lantanídeos são os elementos da tabela periódica com número atômico variando 57 a 71, caracterizados por apresentarem em sua configuração eletrônica o preenchimento gradual dos orbitais 4f. Os espectros de absorção ou emissão nas regiões do infravermelho próximo, visível e ultravioleta apresentam em geral linhas finas e fracas devidas às transições eletrônicas dentro da camada 4f parcialmente preenchida. A proteção propiciada pelos elétrons mais externos 5s e 5p é responsável pela pequena interação dos orbitais f com o ambiente. Variações no ambiente em que o íon lantanídeo está localizado são em geral refletidas por pequenas variações nas energias de seus níveis eletrônicos.

A interpretação dos espectros eletrônicos pode fornecer informações sobre o campo dos ligantes ao redor dos íons lantanídeos, que são portanto utilizados como sonda estrutural. Nesse sentido o Eu<sup>3+</sup> tem sido extensivamente utilizado devido principalmente aos seguintes fatos: (a) estados excitados <sup>5</sup>D<sub>J</sub> (J = 0, 1, 2 e 3) são bem separados dos estados de menor energia <sup>7</sup>F<sub>J</sub>, (J = 0, 1, 2, 3, 4, 5 e 6); (b) o nível emissor principal, <sup>5</sup>D<sub>0</sub>, e o estado fundamental, <sup>7</sup>F<sub>0</sub>, são não-degenerados, levando a uma única transição <sup>5</sup>D<sub>0</sub> → <sup>7</sup>F<sub>0</sub> quando o íon Eu<sup>3+</sup> ocupa um único sítio cristalográfico. Este fato facilita na interpretação dos dados espectrais e fornece informação na eventual existência de mais de um sítio de simetria ocupado pelo íon Eu<sup>3+</sup>; (c) a transição <sup>5</sup>D<sub>0</sub> → <sup>7</sup>F<sub>1</sub> é usualmente dada como transição de referência devido ser permitida por mecanismo de dipolo-magnético, e consequentemente

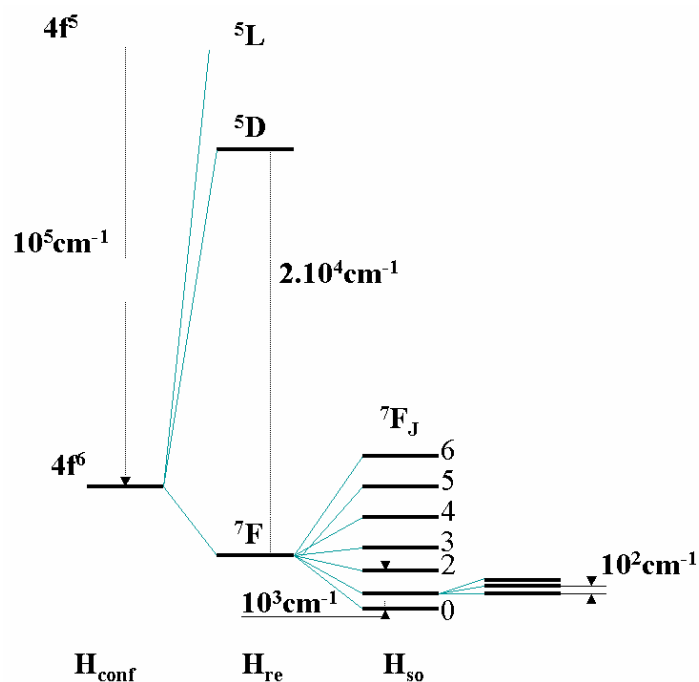
a intensidade da transição não é consideravelmente alterada por perturbação do campo cristalino; (d) longo tempo de decaimento para o nível  $^5D_0$  (milisegundos) [BÜNZLI, *et. al.*, 1989; BLASSE, 1994].

A figura 3.2.1 representa os principais níveis de energia do íon  $\text{Eu}^{3+}$ . As setas na figura representam os níveis a partir dos quais é possível de se observar luminescência.



**Figura 3.2.1:** Representação dos níveis de energia do íon  $\text{Eu}^{3+}$ .

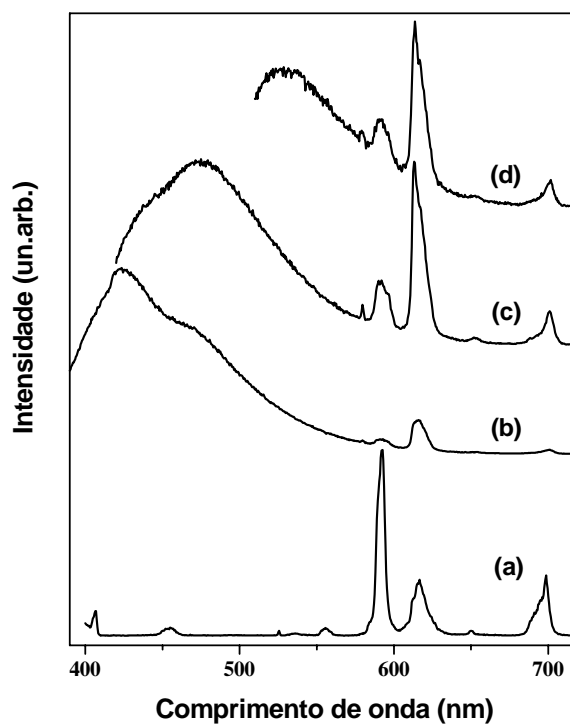
Os níveis de energia do íon livre podem ser descritos pela contribuição de três componentes ao Hamiltoniano de energia. Assim o Hamiltoniano do Campo Central ( $H_{\text{Conf}}$ ) leva em conta a interação de cada um dos elétrons independentemente com o núcleo, e com restante dos elétrons do átomo, dando origem as diferentes configurações possíveis. Em seguida a repulsão intereletrônica ( $H_{\text{re}}$ ) atua como perturbação na degenerescência das diferentes configurações dando origem aos termos espectroscópicos que na representação de momento angular são rotulados pelo símbolo  $^{2S+1}L$  onde S e L são os momentos angulares totais de spin e orbital respectivamente. O Hamiltoniano de acoplamento spin-órbita ( $H_{\text{SO}}$ ) atua perturbando a degenerescência dos termos levando aos níveis  $^{2S+1}L_J$  onde J é o momento angular total. A figura 3.2.2 mostra um esquema com a ordem de grandeza destas diferentes perturbações. A figura mostra também o efeito do campo cristalino, ou seja, o potencial criado pelos átomos vizinhos e que pode quebrar a degenerescência dos níveis em até  $2J+1$  subníveis "Stark" se o número de elétrons f é par e  $J+1/2$  subníveis se o número de elétrons f é ímpar.



**Figura 3.2.2:** Ordem de grandeza (valores aproximados) das energias associadas aos hamiltonianos originados da teoria da perturbação aplicada à configuração  $4f^6$  do íon európio; conf= configuracional, re= repulsão eletrônica, so= spin-órbita

#### Híbridos U600-ZrAMA-EuCl<sub>3</sub>

A figura 3.2.3 apresenta alguns espectros de emissão obtidos para a solução aquosa de cloreto de európio e para as amostras obtidas pela adição da solução de  $\text{Eu}^{3+}$  ao sol Z50.



**Figura 3.2.3:** Espectros de emissão obtidos para: (a) solução aquosa de  $\text{Eu}^{3+}$ ; (b) sol Z50:Eu<sup>3+</sup>  $\lambda_{\text{exc}}=345\text{nm}$ ; (c) sol Z50  $\lambda_{\text{exc}}=394\text{nm}$  e (d) sol Z50  $\lambda_{\text{exc}}=464\text{nm}$ .

O espectro da figura 3.2.3(a) da solução precursora foi obtido sob excitação em 394nm que corresponde a transição  ${}^7F_0 \rightarrow {}^5L_6$  do  $\text{Eu}^{3+}$  (níveis de energia na Figura 3.2.2).

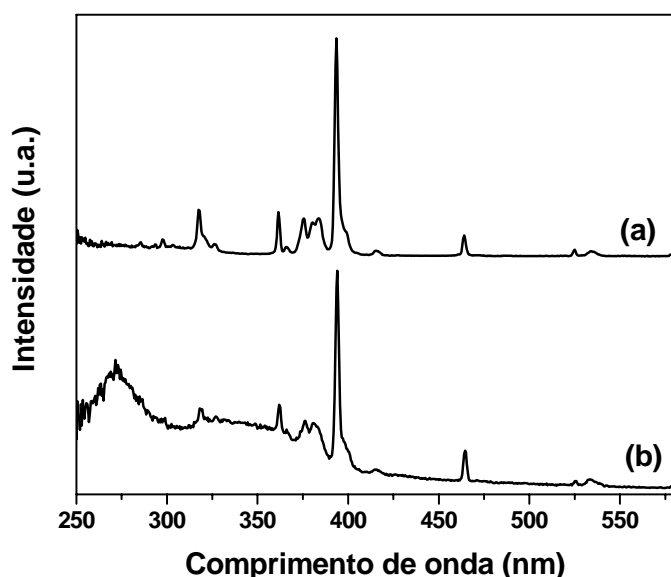
As bandas observadas correspondem a emissão a partir do estado excitado  ${}^5D_0$  para os diferentes multipletes de mais baixa energia. Os números na figura correspondem aos valores de J dos diferentes níveis  ${}^7F_J$ . A maior intensidade relativa é observada para a transição  ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_1$  com máximo em 592,5nm. Como conhecido na literatura o espectro corresponde ao equilíbrio entre espécies de  $\text{Eu}^{3+}$  coordenadas a 8 e 9 moléculas de água num arranjo de alta simetria que faz com que a transição  ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_2$  apresente baixa intensidade. Em geral considera-se a razão de intensidades entre as transições  ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_2$  e  ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_1$  como uma medida da assimetria da primeira esfera de coordenação do  $\text{Eu}^{3+}$ . Quanto maior este número mais afastado de uma simetria com centro de inversão está o sítio ocupado pelo íon metálico.

Em relação aos espectros obtidos para a matriz híbrida contendo  $\text{Eu}^{3+}$  (Figuras 3.2.3 b-d), da mesma forma que observado anteriormente para o híbridos U600 contendo  $\text{Eu}^{3+}$  [FERREIRA, *et. al.*, 2001; ANDRÉ, 2002; MOLINA, 2003a] a figura mostra uma banda larga devida a matriz conforme detalhado anteriormente, e as bandas relativamente mais finas atribuídas as transições do  $\text{Eu}^{3+}$ . Em relação ao observado para a solução aquosa, a relação de intensidades entre as transições  ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_1$  e  ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_2$  é invertida ou seja a transição  ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_2$  é a que apresenta maior intensidade. A interação entre o  $\text{Eu}^{3+}$  e a matriz híbrida é assim evidenciada.

A banda larga se desloca para menores energias na medida que o comprimento de onda de excitação aumenta conforme observado para as amostras que não contém  $\text{Eu}^{3+}$ . Além disso a intensidade relativa entre a banda de emissão da matriz híbrida e as bandas típicas do európio é fortemente dependente do comprimento de onda utilizado para excitação da amostra. As linhas do íon európio aparecem mais fortemente quando a excitação é feita em regiões de menores energias do espectro. A dependência da intensidade relativa entre banda larga e linhas do európio é provavelmente associada com a ativação e desativação de processos de transferência de energia entre centros doadores (matriz híbrida) e centros aceptores (íon európio) [FERREIRA, *et. al.*, 2001; ANDRÉ, 2002; MOLINA, 2003a]

A Figura 3.2.4 apresenta os respectivos espectros de excitação monitorados nos comprimentos de onda referentes aos máximos de emissão de cada espécie.

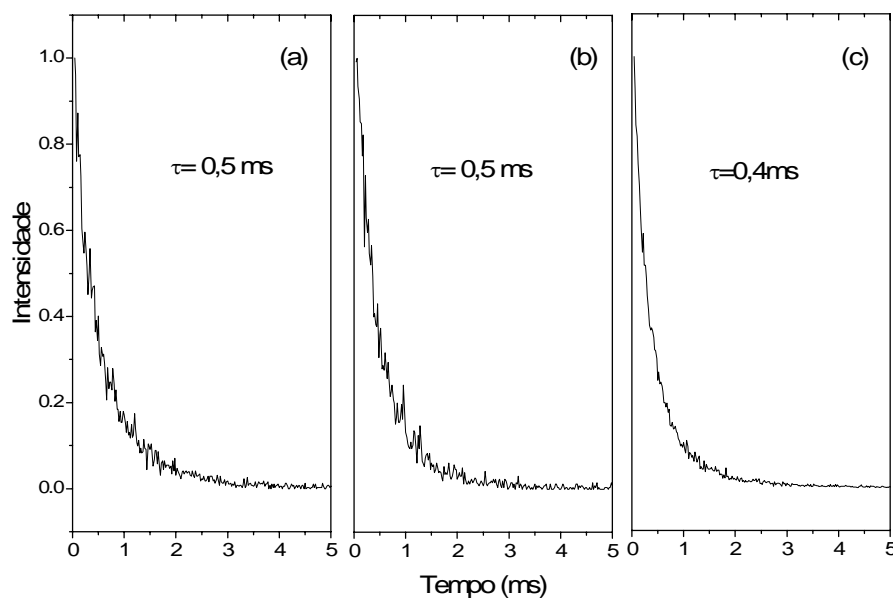
Para a solução aquosa (Figura 3.2.4(a)) observam-se linhas finas que podem ser atribuídas a transições a partir do estado fundamental  ${}^7F_{0,1}$  para os estados excitados da configuração  $4f^6$  (Figura 3.2.2). O máximo de excitação é observado em 394 nm que corresponde a transição  ${}^7F_0 \rightarrow {}^5L_6$ .



**Figura 3.2.4:** Espectros de excitação do (a) solução de cloreto de európio em solução e (b) sol Z50:Eu<sup>3+</sup>

Para a amostra Z50 pode-se observar uma banda larga que se estende de 250 a 400 nm devido a excitação via matriz.

A figura 3.2.5 apresenta as curvas de decaimento obtidas para as amostras Z40, Z50 e Z60 com excitação em 394nm (transição  ${}^7F_0 \rightarrow {}^5L_6$ ) e a emissão em 612 nm (transição  ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_2$ ).



**Figura 3.2.5:** Decaimento de emissão em função do tempo para (a) Z40:Eu<sup>3+</sup>; (b) Z50:Eu<sup>3+</sup> e (c) Z60:Eu<sup>3+</sup> ( $\lambda_{EXC}=394$  nm e  $\lambda_{EM}=612$  nm).

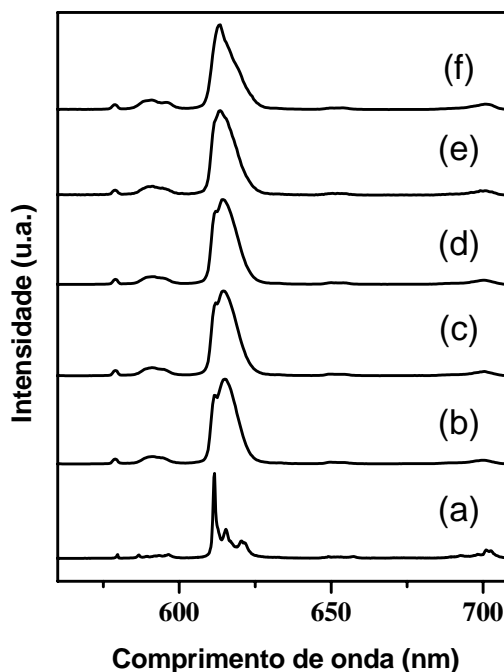
As curvas não seguem um decaimento exponencial e por essa razão um tempo de vida médio foi obtido e é apresentado nas figuras. Em comparação com o valor de 0,18ms obtido anteriormente [MOLINA, 2003a] para o híbrido U600 pode-se dizer que a presença de Zr<sup>4+</sup> contribui para o aumento do tempo de vida.

*Híbridos U600-ZrAMA-[Eu(TTA)<sub>3</sub>(H<sub>2</sub>O)<sub>2</sub>]*

O complexo formado entre  $\text{Eu}^{3+}$  e o ligante tenoiltrifluoroacetato (TTA) — diaquatris(tenoiltrifluoroacetato)europio (III),  $[\text{Eu}(\text{TTA})_3(\text{H}_2\text{O})_2]$  — é conhecido desde os anos 60 [CHARLES, *et. al.*, 1965]. Este complexo exibe forte emissão de luz avermelhada quando excitado no UV e foi inclusive utilizado nos primeiros trabalhos propondo a utilização de soluções de complexos de  $\text{Eu}^{3+}$  em laser líquidos. A utilização de ligantes orgânicos quelantes como os beta-dicetonatos impede a interação entre o íon  $\text{Eu}^{3+}$  e as moléculas de água reduzindo as perdas de energia dos estados excitados via modos vibracionais. A forte absorção de luz no UV e a transferência de energia ligante  $\rightarrow \text{Eu}^{3+}$  levam a sensibilização da emissão e este efeito é conhecido como efeito antena.

O ligante TTA foi preparado seguindo-se a metodologia descrita em [WHITE, 1976]. Foram dissolvidos 0,03 mol de tenoiltrifluoroacetona em 75 mL de etanol e em seguida foram adicionados 0,03 mol de  $\text{NH}_4\text{OH}$  (dissolvidos em 30mL de água). A esta solução foi adicionado 0,01mol de  $\text{EuCl}_3$  (dissolvidos em 120mL de água). O sistema foi deixado em repouso até se formar um sólido, que foi filtrado e seco a vácuo. Depois de seco o composto foi recristalizado em acetona, e lavado com pentano, em seguida seco novamente a vácuo e caracterizado.

A figura 3.2.6 apresenta os espectros obtidos para o complexo precursor e as amostras obtidas da incorporação do complexo à matriz híbrida.

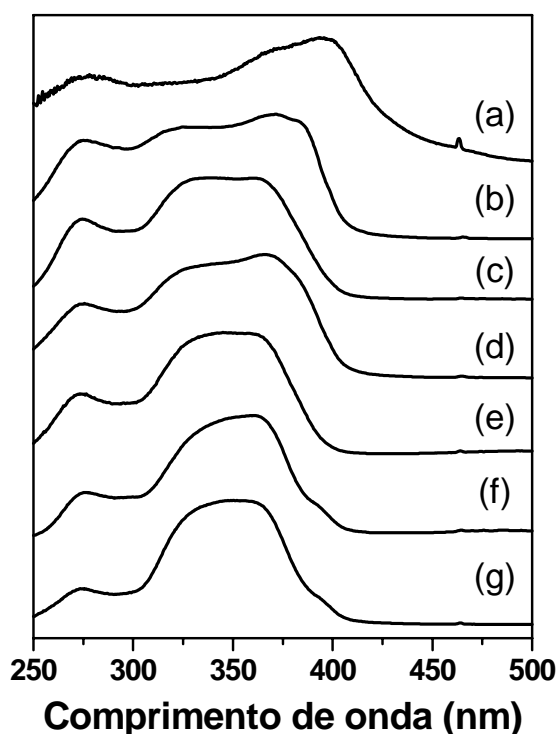


**Figura 3.2.6:** Espectros de emissão ( $\lambda_{\text{exc}} = 350\text{nm}$ ) (a) complexo  $[\text{Eu}(\text{TTA})_3(\text{H}_2\text{O})_2]$  puro e (b-f) híbridos dopados com Eu-TTA, sendo (b) Z15, (c) Z40, (d) Z50, (e) Z60 e (f) Z85.

