

*Instituto Superior Técnico*

**Transmissão de Calor**

**Docente: Viriato Semião**

---

## **Condução de Calor: Arrefecimento de um sólido por convecção forçada**

**- Relatório de Projeto -**

---

### ***Autores***

Diogo Faustino, 95782

Francisco Alves, 95787

Pedro Farinha, 95838

Rodrigo Sequeira, 96480

30 de outubro de 2022

# Índice

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Descrição do problema em estudo</b>	<b>4</b>
2.1	Geometria do sólido e características do material . . . . .	4
2.2	Método da Capacitância Global . . . . .	5
2.3	Solução Analítica . . . . .	6
2.4	Solução Numérica: <i>TEACH-C</i> . . . . .	8
2.5	Escolha do ponto monitor . . . . .	9
<b>3</b>	<b>Resultados</b>	<b>11</b>
3.1	Número de Biot e Método da Capacitância Global . . . . .	11
3.2	Estudo de independência da malha . . . . .	11
3.3	$T(t)$ para o centro geométrico . . . . .	13
3.4	$T(t)$ para os centros das faces laterais . . . . .	14
3.5	Análise do número de termos utilizados na solução analítica . . . . .	16
3.6	Verificação da aproximação a um problema 2D . . . . .	17
3.7	Discussão . . . . .	18
3.7.1	Diferença entre método da Capacitância Global e solução analítica . . . . .	18
3.7.2	Diferença entre método numérico e solução analítica . . . . .	19
3.7.3	Distribuição espacial de temperaturas . . . . .	19
<b>4</b>	<b>Conclusão</b>	<b>20</b>
	<b>Referências</b>	<b>21</b>
	<b>Apêndice</b>	<b>22</b>
	<b>Anexo</b>	<b>27</b>
	Anexo-1 . . . . .	27
	Anexo-2 . . . . .	55

### Resumo

O presente relatório foi realizado no contexto do projeto da unidade curricular Transmissão de Calor, com foco num problema de lingotamento contínuo de um tarugo de latão por convecção forçada. O objetivo foi a comparação de resultados entre diferentes métodos: Método da Capacitância Global, método analítico a duas e três dimensões, e método numérico com recurso a um programa de elementos finitos em MATLAB, *TEACH-C*. O primeiro método foi usado fora da sua região de validade, pelo que o resultado é analisado para avaliar a sua precisão no problema em estudo. O método analítico é baseado na formulação de Yener e Kakac [2], em que se avaliam os resultados em função da quantidade de termos  $\xi_n$ , soluções da equação transcendental, usados na série que define a solução. Por fim, desenvolve-se uma solução numérica, com condições iniciais e de fronteira adaptadas ao problema, bem como uma malha cuja independência nos resultados é estudada. Este tipo de problema é de extrema importância no dimensionamento de centrais metalúrgicas, pois a rapidez da convecção dita tanto a velocidade da extração como as dimensões da zona de arrefecimento. Constataram-se diferenças nos resultados obtidos pelo Método da Capacitância Global em relação aos restantes, que entre si revelaram resultados semelhantes, pelo que se conclui que a hipótese de temperatura constante em todo o corpo não é fiável para o número de Biot obtido. Os resultados confirmaram que a aproximação 2D do problema se revela satisfatória. A solução numérica foi obtida com independência da malha, e foi assegurado um compromisso entre a qualidade dos resultados e o tempo de computação. Como conclusão global, constata-se que o tempo de estabilização da temperatura do sólido é aproximadamente comum a todos os métodos, pelo que, para os efeitos práticos acima descritos, todas as soluções poderão ser utilizadas com relativa validade.

### Contribuições dos Autores

Os alunos Pedro Farinha, Francisco Alves, Diogo Faustino e Rodrigo Sequeira realizaram em conjunto a análise e discussão dos resultados. A contextualização do problema e o estabelecimento de bases teóricas esteve a cargo dos alunos Diogo Faustino e Rodrigo Sequeira, o desenvolvimento da análise analítica teve como responsável o aluno Francisco Alves, e o aluno Pedro Farinha esteve mais focado na realização do método numérico e no estudo da independência da malha. Contudo, é necessário realçar que ao longo do trabalho houve diversos debates sobre o que se devia fazer e como fazer, e também houve um processo de entre-ajuda, garantindo que todos os elementos estivessem presentes em todas as componentes do trabalho.

