

## DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DAS CARACTERÍSTICAS DE UM FEIXE INFRAVERMELHO

### **Luís Mauro Moura**

Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Laboratório de Sistemas Térmicos, Rua Imaculada Conceição, 1155, 80215-901, Curitiba/PR, Brasil. E-mail: lmoura@ccet.pucpr.br

### **Dominique Doermann-Baillis**

### **Jean-François Sacadura**

Centre de Thermique de Lyon, ESA CNRS 5008, INSA de Lyon  
20, Avenue Albert Einstein, F69621 Villeurbanne Cedex, França

### **Resumo**

Apresenta-se neste trabalho a determinação experimental das características de um feixe infravermelho de um dispositivo espectrométrico comercial (BIO-RAD FTS 60A). Este equipamento é utilizado para a identificação de propriedades radiativas de materiais semitransparentes. As medidas realizadas visam a determinação da homogeneidade espacial do campo de intensidade radiativa e do ângulo de divergência do feixe.

**Palavras-chave:** Espectrometria, Radiação térmica, Determinação de propriedades radiativas

## **1. INTRODUÇÃO**

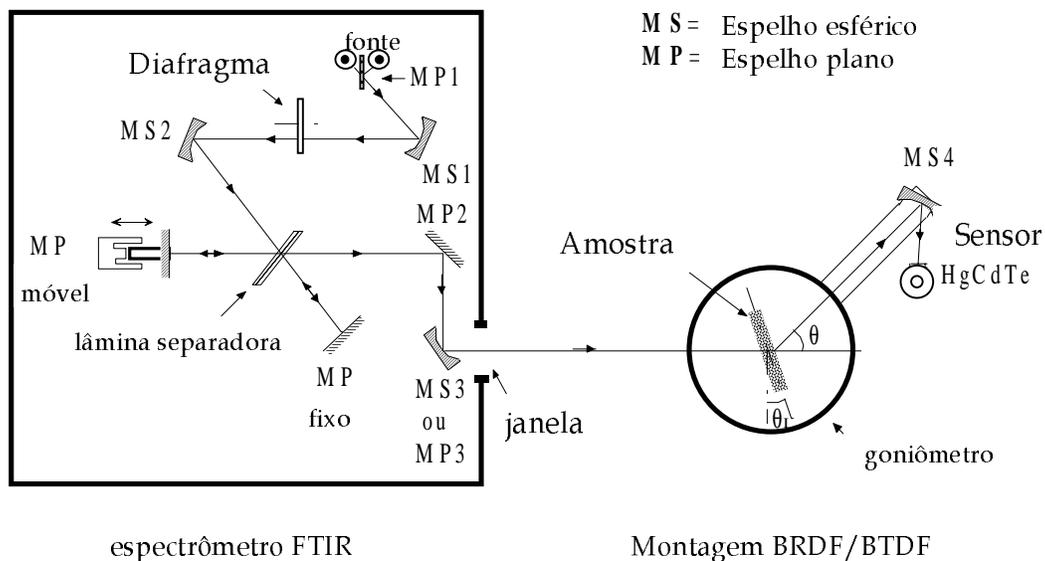
A determinação experimental das propriedades radiativas de materiais semitransparentes e difusores (espessura ótica, albedo e função de fase) nem sempre é realizada de maneira direta, isto é, geralmente é necessário um modelo baseado na equação da transferência de calor por radiação considerando situações experimentais como condições de contorno do problema analítico/numérico. Na maioria dos casos da literatura, considera-se um feixe Infravermelho (IR) incidindo sobre a superfície da amostra de maneira uniforme, segundo uma hipótese de geometria unidimensional, exemplos são os trabalhos de Silva Neto e Özisik (1992), Glicksman. *et al.* (1987), Uny (1986), Nicolau (1994), Doermann (1995) e Henry *et al.* (1997). Entretanto, a condição de uniformidade da intensidade do feixe sobre a amostra nem sempre é facilmente obtida em função das características de construção dos equipamentos disponíveis comercialmente. Existem dois tipos básicos de equipamentos. O primeiro baseia-se no princípio da dispersão de um feixe IR proveniente de um corpo negro (policromático) por um prisma, ou rede de dispersão, sendo a leitura do sinal realizada passo a passo para cada comprimento de onda. O segundo tipo, são os espectrômetros a transformada de Fourier (FTIR) (Griffiths, 1975) que, segundo seu princípio de funcionamento baseado na interferometria, realizam a medição de toda a banda espectral IR simultaneamente. Além de possibilitar uma medição num tempo muito maior, a utilização de um FTIR fornece um sinal com maior intensidade e também mais uniforme.