Para o complexo  $[\text{Eu}(\text{TTA})_3(\text{H}_2\text{O})_2]$  o espectro corresponde ao apresentado na literatura para este composto. A emissão é dominada pela transição  ${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_2$  que aparece desdobrada com máximos 611,5, 615,4 e 621 nm. Na estrutura deste complexo os íons  $\text{Eu}^{3+}$  são coordenados por 8 átomos de oxigênio dispostos num antiprisma quadrado distorcido [WHITE, 1976]. A intensidade pronunciada observada para a transição  ${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_2$  tem sido interpretada como devida a contribuição importante do mecanismo de acoplamento dinâmico causado pela elevada polarizabilidade do ambiente químico, composto dos ligantes betadiconatos e água [MALTA *et. al.*, 1997].

Na figura 3.2.6(b-f) são apresentados os espectros obtidos para as amostras híbridas. Observa-se principalmente o alargamento das bandas em relação ao complexo precursor sugerindo uma distribuição de sítios para o íon  $\text{Eu}^{3+}$  resultantes portanto da interação do complexo com a matriz.

A figura 3.2.7 apresenta os espectros de excitação obtidos para as mesmas amostras.



**Figura 3.2.7:** Espectros de excitação (a)  $[\text{Eu}(\text{TTA})_3(\text{H}_2\text{O})_2]$ , e materiais dopados com o complexo: (b) híbrido U600, (c) Z15, (d) Z40, (e) Z50, (f) Z60, (g) Z85, com emissão fixada em 614nm.

Para o complexo  $[\text{Eu}(\text{TTA})_3(\text{H}_2\text{O})_2]$  (Figura 3.2.7a) o espectro é dominado por uma banda larga que se estende do UV até o visível. As bandas finas referentes a transições dentro da configuração  $4f^6$  são encobertas pela banda larga. Uma banda fina é ainda observada em 464 nm e um multiplete de baixa intensidade relativa na região de 530nm. A banda larga é atribuída a absorção da radiação incidente pelos ligantes TTA. O processo é seguido de transferência de energia para o  $\text{Eu}^{3+}$  e a forte emissão no vermelho (efeito antena). Quando o complexo é incorporado aos híbridos a banda larga no UV é modificada, sugerindo a interação com a matriz. Juntamente com a banda larga também

são observadas as linhas finas atribuídas a transições do nível fundamental  ${}^7F_0$  e os estados excitados da configuração  $4f^6$ .

Como pode-se observar, o espectro de excitação do híbrido U600 dopado com  $[\text{Eu}(\text{TTA})_3(\text{H}_2\text{O})_2]$  é deslocado para comprimentos de onda menores em relação ao complexo puro. Com a adição de ZrAMA há um aumento da contribuição relativa da componente da banda na região de 350 nm.

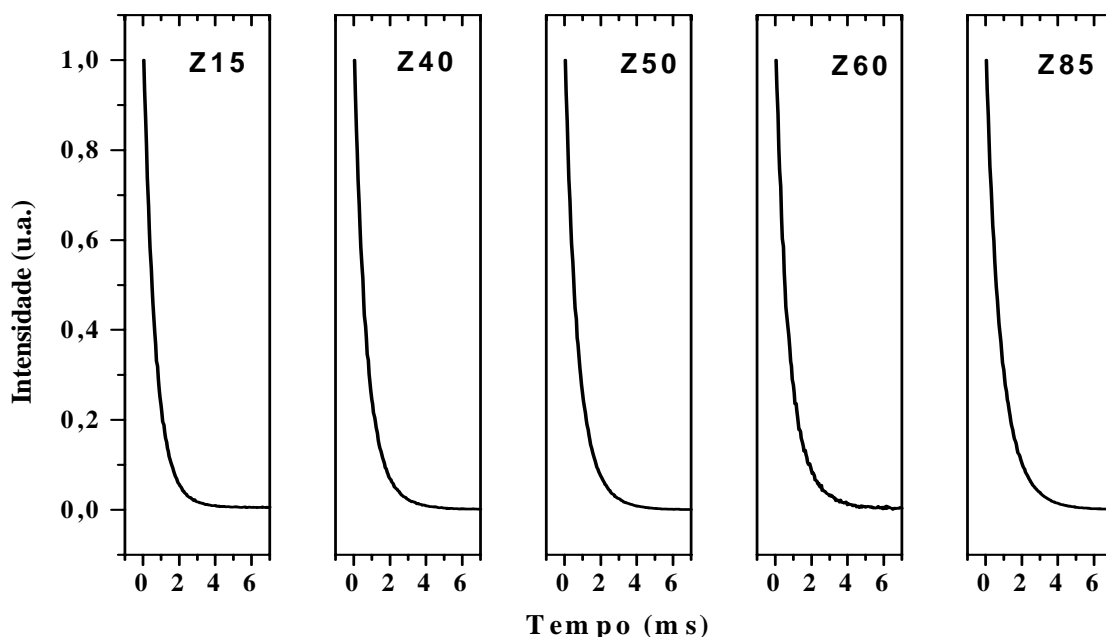
Em todos espectros de excitação observa-se a banda larga e linhas finas do  $\text{Eu}^{3+}$  referentes a transições para os níveis  ${}^5D_2$  e  ${}^5L_6$ . A intensidade relativa entre a banda larga e as linhas do  $\text{Eu}^{3+}$  podem em princípio ser tomada como uma medida da eficiência do processo de transferência de energia ligantes- $\text{Eu}^{3+}$ . Nesse sentido a eficiência aumenta quanto maior a quantidade relativa de  $\text{Zr}^{4+}$ .

Em trabalhos anteriores o efeito do híbrido U600 nas propriedades de emissão deste complexo foram estudadas [MOLINA, 2003a; MOLINA *et. al.*, 2003b]. Verificou-se intensificação da emissão devido a substituição das duas moléculas de água da primeira esfera de coordenação do  $\text{Eu}^{3+}$  por átomos de oxigênio tipo éter da matriz.

A banda larga de emissão referente a matriz híbrida não é observada sugerindo que a presença do complexo de  $\text{Eu}^{3+}$  leve a supressão desta transição.

#### Tempo de vida

Os tempos de decaimento do estado excitado  ${}^5D_0$  do íon európio foram medidos para diferentes amostras variando-se a concentração de zircônio. A excitação foi realizada em 394nm e a emissão em 612nm. Os gráficos obtidos são mostrados na figura 3.2.8:



**Figura 3.2.8:** Curvas de decaimento do estado excitado  ${}^5D_0$  dos íons európio contidos nas amostras indicadas.



As curvas apresentam decaimento exponencial de primeira ordem até o tempo de 2,5ms indicado no eixo x da figura 3.2.8. A partir desse tempo a curva apresenta comportamento exponencial, mesmo em escala logarítmica, o que indica a presença de diferentes sítios para o íon európio, com diferentes tempos de vida. O comportamento da curva varia com o aumento da concentração de zircônio nas amostras. Para amostras mais concentradas, a curva de decaimento tende a uma reta quando a escala é logarítmica, indicando a diminuição do número de sítios.

Os tempos de vida foram calculados considerando-se a média dos tempos de vida, através da determinação da área sob a curva. As curvas não apresentam decaimento exponencial e da mesma forma que para as amostras contendo cloreto de  $\text{Eu}^{3+}$  um tempo médio pôde ser calculado. A tabela 3.2.1 apresenta os resultados. Há um aumento no valor do tempo de vida com o aumento na concentração relativa de  $\text{Zr}^{4+}$

**Tabela 3.2.1:** Valores de tempo de vida médio obtidos para os híbridos contendo o complexo  $[\text{Eu}(\text{tta})_3(\text{H}_2\text{O})_2]$ .

amostra	$\tau$ exp (ms)
Z15	0,70
Z40	0,72
Z50	0,73
Z60	0,79
Z85	0,85

#### *Eficiência quântica ( $\eta$ ).*

O tempo de vida de estado excitado é obtido de medidas experimentais de decaimento de luminescência, ou seja, a curva de decaimento da intensidade da emissão em função do tempo depois de cessada a excitação. Se um estado excitado (j) possui uma população correspondente a  $N_{j0}$  (número de espécies no estado excitado, no tempo  $t=0$ ), e cada espécie emitindo um fóton por emissão espontânea decai para o estado fundamental através de um processo de primeira ordem, pode-se descrever a velocidade de despopulação como:

$$\frac{dN_j}{dt} = -kN_{j0} \quad (\text{eq. VIII})$$

ou

$$N_{jt} = N_{j0}e^{-k_j t} \quad (\text{eq. IX})$$

A intensidade de emissão é diretamente proporcional ao número de espécies no estado excitado e então a equação torna-se:

$$I_{j(t)} = I_{j(0)}e^{-k_j t} \quad (\text{eq. X})$$

onde:

$I_{j(t)}$  = intensidade de emissão no tempo t

$I_{j(0)}$  = intensidade de emissão no tempo  $t=0$

$k_j$  = constante de velocidade do decaimento

O inverso da constante de velocidade,  $k_j$ , é o tempo de vida do estado excitado  $\tau$ , ou seja o tempo decorrido para que a intensidade de emissão decaia a  $1/e$  do valor inicial.

$$\tau = \frac{1}{k_j} \quad (\text{eq. XI})$$

Se o único mecanismo envolvido na desexcitação do estado excitado  $j$  for o de emissão radiativa, a constante de velocidade  $k$  na expressão acima será dada exatamente pelo coeficiente de emissão espontânea de Einstein  $A(i,j)$ . O inverso do coeficiente de emissão espontânea é conhecido como tempo de vida radiativo,  $\tau_{\text{RAD}}$ .

Na prática entretanto, todos processos que contribuam para a despopulação do estado excitado (processos não radiativos-  $k_{\text{N-RAD}}$  e processos de transferência de energia-  $k_{\text{TE}}$ , por exemplo) estarão incluídos no valor experimental de  $k$ , somados ao decaimento puramente radiativo. Se de alguma forma consegue-se separar os diferentes mecanismos contribuindo para a constante de decaimento algumas informações importantes sobre o sistema em estudo podem ser obtidas.

A comparação do tempo de vida experimental com aquele obtido pelo inverso da probabilidade de transição radiativa, ou coeficiente de emissão espontânea de Einstein, é uma medida da eficiência quântica  $\eta$  do nível ( $\eta = \tau_{\text{EXP}}/\tau_{\text{RAD}}$ ). No caso do  $\text{Eu}^{3+}$  o coeficiente de emissão espontânea pode ser facilmente obtido a partir dos espectros de emissão.

A intensidade integrada,  $I(i,j)$ , de cada banda de emissão referente a transição entre estados  $i$  e  $j$  é dada por:

$$I = h\nu A_{0-J} \approx S \quad (\text{eq. XII})$$

onde a intensidade  $I(i,j)$  é a intensidade da banda,  $h$  é a constante de Planck,  $\nu$  é o número de onda da transição e  $S$  é a área da banda

Para as transições a partir do nível  $^5D_0$  do  $\text{Eu}^{3+}$  tem-se:

$$I_{0-J} = h\nu_{0-J} A_{0-J} \quad (\text{eq. XIII})$$

onde  $J$  refere-se aos níveis  $^7F_J$  ( $J=0, 1, 2, 3, 4, 5$  e  $6$ ).

Os coeficientes de emissão espontânea podem ser obtidos da relação de áreas entre as bandas de um espectro de emissão:

$$\frac{S(0,J)}{S(0,1)} = \frac{A(0,J)h\bar{\nu}(0,J)}{A(0,1)h\bar{\nu}(0,1)} \quad (\text{eq. XIV})$$

onde  $A(0-J)$  é o coeficiente de emissão espontânea para a transição  $^5D_0-^7F_J$ ,  $S$  são as áreas,  $\nu$  é o baricentro da banda desejada (em  $\text{cm}^{-1}$ ). A avaliação de intensidades absolutas a partir de espectros de emissão é difícil uma vez que a emissão é isotrópica. O cálculo é facilitado pelo fato que no espectro de emissão do  $\text{Eu}^{3+}$  existe uma transição que ocorre pelo mecanismo de dipolo magnético

( $^5D_0 \rightarrow ^7F_1$  em aproximadamente 590 nm). É talvez a única transição, entre todas as outras transições observadas nos espectros de todos os lantanídeos, que tem este caráter. Todas as demais ocorrem por mecanismo de dipolo elétrico ou apresentam contribuição dos dois mecanismos. O fato importante é que sendo uma transição de dipolo magnético a intensidade da banda observada experimentalmente não deve depender do ambiente químico onde se encontra o  $\text{Eu}^{3+}$ . Esta banda pode então ser usada como uma referência interna para o cálculo de intensidades e coeficientes de emissão.

O coeficiente de emissão espontânea de Einstein pode ser diretamente obtido do coeficiente calculado no vácuo e o índice de refração,  $n$  ( $A_{01}=15.n^3$ ). Desta forma o valor de  $34,4 \text{ s}^{-1}$  é obtido para  $A_{01}$  em água.

De posse de todos os  $A(0,J)$  pode-se obter o coeficiente de emissão espontânea total para o nível  $^5D_0$ , que será dado por:

$$A_T = \sum A(0,J) = A(0,0) + A(0,1) + A(0,2) + A(0,3) + A(0,4) \quad (\text{eq. XV})$$

Como não são observadas experimentalmente as bandas referentes às transições  $^5D_0 \rightarrow ^7F_{5,6}$ , os valores de  $A(0,5)$  e  $A(0,6)$  podem ser considerados muito pequenos. O tempo de vida radiativo,  $\tau_{RAD}$ , será dado pelo inverso do coeficiente de emissão espontânea total:

$$\tau_{RAD} = \frac{1}{\sum A(0,J)} \quad (\text{eq. XVI})$$

Assim, pode ser obtida a eficiência quântica de emissão para o estado excitado, que é a razão entre o tempo de vida experimental e o tempo de vida radiativo:

$$\eta = \tau_{EXP} / \tau_{RAD} \quad (\text{eq. XVII})$$

Considerando-se aproximação de que a contribuição não-radiativa para o decaimento seja devida somente à transferência de energia para os osciladores OH de moléculas de água, pode-se estimar a partir de medidas de tempo de vida, o número de moléculas de água presentes na primeira esfera de coordenação do  $\text{Eu}^{3+}$ .

No método de Horrocks determina-se o tempo de vida em soluções aquosas e em soluções de água pesada ( $\text{D}_2\text{O}$ ). Analisando os resultados obtidos para compostos com estrutura conhecida Horrocks observou que a diferença nos valores obtidos podia ser correlacionada ao número de moléculas de água na primeira esfera de coordenação do  $\text{Eu}^{3+}$ . Em água o tempo de vida do estado  $^5D_0$  é igual a  $0,12 \pm 0,01$  ms. Em  $\text{D}_2\text{O}$  obtém-se  $3,20 \pm 0,01$  ms. A fórmula empírica obtida por Horrocks é:

$$q = 1.05 \left[ \frac{1}{\tau(H_2O)} - \frac{1}{\tau(D_2O)} \right] \quad (\text{eq. XVIII})$$

onde  $q$  é o número de moléculas de água,  $\tau(\text{H}_2\text{O})$  é o tempo de vida (ms) em água, correspondente ao tempo experimental, e  $\tau(\text{D}_2\text{O})$  é o tempo de vida em  $\text{D}_2\text{O}$ , correspondente ao tempo de vida radiativo. Recentemente uma correção da fórmula foi proposta pelo próprio Horrocks:

$$q = 1.11 \left[ \frac{1}{\tau_{\text{exp}}} - \frac{1}{\tau_{\text{rad}}} - 0.31 \right] \quad (\text{eq. XIX})$$

Os resultados dos tempos de vida experimentais e teóricos, eficiência quântica e o cálculo do número de moléculas de água são apresentados na tabela 3.2.1, em função da concentração de zircônio nas amostras:

**Tabela 3.2.1:** Tempos de vida experimentais e teóricos, eficiência quântica e o cálculo do número de moléculas de água para os híbridos

amostra	$\tau_{\text{exp}}$ (ms)	$\tau_{\text{rad}}$ (ms)	$\eta$ (%)	nº moléculas de água (+ 1,0)
U600	0,57*	0,96	59	0,4
Z15	0,70	1,04	67	0,2
Z40	0,72	1,20	60	0,3
Z50	0,73	1,22	59	0,3
Z60	0,79	1,49	53	0,3
Z85	0,85	1,54	55	0,2

\* [MOLINA, 2003A]

A quantidade de água em todas as amostras, segundo os cálculos realizados é de no máximo 1 molécula de água na esfera de coordenação do íon európio, Os resultados sugerem que a adição de zircônio no híbrido U600 contribui para a diminuição da quantidade de água e portanto, para o aumento da eficiência de emissão.

## CAPÍTULO 4.

### APLICAÇÕES.

Materiais fotossensíveis são obtidos com a utilização de precursores que contenham grupos epoxi, como o GLYMO ou GPTS ( $\gamma$ -glicidiloxipropiltrimetoxissilano) ou grupos acrilato, como o MAPTS ou MPTS ( $\gamma$ -metacriloxipropiltrimetoxissilano). Esses grupos, quando submetidos a radiação UV, na presença de um fotoiniciador, podem levar a reações de polimerização e portanto à densificação do material. A iluminação por luz ultravioleta torna o material solúvel em alguns solventes e portanto é possível também criar padrões em filmes e dispositivos para a fotônica [SCHMIDT, 1994].

Na literatura siloxanos modificados por grupos acrilato ou epoxi são utilizados juntamente com suspensões de nanopartículas de zircônio ou titânio modificadas por diferentes acrilatos para a obtenção de materiais fotossensíveis. Outros materiais podem ser adicionados durante a preparação de compostos pelo processo sol-gel, como moléculas orgânicas contendo grupamentos especiais, moléculas do tipo  $\beta$ -dicetonas ou íons emissores de luz, pois o processo de densificação ocorre a baixas temperaturas.

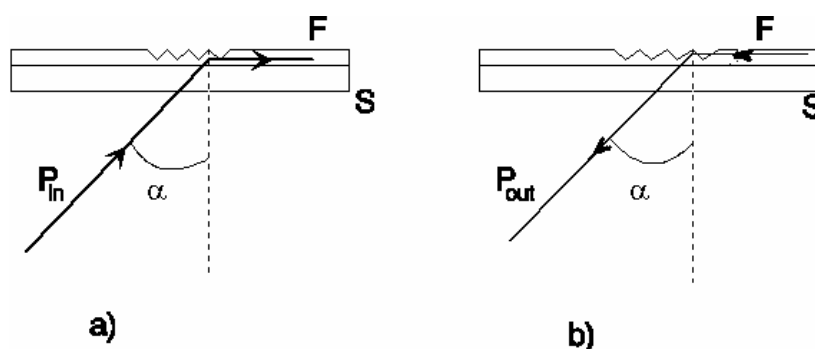
Os híbridos orgânicos-inorgânicos preparados contendo diferentes relações molares Zr:Si foram estudados em relação à fotossensibilidade, utilizando-se diferentes processos e diferentes fontes de luz. A partir dos filmes preparados, foram realizados estudos para obtenção de redes de difração e lasers DFB.

#### *Redes de difração.*

Redes de difração são modulações periódicas permanentes seja do índice de refração, seja da espessura, ao longo de uma fibra ou superfície transparente ou refletora, e que podem ser formadas pela irradiação de luz UV sobre um material fotossensível (método holográfico) [FERRARO *et. al.*, 2002; PETERS *et. al.*, 2000]. Estas redes podem ser obtidas através da impressão de um padrão em um material fotossensível, onde a parte iluminada pode ter sua *solubilidade* diferente da parte não iluminada. Após a remoção da parte solúvel, uma nova camada recobre a rede e tem-se a variação do índice de refração entre os dois depósitos. Outros materiais que modificam suas propriedades que não a solubilidade também podem ser utilizados, e a rede é obtida apenas com a gravação por fonte de luz,

sem a necessidade de remoção de material. O processo de remoção da parte não exposta à luz pode ser evitado desde que haja a formação de um gradiente de índice. A impressão pode ser feita através de máscaras ou feixes de laser em interferência, criando o padrão desejado.