# 1 Introdução

Este projeto tem como objetivo o estudo da transmissão de calor em regime transiente através da simulação do arrefecimento de uma barra de metal proveniente do processo de lingotamento contínuo, usado em várias indústrias metalúrgicas. Este processo é utilizado para produzir tarugos ou barras, com diferentes secções transversais, a altas temperaturas. Estas barras são depois sujeitas a um arrefecimento, natural ou forçado, por convecção com o ar atmosférico, quer suspensas no ar ou em contacto direto com o chão, que neste projeto se considerou adiabático. O seu interesse científico reside na comparação feita entre três métodos diferentes de análise da distribuição da temperatura na barra.

O caso em estudo (enunciado K) é o de uma barra de latão com secção quadrada que, após o processo de lingotamento contínuo, é arrefecida por convecção forçada, estando a sua base assente no chão. Note-se que, dadas as dimensões da secção transversal da barra  $H$  em comparação com o seu comprimento  $L$ ,  $L \gg H$ , o problema pode ser encarado como bidimensional.

Com a informação apresentada na secção 2, desenvolve-se um estudo da evolução térmica do corpo através de vários métodos. Primeiramente, é determinado o número de Biot para o caso em estudo, de modo a aplicar o Método da Capacitância Global para a determinação da evolução temporal da temperatura do sólido na secção 3.1. No uso deste método, que é limitado a uma gama de número de Biot  $Bi < 0.1$ , é assumida a sua validade, independentemente do valor obtido. De seguida, usando o coeficiente de convecção  $h$  fornecido, determina-se a solução analítica da distribuição espacial e temporal de temperatura. Em conjunto com o método numérico utilizado, todas as soluções são comparadas ao longo das secções 3.3, 3.4 e 3.6. Por último, o código *TEACH-C*, um programa computacional de elementos finitos fornecido pelo corpo docente, é ajustado ao caso em estudo de acordo com as secções 2.4 e 2.5, quer em termos de propriedades, condições iniciais e de fronteira, e características da malha, com o objetivo de obter uma solução numérica para o plano central vertical, com especial foco na evolução temporal da temperatura no centro geométrico do sólido e nos centros das faces de maiores dimensões. Para obter as evoluções de temperatura nos pontos acima referidos, incorporou-se código adicional para permitir a extração dos resultados a ser usados. Para além disto, realizou-se na secção 3.2 uma análise que garante que os resultados obtidos são independentes da malha escolhida.

Após a análise do problema através dos três métodos descritos, são apresentados alguns gráficos das diferenças entre as soluções requeridas na secção 3.7, com o objetivo de comparar os resultados obtidos, analisar as diferenças entre eles e concluir acerca da validade de cada um, bem como destacar qual dos métodos é o mais indicado para as condições descritas.

## 2 Descrição do problema em estudo

O objeto em estudo é, então, um lingote de latão sólido, cuja temperatura inicial corresponde a uma distribuição uniforme a  $1150\text{ }^{\circ}\text{C}$ . O metal encontra-se pousado no chão, sendo arrefecido por convecção forçada com o ar atmosférico, a  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Como referido, o chão é considerado como uma superfície adiabática. O coeficiente de convecção fornecido para a configuração em estudo foi de  $250\text{ W/m}^2\text{K}$ . Assim, deseja obter-se a distribuição temporal de temperatura ao longo do sólido, recorrendo ao Método da Capacitância Global, a uma abordagem analítica e a uma solução numérica.

Nesta secção apresenta-se uma breve descrição das soluções encontradas, dos modelos matemáticos e respetivas condições de fronteira, tal como as condições iniciais que foram definidas no enunciado do problema. Também se discutirá o modelo numérico explorado, o seu domínio computacional e a discretização do mesmo - as malhas utilizadas para a simulação.

Para estabelecer uma solução analítica é necessário definir as condições iniciais e as condições de fronteira do problema. No enunciado é dito que o corpo está a uma temperatura uniforme num instante inicial, logo  $T(x, 0) = T_i = 1150^{\circ}\text{C}$  e  $\theta^*(x, 0) = 1$ . Para além disto, espera-se que  $\lim_{t \rightarrow \infty} T(x, t) = T_{\infty} = 20^{\circ}\text{C}$ . Por se tratar duma dissipação de calor puramente convectiva, é possível afirmar que a condução de calor à superfície do material é igual à convecção de calor na mesma direção. Uma vez que a fronteira não pode armazenar energia, o fluxo de calor a entrar na superfície por condução deve ser retirado por convecção, ou seja,  $-k \frac{\partial T(L, T)}{\partial x} = h[T_{\infty} - T(L, T)]$  [1]. Por último, a fronteira com o solo é considerada adiabática e isso constitui a condição  $\frac{\partial T(0, t)}{\partial y} = 0$