Para a determinação das propriedades radiativas de materiais semitransparentes difusores,

como lã de vidro ou espuma de carbono, o Laboratório CETHIL (Centre de Thermique de Lyon, França) dispõe de um FTIR de fabricação BIORAD, modelo FTS60A. Neste trabalho apresenta-se a técnica de medição adotada na determinação das características do feixe IR.

## 2. DESCRIÇÃO DO DISPOSITIVO

O equipamento BioRad FTS60A baseia-se no princípio do interferômetro de Michelson. Sua banda de medição situa-se entre 1,5 e 25  $\mu\text{m}$ . O espectrômetro é composto por: uma fonte de radiação constituída de um filamento de cerâmica aquecida a 1300°C (emissão tipo corpo cinzento); uma lâmina separadora de KBr onde o processo de interferência é realizado; um sensor HgCdTe (também chamado MCT) de banda larga. O sensor dispõe de um sistema de pré-amplificação linearizado eletronicamente pelo próprio fabricante. Existe ainda a possibilidade de utilizar uma segunda fonte (lâmpada halogênea), contudo faz-se necessário substituir a lâmina separadora de KBr por outra em Quartzo (1,0 a 2,5  $\mu\text{m}$ ), este conjunto permite um alinhamento fácil pois pode-se visualizar o trajeto óptico do feixe. Na Fig. 1 vê-se o esquema da montagem com o espectrômetro FTIR e, ao lado, o goniômetro onde é posicionado a amostra para medições BRDF/BTDF (*Bidirectional Reflectance or Transmittance Distribution Function*) (Nicolau, 1994).



**Figura 1.** Montagem com o espectrômetro FTIR

O feixe IR, após partir da fonte cerâmica, é refletido pelo espelho MS1, formando uma imagem sobre um diafragma. A fonte IR de 7 mm de diâmetro está localizada a uma distância de duas vezes a focal,  $f_{MS1}$ , do espelho MS1. O diafragma encontra-se na posição focal do espelho esférico MS2. Desta maneira, o feixe torna-se quasi-paralelo (ângulo de divergência muito pequeno), com um semi-ângulo de divergência  $\theta_0$ . A equação relacionando o valor de  $\theta_0$  com a distância focal,  $f_{MS2}$ , do espelho MS2 e do raio do diafragma  $R_2$  é (Nicolau, 1994):

$$\theta_0 = \arctan \frac{R_2}{f_{MS2}} \quad (1)$$

A Tabela 1 indica os valores dos semi-ângulos de divergência  $\theta_0$  para cada resolução, ou diâmetro, do diafragma do equipamento FTS 60A. A relação entre diâmetro do diafragma e resolução do aparelho é devido ao fato que para uma boa resolução, deve-se limitar o ângulo de divergência do feixe (Griffiths, 1975).

O feixe IR quando chega na lâmina separadora é dividido em dois onde são em seguida refletidos pelos espelhos (fixo e móvel) e novamente recombinados na lâmina separadora. Desta maneira, provoca-se um processo de interferência devido as diferenças de trajetória dos dois feixes. Esta sinal, chamado interferograma, é medido pelo sensor MCT em função da posição do espelho móvel (sinal modulado). Aplicando-se uma FFT (Transformada rápida de Fourier) sobre o interferograma obtém-se o espectro de emissão da fonte IR. Na Fig. 2 vê-se uma curva de emissão típica obtida, bem como seu nível de ruído.

