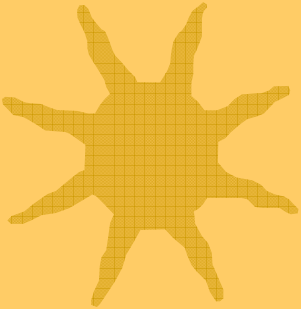




*Universidade Federal da Paraíba*  
*Laboratório de Energia Solar*

---

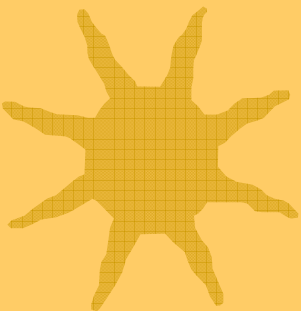


Método Flash

Estimação da Difusividade Térmica em Meios  
Semi-transparente

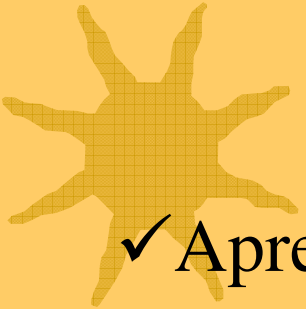


Prof. Dr. Zaqueu Ernesto da Silva

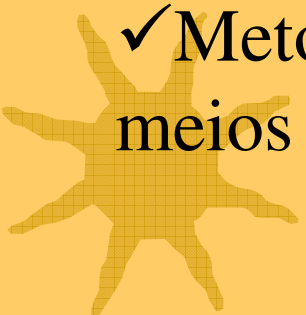


# *Objetivos*

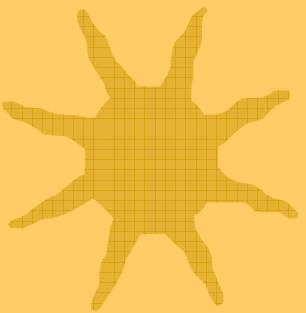
---



✓ Apresentar um histórico do Metodo Flash



✓ Metodologia de Estimação da difusividade térmica em meios Semitransparentes



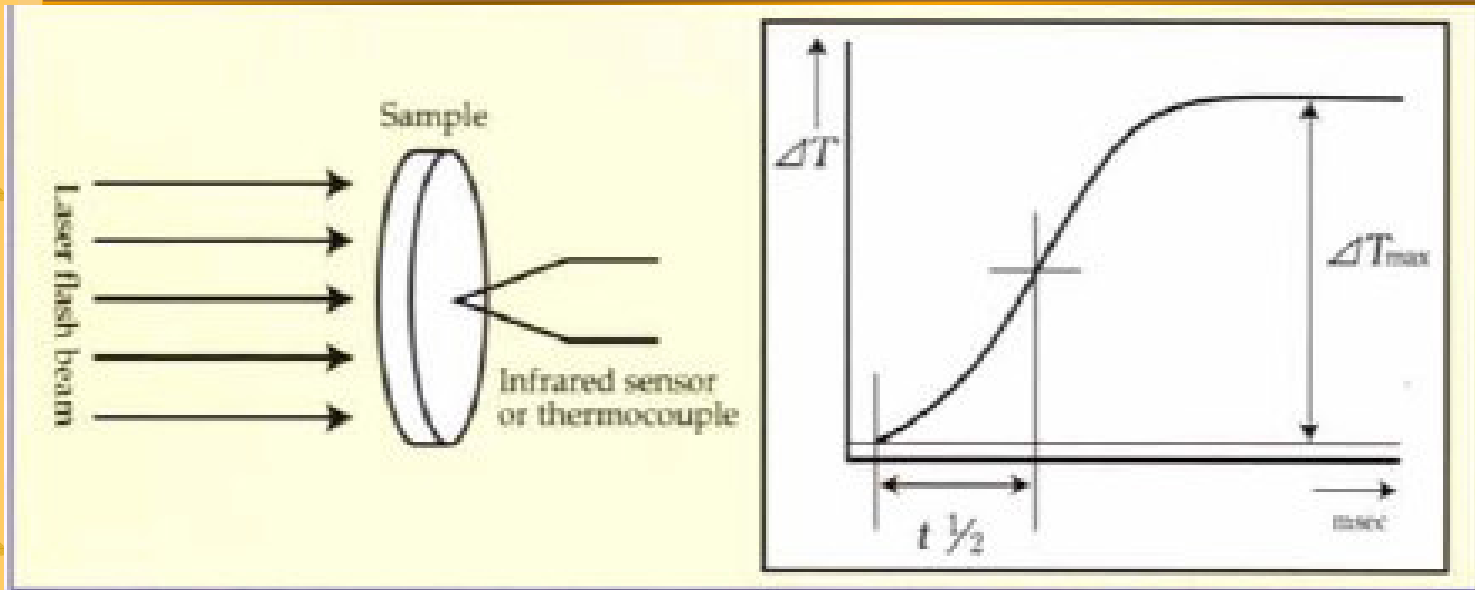


# *Método Flash*

## **Princípio**

- Corpo de Prova cilíndrico de faces paralelas.
- Inicialmente isotérmico.
- Submetido a um pulso térmico de energia radiante.
- A fonte é usualmente um LASER ou uma lâmpada flash de xenon.
- Duração do tempo de irradiação é da ordem de 1 milissegundo ou menos.
- A elevação da temperatura da face oposta do corpo de prova é medida e os valores da difusividade térmica são estimados a partir dos dados da elevação da temperatura versus tempo.
- A temperatura ambiente pode ser controlada por um pequeno forno ou um “chiller”.

# *Método Flash*



## **Observação**

A massa térmica do sistema deve ser pequena tanto quanto o possível para que uma rápida mudança na temperatura e o registro dos dados da evolução da temperatura no tempo também possa ocorrer rapidamente.



## *Método Flash* - Histórico

- O Método Flash foi descrito pela primeira vez em 1960 by Parker, Butler, Jenkins, and Abbott do U.S. Navy Radiological Defense Laboratory.
- **Em 1961 aparece o primeiro artigo sobre o Método Flash (Parker W.J., Jenkins R.J., Buttler G.P., Abbot G.L., J. Appl. Phys., Vol 32, n° 9, 1961).**
- O método flash face oposta - Corpo de prova sólido, bom condutor de calor e de pequenas dimensões (2 x 2 cm, 1 à 3 mm de espessura).
- O modelo teórico unidimensional, sem perdas de calor e a técnica de identificação elementar ( metade do tempo de alcance da temperatura máxima).
- Sistema de aquisição era constituído de um termopar de cromo-alumel (contacto separado), de um amplificador, de um osciloscópio e de uma máquina fotográfica do tipo polaróide.
- O pulso térmico era produzido por um flash de 400 Joules.