### 2.1 Geometria do sólido e características do material

O sólido estudado foi o sólido **K** de latão, um paralelepípedo quadrangular com dimensões  $H = 24\text{ cm}$  e  $L = 300\text{ cm}$ , tal como indicado na figura em baixo (figura 2). A área do corpo através da qual se deu a convecção corresponde a todas as superfícies à exceção da inferior, pois está em contacto com o solo. Este valor corresponde a  $A_s = 2.2752\text{ m}^2$ . Já o volume do corpo é  $V = 0.1728\text{ m}^3$ .

Apresenta-se, de seguida, o referencial que foi considerado ao longo de todo este projeto.

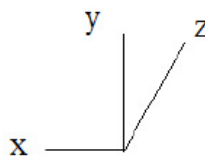


Figura 1: Referencial

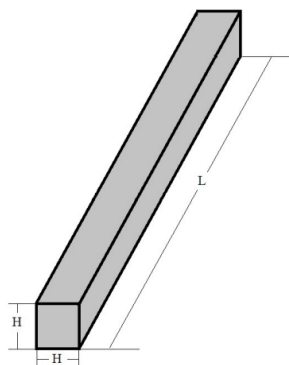


Figura 2: Esquema do sólido de metal em estudo

As propriedades do latão encontram-se listadas de seguida.

	<b>Latão</b>
<b>Massa Volúmica</b> [kg/m <sup>3</sup> ]	7930
<b>Calor específico</b> [J/KgK]	385
<b>Condutividade Térmica</b> [W/mK]	121
<b>Difusividade Térmica</b> [m <sup>2</sup> /s]	39.6·10 <sup>-6</sup>

O calor específico,  $c$ , traduz a energia necessária para aumentar a temperatura de 1 kg de latão em 1 K.

A condutividade térmica,  $k$ , indica a capacidade de conduzir calor que o material tem.

A difusividade térmica,  $\alpha$ , é definida pelo quociente  $\alpha = \frac{k}{\rho c}$ , e traduz-se numa proporção entre a capacidade do material conduzir e acumular energia térmica.

## 2.2 Método da Capacitância Global

O método da capacitância global é um método tipicamente utilizado na resolução de problemas na transmissão de calor transiente. Assenta na suposição de uma distribuição uniforme de temperaturas no corpo, desprezando a influência de um perfil de temperaturas no desenrolar da transmissão de calor. Pela lei de Fourier, a condução de calor na ausência de um gradiente de temperatura implica uma condutividade térmica infinita, que é fisicamente impossível. Posto isto, é fiável assumir esta condição se a resistência do sólido à condução for baixa em comparação com a sua resistência à convecção. O número de Biot,  $Bi = \frac{hL}{k}$ , em que  $h$  é o coeficiente de convecção,  $L$  é uma dimensão característica do corpo e  $k$  é a condutividade térmica do sólido, consiste num parâmetro adimensional que surge do balanço energético, e pode ser interpretado como um rácio entre a resistência térmica do material à condução e à convecção. Assim, o seu valor será o critério de aplicabilidade deste método de análise do problema:  $Bi < 0.1$ . Ao fornecer a razão entre o coeficiente de convecção de calor na superfície do sólido e a condutância específica do sólido, um número de Biot reduzido implica que a condução de calor dentro do corpo é muito mais rápida que a convecção de calor a partir da sua superfície: é aceitável, então, negligenciar os gradientes de temperatura no interior do corpo.

Assim, apesar do número de Biot obtido para este trabalho não se situar na região de validade desta aproximação (como discutido na secção 3), desenvolveu-se a solução através deste método para

mais tarde se poder efetuar a comparação com outras alternativas.