Após passar pela lâmina separadora, o feixe IR é enviado para o exterior por um espelho, onde situa-se o dispositivo goniométrico que suporta a amostra e o sensor IR, por uma janela situada na lateral do aparelho. Para efetuar esta tarefa pode-se empregar um espelho plano ou um esférico. Nicolau (1994) utilizou inicialmente um espelho esférico (focal=500 mm) com o intuito de reduzir ligeiramente o ângulo de divergência do feixe IR, concentrando-o sobre a amostra.

**Tabela 1.** Resolução, diâmetro do diafragma e semi-ângulo de divergência  $\theta_0$

Resolução	Diâmetro [mm]	$\theta$
<i>Open</i>	7,0	2,23°
2 cm <sup>-1</sup>	4,0	1,27°
1 cm <sup>-1</sup>	2,7	0,86°
0,5 cm <sup>-1</sup>	1,25	0,40°

As medições de intensidades radiativas são efetuadas pelo conjunto sensor MCT/espelho esférico, MS4, situado no braço do goniômetro. Este sistema, com a ajuda de uma unidade de rotação acionada por motor de passo, realiza medições para diferentes direções, e não somente na direção de incidência. Outra possibilidade do sistema é de rotacionar a amostra em relação ao feixe incidente, eliminando-se a hipótese de simetria azimutal (Moura, 1998). O espelho esférico MS4 ( $f_{MS4}=150\text{ mm}$ ) tem a função de limitar o ângulo de detecção, conforme a seguinte equação:

$$\theta_d = \arctan \frac{R_d}{f_{MS4}} \quad (2)$$

onde  $R_d$  é o raio da área sensível de detecção do sensor ( $R_d = 0.5\text{mm}$ ), sendo o sensor posicionado na focal do espelho esférico. O valor obtido nesta montagem é de 0.19°, resultando numa boa resolução angular, quando comparado aos ângulos de incidência da Tabela 1.

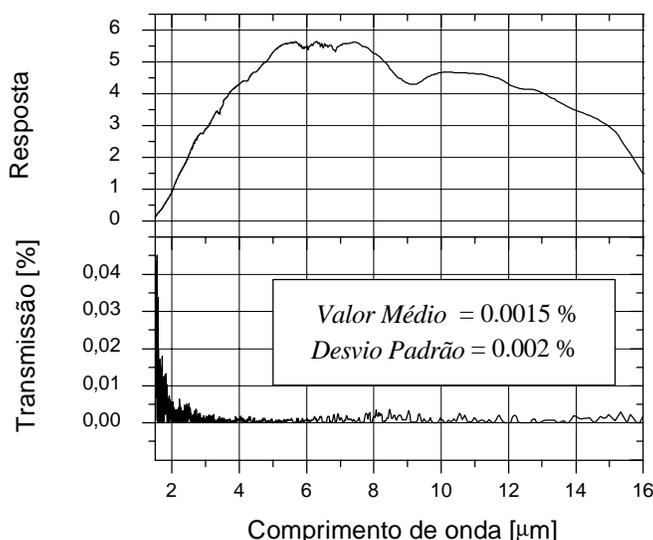
O espectrômetro FTS 60A dispõe ainda de um laser He-Ne (632,8  $\mu\text{m}$ ) com a função de realizar o alinhamento dinâmico do conjunto ótico, bem como de servir de referência para o posicionamento do espelho móvel. Este laser dispõe de uma lente divergente que aumenta o seu diâmetro para aproximadamente 10 mm. O laser encontra-se atrás do espelho MS2 o qual possui um furo no seu centro deixando passar o feixe He-Ne. O feixe laser e IR realizam o mesmo trajeto ótico, até o espelho MP2, o qual possui também um furo no centro, permitindo desta forma a saída do feixe de alinhamento, incidindo finalmente sobre três diodos laser

dispostos de forma triangular. A presença deste furo, embora necessária, provoca heterogeneidades no feixe IR que serão demonstrados a seguir.

Em condições ideais o feixe IR incidente sobre a amostra deve ter um ângulo de divergência muito reduzido, para possuir características próximas a de um feixe paralelo. Entretanto, sabe-se quanto menor sua divergência, menor será a quantidade de energia disponível a ser medida pelo sensor. O fluxo de radiação espectral é expresso pela equação:

$$q_{r,\lambda} = I_{\lambda} d\omega_o \cos \theta_I \quad (3)$$

onde  $I_{\lambda}$  é a intensidade radiativa espectral,  $d\omega_o$  é o ângulo sólido de divergência do feixe e  $\theta_I$  é o ângulo de incidência do feixe sobre a amostra (no caso de simetria azimutal  $\theta_I = 0^\circ$ ).