# *Método Flash* - Histórico

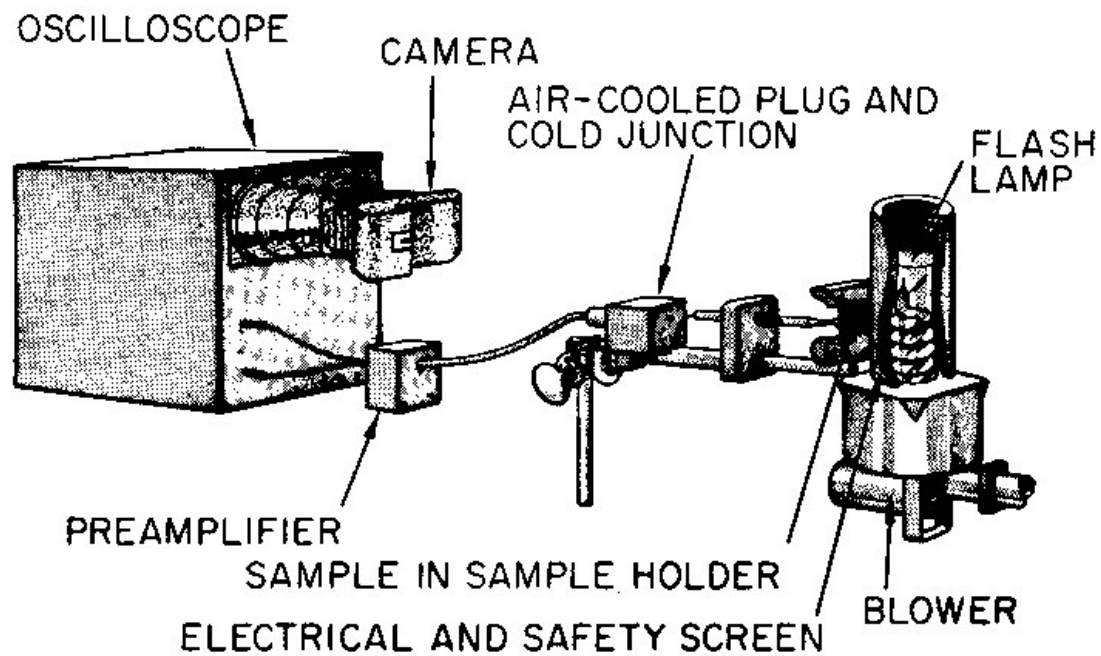


FIG. 3. Pictorial schematic of test setup.



## *Método Flash – 10 anos depois*

Melhorias foram realizadas nos Estados Unidos foram focadas :

- No dispositivo experimental.
- Sistema de aquisição de dados
- Modelo Teórico

Considerar as perdas.

Duração do Pulso

- Pouco progresso sobre a Técnica de Identificação.

Correções sobre o método de PARKER

- Considerar novos parâmetros supostamente conhecidos.
- A nível de pulso térmico – Aparecimento do do LASER.
- Outros meios de aquecimento.



## *Método Flash – Durante os anos 70*

---

A Europa, em particular a FRANÇA e a INGLATERRA vão se interessar pelo método FLASH

➤ Método Flash se desenvolve rapidamente.

Modelos Teóricos 3D são considerados

Novos métodos de identificação (coeficiente de perdas)

➤ Desperta o interesse de utilização do Método Flash para identificar outras grandezas dos materiais homogêneos ( Resistência Térmicas de Contacto)

➤ Os registradores vão substituir os osciloscópios. Inicialmente Galvanômetros depois potenciômetros.

➤ Os termopares de semicondutores aparecem ( $350 \mu\text{V}/\text{K}$  em lugar de  $40 \mu\text{V}/\text{K}$ ).

➤ Muda a faixa de temperatura - baixa e alta temperaturas.





## *Método Flash – Durante os anos 80*

---

Entrada dos países do Leste Europeu.

- Os pesquisadores da área de automação, começam a utilizar técnicas de identificação. Isto é possível graças ao progresso eletrônica numérica e centrais de aquisição de boa qualidade ( sem ruídos em particular).
- Medições de temperaturas sem contacto (por fotomultiplicador depois por detector fotovoltaico ou foto resistivo) modificam radicalmente as possibilidades d aplicação.
- Medições de temperaturas na face frontal se torna possível;
- E associado ao uso do laser como fonte de pulso as estimações à altas temperaturas se torna possíveis



## *Método Flash – Durante os anos 90*

---

- Aparece no seio da comunidade Engenharia Térmica o paradigma “Métodos INVERSOS” e o arsenal matemático que o acompanha, fez realmente progredir a METROLOGIA TÉRMICA em todas as suas possibilidades.
- A utilização da Câmara Infravermelho – Instrumento de medida que vai ainda estender as aplicações do método aos materiais anisotrópicos ou da busca de falhas em novos materiais.
- O Osciloscópio Numérico e as cartas de aquisição de dados permitem aumentar o suporte técnico experimental



## *Método Flash - Difusividade Térmica*

O caso clássico da medida da difusividade térmica de um material homogêneo, o modelo 1D com perdas ( O estudo de sensibilidade mostra que as perdas laterais são correlacionadas com as perdas axiais ):

$$T = \frac{Q}{\rho c e} f\left(\frac{he}{\kappa}, \frac{\alpha t}{e^2}\right)$$

Neste caso três parâmetros precisam ser identificados:

$$\frac{Q}{\rho c e}, \frac{he}{\kappa}, \frac{\alpha}{e^2}$$

As condições de validade permitem determinar a espessura do corpo de prova para poder negligenciar a forma do pulso.