Uma rede de difração pode ser construída no próprio filme F, depositado no substrato S, e pode ser utilizada para acoplar o feixe incidente com potência  $P_{in}$  no interior do guia de onda (figura 4.1(a)). Uma segunda rede de difração pode ser construída para a retirada do feixe do guia e seu direcionamento para outro ponto do circuito óptico (Figura 4.1(b)).



**Figura 4.1:** Esquema de acoplamento de um feixe de luz incidente sobre um guia de onda planar na superfície do qual foi construída uma rede de difração. (a) acoplamento do feixe do exterior para dentro do guia. (b) acoplamento do feixe do guia para o exterior.

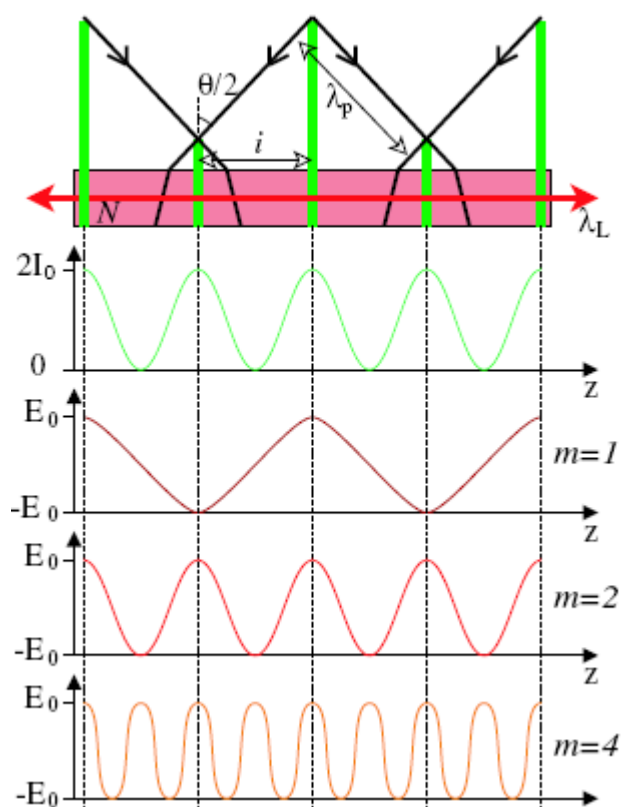
Na literatura, diversos trabalhos têm sido publicados em relação à obtenção e utilização de redes de difração. Gangopadhyay [GANGOPADHYAY, 2004] apresentou resultados da utilização de redes de Bragg em fibras como sensores de vibração, substituindo-se materiais piezelétricos. Rao [RAO, 1999] apresenta também resultados da aplicação de redes de Bragg em fibras como sensores. Resultados do uso de redes de Bragg em fibras e como aplicações em lasers DFB também são apresentados por Canning [CANNING, *in press*]. Em 1995, Tennant e colaboradores. [TENNANT *et. al.*, 1995] obtiveram redes pelo processo de litografia, utilizando-se máscaras. Makovetsky e colaboradores [MAKOVETSKY, *et. al.*, 2005] obtiveram redes de Bragg em filmes de AgCl-Ag através da irradiação por laser polarizado. Redes reversíveis, em relevo sobre filmes de azo-corantes, foram obtidas através de holografia por Fiorini [FIORINI *et. al.*, 2000]. Messaddeq e colaboradores [MESSADDEQ, *in press*] obtiveram redes de difração utilizando-se o espelho de Lloyd em amostras vítreas de  $Ga_{10}Ge_{25}S_{65}$ . Freschi e colaboradores [FRESCHI *et. al.*, 2002] obtiveram redes em fotorresinas através da superposição de padrões holográficos em processos de multiexposição.

Como pode ser observado, a variedade de materiais e metodologias utilizadas para a obtenção de redes e outros padrões em materiais como fibras e filmes têm aumentado o interesse na aplicação e no estudo desses fenômenos. O trabalho aqui apresentado mostra a obtenção de redes de Bragg por

diferentes métodos já conhecidos visando aplicações do híbrido U600 como material base no estudo de fontes de microlaseres ou lasers DFB.

#### *Laser DFB (distributed feedback).*

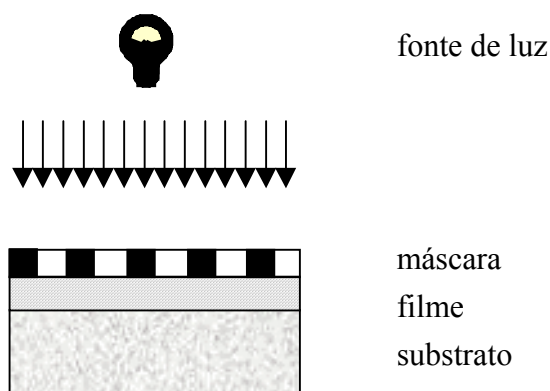
Laser DFB ou laser de ganho distribuído pode ser obtido quando um meio possui uma periodicidade induzida, que seleciona o comprimento de onda que pode existir naquele meio. As ondas que estão se propagando em fase com a periodicidade do meio são amplificadas em detrimento da perda de energia das outras ondas. Essas ondas que estão em fase são as que participam da emissão estimulada, obtida através da presença de um composto emissor de luz. A figura 4.2 ilustra esse fenômeno:



**Figura 4.2:** Princípio da retroação distribuída: o meio (índice  $N$ ) possui uma periodicidade representada no gráfico  $2I_0 \times z$ ; as curvas  $m=1, 2$  e  $4$  representam o campo elétrico das ondas de ordem  $m$  que podem se propagar nesse meio [extraído de GOUDKET, 2004].

#### **4.1. Redes de difração por litografia: lâmpada.**

A obtenção de redes permanentes por litografia foi realizada na Unicamp, no Instituto de Física Gleb Wataglin (IFGW) no laboratório da profa. Dra. Lucila Cescato. As redes de difração foram obtidas a partir de máscaras posicionadas em contato com as amostras e iluminadas com uma lâmpada de Hg ( $\lambda \sim 350\text{nm}$ ) por 30 minutos, com potência de  $15\text{mW/cm}^2$ , como mostra a figura 4.1.1:

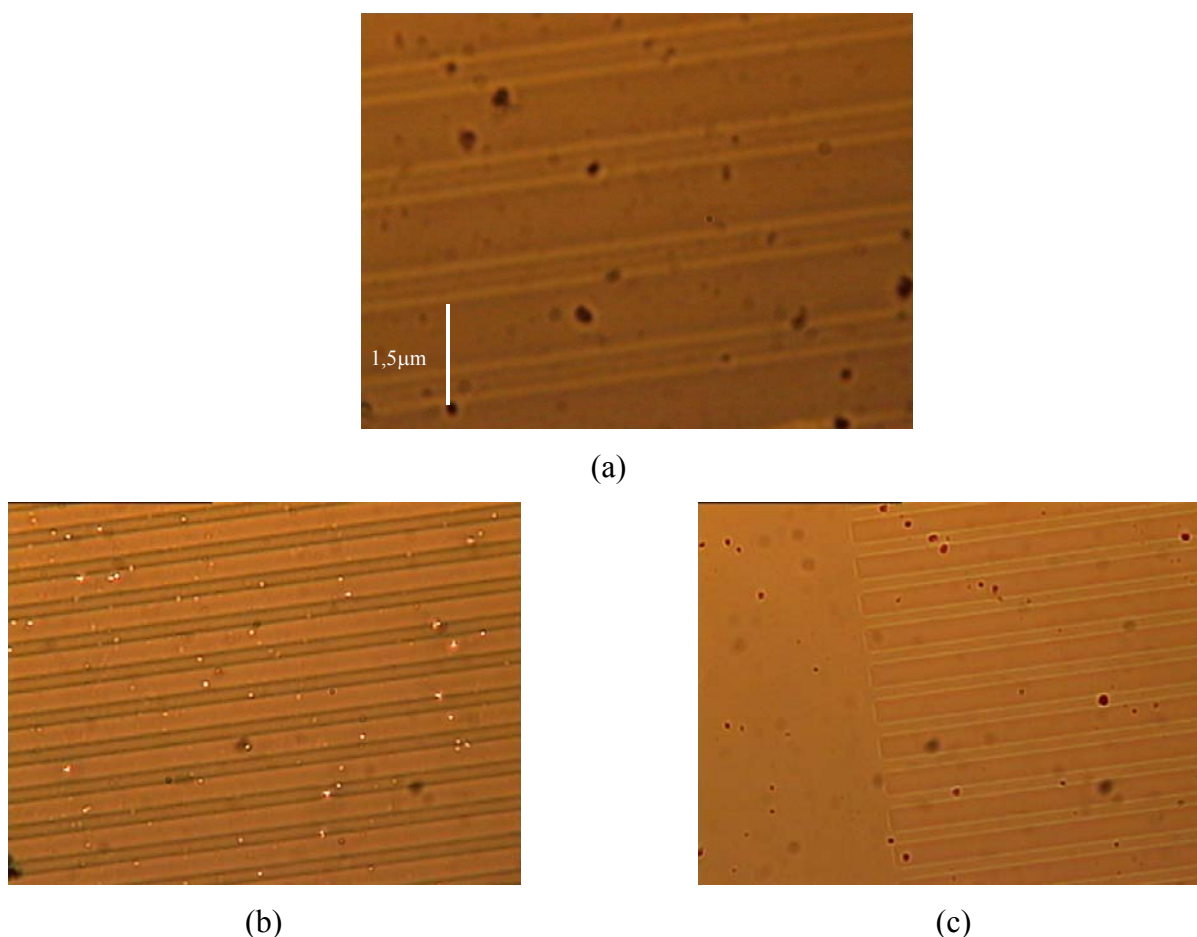


**Figura 4.1.1:** Representação do experimento de exposição das amostras sob lâmpada de Hg utilizando-se máscaras.

As amostras testadas foram as da série Z50, e apresentaram aquecimento em função da potência e do tempo de exposição da lâmpada. Para verificar se a variação da temperatura era o fator responsável pela gravação das redes, algumas amostras foram aquecidas antes da exposição na luz UV. Não houve alteração perceptível em relação às amostras anteriores, portanto foi verificado que a temperatura não era responsável pela formação das redes. As amostras foram ainda aquecidas após a gravação das redes, para verificar se poderiam ser apagadas, e não houve alteração, as redes permaneceram inalteradas. Outras redes foram gravadas por cima das mesmas amostras, a 90° uma da outra, para verificar se uma segunda gravação apagaria a primeira. Tanto a primeira quanto a segunda rede permaneceram nas amostras; as redes obtidas foram do tipo permanentes.

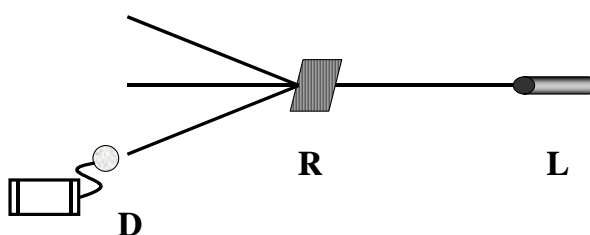
A qualidade dessas redes gravadas e as medidas da altura do relevo formado foram determinadas. A qualidade foi verificada por microscopia óptica (IQ-UNESP da Unesp) e pela medida de eficiência relativa de difração (a eficiência é a porcentagem de iluminação incidente que é difratada para formar a imagem) A figura 4.1.2 mostra o aspecto das redes obtidas:





**Figura 4.1.2:** Microscopia óptica das redes de difração de uma amostra, obtidas por litografia: as escalas são idênticas nas figuras (a), (b) e (c), variando-se apenas o aumento.

Para as medidas de eficiência de difração foi utilizado um laser He-Ne cujo feixe foi posicionado através da rede gravada, e as intensidades das ordens 0, +1 e -1 (respectivamente  $I_0$ ,  $I_{+1}$  e  $I_{-1}$ ) foram medidas (figura 4.1.3):



**Figura 4.1.3:** Representação da medida de eficiência de difração por transmissão: laser He-Ne (L), rede de difração gravada no filme (R) e detector posicionado nas ordens +1 e -1 (D).

Os resultados para amostras da série Z50 são apresentados na tabela 4.1.1:

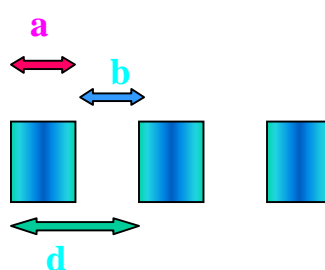
**Tabela 4.1.1:** Potências dos feixes de laser medidas nas ordens de difração de uma rede.

	$I_0$	$I_{+1}$	$I_{-1}$	Eficiência relativa*
difração por transmissão	3,66 $\mu$ W	1,50nW	1,87nW	0,05%
difração por reflexão (após recobrimento com alumínio)	2,54 $\mu$ W	10,40nW	14,90nW	0,50%

\* a eficiência foi calculada utilizando-se a média entre as ordens +1 e -1; a variação entre essas ordens deve-se ao fato da oscilação do laser.

Os resultados obtidos estão em acordo com os encontrados na literatura para a primeira ordem de difração em materiais contendo grupamentos acrilato. São encontrados valores em torno de 0,01% em ciano-azobenzeno polimetacrilato ou PC6 [RODRIGUES *et. al.*, 2006] e entre 0,01-0,2% para polímeros do tipo polifenilvinileno [KREBS *et. al.*, 2006].

O recobrimento com alumínio confirma que a rede formada apresenta alteração no relevo, e não apenas alteração de índice de refração, visto que continua a existir difração após o recobrimento da superfície da rede. Para estimar a altura da rede formada, utiliza-se um cálculo [MENDES *et. al.*, 1984] onde são necessários os parâmetros da máscara (relação de tamanho da parte clara e da parte escura) e da amostra (índice de refração e espessura), além dos valores de  $I_0$  e  $I_n$ . Os parâmetros são indicados na figura 4.1.4:



**Figura 4.1.4:** Parâmetros da máscara:  $a$  = tamanho da parte escura;  $b$  = tamanho da parte clara;  $d$  = tamanho da parte escura+clara.

O cálculo da modulação é realizado a partir da fórmula:

$$\cos(2\sigma) = 1 - \frac{I_n / I_0}{2(a/d)^2 \cdot \text{sinc}^2(N \cdot a/d) + (I_n / I_0) \cdot 2 \cdot (1 - a/d) - (a/d)} \quad (\text{eq. XX})$$

onde:

$2\sigma$  = modulação;

$\text{sinc } x = (\text{sen}(x))/x$  em radianos;

$I_n$  e  $I_0$  = intensidade das ordens de difração.

A Modulação é o processo onde um sinal principal (portadora) tem sua forma alterada, em frequência, fase ou amplitude, através de um sinal secundário (moduladora). Neste caso, o laser tem sua forma alterada pelo padrão da rede de difração. O cálculo da modulação, ou seja, a maneira pela qual a onda se adapta aos padrões da rede para que haja difração, permite encontrar o valor da altura ( $h$ ) do relevo da rede:

$$2\sigma = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta n \cdot h \quad (\text{eq. XXI})$$

onde:

$\lambda$  = comprimento de onda do laser usado para medir a difração (a unidade de  $\lambda$  é a mesma de  $h$ );

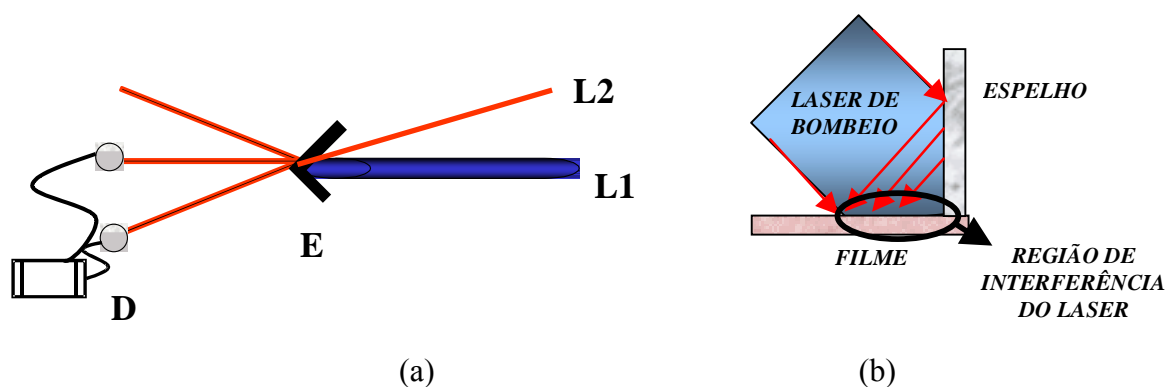
$\Delta n$  = diferença de índice de refração entre a parte iluminada e a não iluminada;

$h$  = altura do relevo.

O valor da altura foi obtido para uma das amostras. Os parâmetros utilizados foram:  $I_1/I_0 = 0,0084$ , máscara com  $a/d=1/2$ ,  $\Delta n=0,529$  e  $\lambda=633\text{nm}$ . A altura determinada do relevo da rede de difração foi de 5,5 nm.

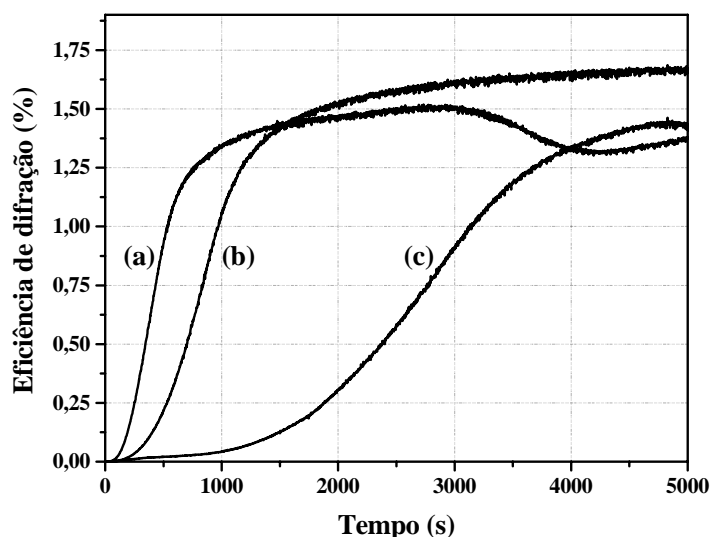
#### 4.2. Redes de difração por holografia: laser contínuo.

A obtenção de redes de difração com laser contínuo foi realizada no Instituto de Física da USP - São Carlos, no laboratório do prof. Dr. Máximo Siu Li. Foram realizados experimentos com um laser de kriptônio multiline no UV com  $\lambda=337,5$  350,7 e 356,4nm, em três séries de amostras: Z85, Z50 e Z15 onde as redes de difração foram gravadas utilizando-se uma montagem simplificada do Espelho de Lloyd. Um laser He-Ne foi utilizado para acompanhar a formação da rede em tempo real (figura 4.2.1):



**Figura 4.2.1:** Representação (a) da medida de eficiência de difração em função do tempo (onde L1=laser no UV, L2=laser He-Ne, E=espelho de Lloyd e D=detector) e (b) detalhe do espelho de Lloyd.

Tanto a intensidade dos feixes difratados de ordem zero quanto os de ordem 1 foram coletados durante toda a medida, e os gráficos de eficiência de difração em função do tempo são apresentados na figura 4.2.2:



**Figura 4.2.2:** Eficiência de difração em função do tempo de gravação das redes das amostras (a)Z85, (b)Z50 e (c)Z15. Potência do laser usado para gravação das redes = 400mW.