**Figura 2.** Distribuição de energia e o nível de ruído para o espectro de base, em função do comprimento de onda

### 3. ENSAIOS REALIZADOS

Além de um ângulo de divergência reduzido o fluxo radiativo sobre a superfície da amostra deve ser constante, garantindo a hipótese de problema unidimensional. Um dos objetivos desta avaliação é comparar as características obtidas, seja utilizando um espelho plano na janela de saída do espectrômetro (MP3), seja utilizando um espelho esférico nesta posição (MS3). Descreve-se a seguir a caracterização experimental do feixe IR.

#### 3.1 Determinação da uniformidade do feixe IR

Para determinar a uniformidade do feixe IR sobre a amostra, utilizou-se o sensor MCT posicionado no plano normalmente ocupado pela amostra, recebendo diretamente o feixe IR, sem a utilização de algum espelho de concentração. Um suporte permite deslocar o sensor nos dois eixos ortogonais a direção de incidência. Como a área do sensor MCT (diâmetro de 1 mm) é muito menor que a área do feixe incidente, obtém-se uma boa resolução espacial. Mede-se o sinal máximo detectado pelo interferograma (em Volt), antes da aplicação da transformada de Fourier.

As Figs. 3 a 5 apresentam as medições realizadas com o espelho plano para as aberturas de *open*,  $2 \text{ cm}^{-1}$  e  $0,5 \text{ cm}^{-1}$ . A posição ( $X=0 \text{ cm}$  e  $Y=0 \text{ cm}$ ) é eixo óptico obtido através do alinhamento, para uma abertura de  $2 \text{ cm}^{-1}$ . As curvas do sinal são representadas em dois formatos, uma indica a iluminação obtida sobre uma folha de papel quando se utiliza a lâmina separadora de quartzo para materializar o caminho ótico do feixe. O segundo formato é o gráfico 3-D do sinal medido, indicando melhor a forma do feixe.

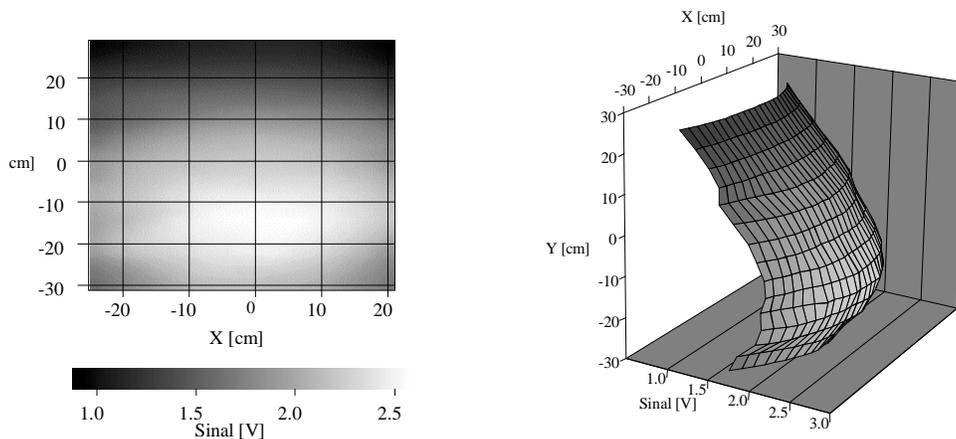
Os resultados obtidos para a posição *open* mostram que o feixe é mais intenso na sua porção inferior. Isto é devido à existência de um gradiente térmico na fonte cerâmica. Visualmente observa-se que a resistência cerâmica (na forma de 3 espiras) têm seções com temperaturas diferentes. Com a redução do diâmetro do diafragma, este efeito é menos visível e a intensidade máxima do feixe encontra-se próxima do eixo de alinhamento. Entretanto, reduzindo-se o diâmetro do diafragma, o feixe torna-se menos uniforme.