## *Método Flash – Dispositivos Experimentais*

---

Os dispositivos experimentais são de diversos tipos, combinando o gerador do pulso e o detector de temperatura:

- Pulso do tipo Flash ou Laser
- Detector de temperatura seja de termopares ou infravermelho

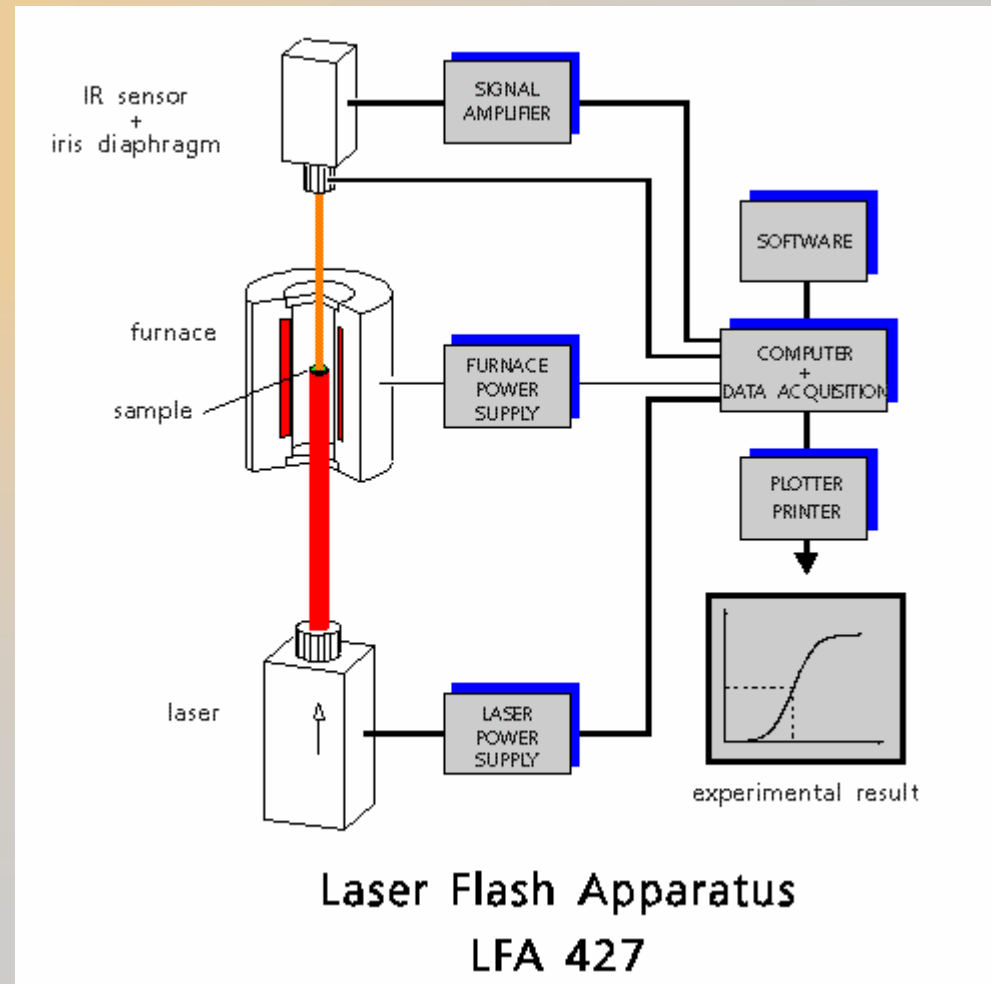
### Exemplos

- Lâmpada Flash + Termopares de semi-condutores - Baixa temperatura ou/e corpos de prova de grandes dimensões.
- Lâmpada Flash + Detector infravermelho - Médias temperaturas e/ou corpos de provas de grandes dimensões

Laser + Detector infravermelho - Altas temperaturas e para corpos de provas de pequenas dimensões e de difusividade térmica elevada.



# *Método Flash – Dispositivos Experimentais*





## *Método Flash – Métodos de Identificações*

Fórmula clássica de PARKER – O valor da difusividade pode ser calculado da metade do tempo  $t_{1/2}$  usando a relação

$$\alpha = \frac{0.138}{t_{1/2}} e^2$$

Onde  $t_{1/2}$  é o tempo do início do pulso até que a elevação da temperature da face oposta alcance 1/2 (um meio) do valor máximo.

Atualmente se utiliza algum percentual da elevação

$$\alpha = \frac{K_x}{t_x} e^2$$

Onde  $K_x$  é a constante correspondente ao percentual  $x$  da elevação e  $t_x$  é o tempo correspondente do percentual de elevação.



## *Método Flash – Métodos de Identificações*

---

Os métodos dos mínimos quadrados não-lineares

- Gauss-Newton Não Linear
- Levenberg Marquardt

Observação

As incertezas dos parâmetros identificados são calculadas



# *Método Flash* *outras grandezas termofísicas*

Resistência de Contato - Modelo com 3 parâmetros

$$T = \frac{Q}{C_T} f(h, R_c, t)$$

Espessuras de depósitos ou Revestimento - Modelo com 4 parâmetros

$$T = \frac{Q}{C_T} f(\rho c_d, \kappa_d, h, t)$$

Meios Semitransparentes - Modelo com 5 parâmetros

$$T = \frac{Q}{\rho c_e} f(\rho c, \kappa, R_r, h, t)$$

Outras possibilidades

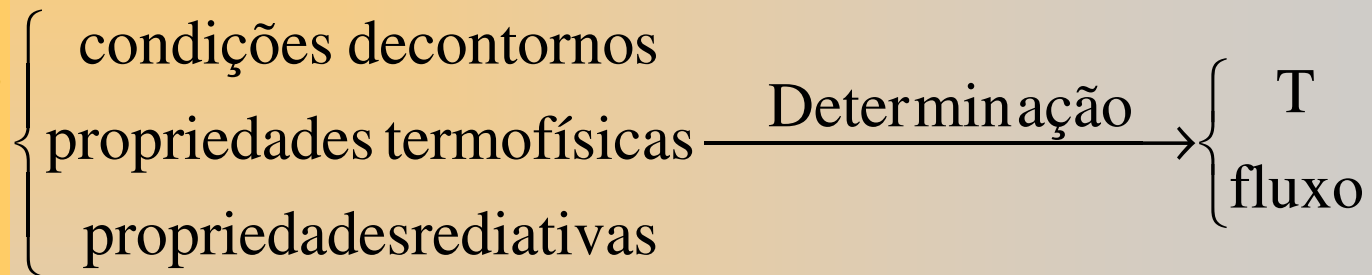
Difusividade Transversa de materiais  
anisotrópicos  
Difusividade de líquidos  
Controle não destrutivo