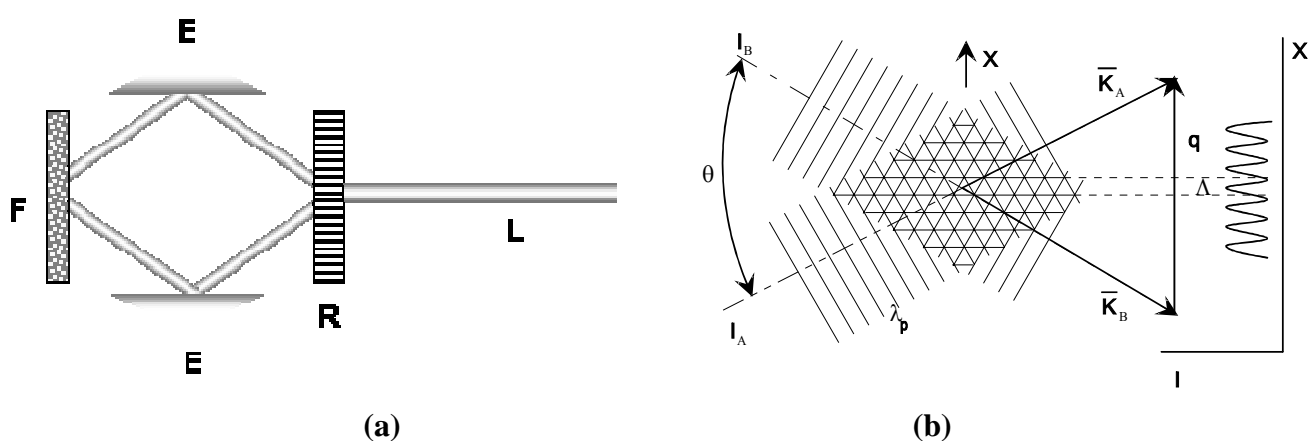
Observa-se que amostras com concentração de zircônio maiores aumentam rapidamente a eficiência de difração. Isso deve-se provavelmente ao fato de o zircônio estar coordenado ao ácido metacrílico, o qual polimeriza na presença de luz UV, mudando a estrutura química local e formando assim uma estrutura periódica mais bem definida. Após certo tempo de exposição, as curvas de eficiência atingem praticamente o mesmo valor e comparando-se amostras de diferentes concentrações Zr:Si, a influência do híbrido U600 não aparece, e portanto não é esclarecida nesta análise.

Este valor para o qual a eficiência de difração tende (aproximadamente 1,5%) indica o ponto de saturação do material. Esse ponto pode significar que não ocorre mais reação química de polimerização nos grupos acrilato do material. Se a incidência do laser persistir, pode ocorrer reação química por todo o material, o que provocaria a diminuição da eficiência de difração, visto que todo o material atingiria o mesmo índice de refração final.

### 4.3. Redes de difração por holografia: laser pulsado.

Os ensaios de gravação de redes de Bragg com laser pulsado foram realizados na PUC- Rio de Janeiro nos laboratório do Prof. Luiz Carlos Guedes Valente com o auxílio da Dra. Adriana Triques.

A figura 4.3.1 mostra de maneira esquemática a iluminação das amostras pelo padrão de interferência, e como é possível o controle do padrão a ser formado com o ângulo de incidência dos feixes de luz sobre a superfície.

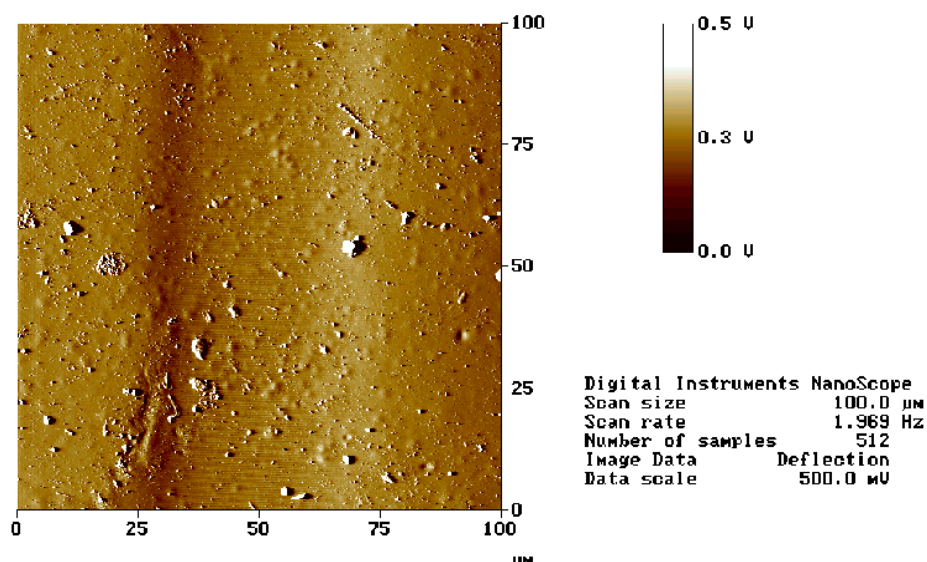


**Figura 4.3.1:** (a) Montagem utilizada para obtenção de redes de difração: F=filme, E=espelho, R=rede de difração, L=laser; (b) esquema de produção de uma rede de difração pela interferência de duas ondas planas - o período  $\Lambda$  é definido pelo ângulo  $\theta$ .

Na montagem utilizada (a), a divisão do feixe de luz do laser é feita através de uma rede de difração; uma porção dos feixes difratados na ordem 1 da rede foi refletida através de dois espelhos simétricos e recombinada sobre a amostra. Os feixes de luz laser incidentes na amostra interferem de forma a produzir um campo modulado de luz, uma "rede de interferência". Se o material sobre o qual incide este campo modulado é fotossensível, as regiões de interferência construtiva e destrutiva serão sensibilizadas de maneira diferente e uma rede holográfica pode ser construída. O ângulo  $\theta$  define o período  $\Lambda$  da rede formada. Por outro lado, se o laser incidente é de alta potência, a parte orgânica pode decompor-se com o mesmo período  $\Lambda$  e a rede formada será uma rede em volume, com vales e cristas, como mostrado nas imagens de microscopia de força atômica a seguir.

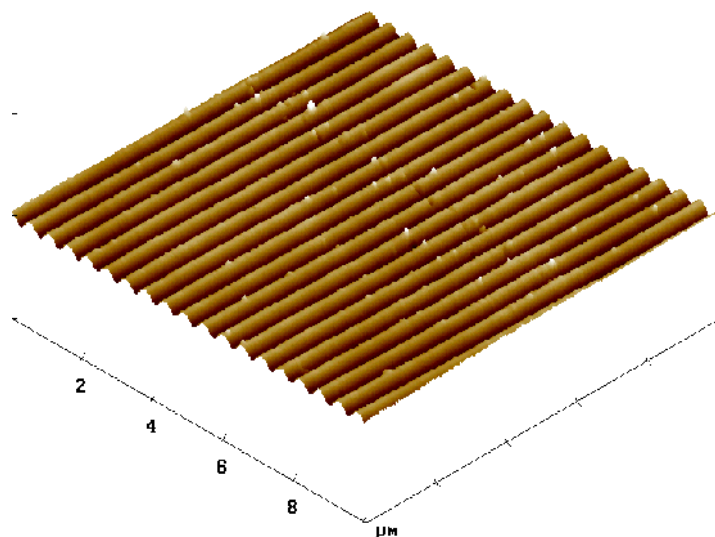
Utilizou-se filmes depositados sobre substratos de vidro por *spin-coating*, a partir da composição Z85, preparada a partir dos óxidos de zircônio e do híbrido U600, além de fotoiniciador irgacure 184. O sistema utilizado foi montado de maneira que as redes gravadas apresentassem períodos de 532nm (estimativa). Utilizou-se um laser de Nd-YAG (266nm) pulsado (largura de pulso de 4ns, frequência de 20Hz) e potência de 20-30mW. Os tempos de exposição foram de 15, 30 e 45s ou 1, 2 e 3 min em diferentes regiões de uma mesma amostra. Redes de dimensões de 1 mm foram gravadas em cada ensaio.

Os materiais obtidos foram caracterizados por microscopia de força atômica- AFM (UFSCAR - São Carlos). A figura 4.3.2 mostra o aspecto da rede na superfície do filme.

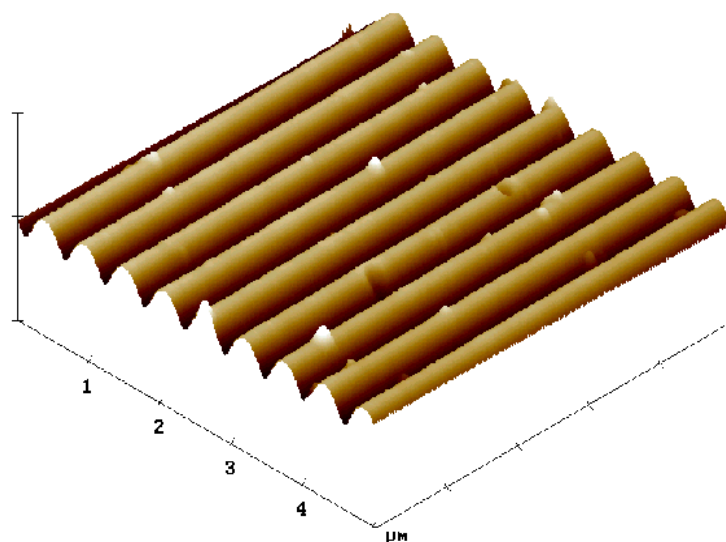


**Figura 4.3.2:** Imagem de AFM da formação das redes por exposição ao laser por 45s; escala 0-100μm.

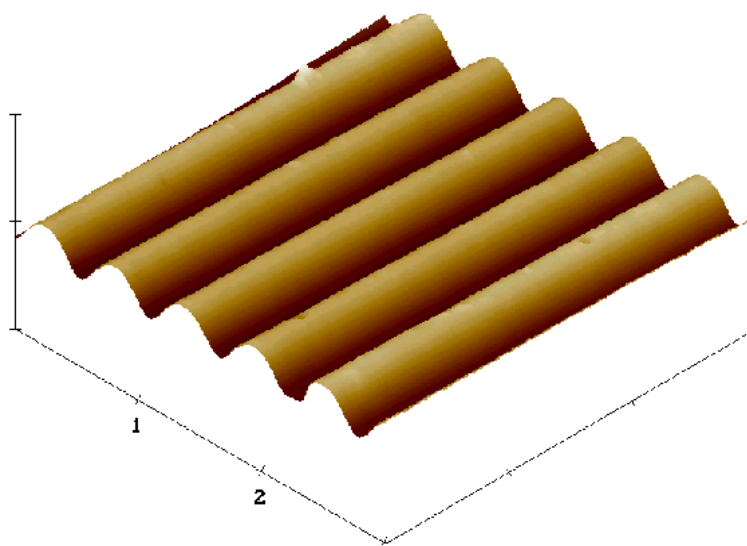
Observa-se que a rede está situada em um nível abaixo da superfície do filme, indicando a provável abrasão do material. A construção de padrões em superfície de polímeros por abrasão a laser é conhecida e bastante utilizada [DYER *et. al.*, 1996]. Nestas amostras os resultados obtidos foram bastante satisfatórios, pois as redes foram formadas com a incidência do laser por apenas alguns segundos. As figuras 4.3.3, 4.3.4 e 4.3.5 mostram outras imagens obtidas.



**Figura 4.3.3:** Imagem de AFM das redes formadas por exposição ao laser por 45s; escala 0-10μm.



**Figura 4.3.4:** Imagem de AFM das redes formadas por exposição no laser por 4min; escala 0-5 $\mu$ m.



**Figura 4.3.5:** Imagem de AFM das redes formadas por exposição no laser por 45s; escala 0-3 $\mu$ m.

É possível a observação de grãos na superfície das amostras, que podem ser devidos à própria composição da amostras (eventuais precipitados de sais ou óxido de zircônio por exemplo). As redes, entretanto, foram formadas satisfatoriamente.

As distâncias entre as cristas e suas alturas foram determinadas pelo equipamento e estão na tabela 4.3.1. O período obtido para a rede coincide com o previsto pelo arranjo experimental dos espelhos.

**Tabela 4.3.1:** Distância horizontal (período) e vertical (altura) das redes formadas nos filmes expostos ao laser e analisados por microscopia de força atômica.

filme/exposição	período (nm)	altura (nm)
f1e1 500rpm / 60s	527	14
f2 500rpm / 45s	562	25
f4 1000rpm / 45s	556	30

Após as análises apresentadas foi verificado que é possível a formação da rede através de técnicas distintas no mesmo material, obtendo-se uma rede holográfica de fase quer pela variação no índice de refração quer pela variação na espessura do filme.

#### 4.4. Redes dinâmicas e lasers DFB.

Os testes para aplicação em laser DFB foram realizados no laboratório POMA (Propriétés Optiques des Materiaux et Applications) na Universidade de Angers, França, com o prof. Dr. Jean-Michel Nunzi, o Dr. Denis Gindre e o doutorando Adrien Vésperini.

Corantes orgânicos quando incorporados nos géis pelo processo sol-gel luminescem intensamente. Os espectros de emissão dependem de diversos parâmetros como a concentração (aumento da concentração aumenta a intensidade de emissão até a concentração crítica), a quantidade de água no gel (a água causa desativação dos centros emissores por processos não radiativos) e a natureza da matriz (também pode causar desativação dos centros emissores). O estudo de propriedades ópticas dos corantes inseridos nos géis pode ser uma maneira de conhecer as propriedades destes, pois seus espectros mostram a qualidade óptica do material de suporte dos centros emissores. Esses géis oferecem numerosas possibilidades no campo de aplicação em lasers, em particular sob a forma de filmes [DESHPANDE *et. al.*, 2002; YANG *et. al.*, 2004; SAINI *et. al.*, 2005].

A emissão estimulada foi descrita por Einstein em 1917 e realizada como o primeiro laser de rubi em 1960 por T. Maiman [MAIMAN, 1960]. Desde então novas descobertas surgiram e diversos materiais para aplicações em lasers continuam sendo estudados [GOUDKET, 2004].

A pesquisa em lasers no campo da óptica integrada em materiais orgânicos poliméricos ou híbridos orgânico-inorgânicos preparados pelo processo sol-gel, dopados com corantes orgânicos tem sido bastante desenvolvida por diversos grupos de pesquisa [WANG *et. al.*, 2005; GOUDKET, 2004; SOBEL *et. al.*, 2004]. De maneira geral tanto materiais orgânicos como híbridos que são utilizados como matrizes hospedeiras não devem diminuir a eficiência de emissão dos corantes. Assim os materiais orgânicos emergiram como alternativas promissoras para uma variedade dos dispositivos que são fabricados tradicionalmente a partir de materiais inorgânicos ou semicondutores. Técnicas como a fotolitografia e micromoldagem podem ser usadas para preparar dispositivos leves e de baixo custo em materiais orgânicos em substratos lisos ou de diversas formas [GOUDKET, 2004].

Existem vantagens adicionais para lasers baseados em materiais orgânicos, tais como auto-absorção mais baixa e a fraca dependência das características do laser em relação à temperatura, incluindo o comprimento de onda da emissão e o limiar de emissão [GOUDKET, 2004].

A confecção de lasers em matrizes inorgânicas a partir de síntese química implica na necessidade de aquecimento do material a temperaturas normalmente acima de 500°C. Neste caso os



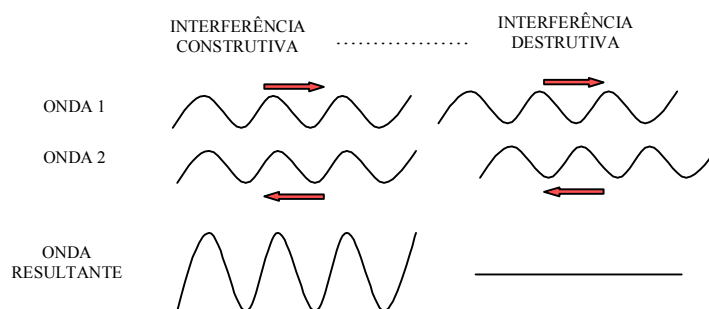
corantes orgânicos não poderiam ser utilizados. Os materiais obtidos a partir do processo sol-gel são uma alternativa para que se consiga obter materiais inorgânicos dopados com corantes, pois sua preparação não degrada os materiais ativos empregados. A união das facilidades do processo sol-gel com as características próprias dos materiais orgânicos, em um material híbrido, pode permitir a confecção de lasers de ganho distribuído ou lasers DFB com características vantajosas.

Dispositivos que utilizam o sistema DFB são largamente empregados em lasers devido a sua facilidade de fabricação [SOBEL *et. al.*, 2004; VESPERINI, 2006; OKI *et. al.*, 2002]. Um aspecto importante de estruturas DFB é que o período da rede ( $\Lambda$ ) seleciona o comprimento de onda da emissão laser segundo a relação:

$$\lambda = \frac{2\Lambda n_{eff}}{m} \quad (\text{eq. XXII})$$

onde  $n_{eff}$  é o índice de refração do modo que guia o laser e  $m$  é a ordem de difração responsável pelo efeito *feedback*. Assim, o comprimento de onda da emissão do laser pode ser ajustado dentro da banda de emissão do meio ativo. O ganho pode ser deslocado por todo o visível e infravermelho próximo de acordo com o corante utilizado [SOBEL *et. al.*, 2004; VESPERINI, 2006; GOUDKET, 2004].

A teoria que envolve os lasers de ganho distribuído ou DFB foi apresentada inicialmente por H. Kogelnik e C. V. Shank [KOGELNIK, *et. al.*, 1972; SHANK *et. al.*, 1971], que tratavam da emissão laser que acontece em um meio periódico. O meio periódico pode ser uma rede de Bragg inscrita na superfície de um guia de onda. Consideremos duas ondas que se propagam numa rede inscrita, em sentidos opostos; pode-se observar a interação entre elas, que resulta em uma onda que muda progressivamente sua amplitude:

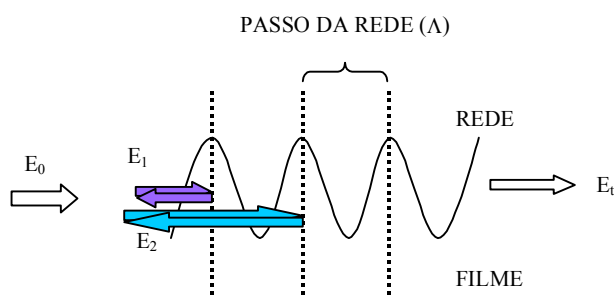


**Figura 4.4.1:** Interferência construtiva e destrutiva gerada por duas ondas que interagem.

Como elas estão se propagando dentro da rede, a interação entre elas vai ser multiplicada em cada ponto por causa da reflexão de Bragg. Isso é chamado de mecanismo de feedback, que ocorre por toda a estrutura periódica.

Devido à presença de dopantes emissores no meio, a estrutura periódica se comporta como várias microcavidades laser, onde o comprimento de onda do laser está relacionado ao tamanho da microcavidade, chamado de “passo da rede”.

Considerando-se outro fenômeno que também ocorre, a reflexão de duas ondas por dois planos sucessivos no caso de uma rede com um passo  $\Lambda$ , pode-se observar a existência de uma defasagem entre as duas ondas:



**Figura 4.4.2:** Reflexão nos planos semi-refletores sucessivos de uma rede de Bragg.  $E_0$  é o campo incidente,  $E_1$  e  $E_2$  os campos refletidos e  $E_t$  o campo transmitido [VESPERINI, 2006].