A Fig. 5 mostra claramente a influência dos furos existentes nos espelhos MS2 e MP2. Para uma abertura menor ( $0,5 \text{ cm}^{-1}$ ) a superfície iluminada do espelho MS2 é menor, Fig. 1, e esta influência torna-se mais importante.

As Figs. 6 a 8 mostram as mesmas medições que as anteriores, mas agora utilizando um espelho esférico. Na Fig. 6 pode-se observar a imagem do três filamentos da fonte IR (uma imagem da fonte é formada a  $230 \text{ mm}$  do espelho esférico, sendo que o porta amostra encontra-se a  $500 \text{ mm}$ ). Reduzindo o diafragma o feixe torna-se muito concentrado.

### 3.2 Determinação do ângulo de divergência

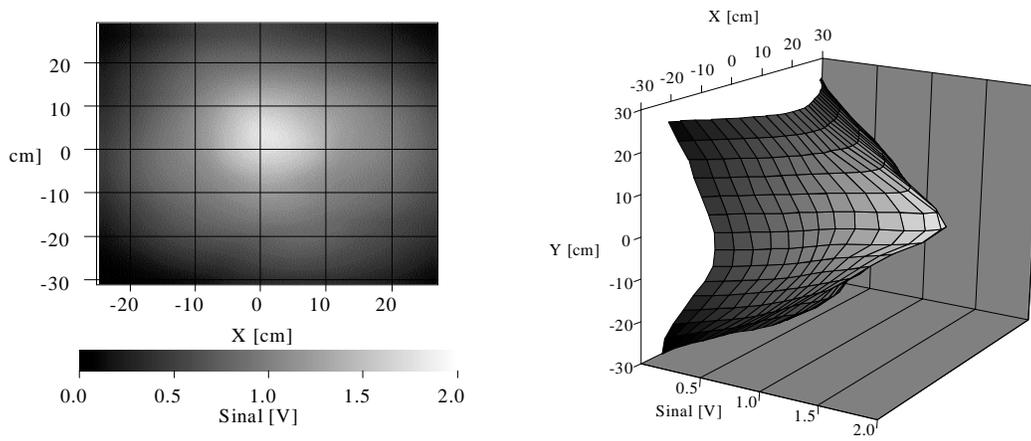
O ângulo de divergência do feixe IR é um parâmetro importante na definição da quadratura utilizada (Moura, 1998). Em princípio, este ângulo é definido pelo raio do diafragma e pela focal do espelho MS2, equação 1. Entretanto, pode-se obter o ângulo de divergência de maneira experimental, medindo-se as intensidade radiativas do feixe, rotacionando-se o braço do sistema de detecção. Este sistema integra a energia recebida das intensidades radiativas dentro do ângulo de detecção  $\theta_d$ , equação 2. Em princípio os valores deveriam ser constantes para  $0^\circ \leq \theta \leq \theta_o - \theta_d$ .



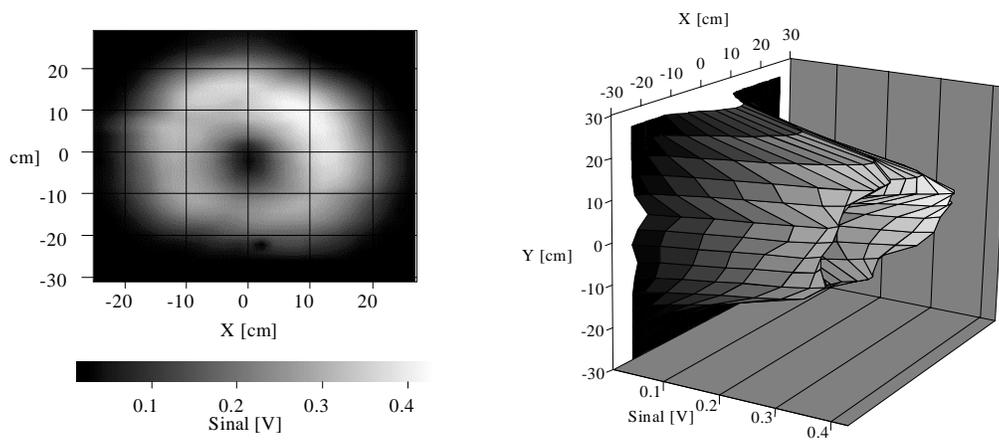
**Figura 3.** Espelho plano com o diafragma na posição *open*