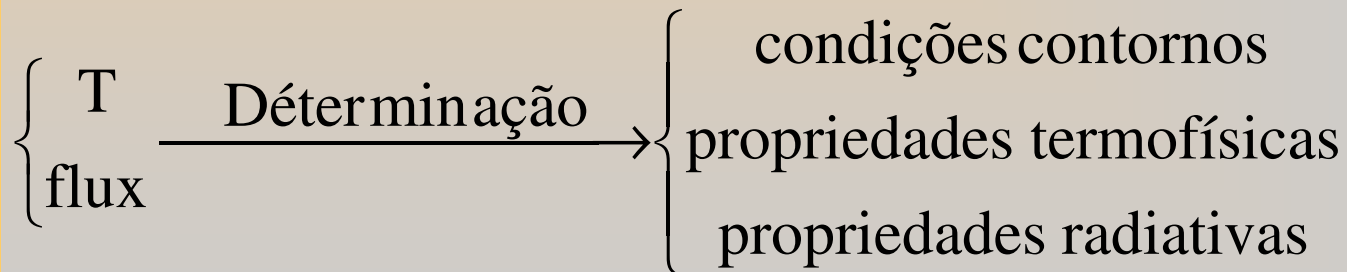


# Método Flash – Estimação da Difusividade Térmica de Meio Semitransparente

## Problema direto



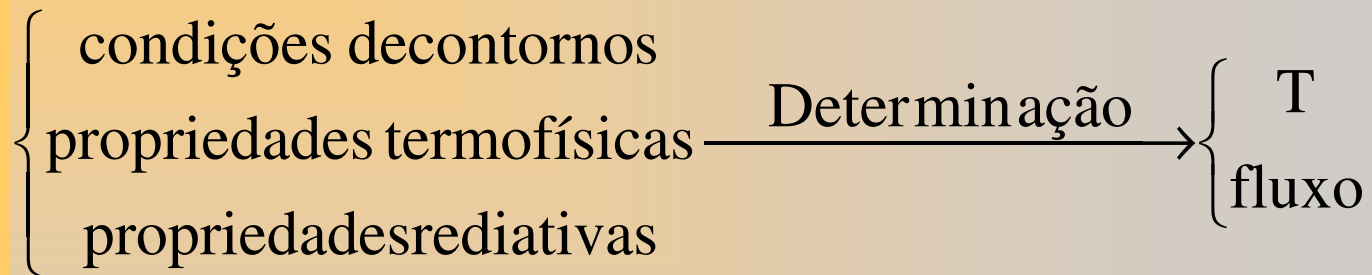
## Problema inverso



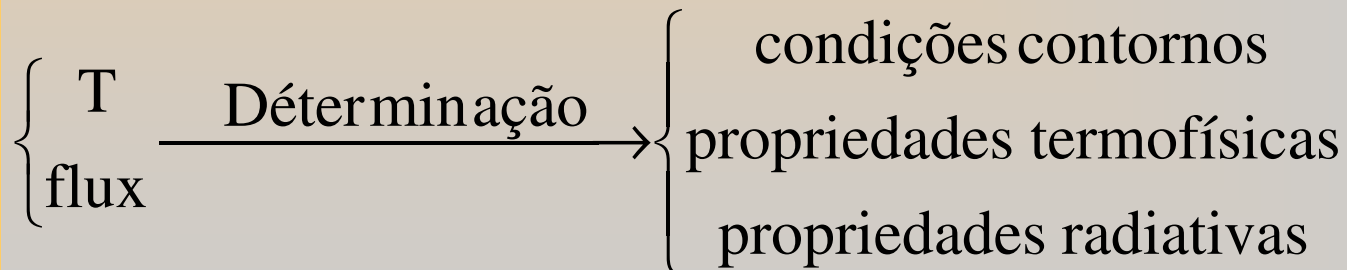


# Método Flash – Estimação da Difusividade Térmica de Meio Semitransparente

## Problema direto



## Problema inverso





# Parametrização

$$a = \frac{\lambda}{\rho c_p} ; N = \frac{\beta \lambda}{4n^2 \sigma T_e^3} ; B_i = \frac{he}{\lambda} ; T_r = \frac{q_{\text{flash}}}{\rho c_p} ; Fo = \frac{at}{e^2} ; \tau_z = \beta e$$

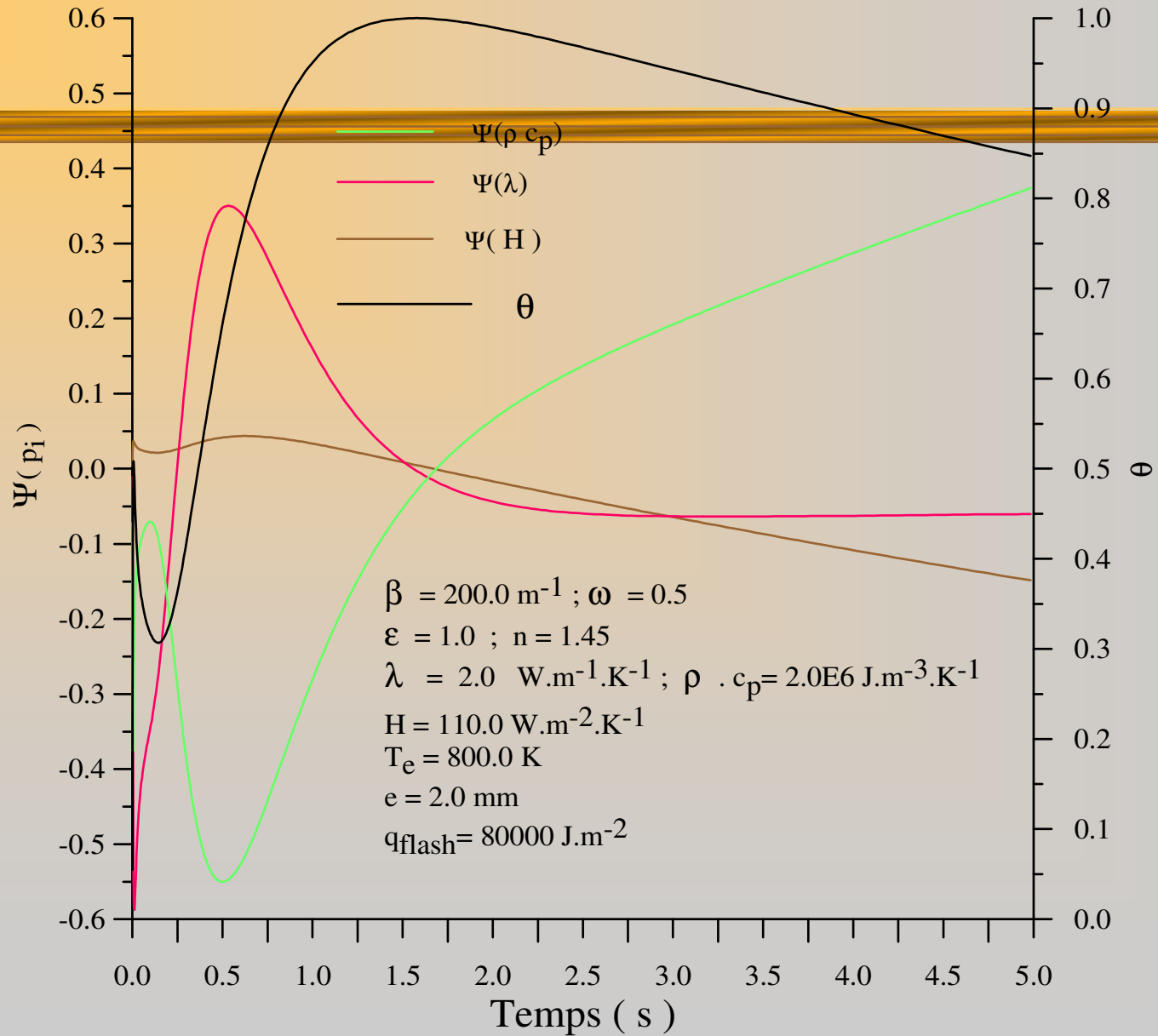
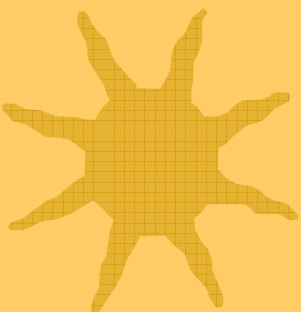
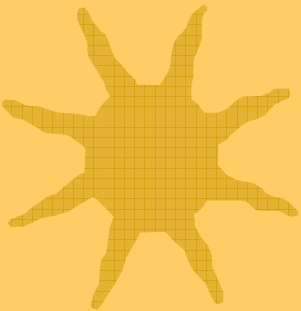
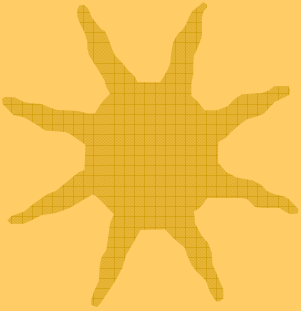