A defasagem entre os dois feixes refletidos é chamada de  $\Delta\varphi$  e é dependente do material (constante de propagação  $\beta$ ) e do tamanho do passo da rede,  $\Lambda$ : [GOUDKET, 2004; HALLIDAY *et al.*, 2002]

$$\Delta\varphi = \beta \times 2\Lambda = \frac{4\pi n_{\text{eff}} \Lambda}{\lambda} \quad (\text{eq. XXIII})$$

onde  $n_{\text{eff}}$  é o índice de refração do material do filme e  $\lambda$  é o comprimento de onda do laser de bombeio.

A condição para que haja interferência construtiva entre duas ondas refletidas é que a defasagem entre elas deve ser um número múltiplo de seu comprimento de onda, ou seja,  $\Delta\varphi = 2k\pi$ , onde  $k$  é um número inteiro. Esta é a condição de Bragg, que pode ser escrita como :

$$2n_{\text{eff}} \Lambda = k\lambda \quad (\text{eq. XXIV})$$

No caso da emissão laser DFB, o comprimento de onda que será emitido pelo laser ( $\lambda_{\text{emiss}}$ ) será o favorecido pela rede de Bragg. Assim temos:

$$\lambda_{\text{emis}} = \frac{2n_{\text{eff}} \Lambda}{k} \quad (\text{eq. XXV})$$

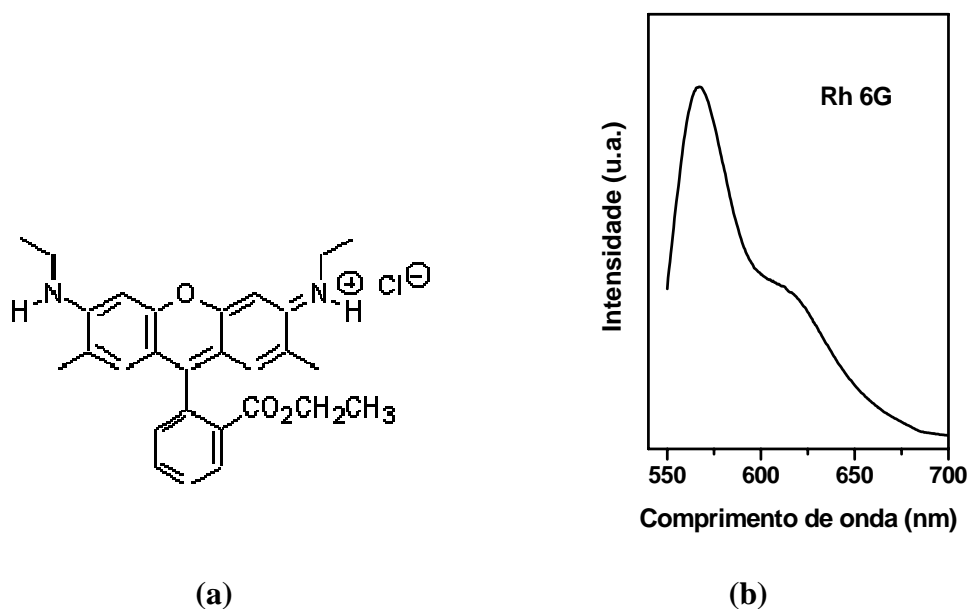
Assim podemos selecionar o comprimento de onda da emissão laser variando-se o passo da rede de Bragg.

Para os testes realizados, foram utilizados filmes dopados com Rodamina 6G. As rodaminas são os corantes mais estudados pois possuem um bom rendimento quântico e a largura espectral da banda é até de algumas dezenas de nanômetros. Isso graças à estrutura química e às diversas vibrações que ocorrem na molécula, o que propicia um alargamento da banda de emissão [GOUDKET, 2004]. Por serem compostos orgânicos, a estabilidade térmica desses materiais é menor que 110°C.

Para que esses compostos possam gerar efeito laser por emissão estimulada é necessário que a população de moléculas excitadas no meio seja superior à de moléculas no estado fundamental, e que

uma emissão espontânea inicie o processo. Para que isso ocorra, a inversão da população é realizada por laser ou flashes de luz [GOUDKET, 2004].

A figura 4.4.3 mostra a estrutura e o espectro de emissão da rodamina 6G na matriz estudada, com excitação em 532nm. A banda de emissão da rodamina quase não varia em função da relação Zr:Si das amostras.

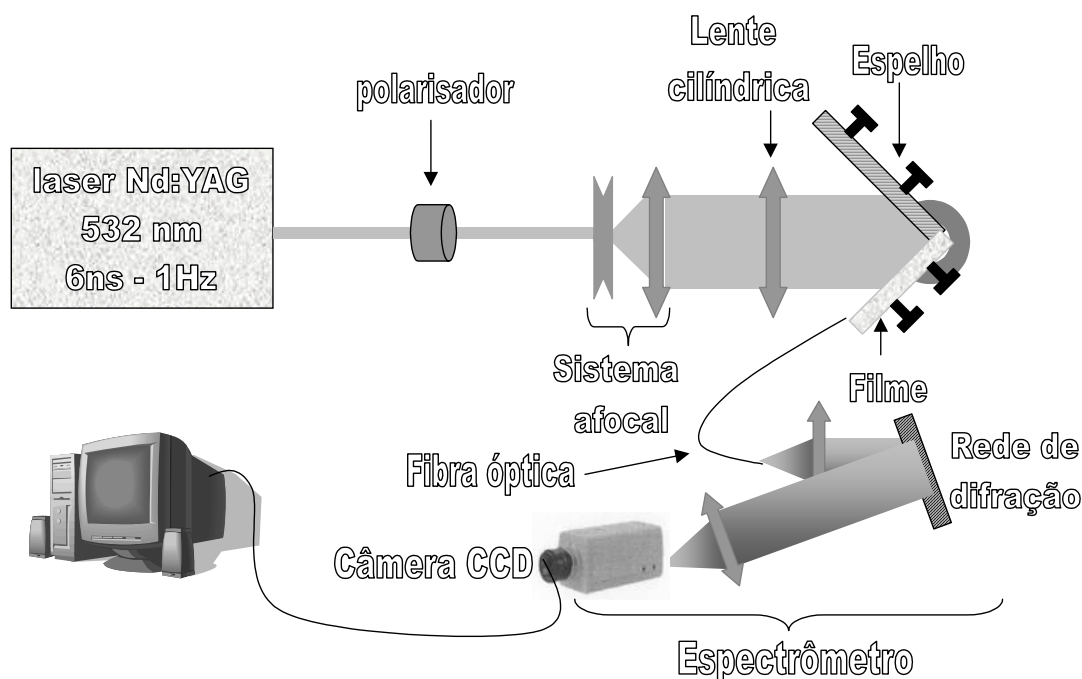


**Figura 4.4.3:** (a) Estrutura da rodamina 6G; (b) espectro de emissão da rodamina 6G, na amostra Z50, com excitação em 532nm.

A região entre aproximadamente 550 e 650 nm, onde a intensidade das bandas é maior, é a melhor região para obtenção do efeito laser. Quanto mais próximo do máximo da emissão, maior o número de fótons disponíveis e maior a probabilidade de emissão estimulada. A emissão estimulada é mais difícil de ser obtida quanto mais distante do máximo for o comprimento de onda selecionado para o efeito laser. Se o efeito laser for ajustado fora das regiões de alta absorção, será observada apenas a emissão espontânea.

Os testes para obtenção de lasers DFB foram realizados em três conjuntos de amostras: Z25, Z50 e Z75, com índices de refração menor, igual e maior que o substrato, respectivamente. Todas as amostras testadas foram preparadas contendo o corante orgânico Rodamina 6G. O laser de bombeio utilizado consiste de um laser pulsado, com duração de pulso de 35ps, frequência de 1Hz, e emite no infravermelho; foi utilizado um cristal para dobrar a frequência e o comprimento de onda obtido foi de  $\lambda=532,8\text{nm}$ . A montagem experimental utilizada inclui um Espelho de Lloyd e aparato para coleta do sinal de emissão. De acordo com o ângulo de incidência do laser em relação ao espelho, o período da rede formada varia de tamanho, e de acordo com o tamanho do período da rede, as diferentes ordens de emissão são favorecidas. Portanto, foram calculados os ângulos teóricos de incidência do laser de

bombeio para a obtenção do efeito laser no filme nas diferentes ordens. A figura 4.4.4 mostra o arranjo experimental utilizado.



**Figura 4.4.4:** Arranjo experimental utilizado na obtenção do efeito laser DFB em filmes dopados com rodamina 6G.

O ângulo é determinado tendo-se conhecimento do comprimento de onda de emissão do corante ( $\lambda_{emis}$ ), o comprimento de onda do laser usado para excitação ( $\lambda_{bombeio}$ ), o índice de refração do filme ( $n_{eff}$ ) e a ordem da emissão laser ( $k$ ):

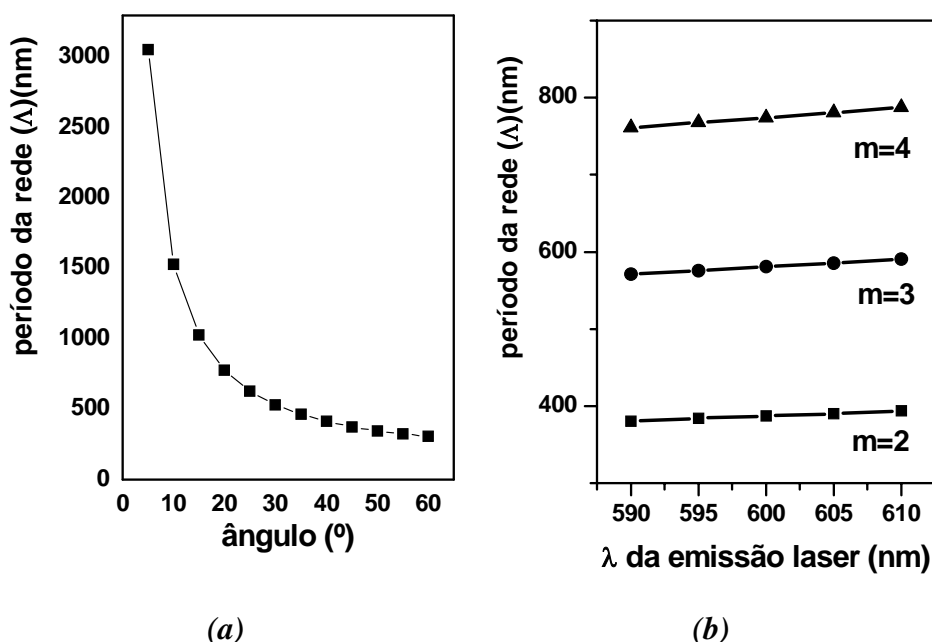
$$\lambda_{emis} = \frac{n_{eff} \lambda_{bombeio}}{k \sin \theta} \quad (\text{eq. XXVI})$$

Variando-se o comprimento de onda de bombeio, o ângulo de obtenção do efeito laser não será mais o mesmo. Essas variações tanto no ângulo de bombeio quanto no comprimento de onda permitem o ajuste do comprimento de onda do efeito laser; mas isso não significa que se pode obter o pico laser em qualquer comprimento de onda. Quando o ajuste do ângulo é realizado para que o efeito laser seja centrado na banda de fluorescência, esta é "absorvida" pelo laser, ou seja, os fótons são emitidos preferencialmente em emissão estimulada, e a fluorescência desaparece enquanto o pico laser é intenso. Quando o laser é deslocado espectralmente para perto dos limites da banda de luminescência e portanto é menos intenso, a fluorescência está presente. Após o limite da banda de fluorescência, o efeito laser não mais ocorre, pois o comprimento de onda favorecido está fora da banda de emissão e não há ganho suficiente para que ocorra este efeito.

Para as diferentes composições Zr:Si contendo rodamina 6G, os ângulos calculados (entre o feixe laser de bombeio e o espelho) são apresentados na tabela 4.4.1 e sua variação na figura 4.4.5:

**Tabela 4.4.1:** Ângulos teóricos para obtenção de emissão laser da rodamina 6G em filmes híbridos:

amostra	n	k	ângulo calculado
(Z75)	1,55	2	43,4°
		3	27°
		4	20°
(Z50)	1,52	2	42,4°
		3	26,7°
		4	19,7°
(Z25)	1,51	2	42°
		3	26,5°
		4	19,6°

**Figura 4.4.5:** Variação do ângulo(a) e do comprimento de onda do laser(b) em função do período da grade formada ( $m = \text{ordem}$ ).

A emissão laser da ordem 1 não pode ser visualizada pela montagem de Lloyd, visto que para a obtenção desta emissão, seria necessário um ângulo cujo valor de seno é maior que 1, o que é fisicamente impossível.

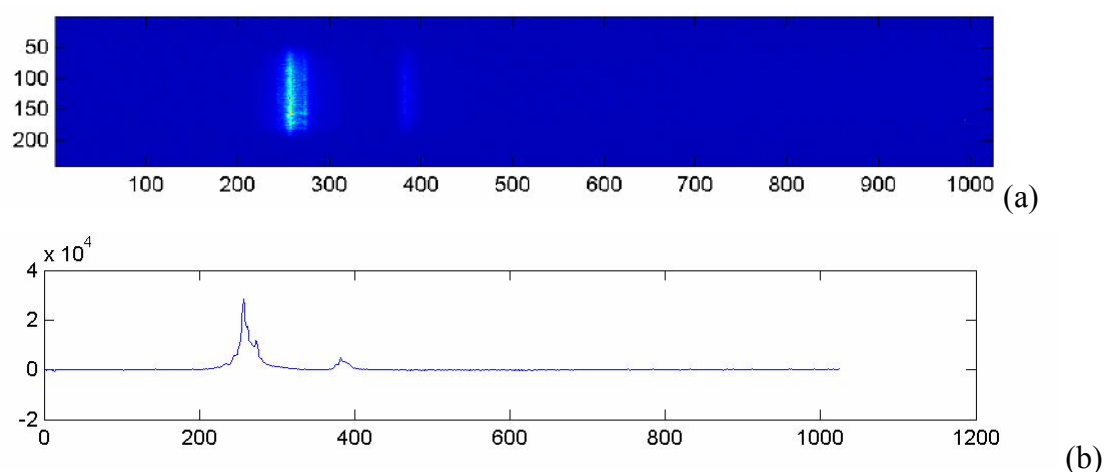
No caso da emissão laser DFB, é necessário haver uma estrutura periódica sobre o material afim de garantir a reflexão da luz. Para isso, as redes podem ser inscritas definitivamente, utilizando-se materiais fotossensíveis. Neste caso o comprimento de onda do laser emitido ficaria restrito a apenas um valor, visto que o tamanho da cavidade laser seria fixo. A dificuldade na regulagem do espelho dificultaria a obtenção do passo exato da rede inscrita. Por isso, a estrutura periódica mais utilizada é a rede temporária ou dinâmica, que é inscrita no material ao mesmo tempo em que se faz o bombeio

para a emissão laser, e com o mesmo laser sendo utilizado tanto para gravação quanto para bombeio. A regulagem é feita *in situ* o que facilita a obtenção do efeito laser.

Assim, foi utilizada a montagem conhecida como espelho de Lloyd, apresentado anteriormente na figura 4.2.1. O ângulo entre o espelho e o filme é de  $90^\circ$ . A interferência entre a parte do feixe que chega diretamente sobre o filme e a parte que é refletida pelo espelho gera uma perturbação periódica sobre a superfície do filme, e forma a rede. O ângulo entre o espelho e o laser determina o passo da rede inscrita.

O interferômetro é montado sobre um goniômetro que permite um ajuste de ângulo entre o laser e o espelho com precisão de um minuto. Possui também parafusos micrométricos nas placas onde ficam presos o espelho e a amostra para assegurar a ortogonalidade entre ambos e também com o laser incidente. Estes ajustes permitem um maior controle sobre o passo da rede a ser inscrita.

A luz emitida pelo laser é guiada e é detectada por uma fibra óptica acoplada na lateral do filme. A fibra captura a luz emitida e a transporta para um espectrômetro Huet M25 que contém uma rede de difração de 800 linhas/mm. A luz decomposta pela rede é analisada por uma câmera CCD Hamamatsu C4547-95. A câmera contém  $1024 \times 1024$  pixels, e pode ser ajustada para capturar a imagem durante  $132 \mu\text{s}$  à  $10\text{s}$ , com tamanho de imagem a ser selecionado. A imagem bidimensional selecionada capturada (figura 4.4.6) é exportada como um arquivo “.img”.



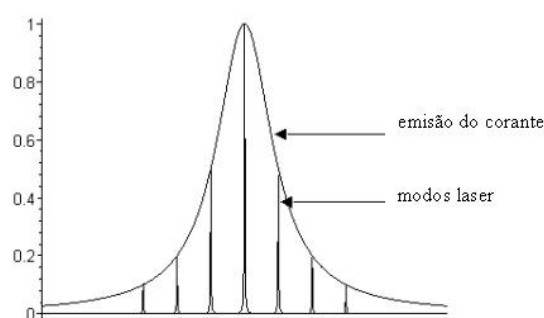
**Figura 4.4.6:** Imagem capturada pela câmera CCD, escala em pixels. (a) imagem exportada, (b) espectro correspondente.

O tratamento das imagens é realizado através do software Matlab. As imagens são inicialmente convertidas em arquivos compatíveis com o Matlab (matrizes) e depois tratadas. A conversão das imagens é feita transformando-se cada pixel da câmera em um valor ( $a_{ij}$ ) de uma matriz. Um ponto escuro resulta em um valor baixo, e um ponto claro em um valor alto, ambos arbitrários. No eixo das abscissas da imagem tem-se uma escala arbitrária em comprimento de onda, que é posteriormente calibrada. Cada valor é então convertido pelo Matlab em pontos coloridos, indo do azul para o mais

baixo até o vermelho para o mais alto. Vários espectros podem ser colocados em serie, formando então uma imagem gráfica, como será visto a seguir.

Considerando o efeito laser de uma rede de difração inscrita em um guia de onda, o número de modos de emissão laser depende então da espessura do filme, do índice de refração e de um terceiro parâmetro, o tamanho da cavidade laser. Considerando uma cavidade de tamanho  $L$ , o número de modos vai ser a quantidade de múltiplos de  $\lambda/2$ , onde  $\lambda$  são os comprimentos de onda possíveis de se obter o efeito laser dentro da cavidade  $L$ . A cavidade é portanto responsável pela seleção das frequências de ressonância do laser.

Quando um corante é utilizado como meio ativo nesta mesma cavidade  $L$ , a banda larga de emissão do corante se sobrepõe aos modos possíveis do laser, e todos os modos que estão contidos na banda do corante poderão existir dentro desta cavidade [SOBEL, 2001], como mostra a figura 4.4.8.