No sistema de equações em baixo, a primeira equação trata-se do balanço energético do problema,  $\dot{E}_{st} = -\dot{E}_{out}$ , enquanto que a segunda é uma condição inicial que impõe a temperatura no instante inicial do arrefecimento como sendo igual à temperatura inicial do sólido, a qual é conhecida. O segundo sistema contém estas mesmas equações na sua forma adimensionalizada [1].

$$\begin{cases} \rho V c \frac{dT}{dt} = -A_s h (T - T_\infty) \\ T(0) = T_i \end{cases} \quad (2.1)$$

$$\begin{cases} \frac{d\theta^*}{dFo} = -Bi\theta^* \\ \theta^*(0) = 1 \end{cases} \Rightarrow \theta^* = \exp(-Bi \cdot Fo) = \exp\left(-\frac{hA_s}{\rho V c} t\right), \quad (2.2)$$

onde  $\theta^* = \frac{T - T_\infty}{T_i - T_\infty}$ ,  $Fo = \frac{\alpha t}{L_c^2}$  e  $L_c = \frac{V}{A_s}$ .  $c$  representa o calor específico do material,  $\alpha$  a difusividade térmica,  $T_i, T_\infty$  a temperatura inicial do sólido e do ar, respetivamente,  $L_c$  o comprimento característico,  $V$  o volume do corpo e  $A_s$  a área da superfície. Note-se que o número de Fourier é um tempo adimensionalizado, e que  $\frac{\rho V c}{h A_s}$  é uma constante de tempo térmica que reflete a velocidade do processo de arrefecimento.

Assim, a solução obtida,

$$\theta^* = \exp(-Bi \cdot Fo) = \exp\left(-\frac{hA_s}{\rho V c} t\right), \quad (2.3)$$

permite obter a evolução temporal de temperatura de uma forma relativamente simples, em comparação com as soluções discutidas em diante, estando, contudo, assente na referida hipótese de dominância da resistência convectiva no problema.

## 2.3 Solução Analítica

Seja a parede plana com espessura  $2L$ . Se a espessura for pequena quando comparada à largura e altura da parede, supõe-se que a condução ocorre exclusivamente na direção  $x$ . Se a parede se encontrar a uma temperatura inicial uniforme  $T(x, 0) = T_i$  e for subitamente imersa num fluido com temperatura  $T_\infty \neq T_i$ , as temperaturas resultantes são descritas pela seguinte equação, simétrica relativamente ao plano central da parede ( $x^* = 0$ ) já que as condições convectivas em ambos os lados são as mesmas [1].

$$\theta^* = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \exp(-\xi_n^2 Fo) \cos(\xi_n x^*) \quad (2.4)$$

Onde  $x^* = \frac{x}{L}$ ,  $L$  representando a metade da espessura da barra, e o coeficiente  $C_n$  é descrito pela seguinte relação:

$$C_n = \frac{4 \sin \xi_n}{2\xi_n + \sin(2\xi_n)} \quad (2.5)$$

Já os valores discretos de  $\xi_n$  são raízes positivas da equação transcendental apresentada em baixo.

$$\xi_n \tan \xi_n = Bi \quad (2.6)$$

Apesar de existirem tabelas com algumas das primeiras raízes desta equação, rapidamente se sentiu a necessidade de incluir mais destes termos na solução posta em prática durante a resolução deste trabalho. Assim, desenvolveu-se um algoritmo para o cálculo destes coeficientes, o que auxiliou de forma palpável a precisão do método empregue, algo que será abordado mais à frente neste relatório.

Visto que o problema matemático é precisamente o mesmo, os resultados anteriores também podem ser utilizados para uma parede plana, com espessura  $L$ , que é isolada num dos seus lados ( $x^* = 0$ ) e haja transporte convectivo no outro ( $x^* = +1$ ). Essa equivalência é uma consequência do facto de que, indiferentemente de haver uma exigência de simetria ou de condição adiabática estabelecida em  $x^* = 0$ , a condição de contorno tem a forma  $\frac{\partial \theta^*}{\partial x^*} = 0$ .

Esta correspondência é usada no trabalho para modelar a face adiabática que resulta do corpo estar pousado no chão. Assim, na direção vertical do corpo, o modelo matemático irá utilizar como comprimento característico do corpo toda a sua espessura, e não apenas metade. Desta forma simula-se uma barra com o dobro da altura com a face de baixo exposta ao ar a temperatura atmosférica como discutido anteriormente.