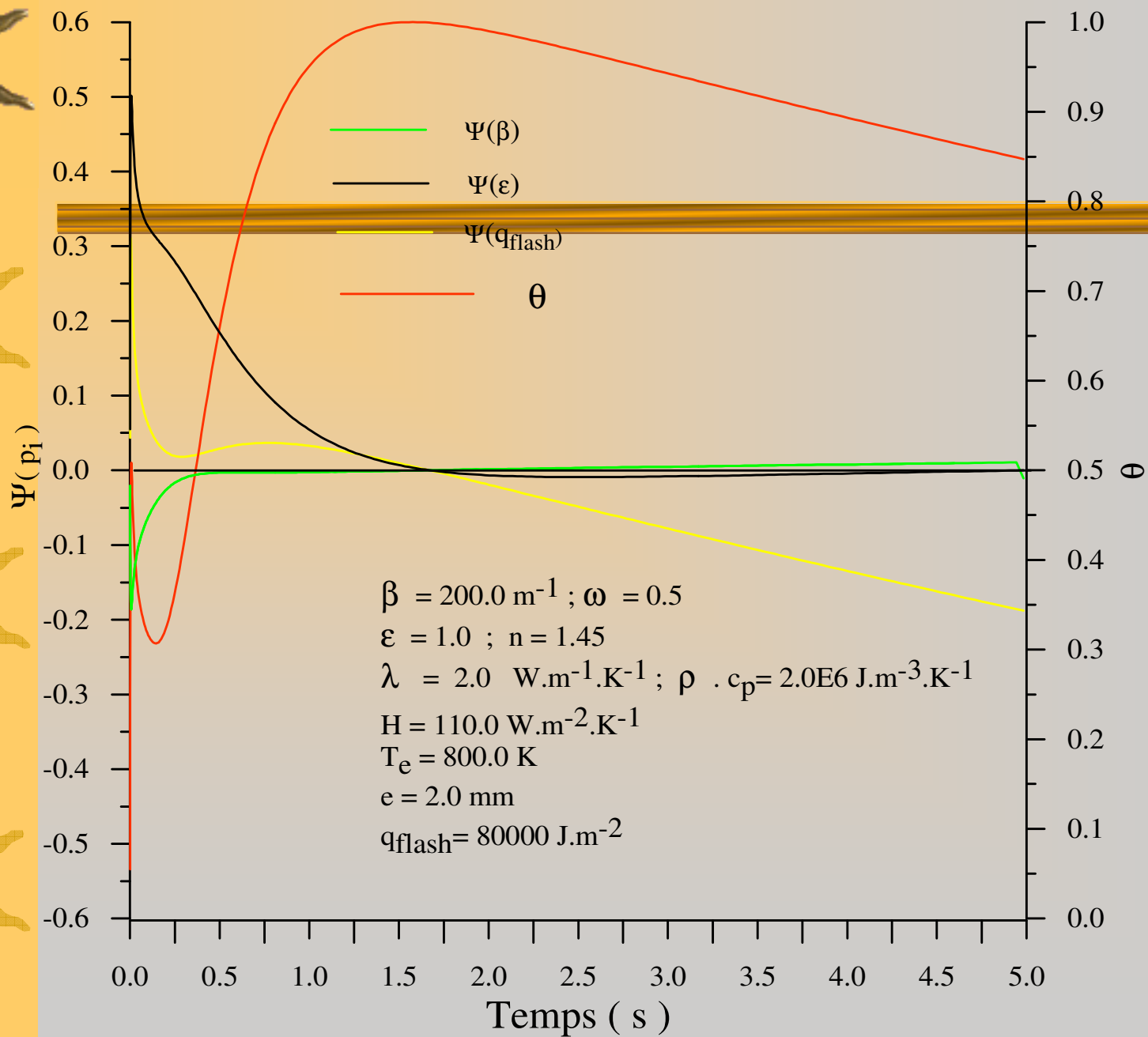
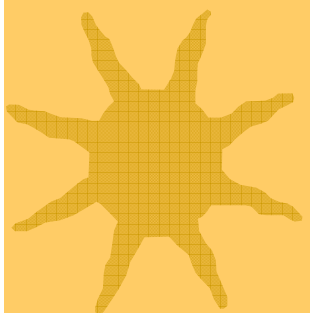
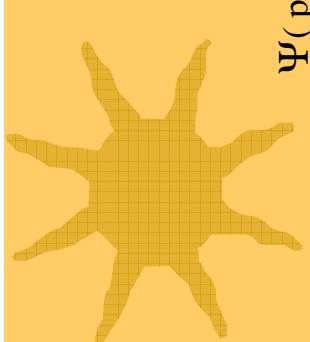
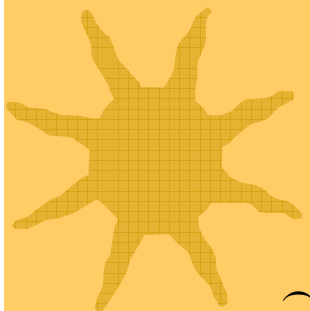
$$\theta^* \xrightarrow{f} \left\{ \begin{array}{c} Fo \\ Bi \\ N \\ T_r \\ \tau_z \\ \omega \\ \varepsilon \end{array} \right.$$