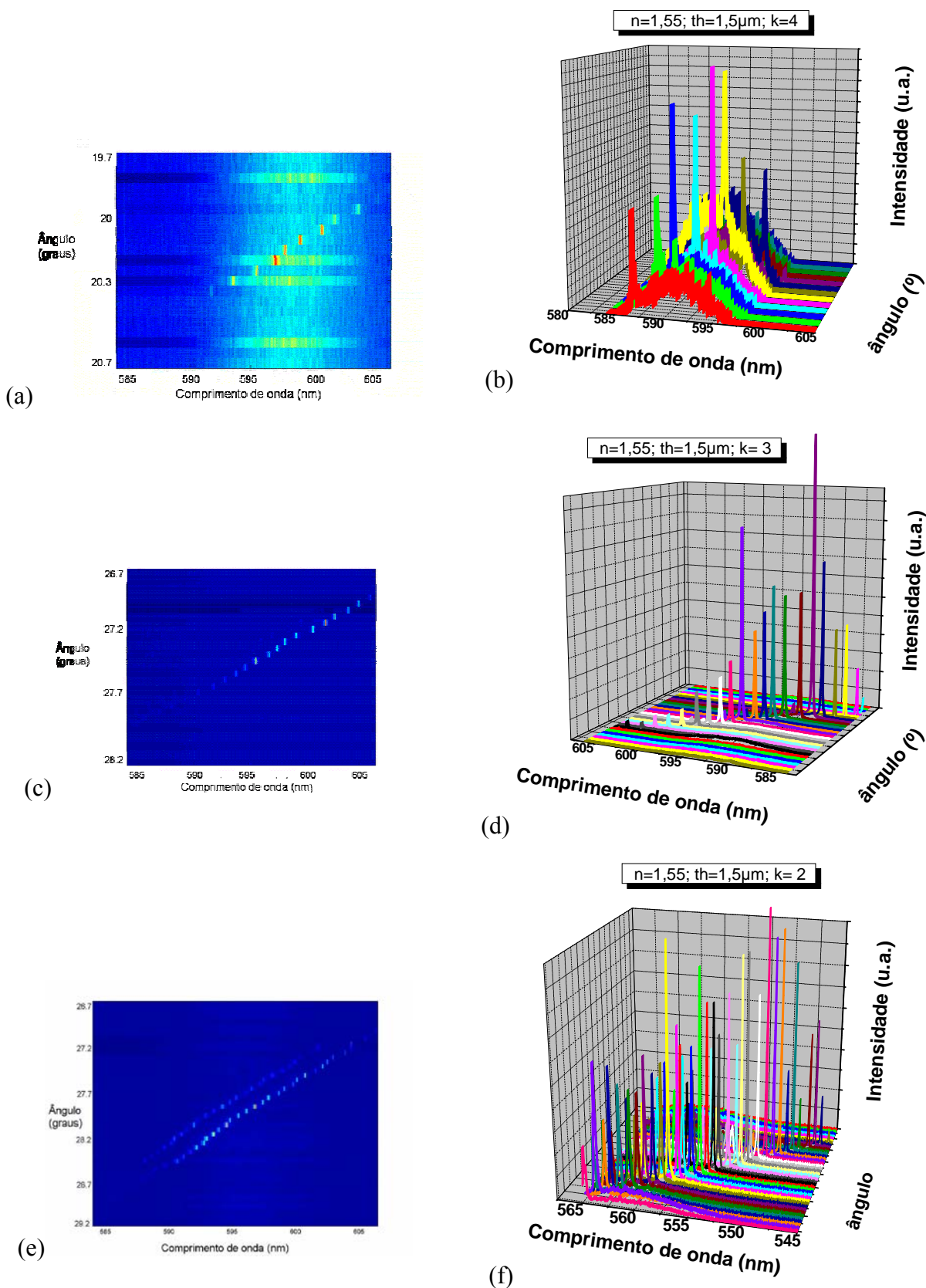


**Figura 4.4.8:** Modos possíveis de um laser corante com uma cavidade de tamanho " $L$ " [extraído de SOBEL, 2001].

Como explicado anteriormente, os modos laser podem existir também fora da banda de emissão (modos teóricos), mas o efeito laser depende do número de fótons disponíveis. Fora da banda de emissão do corante não haverá fótons suficientes para que ocorra o efeito laser.

#### *Variação da ordem $k$ .*

Os resultados obtidos são apresentados nas figuras a seguir. As figuras 4.4.9 mostram a emissão laser da amostra Z75; no eixo  $y$  tem-se o ângulo do espelho de Lloyd em relação ao laser de bombeio.



**Figura 4.4.9:** Emissão laser da amostra Z75 dopada com rodamina 6G variando-se a ordem  $k$ ; (a) e (b)  $k=4$  com ângulo próximo a  $20^\circ$ ; (c) e (d)  $k=3$  com ângulo próximo a  $27^\circ$ ; (e) e (f)  $k=2$  com ângulo próximo a  $43,3^\circ$ .



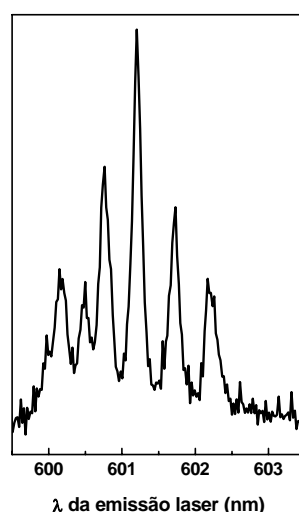
A emissão laser ocorre aproximadamente entre 593 e 605 nm para a ordem  $k=4$ , entre 590 e 606nm para  $k=3$  e entre 587 e 606nm para  $k=2$ . Nesta figura pode-se observar que a menor intensidade do efeito laser obtido possibilita o aparecimento da emissão espontânea. As linhas mais claras na figura 4.4.9(a) são essas bandas de emissão espontânea, e as marcas em vermelho são os picos laser. Na figura 4.4.9(b) o posicionamento do pico laser, que é pouco intenso nessa ordem, sobre a banda de emissão espontânea pode ser bem visualizado. Para ordens menores (c-f) o pico laser é mais intenso e a visualização da banda de emissão é mais difícil.

Pelos gráficos obtidos, percebe-se que a emissão mais intensa é a de ordem mais baixa. Na figura 4.4.9(a) observa-se em certas posições que só existe a emissão espontânea. O aumento da intensidade da emissão laser faz com que a emissão espontânea diminua até que deixe de existir, como observado na figura 4.4.9(f) (ordem 2). Isso se deve ao fato que a luz emitida torna-se cada vez mais coerente e os fótons estão em fase.

O intervalo de existência do efeito laser varia de acordo com a ordem selecionada. Para a ordem 4 o efeito laser existe durante 13nm, para a ordem 3 durante 17nm e para a ordem 2 durante 20nm. Esse estreitamento da faixa de existência do laser com o aumento da ordem  $k$  está diretamente relacionado com a diminuição da intensidade de emissão, o que diminui o número de fótons para que haja o efeito de emissão estimulada.

#### *Varição do índice de refração $n$ .*

Diminuindo-se o índice de refração da amostra, a intensidade do efeito laser diminui, e assim fica mais difícil visualizar as diferentes ordens. No caso da amostra Z25 não se observam outras ordens, visto que o índice de refração do filme é inferior ao índice do substrato. Isso modifica a característica do pico laser. O pico passa a ser menos intenso e deixa de ser um pico único (Figura 4.4.10).

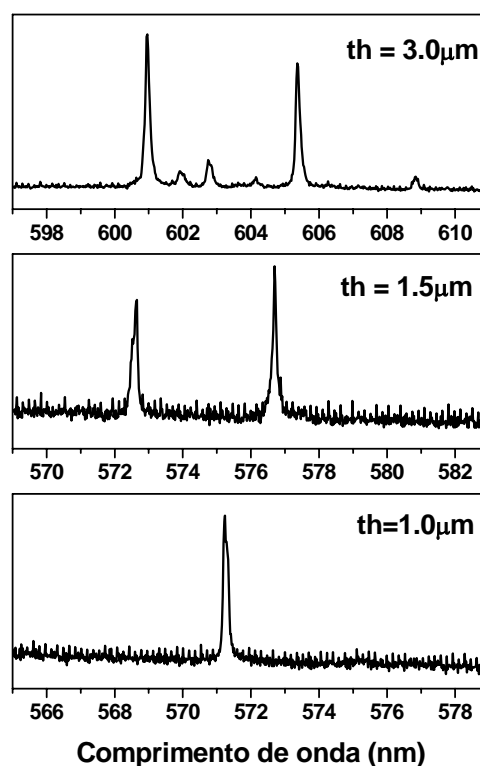


**Figura 4.4.10:** Emissão laser da amostra Z25 ( $n=1,51$ ).

De acordo com a variação do índice de refração do filme em relação ao substrato, foram observadas variações no pico laser obtido. Para os filmes da série Z75 (figura 4.4.9), com índice de refração maior que o substrato, o laser é guiado no filme e o sinal coletado mostra um pico fino. Com a diminuição do índice de refração, o pico laser é um pouco mais alargado (amostras Z50 não mostradas), onde o índice do filme é praticamente o mesmo do substrato. Nas amostras Z25 (figura 4.4.10), onde o índice de refração do filme é menor que o do substrato, o laser não pode ser guiado dentro do filme. O que ocorre é que o laser é guiado pelo ganho do próprio meio. Assim, o que se observa são picos de todas as ordens ao mesmo tempo, e de fundo tem-se a emissão espontânea amplificada. Isso diminui a intensidade do laser, pois o número de fótons em fase é menor.

#### *Varição da espessura $th$ .*

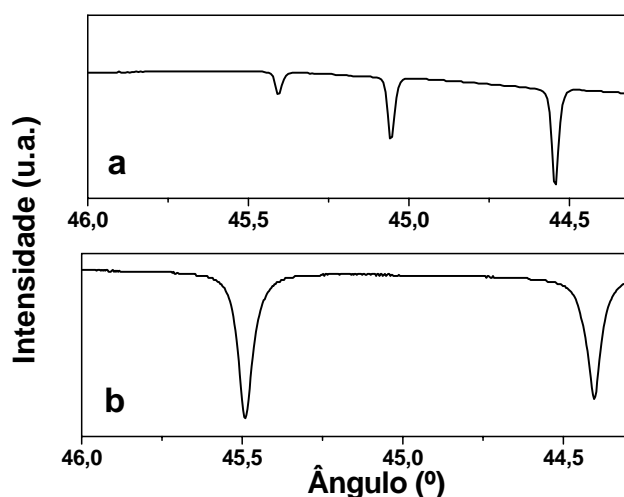
A figura 4.4.11 mostra a emissão laser da amostra Z75 para a ordem  $k=2$ ; Para diferentes espessuras o aparecimento dos picos laser é influenciado.



**Figura 4.4.11:** Formação de picos laseres em amostras da composição Z75 para diferentes espessuras ( $th$ ) indicadas na figura.

Para amostras com espessuras diferentes, o número de modos laser encontrados ao mesmo tempo, no mesmo ângulo, é coincidente com o número de modos guiados observados por m-lines nas amostras não dopadas. Assim, aumentando-se a espessura, o número de picos aumenta.

A figura abaixo mostra os modos guiados obtidos por espectroscopia m-lines, da amostra Z75 não dopada com rodamina 6G.



**Figura 4.4.12:** Modos guiados obtidos por *m*-lines da amostra Z75, utilizando-se laser de 543,5nm; as espessuras dos filmes são (a) 3  $\mu\text{m}$  e (b) 1,5  $\mu\text{m}$ .

As pequenas diferenças observadas devem-se ao fato de que os filmes utilizados para obtenção do efeito laser são dopados com rodamina 6G e apresentam portanto uma pequena variação no índice de refração em relação à amostra não dopada utilizada nas medidas de *m*-lines. Além disso existe também diferenças nos comprimentos de onda dos lasers verdes utilizados; para o efeito laser foi utilizado o laser em 532nm e para o *m*-lines em 543,5nm. Mais detalhes da técnica de *m*-lines e dos resultados obtidos com as amostras aqui estudadas estão apresentadas no anexo I.

O efeito da espessura no número de modos laser foi observado também por H. Goudket [GOUDKET, 2004]. Seus resultados mostram que o aumento da espessura aumenta a absorção e a emissão dos corantes utilizados em seu trabalho (rodamina 6G e B) e no caso da rodamina B, o espectro desloca-se para o vermelho. Outros estudos mostraram filmes de polimetilmetacrilato (PMMA) dopados com rodamina 6G e de polivinilcarbazol (PVK) dopados com o corante DCM [DUMARCHER, *et. al.*, 2000]. Seus resultados mostraram o efeito laser obtido em filmes depositados sobre substrato de vidro. Os índices dos polímeros são 1,5 para o PMMA e 1,6 para o PVK, o que limita a intensidade do pico laser, pois os índices são próximos aos do substrato.

Em relação a esses materiais e outros materiais poliméricos utilizados e já reportados na literatura, o híbrido U600 apresenta algumas vantagens: (i) sua resistência mecânica é maior devido aos átomos de silício presentes na cadeia; (ii) suas propriedades podem ser ajustadas variando-se o comprimento da cadeia orgânica (U900, U2000, etc); (iii) a solubilidade de centros emissores no híbrido é alta, sejam eles de origem puramente orgânica (como a rodamina 6G), sejam complexos (como o  $\text{Eu}(\text{TТА})_3 \cdot (\text{H}_2\text{O})_2$ ) ou sais de íons lantanídeos ( $\text{EuCl}_3$ ); (iv) são encontradas poucas moléculas de água residual após o processo de secagem, o que melhora as propriedades de luminescência; (v) sua estabilidade térmica é maior do que a maioria dos compostos orgânicos poliméricos conhecidos, o que permite ainda maior densificação do material e maior tempo de tratamento térmico para melhoria das

qualidades do filme. Além disso, quando são adicionadas diferentes proporções de ZrAMA no U600, as propriedades térmicas e mecânicas são melhoradas, além da possibilidade de um controle efetivo no índice de refração do material variando-se o teor de zircônio. Podem ser ainda inseridos materiais com propriedades fotossensíveis, o que possibilita a obtenção de redes permanentes ou dinâmicas no mesmo material.

**CAPITULO 5.****CONCLUSÕES, CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS.**

O híbrido U600 é descrito por uma estrutura bifásica de clusters de dimensões nanométricas de siloxanos correlacionados espacialmente, dispersos e localizados nas pontas da estrutura das cadeias poliméricas. Com o acréscimo das espécies a base de zircônio e ácido metacrílico observa-se um aumento do raio de giro determinado por SAXS. Isso indica que o zircônio adicionado coordena-se preferencialmente ao redor das partículas de siloxanos, contribuindo efetivamente para o aumento do tamanho das partículas dos domínios siliciosos. As distâncias entre as heterogeneidades diminuem o que pode ser explicado pela interação do zircônio também com a fase polimérica levando a ligações cruzadas e um maior enovelamento do polímero.

As curvas de SAXS obtidas para todas as amostras apresentaram o pico de correlação característicos desses híbridos. A adição de  $Zr^{4+}$  leva em princípio a um alargamento do pico indicando a dispersão nas distâncias das amostras. Para as amostras mais concentradas em  $Zr^{4+}$  (Z75, Z85) a diminuição na largura do pico sugere a organização do sistema.

Considerando-se a parte orgânica da estrutura do híbrido U600 existem dois sítios de coordenação possíveis para as interações com as espécies de zircônio sem se considerar a possível heterocondensação Zr-O-Si. Um deles é a região do grupo uréia (-NH-C=O-NH-) localizado próximo aos nanodomínios de silício, no início e no fim da cadeia. A outra região é a dos grupamentos poliéter, na região da cadeia mais distante dos centros de silício. A análise dos espectros de absorção no infravermelho sugerem a interação das espécies de zircônio com os grupos uréia da matriz híbrida que por sua vez se encontram próximos dos domínios siliciosos.

Os espectros de absorção no infravermelho apresentam uma diminuição relativa da banda referente a frequência de estiramento CO ( $1110\text{ cm}^{-1}$ ) para as amostras com maior concentração relativa de zircônio (Z75 e Z85). Este aumento pode estar relacionado a interação das espécies de zircônio na região polimérica do híbrido U600 devido à saturação das posições preferenciais próximas aos domínios de silício, havendo inclusive início de formação de zircônia cristalina, como mostrado por difração de raios X.

A adição de zircônio leva a uma diminuição relativa no grau de condensação dos grupamentos siloxanos, como foi observado pelos espectros de RMN de  $^{29}\text{Si}$ . Isso ocorre quando a quantidade de água utilizada para hidrólise não é suficiente para os dois precursores, pois altera as reações de hidrólise e condensação, e modifica a estrutura local dos nanodomínios de Si, modificando toda a estrutura do híbrido.

A luminescência observada apresenta as mesmas características já observadas anteriormente para os ureasis. Um banda de emissão larga que se estende por toda a região do visível e que apresenta características de processos de recombinação elétron-buraco, atribuída a grupamentos NH e aos siloxanos. A adição de  $\text{Zr}^{4+}$  não altera as características gerais embora um alargamento das bandas e o deslocamento para menores energias seja observado.

A banda larga de emissão também é observada para amostras contendo  $\text{Eu}^{3+}$ . Como observado anteriormente para os di-ureasis a banda larga é acompanhada da emissão característica do  $\text{Eu}^{3+}$  no vermelho do espectro. Processos de transferência de energia matriz  $\rightarrow \text{Eu}^{3+}$  puderam ser identificados pela presença de bandas largas de excitação observadas na região do UV.

O complexo  $[\text{Eu}(\text{TTA})_3(\text{H}_2\text{O})_2]$  foi adicionado aos novos híbridos e a intensificação da luminescência foi evidenciada pelas medidas de eficiência quântica. O aumento da quantidade relativa de zircônio levou a uma intensificação da emissão, além do aumento no tempo de vida e na eficiência quântica. O número de moléculas de água, determinado pelo método adaptado de Horrocks, sugere que há substituição de moléculas de água por átomos de oxigênio da matriz. As alterações importantes observadas nos espectros de excitação com a variação na composição da matriz sugerem a interação efetiva do complexo com as espécies de zircônio.

Foram obtidas redes holográficas neste novos materiais fotossensíveis quer pela variação no índice de refração quer pela variação na espessura do filme. As redes em volume obtidas por lâmpadas são formadas por contração do material. As redes em volume obtidas por lasers potentes são formadas por abrasão do material.

O efeito laser obtido a partir de amostras dopadas com rodamina constitui-se em um promissor objeto de estudos para futuros trabalhos. As amostras são de fácil preparação e as aplicações possíveis justificam um estudo detalhado voltado para esse campo.

Como perspectivas deste trabalho podem ser citados a preparação de novos sistemas híbridos para estudos aplicados em lasers, utilizando-se ou não de materiais fotossensíveis, e ainda a preparação de padrões na superfície de filmes com o objetivo de preparação de sistemas aplicáveis através de holografia e litografia. Através do estudo de materiais baratos, pode-se inclusive obter aplicações comerciais em materiais com estruturas parecidas.

Para uma fase de estudos visando a aplicação final deste material, sugere-se ainda o estudo térmico e mecânico dos materiais nas suas diversas formas (bulk, filmes, etc). Os materiais aqui

estudados são potencialmente interessantes, pelo que foi observado através destes estudos preliminares em diversas aplicações. Portanto novas caracterizações e estudos para novas aplicações podem ser realizados com sucesso, mesmo que o sistema original não seja alterado em sua composição.

Esses materiais poderiam ainda ser utilizados na proteção de superfícies especiais, devido ao controle da sua resistência mecânica, como suportes de outros materiais para aplicações em catálise e em detecções analíticas como sensores. Suas propriedades ópticas permitem ainda que se faça um estudo para aplicação desse material como memória óptica.

## CAPÍTULO 6.

## REFERÊNCIAS.

ALMEIDA, R. M.; MORAIS, P. J.; VASCONCELOS, H. C. Optical loss mechanisms in nanocomposite sol-gel planar waveguides **SPIE**, v. 3136, p. 296-303, 1997.

ANDRÉ, M. R. A. S. F. **Estrutura e luminescência de materiais híbridos orgânicos-inorgânicos modificados por iões lantanídeos**. 2002. 226 f. Tese (Doutorado em Física) - Departamento de Física, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, 2002.

AVNIR, D. Organic chemistry within ceramic matrixes: doped sol-gel materials. **Accounts of Chemical Research**, v. 28, p. 328-334, 1995.

BARALDI, A.; CAPELLETTI, R.; CASALBONI, M.; MORA, C.; PAVESI, M.; PIZZOFERRATO, R.; PROSPITO, P.; SARCINELLI, F. Effects of composition and catalyst on the optical properties of ZrO<sub>2</sub>-based ormosil films. **Journal of Non-Crystalline Solids**, v. 317, p. 231-240, 2003.

BEAUCAGE, G.; ULIBARRI, T. A.; BLACK, E. P.; SCHAEFER, D. W. **Hybrid organic-inorganic composites**. Washington: American Chemical Society, 1995. 430 p.