Para o cálculo do ângulo de detecção, equação 2, o sensor deve ser posicionado na posição focal do espelho esférico MS4. Contudo, o procedimento de alinhamento utilizado por Nicolau (1994) e Doermann (1995) baseava-se no deslocamento do sensor de alguns milímetros de maneira a obter-se um sinal de maior intensidade.

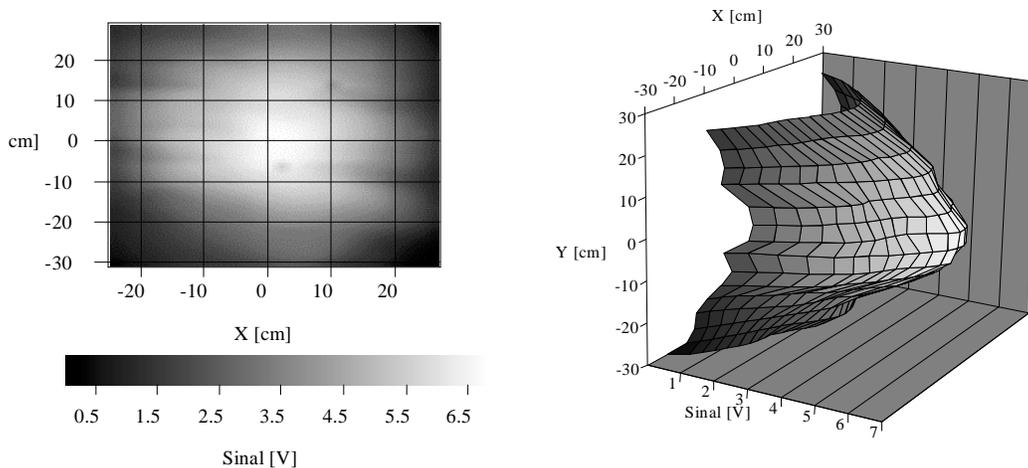
A utilização de uma lâmina em quartzo para efetuar o alinhamento permitiu a visualização dos pontos de concentração do feixe sobre o sensor. Utilizando o espelho plano MP3, obtém-se uma imagem do diafragma a 160 mm do espelho MS4 com um diâmetro de 7 mm para a posição *open*. As espirais da fonte IR são novamente visíveis e como a superfície de detecção é menor que a imagem, tende-se a regular o espelho MS4 de maneira a posicionar a superfície de detecção na espiral de maior intensidade. A uma posição de 170 mm do espelho MS4 aparece uma imagem do espelho MS2, sendo visível o orifício deste espelho (região não iluminada). A análise com o espelho esférico MS3 é similar, mas a imagem da fonte é formada a uma distância de 195 mm. Isto explica a necessidade de afastar o sensor de sua posição focal para obter-se um ganho de sinal.



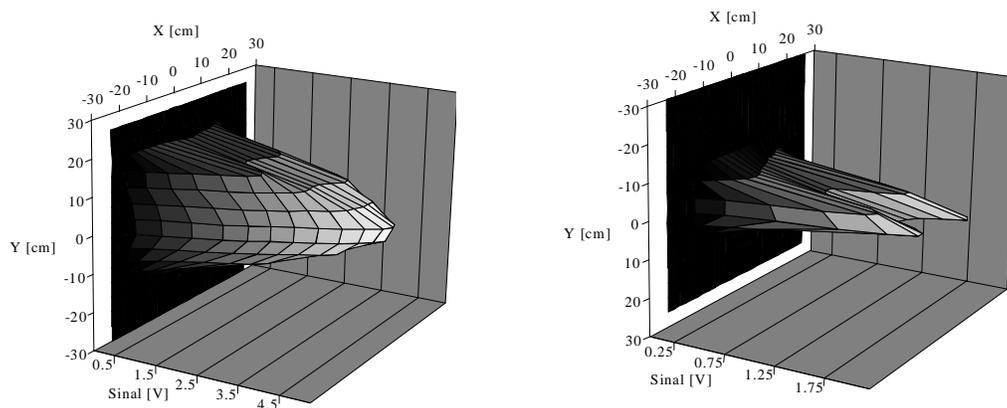
**Figura 4.** Espelho plano com o diafragma na posição  $2\text{ cm}^{-1}$