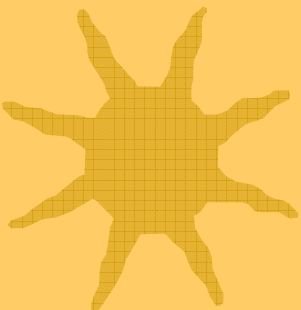
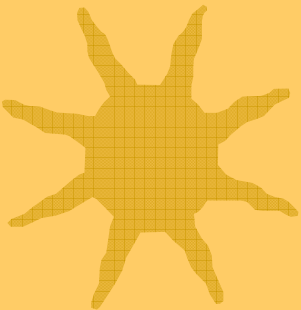
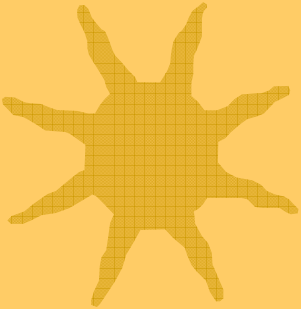
$$\theta^* \xrightarrow{f} \left\{ \begin{array}{c} t \\ h \\ \lambda \\ \rho c_p \\ e \\ q_{\text{flash}} \\ \beta \\ \omega \\ \varepsilon \end{array} \right.$$



# Estudo de Sensibilidade (Superfície Negra)







# Identificações a partir de dados contaminados

## Méthode de Levenberg - Marquardt

Resultados de identificações simuladas

| Parametros   |                            | Valores  |  |
|--|----------------------------|--|--|
| entrada  | saída                      | Reals  | Identificado   |
| $\varepsilon=1, H=110,$<br>$\beta=200$<br>$q_{\text{flash}}=8.10^5$                                | $\lambda$<br>$\rho c_p$    | $\lambda = 2.0$<br>$\rho c_p = 2.10^6$<br>$a = 10^{-6}$                    | $\lambda = 1,95 \pm 0,26.10^{-1}$<br>$\rho c_p = 2,054.10^6 \pm 0, 24.10^5$<br>$a = 9,5.10^{-7} \pm 1,4.10^{-8}$                         |
| $\beta=200$<br>$\varepsilon=1.0$<br>$q_{\text{flash}}=8.10^5$                                      | $H, \lambda, \rho c_p$     | $H = 110.0$<br>$\lambda = 2.0$<br>$\rho c_p = 2.10^6$<br>$a = 10^{-6}$     | $H = 117.8 \pm 11.4$<br>$\lambda = 1.99 \pm 0,29.10^{-1}$<br>$\rho c_p = 2,02.10^6 \pm 0,82.10^5$<br>$a = 0,98.10^{-7} \pm 2,08.10^{-8}$ |
| $H=110$<br>$\varepsilon=1.0$<br>$q_{\text{flash}}=8.10^5$  | $\beta, \lambda, \rho c_p$ | $\beta = 200.0$<br>$\lambda = 2.0$<br>$\rho c_p = 2.10^6$<br>$a = 10^{-6}$ | $\beta = 196.0 \pm 26.4$<br>$\lambda = 1.995 \pm 0.196$<br>$\rho c_p = 1,97.10^6 \pm 0,192.10^6$<br>$a = 1.013.10^{-6} \pm 7,8.10^{-9}$  |
| Dados da simulação : $\Delta t = 1.0 - \text{Exp}(-i.2.23^{-5})$ ; $\delta = 0.05T_{\text{max}}$ . |                            |  |  |
| Intervalo de identificação : $0 \leq t \leq 0.53$ ; malha : 21 nodos                               |                            |  |  |