BEKIARI, V.; LIANOS, P. Tunable photoluminescence from a material made by the interaction between (3-aminopropyl)triethoxysilane and organic acids. **Chemistry of Materials**, v. 10, p. 3777-3779, 1998a.

BEKIARI, V.; LIANOS, P. Characterization of photoluminescence from a material made by interaction of (3-aminopropyl)triethoxysilane with acetic acid. **Langmuir**, v. 14, p. 3459-3461, 1998b.

BENATSOU, M.; CAPOEN, B.; BOUAZAOU, M.; TCHANA, W.; VILCOT, J. P. Preparation and characterization of sol-gel derived Er<sup>3+</sup>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> planar waveguides. **Applied Physics Letters**, v. 71, p. 429-430, 1997.

BERMUDEZ, V. Z.; CARLOS, L. D.; ALCÁCER, L. Sol-gel derived urea cross-linked organically modified silicates. 1. Room temperature mid-infrared spectra. **Chemistry of Materials**, v. 11, p. 569-580, 1999.

BERMUDEZ, V. Z.; FERREIRA, R. A. S.; CARLOS, L. D.; MOLINA, C.; DAHMOUCHE, K.; RIBEIRO, S. J. L. Coordination of Eu<sup>3+</sup> ions in siliceous nanohybrids containing short polyether chains and bridging urea cross-links. **Journal of Physical Chemistry B**, v. 105, p. 3378-3386, 2001.

BLASSE, G. **Luminescent materials**. Berlim: Springer-Verlag, 1994. 232 p.



- BRINKER, C. J.; SCHERER, G. W. **Sol gel science: the physics and chemistry of sol gel processing**. 2nd ed. London: Academic Press, 1990. 908 p.
- BÜNZLI, J. C. G.; CHOPPIN, G. R. **Lanthanide probes in life, chemical and earth sciences: theory and practice**. Amsterdam: Elsevier, 1989. 432 p.
- CANNING, J. Fibre lasers and related technologies. **Optics and lasers in engineering**. In press.
- CARLOS, L. D.; BERMUDEZ, V. Z.; FERREIRA, R. A. S.; MARQUES, L.; ASSUNÇÃO, M. Sol-gel derived urea cross-linked organically modified silicates. 2. blue-light emission. **Chemistry of Materials**, v. 11, p. 581-588, 1999.
- CARLOS, L. D.; FERREIRA, R. A. S.; BERMUDEZ, V. Z. An intra-Nd<sup>3+</sup> visible to infrared conversion process in hybrid xerogels. **Electrochimica Acta**, v. 45, p. 1555-1560, 2000a.
- CARLOS, L. D.; FERREIRA, R. A. S.; ORION, I.; BERMUDEZ, V. Z.; ROCHA, J. Sol-gel derived nanocomposite hybrids for full colour displays. **Journal of Luminescence**, v. 87-89, p. 702-705, 2000b.
- CARLOS, L. D.; FERREIRA, R. A. S.; BERMUDEZ, V. Z. Coordenação local do Eu(III) em híbridos orgânicos/inorgânicos emissores de luz branca. **Química Nova**, v. 24, n. 4, p. 453-459, 2001a.
- CARLOS, L. D.; FERREIRA, R. A. S.; BERMUDEZ, V. Z.; RIBEIRO, S. J. L. Full-color phosphors from amine-functionalized crosslinked hybrids lacking metal activator ions **Advanced Functional Materials**, v. 11, n. 2, p. 111-115, 2001b.
- CARLOS, L. D.; FERREIRA, R. A. S.; BERMUDEZ, V. Z. Light emission from organic-inorganic hybrids lacking activating centers. In: NALWA, H. S. **Handbook of organic-inorganic hybrid materials and nanocomposites**. California: American Scientific Publishers, 2003. v. 1, cap. 9, p. 353-380.
- CARLOS, L. D.; FERREIRA, R. A. S.; PEREIRA, R. N.; ASSUNÇÃO, M.; BERMUDEZ, V. Z. White-light emission of amine-functionalized organic/inorganic hybrids: emitting centers and recombination mechanisms. **Journal of Physics Chemistry B**, v. 108, p. 14924-14932, 2004.
- CHANG, T. C.; WANG, Y. T.; HONG, Y. S.; CHIU, Y. S. Effects of inorganic components on the structure and thermo-oxidative degradation of PMMA modified metal alkoxide-EAA complex. **Termochimica Acta**, v. 390, p. 93-102, 2002.
- CHEN, Y.; JIN, L.; XIE, Y. Sol-gel processing of organic-inorganic nanocomposite protective coatings. **Journal of Sol-Gel Science and Technology**, v. 13, p. 735-738, 1998.
- CIN, M. D.; DAVALLI, S.; MARCHIORO, C.; PASSARINI, M.; PERINI, O.; PROVERA, S.; ZARAMELLA, A. Analytical methods for the monitoring of solid phase organic synthesis. **Farmaco**, v. 57, p. 497-510, 2002.
- CORREIA, S. M. G.; BERMUDEZ, V. Z.; SILVA, M. M.; BARROS, S.; FERREIRA, R. A. S.; CARLOS, L. D.; ALMEIDA, A. P. P.; SMITH, M. J. Morphological and conductivity studies of di-ureasil xerogels containing lithium triflate. **Electrochimica Acta**, v. 47, p. 2421-2428, 2002.

- CORREIA, S. M. G.; BERMUDEZ, V. Z.; SILVA, M. M.; BARROS, S.; FERREIRA, R. A. S.; CARLOS, L. D.; ALMEIDA, A. P. P.; SMITH, M. J. Sol-gel derived POE/siliceous hybrids doped with Na<sup>+</sup> ions: morphology and ionic conductivity. **Solid State Ionics**, v. 156, p. 85-93, 2003.
- DAHMOUCHE, K.; CARLOS, L. D.; SANTILLI, C. V.; BERMUDEZ, V. Z.; CRAIEVICH, A. F. Small-angle X-ray scattering study of gelation and aging of Eu<sup>3+</sup>-doped sol-gel-derived siloxane-poly(oxyethylene) nanocomposites. **Journal of Physical Chemistry B**, v. 106, p. 4377-4382, 2002.
- DAHMOUCHE, K.; CARLOS, L. D.; BERMUDES, V. Z.; FERREIRA, R. A. S.; SANTILLI, C. V.; CRAIEVICH, A. F. Structural modelling of Eu<sup>3+</sup>-based siloxane-poly(oxyethylene) nanohybrids. **Journal of Materials Chemistry**, v. 11, p. 3249-3257, 2001.
- DESHPANDE, A. V.; KUMAR, U. Effect of method of preparation on photophysical properties of Rh-B impregnated sol-gel hosts. **Journal of Non-Crystalline Solids**, v. 306, p. 149-159, 2002.
- DUMARCHER, V.; ROCHA, L.; DENIS, C.; FIORINI, C.; NUNZI, J.- M.; SOBEL, F.; SAHRAOUI, B.; GINDRE, D. Polymer thin-film distributed feedback tunable lasers. **Journal of Optics A: Pure Applied Optics**, v. 2, p. 279-283, 2000.
- DUVERGER, C.; FERRARI, M.; MAZZOLENI, C.; MONTAGNA, M.; PUCKER, G.; TURRELL, S. Optical spectroscopy of Pr<sup>3+</sup> ions in sol-gel derived GeO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> planar waveguides. **Journal of Non-Crystalline Solids**, v. 245, p. 129-134, 1999.
- DYER, P. E.; FARLEY, R. J.; GIEDL, R.; KARNICKI, D. M. Excimer laser ablation of polymers and glasses for grating fabrication. **Applied Surface Science**, v. 96/98, p. 537-549, 1996.
- ETTIENNE, P.; COUDRAY, P.; PORQUE, J.; MOREAU, Y. Active erbium-doped organic-inorganic waveguide. **Optics Communications**, v. 174, p. 413-418, 2002.
- FERRARO, P.; NATALE, G. On the possible use of optical fiber Bragg gratings as strain sensors for geodynamical monitoring. **Optics and Laser in Engineering**, v. 37, p. 115-130, 2002.
- FERREIRA, R. A. S.; CARLOS, L. D.; BERMUDEZ, V. Z. Excitation energy dependence of luminescent sol-gel organically modified silicates. **Thin Solid Films**, v. 343-344, p. 476-480, 1999.
- FERREIRA, R. A. S.; CARLOS, L. D.; GONÇALVES, R. R.; RIBEIRO, S. J. L.; BERMUDEZ, V. Z. Energy-transfer mechanisms and emission quantum yields in Eu<sup>3+</sup>-based siloxane-poly(oxyethylene) nanohybrids. **Chemistry of Materials**, v. 13, p. 2991-2998, 2001.
- FERREIRA, R. A. S.; CARLOS, L. D.; BERMUDEZ, V. Z.; MOLINA, C.; DAHMOUCHE, K.; MESSADDEQ, Y.; RIBEIRO, S. J. L. Room temperature visible/infrared emission and energy transfer in Nd<sup>3+</sup>-based organic/inorganic hybrids. **Journal of Sol-gel Science and Technology**, v. 26, n. 1/3, p. 315-319, 2003.
- FIORINI, C.; PRUDHOMME, N.; DE VEYRAC, G.; MAURIN, I.; RAIMOND, P.; NUNZI, J. M. Molecular migration mechanism for laser induced surface relief grating formation. **Synthetic Metals**, v. 115, p. 121-125, 2000.

- FRESCHI, A. A.; SANTOS, F. J.; RIGON, E. L.; CESCATO, L. Phase-locking of superimposed diffractive gratings in photoresists. **Optics Communications**, v. 208, p. 41–49, 2002.
- FU, L.; FERREIRA, R. A. S.; SILVA, N. J. O.; CARLOS, L. D. Photoluminescence and quantum yields of urea and urethane cross-linked nanohybrids derived from carboxylic acid solvolysis. **Chemistry of Materials**, v. 16, p. 1507-1516, 2004.
- GANGOPADHYAY, T. K. Prospects for fibre bragg gratings and Fabry-Perot interferometers in fibre-optic vibration sensing. **Sensors and Actuators A**, v. 113, p. 20-38, 2004.
- GONÇALVES, M. C.; BERMUDEZ, V. Z.; FERREIRA, R. A. S.; CARLOS, L. D.; OSTROVSKII, D.; ROCHA, J. Optically functional di-urethanesil nanohybrids containing  $\text{Eu}^{3+}$  ions. **Chemistry of Materials**, v. 16, n. 13, p. 2530-2543, 2004.
- GONÇALVES, R. R. **Preparação e caracterização de filmes óxidos contendo componentes opticamente ativos**. 2001. 303 f. Tese (Doutorado em Química) - Instituto de Química, Universidade Estadual Paulista, Araraquara, 2001.
- GONÇALVES, R. R.; CARTURAN, G.; SCARPARI, S.; OLIVEIRA, D. C.; BUENO, L. A.; RIBEIRO, S. J. L.; MESSADDEQ, Y.; FERRARI, M.; MONTAGNA, M.; RAINHO, J. P.; CARLOS, L. D. Inorganic nanoparticles in organic-inorganic hybrid hosts for planar waveguides. **Proceedings of SPIE**, v. 4805, p. 134-139, 2002.
- GOUDKET, H. **Étude de matériaux polymères, organiques et organo-minéraux, dopés par des colorants organiques**: application à la réalisation de sources laser intégrées. 2004. 260 f. Tese (Doutorado em Ciências) - Université Paris XI Orsay, Paris, França, 2004.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de física**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002. v. 4, 356 p.
- IMADA, M.; CHUTINAN, A.; NODA, S.; MOCHIZUKI, M. Multidirectionally distributed feedback photonic crystal lasers. **Physical Review B**, v. 65, p. 195306/1-195306/8, 2002.
- KAMMLER, H. K.; BEAUCAGE, G.; KOHLS, D. J.; AGASHE, N.; ILAVSKY, J. Monitoring simultaneously the growth of nanoparticles and aggregates by in situ ultra-small-angle x-ray scattering. **Journal of Applied Physics**, v. 97, p. 054309/1-054309/11, 2005.
- KICKELBICK, G.; WIEDE, P.; SCHUBERT, U. Variations in capping the  $\text{Zr}_6\text{O}_4(\text{OH})_4$  cluster core: X-ray structure analyses of  $[\text{Zr}_6(\text{OH})_4\text{O}_4(\text{OOC}-\text{CH}=\text{CH}_2)_{10}]_2(\mu-\text{OOC}-\text{CH}=\text{CH}_2)_4$  and  $\text{Zr}_6(\text{OH})_4\text{O}_4(\text{OOCR})_{12}(\text{PrOH})$  ( $\text{R} = \text{Ph}$ ,  $\text{CMe} = \text{CH}_2$ ). **Inorganica Chimica Acta**, v. 284, p. 1-7, 1999.
- KOGELNIK, H.; SHANK, C. V. Coupled-wave theory of distributed feedback lasers. **Journal of Applied Physics**, v. 43, n. 5, p. 2327-2335, 1972.
- KOGELNIK, H.; SHANK, C. V. Stimulated emission in a periodic structure. **Applied Physics Letters**, v. 18, n. 4, p. 152-154, 1971.
- KREBS, F. C.; RAMANUJAM, P. S. Holographic recording in a series of conjugated polymers. **Optical Materials**, v. 28, p. 350–354, 2006.

- LEBEAU, B.; SANCHEZ, C. Sol-gel derived hybrid inorganic-organic nanocomposites for optics. **Current Opinion in Solid State & Materials Science**, v. 4, p. 11-23, 1999.
- MAIMAN, T. Stimulated optical radiation in ruby. **Nature**, v. 187, p. 493-494, 1960.
- MAKOVETSKY, E. D.; MILOSLAVSKY, V. K. Peculiarities of the spontaneous grating formation in light-sensitive waveguide films near a magic angle of laser beam incidence. **Optics Communications**, v. 244, p. 445-454, 2005.
- MALTA, O. L.; BRITO, H. F.; MENEZES, J. F. S.; SILVA, F. R. G.; ALVES JR., S.; FARIAS JR., F. S.; ANDRADE, A. V. M. Spectroscopic properties of a new light-converting device  $\text{Eu}(\text{thenoyltrifluoroacetate})_3 \cdot 2(\text{dibenzylsulfoxide})$ . A theoretical analysis based on structural data obtained from a sparkle model. **Journal of Luminescence**, v. 75, p. 255-268, 1997.
- MENDES, G. F.; CESCATO, L.; FREJLICH, J. Gratings for metrology and process control. 2: thin film thickness measurement. **Applied Optics**, v. 23, n. 4, p. 576-583, 1984.
- MESSADDEQ, S. H.; SIU LI, M.; INOUE, S.; RIBEIRO, S. J. L.; MESSADDEQ, Y. Photoinduced effect in Ga-Ge-S based thin films. **Applied Surface Science**. In press.
- MOLINA, C. **Materiais híbridos orgânicos-inorgânicos como matrizes para compostos luminescentes de íons lantanídios**. 2003. 181 f. Tese (Doutorado em Química) - Instituto de Química, Universidade Estadual Paulista, Araraquara, 2003a.
- MOLINA, C.; DAHMOUCHE, K.; MESSADDEQ, Y.; RIBEIRO, S. J. L.; SILVA, M. A. P.; BERMUDEZ, V. Z.; CARLOS, L. D. Enhanced emission from  $\text{Eu(III)}$   $\beta$ -diketone complex combined with ether-type oxygen atoms of di-ureasil organic-inorganic hybrids. **Journal of Luminescence**, v. 104, p. 93-101, 2003b.
- MOLINA, C.; MOREIRA, P. J.; GONÇALVES, R. R.; FERREIRA, R. A. S.; MESSADDEQ, Y.; SOPPERA, O.; LEITE, A. P.; MARQUES, P. V. S.; BERMUDEZ, V. Z.; CARLOS, L. D. Planar and UV written channel optical waveguides prepared with siloxane-poly(oxyethylene)-zirconia organic-inorganic hybrids: structure and optical properties. **Journal of Materials Chemistry**, v. 15, p. 3937-3945, 2005.
- MOLINA, C.; FERREIRA, R. S.; DAHMOUCHE, K.; RIBEIRO, S. J. L.; GONÇALVES, R. R.; BERMUDEZ, V. Z.; CARLOS, L. D. Photoluminescence study of organic/inorganic hybrids for integrated optic devices. **MRS Proceedings**, v. 847, p. EE10/1-7, 2004.
- NAJAFI, S. I.; TOUAM, T.; SARA, R.; ANDREWS, M. P.; FARDAD, M. A. Sol-gel glass waveguide and grating on silicon. **Journal of Lightwave Technology**, v. 16, n. 9, p. 1640-1646, 1998.
- OKAMOTO, K. **Fundamentals of optical waveguides**. Hardcover: Academic Press, 2000. 428 p.
- OKAMURA, Y.; YOSHINAKA, S.; YAMAMOTO, S. Measuring mode propagation losses of integrated optical waveguides: a simple method. **Applied Optics**, v. 22, p. 3892-3894, 1983.

- OKI, Y.; MIYAMOTO, S.; TANAKA, M.; ZUO, D.; MAEDA, M. Long lifetime and high repetition rate operation from distributed feedback plastic waveguided dye lasers. **Optics Communications**, v. 214, p. 277-283, 2002.
- OLIVEIRA, P. W.; KRUG, H.; MÜLLER, P.; SCHMIDT, H. Fabrication of GRIN-materials by photopolymerization of diffusion- controlled organic-inorganic nanocomposite materials. **MRS Symposia Proceedings**, v. 435, p. 553-558, 1996.
- OLIVIER, M.; PENZIN, J. C.; DANIEL, J. S.; CHALLETON, D. Absorption spectra of garnet films between 1.0 and 1.8  $\mu\text{m}$  by guided-wave optical spectroscopy. **Applied Physics Letters**, v. 38, p. 79-81, 1981.
- ORIGNAC, X.; BARBIER, D.; DU, X. M.; ALMEIDA, R. M. Fabrication and characterization of sol-gel planar waveguides doped with rare-earth ions. **Applied Physics Letters**, v. 69, p. 895-897, 1996.
- ORIGNAC, X.; BARBIER, D.; DU, X. M.; ALMEIDA, R. M.; MCCARTY, O.; YEATMAN, E. Sol-gel silica/titania-on-silicon Er/Yb-doped waveguides for optical amplification at 1.5  $\mu\text{m}$ . **Optical Materials**, v. 12, p. 1-18, 1999.
- OUBAHA, M.; SMAIHI, M.; ETIENNE, P.; COUDRAY, P.; MOREAU, Y. Spectroscopic characterization of intrinsic losses in an organic-inorganic hybrid waveguide synthesized by the sol-gel process. **Journal of Non-Crystalline Solids**, v. 318, p. 305-313, 2003.
- PETERS, K.; PATTIS, P.; BOTSIS, J.; GIACCARI, P. Experimental verification of response of embedded optical fiber Bragg grating sensors in non-homogeneous strain fields. **Optics and Laser in Engineering**, v. 33, p. 107-119, 2000.
- RAO, Y. J. Recent progress in applications of in-fibre Bragg grating sensors. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 31, p. 297-324, 1999.
- RIBEIRO, S. J. L.; MESSADDEQ, Y.; GONÇALVES, R. R.; FERRARI, M.; MONTAGNA M.; AEGERTER, M. A. Low optical loss planar waveguides prepared in an organic-inorganic hybrid system. **Applied Physics Letters**, v. 77, n. 22/24, p. 3502-3504, 2000.
- RIGHINI, G. C.; PELLI, S. Sol-gel glass waveguides. **Journal of Sol-gel Science and Technology**, v. 8, p. 991-997, 1997.
- RODRÍGUEZ, F. J.; SÁNCHEZ, C.; VILLACAMPA, B.; ALCALÁ, R.; CASES, R.; MILLARUELO, M.; ORIOL, L.; LÖRINCZ, E. Red light induced holographic storage in an azobenzene polymethacrylate at room temperature. **Optical Materials**, v. 28, p. 480-487, 2006.
- SAINI, G. S. S.; KAUR, S.; TRIPATHI, S. K.; MAHAJAN, C. G.; THANGA, H. H.; VERMA, A. L. Spectroscopic studies of rhodamine 6G dispersed in polymethylcyanoacrylate. **Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**, v. 61, p. 653-658, 2005.
- SANCHEZ, C.; RIBOT, F. Design of hybrid organic-inorganic materials synthesized via sol-gel chemistry. **New Journal of Chemistry**, v. 18, p. 1007-1047, 1994.