**Figura 5.** Espelho plano com o diafragma na posição  $0,5\text{ cm}^{-1}$



**Figura 6.** Espelho esférico com o diafragma na posição *open*

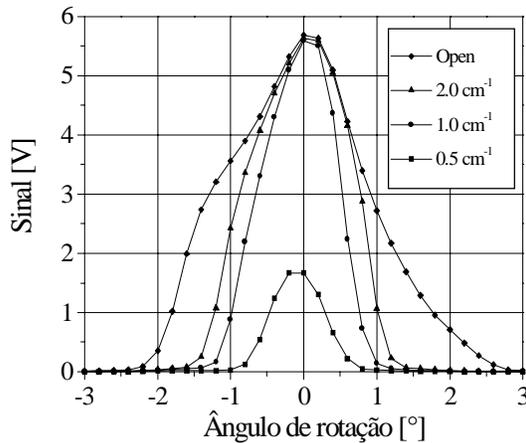


**Figura 7.** Espelho esférico com o diafragma na posição  $2 \text{ cm}^{-1}$

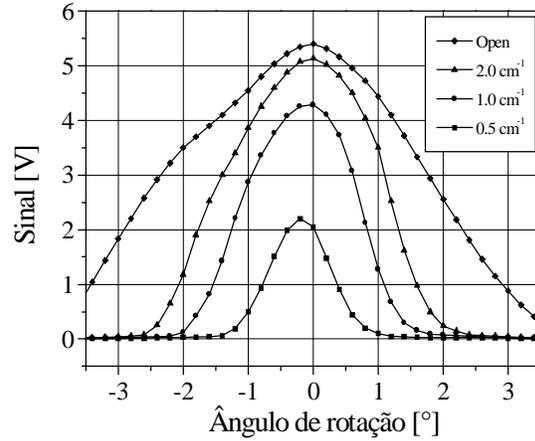
**Figura 8.** Espelho esférico com o diafragma na posição  $0,5 \text{ cm}^{-1}$

Na Fig. 9, vê-se as medidas realizadas para os quatro diferentes diafragmas, para o espelho plano MP3. O sensor não localiza-se no plano focal do espelho MS4 mas sim na posição de imagem da fonte (160 mm). O ângulo de divergência do feixe obtido experimentalmente está em concordância com os listados na Tabela 1. Na Fig. 10, observa-se que com a utilização do espelho esférico MS3 a divergência do feixe aumenta. Nesta configuração o sensor localiza-se a uma distância de 195 mm de MS4, sobre a imagem da fonte.

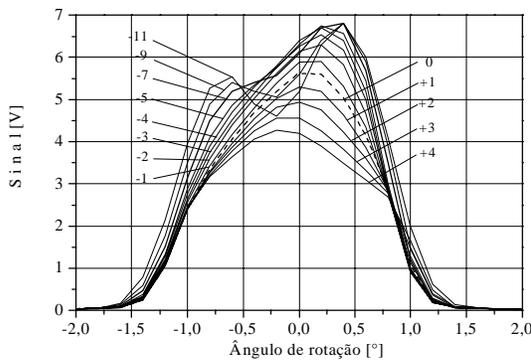
As Figs. 11 e 12 mostram o efeito da posição do sensor na determinação experimental do ângulo de divergência para uma resolução de  $2 \text{ cm}^{-1}$ . Para o espelho plano MP3, a posição 0 mm (sobre o plano imagem da fonte) não é a posição aonde o sinal é mais elevado. Um deslocamento na direção do espelho MS4 (direção positiva) reduz a intensidade do sinal. Na direção negativa, o sinal aumenta e para as posições mais distantes aparece a formação de um orifício. Para a Fig.12 nota-se o mesmo efeito, agora utilizando o espelho MS3. Novamente observa-se que a posição 0 mm não é a posição onde ocorre o máximo do sinal, mas o deslocamento do sensor não demonstrou a existência de um orifício. Neste caso, provavelmente o sensor esta situado numa posição inferior à região do furo, pois caso contrário, o sinal medido seria muito fraco.