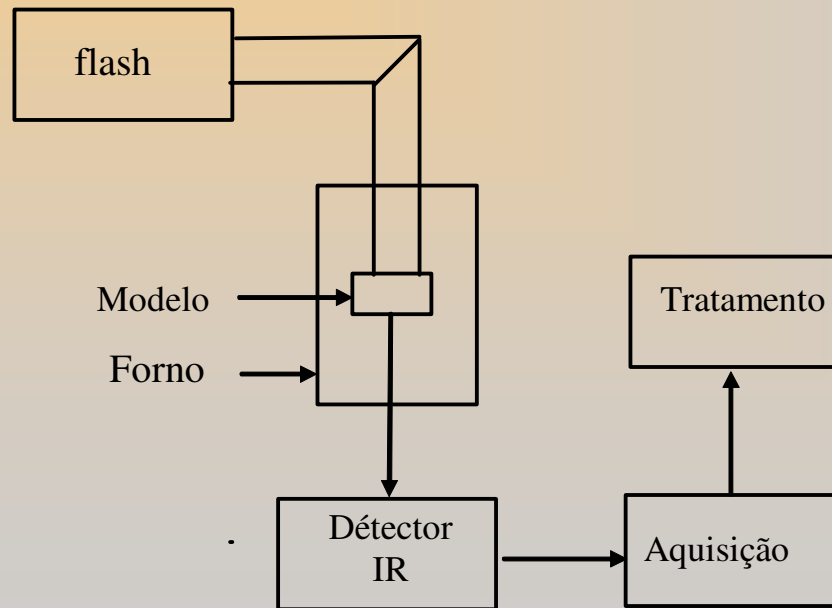


# RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Thermogramas

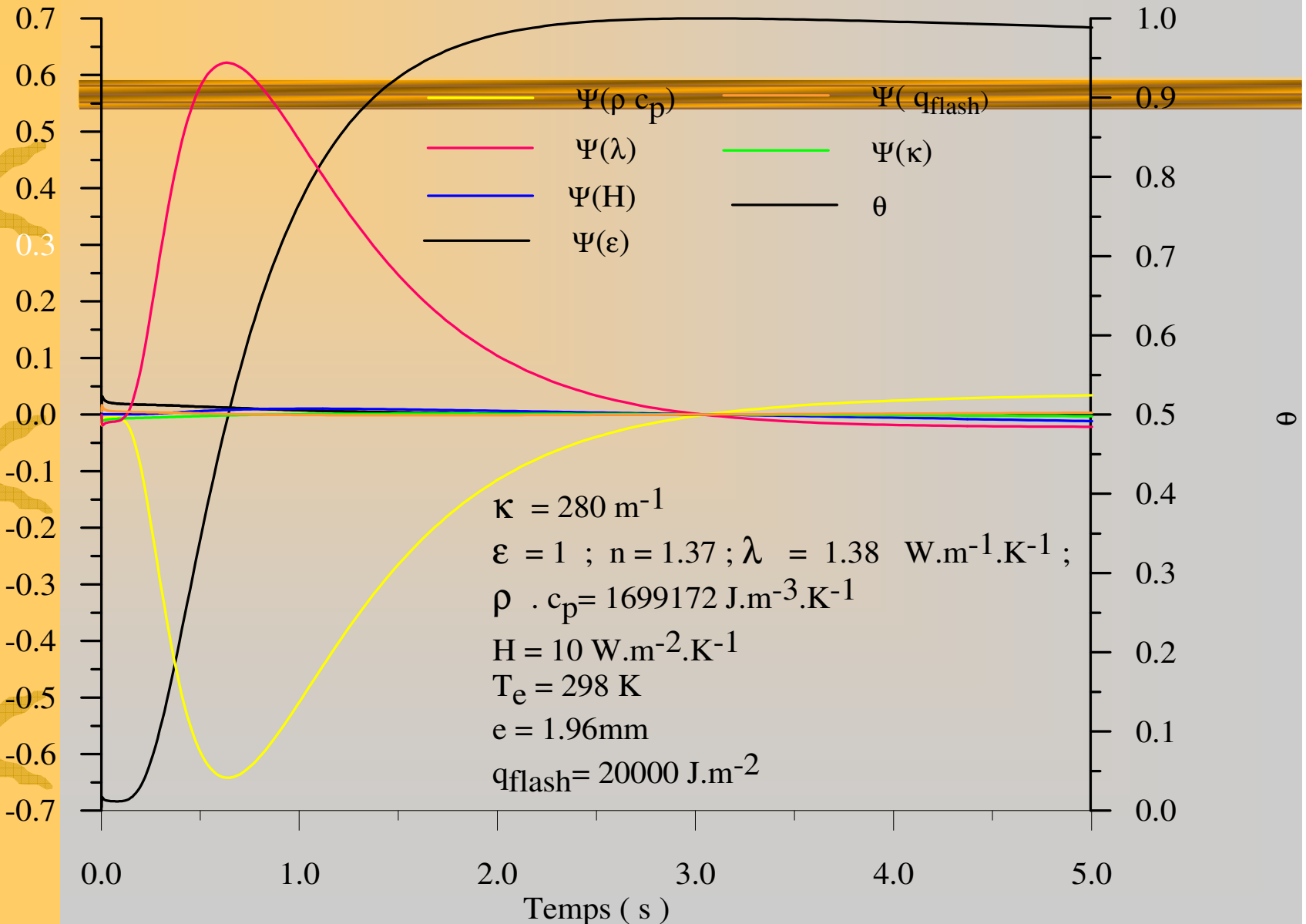
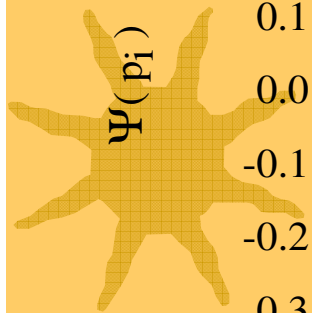
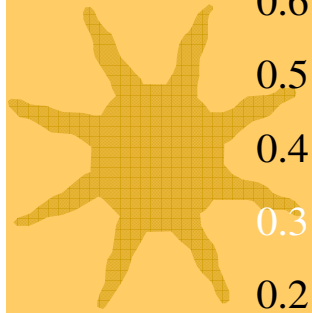
CEACESTA  $\Rightarrow$  VerredeSilice

LEMTA  $\Rightarrow$  Irtran2



Dispositivo Experimental

# Análise de Sensibilidade



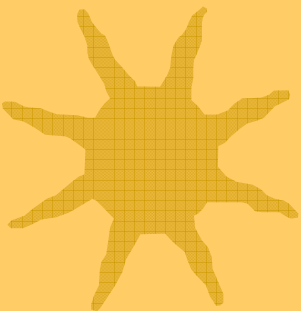
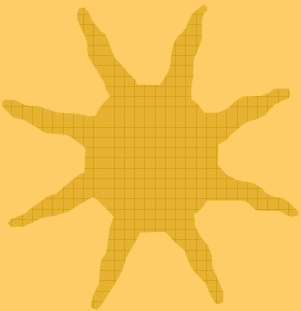
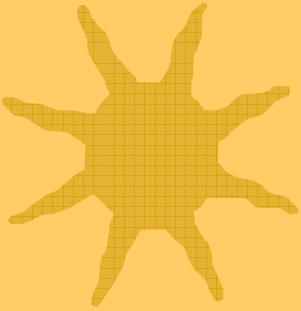




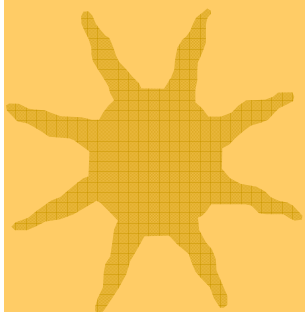
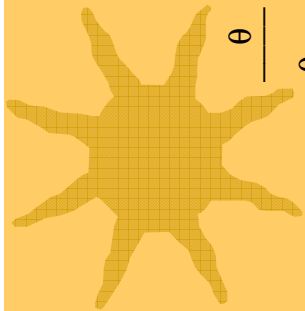
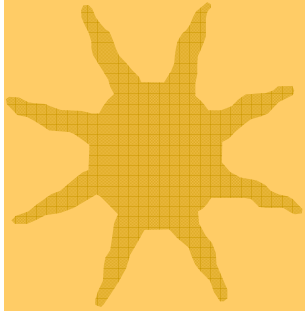
# Resultados

*SUPRASIL* ( $R=20\text{ mm}$ ,  $e = 1.96\text{ mm}$ ,  $T_e=298\text{ K}$ ).