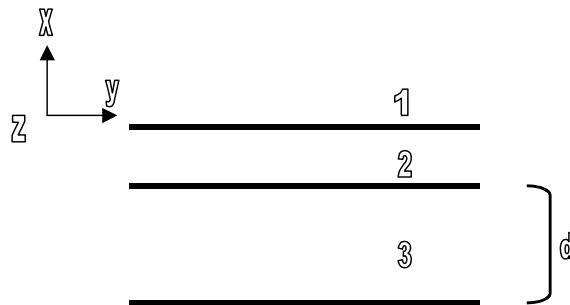
- SCHMIDT, H. Inorganic-organic composites for optoelectronics. In: KLEIN, L. C. **Sol-gel optics - processing and applications**. Boston: Kluwer Academic, 1994. p. 451-481.
- SCHMIDT, H. K. Organically modified silicates and ceramics as two-phasic systems: synthesis and processing. **Journal of Sol -Gel Science and Technology**, v. 8, p. 557-565, 1997.
- SCHMIDT, H.; KRUG, H.; KASEMANN, R.; TIEFENSEE, F. Development of optical waveguides by sol-gel techniques for laser patterning. **SPIE: Submolecular Glass Chemistry and Physics**, v. 1590, p. 36-43, 1991.
- SCHOTTNER, G. Hybrid sol-gel-derived polymers: applications of multifunctional materials. **Chemistry of Materials**, v. 13, p. 3422-3435, 2001.
- SCHUBERT, U. Organofunctional metal oxide clusters as building blocks for inorganic-organic hybrid materials. **Journal of Sol-Gel Science and Technology**, v. 31, p. 19-24, 2004.
- SCHUBERT, U. Cluster-crosslinked inorganic-organic hybrid polymers In: MRS SPRING MEETING, 2002, San Francisco, **MRS Proceedings**. San Francisco: MRS, 2002. p. 1-4.
- SCHUBERT, U. Polymers reinforced by covalently bonded inorganic clusters. **Chemistry of Materials**, v. 13, p. 3487-3494, 2001.
- SHANK, C. V.; BJORKHÖLM, J. E.; KOGELNIK, H. Tunable distributed feedback dye laser. **Applied Physics Letters**, v. 18, n. 9, p. 395-396, 1971.
- SILVA, N. J. O. **Estrutura e magnetismo de híbridos orgânicos-inorgânicos modificados por íons de Ferro e Neodímio**. 2002. 124 f. Dissertação (Mestrado em Física) - Departamento de Física, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, 2002.
- SILVERSTEIN, R. M.; WEBSTER, F. X. **Identificação espectrométrica de compostos orgânicos**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2000. 460 p.
- SOBEL, F.; GINDRE, D.; NUNZI, J. -M.; DENIS, C.; DUMARCHER, V.; DEBUISSCHERT, C. F.; KRETSCH, K. P.; ROCHA, L. Multimode distributed feedback laser emission in a dye-doped optically pumped polymer thin-film. **Optical Materials**, v. 27, n. 2, p. 199-201, 2004.
- SOBEL, F. **Effet laser à contre réaction répartie (DFB) excité par voie optique dans les films minces polymères**. 2001. Tese (Doutorado em Física) - Laboratório POMA, Université d'Angers, Angers, França, 2001.
- SOREK, Y.; REISFELD, R.; FINKELSTEIN, I.; RUSCHIN, S. Sol-gel glass waveguides prepared at low temperature. **Applied Physics Letters**, v. 63, p. 3256-3258, 1993.
- STROHHÖFER, C.; FICK, J.; VASCONCELOS, H. C.; ALMEIDA, R. M. Active optical properties of Er-containing crystallites in sol-gel derived glass films. **Journal of Non-Crystalline Solids**, v. 226, p. 182-191, 1998.

- TADANAGA, K.; ELLIS, B.; SEDDON, A. B. Structural changes during thermally induced polymerization of ormosil films from trimethoxysilylpropylmethacrylate and zirconium-n-propoxide modified with methacrylic acid. **Proceedings of SPIE: Sol-Gel Optics V**, v. 3943, p. 228-235, 2000.
- TENNANT, D. M.; FEDER, K.; DREYER, K. F.; GNALL, R. P.; KOCH, T. L.; KOREN, U.; MILLER, B. I.; YOUNG, M. G. Phase grating masks for photonic integrated circuits fabricated by e-beam writing and dry etching: challenges to commercial applications. **Microelectronic Engineering**, v. 27, p. 427-434, 1995.
- TIEN, P. K. Integrated optics and new wave phenomena in optical waveguides. **Review of Modern Physics**, v. 49, p. 361-420, 1977.
- TRIMMEL, G.; FRATZL, P.; SCHUBERT, U. Cross-linking of poly(methyl methacrylate) by the methacrylate-substituted oxozirconium cluster  $Zr_6(OH)_4O_4(\text{methacrylate})_{12}$ . **Chemical Materials**, v. 12, p. 602-604, 2000.
- VÉSPERINI, A. **Etude du spectre d'émission de lasers à rétroaction répartie dans des couches minces de polymères excités par plusieurs faisceaux**. 2006. Tese (Doutorado em Física). Laboratoire POMA, Université d'Angers, Angers, França, 2006.
- VILLEGAS, M. A. Chemical and microstructural characterization of sol-gel coatings in the  $ZrO_2-SiO_2$  system. **Thin Solid Films**, v. 382, p. 124-132, 2001.
- WANG, J.; WEIMANN, T.; HINZE, P.; ADE, G.; SCHNEIDER, D.; RABE, T.; RIEDL, T.; KOWALSKY, W. A continuously tunable organic DFB laser. **Microelectronic Engineering**, v. 78-79, p. 364-368, 2005.
- WHITE, J. G. The crystal structure of europium tris [4, 4, 4-trifluoro-1-(2-thienyl)-1,3-butanedione] dihydrat. **Inorg. Chim. Acta**, v. 16, p. 159, 1976.
- WYBOURNE, B. G. **Spectroscopic properties of rare earth**. New York: Interscience, 1965. 244 p.
- YANG, Y.; WANG, M.; QIAN, G.; WANG, Z.; FAN, X. Laser properties and photostabilities of laser dyes doped in ORMOSILs. **Optical Materials**, v. 24, p. 621-628, 2004.

## ANEXO I

## CARACTERIZAÇÃO DOS FILMES POR ESPECTROSCOPIA M-LINES.

Esta técnica permite a determinação dos modos do guia de onda em função do ângulo de incidência da luz laser. Um *guia de onda* é um condutor de luz que consiste de um filme, fita ou fibra; um guia *planar* consiste de filme dielétrico de índice de refração  $n_2$  e espessura  $d$  (da ordem de micrômetros) é depositado sobre um substrato de índice  $n_3$ . A figura I.1 esquematiza esta situação onde a região 1 é constituída por ar ( $n_1=1$ ). O sistema é ainda considerado infinito nas direções  $y$  e  $z$ .



**Figura I.1:** Guia de onda planar; o sistema é infinito nas direções  $y$  e  $z$ ;  $n$  é o índice de refração ( $n_2 > n_3 > n_1$ ).

Para que a luz seja guiada, é necessário que o índice de refração do meio por onde ela passa seja maior que os meios que tocam a sua superfície, para que haja reflexão da luz. Essa condição é conhecida como lei de Snell. A lei de Snell pode ser descrita das equações de Maxwell [OKAMOTO, 2000]. Para o fenômeno de refração, é necessário que os índices  $n_1$  e  $n_2$  dos meios e os ângulos  $\theta_1$  e  $\theta_2$  da luz obedeçam a seguinte condição:

$$\text{sen}\theta_1/\text{sen}\theta_2 = n_2/n_1 \quad (\text{eq. XXVII})$$

O ângulo limite a partir do qual a luz não consegue ir para o outro meio é o ângulo limite para a reflexão da luz. A partir desse ângulo a luz fica confinada nesse meio, e tem-se assim um guia de luz. A condição necessária (mas não suficiente) para a propagação dos modos normais é portanto que  $n_2 > n_1$  e  $n_2 > n_3$ . No caso usual que o substrato é o ar teremos ainda  $n_3 > n_1 = 1$ . Isto implica na existência de dois ângulos limites  $\theta_{\text{ar}}$  (nas interfaces 1-2 entre o filme e o ar) e  $\theta_{\text{subs}}$  (nas interfaces 2-3 entre o filme e o substrato) para as reflexões totais.

Para ângulos de incidência pequenos menores que  $\theta_{\text{ar}}$  e  $\theta_{\text{subs}}$ , a luz incidente a partir do substrato é refratada de acordo com a Lei de Snell e sai do guia pela interface com o ar. Este modo não confinado da luz é chamado *modo da radiação*. Quando o ângulo de incidência de um dos meios é

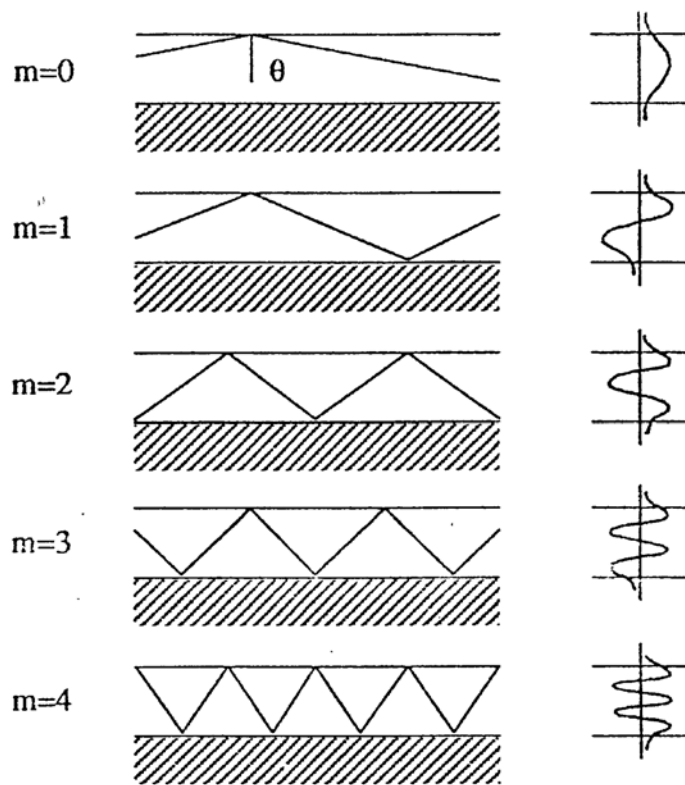


maior que  $\theta_{ar}$  e  $\theta_{subs}$ , a luz é totalmente refletida (*modo guiado*). Se ocorre reflexão apenas na interface filme-ar, tem-se o *modo do substrato*. Portanto a condição para que se observe reflexão total nas interfaces 1-2 e 2-3 será:

$$n_2 \sin(\theta) \geq n_1 \text{ e } n_2 \sin(\theta) \geq n_3 \quad (\text{eq. XXVIII})$$

A outra condição para a existência de um modo normal no guia é que a soma das fases de ida e volta de uma interface a outra (considerando o modo transversal ao longo de x) seja igual a um múltiplo de  $2\pi$ . Esta condição é dita de ressonância transversal.

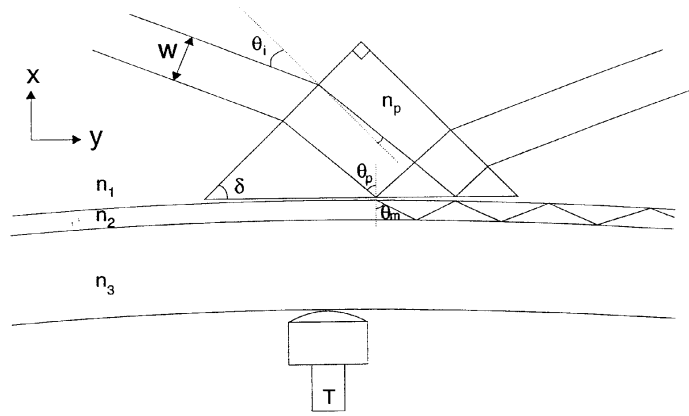
Os modos normais a partir dos parâmetros fundamentais (índices de refração e espessuras das camadas) [ANDRÉ, 2002] que podem ser calculados a partir da óptica geométrica, também podem ser obtidos da resolução direta das equações de Maxwell., de onde obtém-se a forma dos modos em um filme, que pode ser visualizada na figura I.2 abaixo:



**Figura I.2:** Trajetória do feixe luminoso em função do número do modo. À direita estão representadas as distribuições relativas do campo elétrico nas diferentes regiões.

Como se observa na figura I.2 a ordem do modo representa também o número de nós do modo estendido. Note-se que os modos guiados possuem uma "cauda" do tipo exponencial que se estende além do filme tanto para o substrato como para o ar.

A partir do conhecimento dos modos teóricos do guia, pode-se excitar estes modos a partir de alguns métodos. O método utilizado foi o acoplamento via prisma, conhecido por espectroscopia m-lines. A configuração utilizada está esquematizada na figura I.3 a seguir:



**Figura I.3:** Configuração para o acoplamento via prisma.

O guia é mantido em contato com o prisma com o auxílio do pistão T. O feixe de laser de tamanho  $W$  incide na superfície do prisma, que tem índice de refração  $n_p$ , penetrando segundo as leis normais de refração. É necessário que  $n_p$  seja maior que  $n_2$ , para que o feixe possa sofrer reflexão total na face do prisma que está em contato com o guia. Nestas condições a projeção ao longo de  $y$  do vetor de onda do feixe laser no prisma vale  $\beta_p = kn_p \sin(\theta_p)$ . Neste ponto para a excitação seletiva de um modo do guia basta variar o ângulo  $\theta_p$  (variando o ângulo  $\theta_i$  de incidência da luz laser) de modo que para certos  $\theta_{pm}$  se verifique a relação [OKAMOTO, 2000; MOLINA, 2003a]:

$$\beta_{pm} = kn_p \sin(\theta_{pm}) = kn_2 \sin(\theta_m) = \beta_m \quad m=1,2,3,\dots - \text{ordem do modo (eq. XXIX)}$$

onde a projeção ao longo de  $y$  da constante de propagação da luz no prisma deve ser igual a um dos valores discretos permitidos pela constante de propagação  $\beta_m$  no filme. Em outras palavras deve haver um "acordo de fases".

Como visto anteriormente, os modos possuem uma cauda exponencial que é chamada cauda evanescente, que se estende além da interface 1-2 por uma distância equivalente a um comprimento de onda da luz. Da mesma maneira o campo elétrico presente no prisma e que se encontra em reflexão total na sua base, possui também uma cauda análoga. Como se pode observar na figura I.3 existe uma camada de ar entre o guia e o prisma e portanto existe uma sobreposição apenas parcial destas caudas exponenciais que permitem transferência de energia prisma-guia. Este processo é análogo a um efeito túnel quântico. A zona onde ocorre esta transferência (onde a pressão do pistão T é maior) é chamada ponto de acoplamento. Fala-se neste caso de acoplamento fraco no sentido que nestas condições a presença do prisma não altera os modos normais do guia, podendo ser considerada como uma pequena perturbação. Um "gap" ótimo de ar é encontrado variando-se a pressão do prisma sobre o guia.

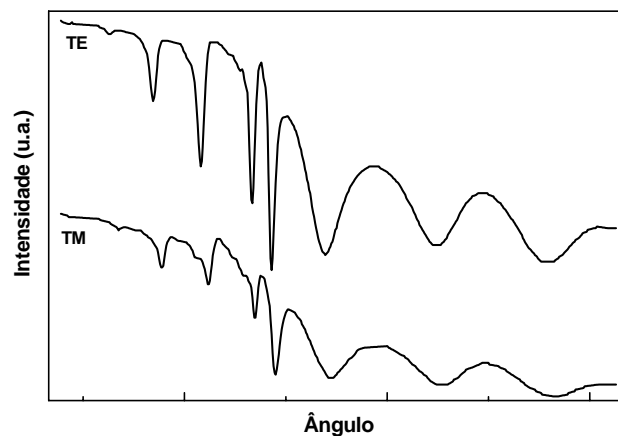
Neste estudo os filmes finos foram preparados visando a obtenção de guias de luz. A sua caracterização foi iniciada pela técnica de acoplamento por prisma. Dependendo das características do filme (qualidade óptica, índice de refração e espessura) esta técnica permite a determinação da

espessura, índice de refração e atenuação da luz no interior do filme [TIEN, 1977; OKAMURA, *et al.*, 1983; OLIVIER, *et al.*, 1981].

Os filmes obtidos a partir de híbridos de zircônio foram caracterizados pela técnica de acoplamento por prisma. O equipamento utilizado da Metricon, modelo 2010 permite a identificação dos modos guiados da luz no visível - 543,5nm, 632,8nm (lasers de He-Ne) - e no infravermelho - 1550nm (laser de diodo) - com polarização TE e TM, além da medida direta de atenuação utilizando-se um detetor montado numa fibra óptica. O prisma utilizado foi um GGG (Gadolinium Gallium Garnet) com índice de refração de 1,9644 em 632,8nm. O aparelho é equipado com detectores de Si e Ge para coletar a luz na região do visível e infravermelho próximo, respectivamente. De posse dos índices de refração efetivos é possível o cálculo do índice de refração bem como da espessura dos filmes. O perfil do índice de refração na profundidade do filme e o confinamento da luz nos três comprimentos de onda utilizados também são parâmetros simples de serem obtidos.

O índice de refração e a espessura podem ser calculados simultaneamente desde que haja pelo menos 2 modos guiados na amostra. Quando há apenas um modo guiado, este cálculo também pode ser feito através dos valores obtidos quando se utiliza a luz no modo transversal elétrico (TE - vetor campo elétrico paralelo ao plano do guia) e transversal magnético (TM - vetor campo magnético paralelo ao plano do guia).

A figura I.4 apresenta o gráfico de m-lines obtido para uma das amostras da composição Z75. A tabela I.1 mostra os valores de índice de refração ( $\eta$ ) obtidos das amostras em função das diferentes relações molares Zr:Si.



**Figura I.4:** Espectro m-lines da amostra Z75 com laser He-Ne operando em 632,8nm.

**Tabela I.1:** Valores obtidos dos índices de refração dos guias de onda híbridos contendo Zr e U600.

Amostra	Zr:Si	$\eta_{543,5\text{nm TE } +0,001}$	$\eta_{632,8\text{nm TE } +0,001}$	$\eta_{1550\text{nm TE } +0,001}$
Z85	85:15	1,557	1,552	1,534
Z75	75:25	1,565	1,559	1,533
Z60	60:40	1,551	1,546	1,530
Z50	50:50	1,535	1,529	1,519
Z40	40:60	1,516	1,510	1,497
Z15	15:85	1,500	1,496	1,478

Podemos observar que o índice pode ser controlado variando-se a composição da matriz. Há um aumento do índice com o aumento da quantidade relativa de Zr. Medidas preliminares de atenuação levaram aos resultados de 3dB/cm para o híbrido Z75 e de 2dB/cm para o híbrido Z50.