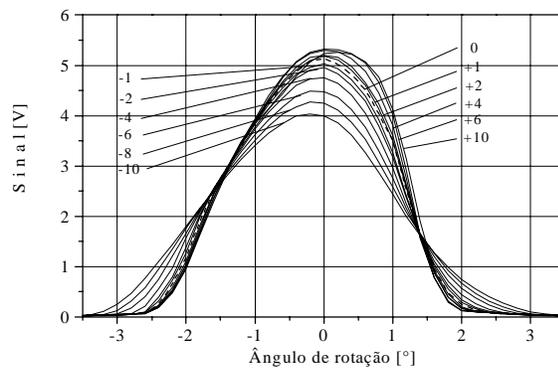
**Figura 9.** Ângulos de divergência para o espelho MP3 para diferentes aberturas do diafragma



**Figura 10.** Ângulos de divergência para o espelho MS3 para diferentes aberturas do diafragma



**Figura 11.** Divergência do feixe para uma resolução de 2 cm<sup>-1</sup> e utilizando o espelho MP3



**Figura 12.** Divergência do feixe para uma resolução de 2 cm<sup>-1</sup> e utilizando o espelho MS3

#### 4. CONCLUSÃO

Esta análise realizada sobre a ótica do feixe IR do BioRad FTS 60A permitiu verificar a influência da abertura do diafragma e do tipo de espelho utilizado na janela de saída deste espectrômetro. Verificou-se nos ensaios que embora o espelho esférico forneça uma maior quantidade de energia difusa, em contrapartida ele ocasiona um aumento do ângulo de divergência. Conclui-se então que o espelho plano é mais próximo das condições idealizadas no modelo 1-D.

Na seqüência deste trabalho faz-se necessário um estudo de sensibilidade na identificação de parâmetros. Um outro ponto necessário é o desenvolvimento de um código em geometria cilíndrica bidimensional para calcular os erros devido a não-uniformidade do feixe incidente.

#### 5. REFERENCIAS

- Doermann, D., 1995, "Modélisation des transferts thermiques dans des matériaux semi-transparents de type mousse à pores ouverts et prédiction des propriétés radiatives". Thèse de doctorat n° 95ISAL0010, INSA, Lyon. 271p.
- Glicksman, L., Schuetz, M., Sinofsky, M., 1987, "Radiation heat transfer in foam insulation". Int. J. Heat Mass Transfer, 30, pp. 187-197
- Griffiths, P.R., 1975, "Chemical infrared Fourier transform spectroscopy", New York : John Wiley and Sons- 337p.
- Henry, J.F., Bissieux, C., Marquie, S., Gillet, Y., 1997, "One-dimensional modelling and parameter estimation in scattering media. High temperatures-High Pressures", 29, pp. 159-164
- Moura, L.M., 1998, "Identification des propriétés radiatives des matériaux semi-transparents diffusants en situation de non-symétrie azimutale du champ radiatif". Thèse de doctorat 98ISAL0059. INSA, Lyon.- 210p.
- Nicolau, V.P., 1994, "Identification des Propriétés Radiatives des Matériaux Semi-Transparents Diffusants". Thèse de doctorat n° 94ISAL0001. INSA, Lyon. - 234p
- Silva Neto, A.J., Özisik, M.N., 1992, "An inverse analysis of simultaneously estimating phase function, albedo and optical thickness". ASME-HTD- Developments in Radiative Heat Transfer, 203, pp. 23-30
- Uny, G., 1986, "Modélisation du transfert couplé rayonnement-convection au sein de matériaux poreux et identification de leurs propriétés radiatives: application aux laines de verre". Thèse de Doctorat n° 86 ISAL 0007, INSA, Lyon. - 130p.