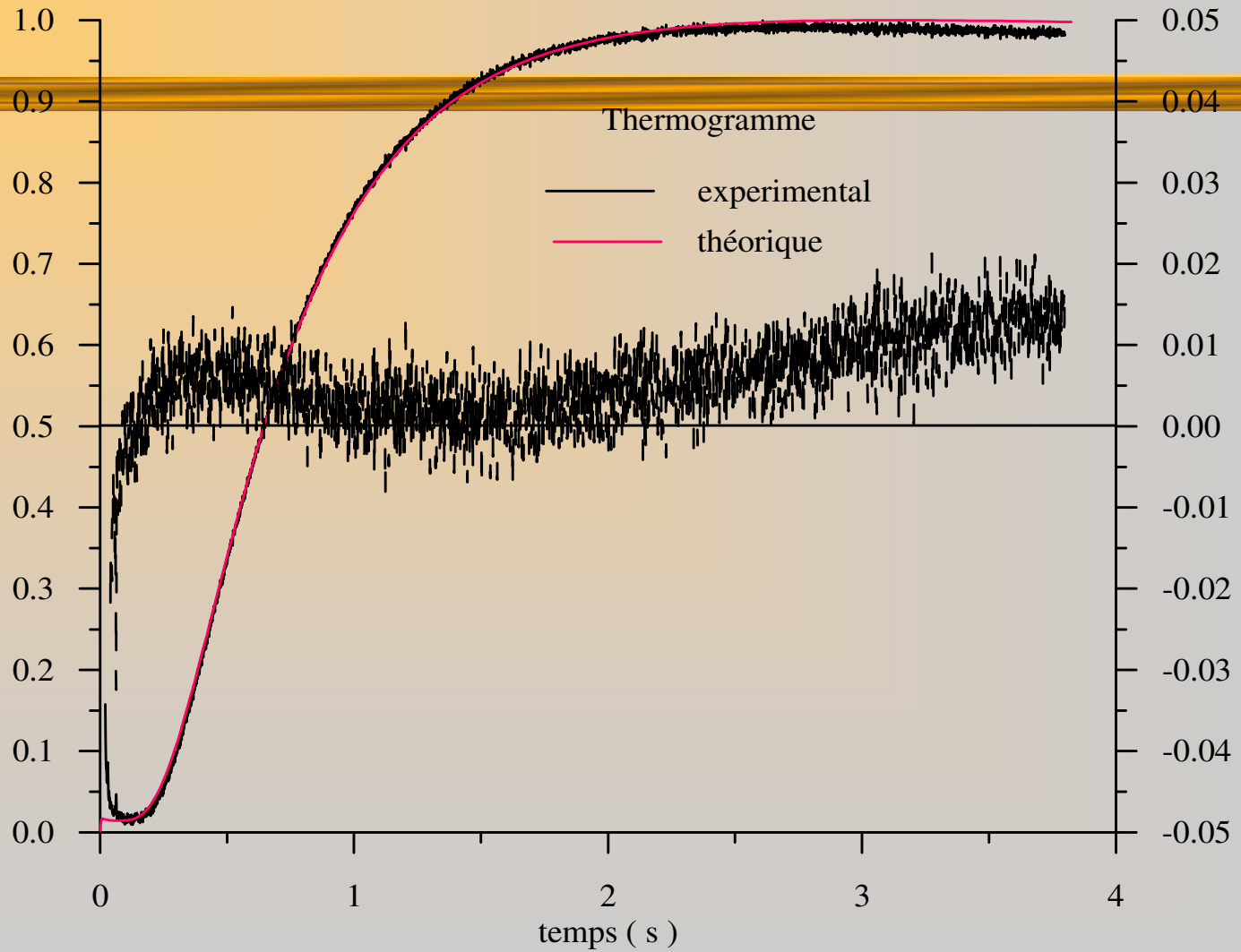
| Parametros (SI)   |                      |  |                           |
|---|----------------------|--|---------------------------|
| Connus  | Inconnus             | Estimées   | Fabricant                 |
| H=10<br>q <sub>flash</sub> =20000   | $\lambda, \rho c_p,$ | $\lambda = 1.18$<br>$\rho c_p =$<br>$1,47 \times 10^6$ | 1.38<br>$1,7 \times 10^6$ |
| $\epsilon = 1.0$<br>$\beta = 280$   |                      | $\alpha = 8,05 \times 10^{-7}$                         | $8,1 \times 10^{-7}$      |
| pas du temps : $\Delta t = 0.001\text{ s}$ maillage : 21 noeuds<br>Intervalle d'identification : $0.009 \leq t \leq 0.6;$ |                      |  |                           |



# Residuos



$\theta$   
 $\theta_{\max}$





# Resultados

*SUPRASIL* ( $R=20\text{ mm}$ ,  $e = 1.96\text{ mm}$ ,  $T_e=723\text{ K}$ ).

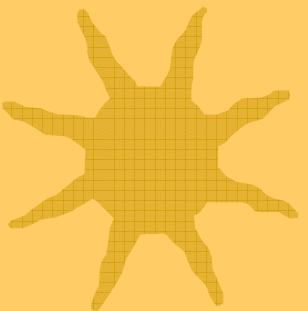
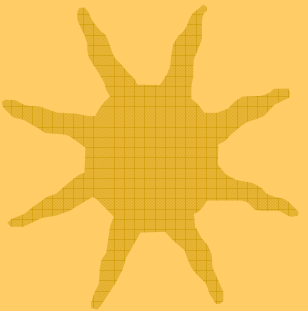
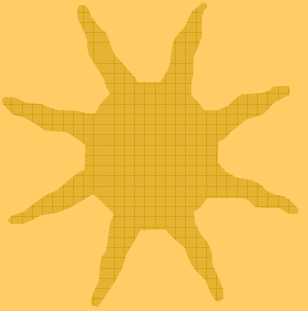
| Paramètres (SI)   |                      |                                |                                |
|---|----------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Connus  | Inconnus             | Estimées                       | Fabricant                      |
| H=85  | $\lambda, \rho c_p,$ | $\lambda = 1.91$               | $\lambda = 1.93$               |
| $q_{\text{flash}}=20000$  |                      | $\rho c_p = 2,9 \times 10^6$   | $\rho c_p = 2,4 \times 10^6$   |
| $\varepsilon=1.0$   |                      | $\alpha = 6,54 \times 10^{-7}$ | $\alpha = 7,79 \times 10^{-7}$ |
| $\beta=280$   |                      |                                |                                |
| pas du temps : $\Delta t = 0.001\text{ s}$ : maillage : 21 noeuds |                      |                                |                                |
| Intervalle d'identification : $0.009 \leq t \leq 0.6$ ;           |                      |                                |                                |



## Difusividade termica du IRTRAN 2 (ZnS)

| température (K) | ce travail           | LEMMA                |
|-----------------|----------------------|----------------------|
| 298*            | $8,46 \cdot 10^{-6}$ | $8,3 \cdot 10^{-6}$  |
| 633             | $3,08 \cdot 10^{-6}$ | $3,01 \cdot 10^{-6}$ |
| 783             | $2,1 \cdot 10^{-6}$  | $2,46 \cdot 10^{-6}$ |

pas du temps :  $\Delta t = 0.001$  ; \* $\Delta t = 0.0005$  s ; 21 noeuds  
Intervalle d'identification :  $0.001 \leq t \leq 0.6$



Obrigado.....