Até agora, toda a dedução teórica foi realizada para o caso duma parede plana. No entanto, o problema em mãos exige uma abordagem multidimensional, que será construída a partir da formulação de **Yener e Kakac** [2]. Assim, um problema transiente bi ou tridimensional pode ser resolvido com uma sobreposição multiplicativa das soluções unidimensionais obtidas até agora. Visto que o problema obedece aos seguintes critérios:

- O problema tem que consistir numa equação de calor homogénea com condições de fronteira igualmente homogéneas;
- A distribuição de temperatura inicial tem que ser uniforme.

pode-se construir tanto a solução bidimensional como a tridimensional da seguinte maneira:

$$\theta^*(x, y, t) = \theta^*(x, t) \cdot \theta^*(y, t) \quad (2.7)$$

$$\theta^*(x, y, z, t) = \theta^*(x, t) \cdot \theta^*(y, t) \cdot \theta^*(z, t) \quad (2.8)$$

Desta maneira, a distribuição de temperatura adimensional na barra é o produto das distribuições de temperatura adimensionais das paredes planas cuja interseção forma o sólido em estudo, tal como a figura 3 ilustra (caso bidimensional).



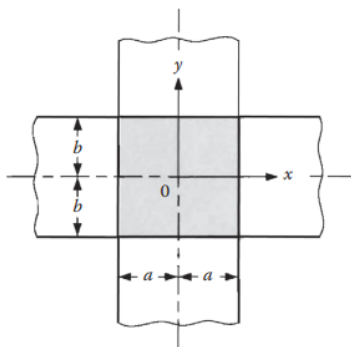


Figura 3: A interseção de duas paredes planas, que forma a secção transversal do sólido em estudo

Neste caso, as dimensões indicadas na figura serão então  $a = 12$  cm e  $b = 24$  cm, e para o caso tridimensional a dimensão utilizada seria  $c = 150$  cm.

## 2.4 Solução Numérica: *TEACH-C*

A solução numérica do problema foi obtida com recurso ao programa de elementos finitos *TEACH-C*, em MATLAB. Este programa permite simular problemas unidimensionais e bidimensionais de condução de calor, permitindo a especificação do problema através da variação das coordenadas (cartesianas ou cilíndricas), do tipo de regime (estacionário ou transiente) e da condutividade térmica, que neste caso permanece constante ao longo da simulação.

Para além disto, o programa permite definir quatro tipos de condição de fronteira. Não só existe a possibilidade de fixar uma temperatura imposta num certo ponto, como se pode ainda estabelecer um determinado fluxo de calor ou a condição de convecção na fronteira do corpo, especificando o coeficiente de convecção e a temperatura do fluido exterior. Por último, pode especificar-se a condição de "simetria" numa fronteira adiabática de forma a modelar a não transmissão de calor (equivalente a impôr a condição de fluxo de calor nulo mas computacionalmente mais simples).

No código, começou-se pelo ajuste das dimensões do sólido - a sua largura ( $W$ ) e altura ( $H$ ), ambas de 24 cm, como documentado no código do programa *TEACH-C.m* no Anexo-1, onde se apresentam também todas as alterações efetuadas ao *PROMOD.m*, que define e introduz as condições de fronteira. De salientar que estes dois ficheiros foram os únicos que sofreram alterações, de acordo com as indicações do corpo docente. De seguida, definiram-se as propriedades do material do sólido em causa: condutividade térmica,  $TCON = 121$  W/mK, calor específico,  $CV = 385$  J/KgK, e densidade,  $DENSIT = 7930$  kg/m<sup>3</sup>. Definiu-se também a temperatura inicial do sólido  $TINIC = 1150^\circ$  C.

As variáveis  $TBOT$  e  $TTOP$  foram definidas como iguais a  $1150^\circ$ C e  $20^\circ$ C, respetivamente. Já as variáveis  $TLEFT$  e  $TRIGHT$  foram definidas com valor nulo. Uma vez que o sólido em estudo não tem nenhuma temperatura imposta nas fronteiras, os valores de  $TTOP$ ,  $TBOT$ ,  $TLEFT$  e  $TRIGHT$  não irão afetar os valores de temperatura obtidos. No entanto, os valores de  $TTOP$  e  $TBOT$  irão afetar a variável  $SNORM$ . Esta variável é o valor absoluto majorado do resíduo normalizado ajudando a reduzir o número de iterações espaciais e, assim, o programa irá convergir mais

rapidamente, diminuindo o tempo de computação. Uma vez que  $SNORM$  é calculada a partir dos valores de  $TTOP$  e  $TBOT$ , introduziu-se nestas duas variáveis valores coerentes com o enunciado.

A definição do tipo de condição de fronteira foi essencial para a correta modelação do problema. Dito isto, definiu-se uma condição de convecção para as fronteiras Norte, Oeste e Este, pois nestas faces existe convecção com o ar; para a fronteira Sul, definiu-se uma condição de simetria.

Tanto para a fronteira Norte, como para a Oeste e a Este, estipulou-se um coeficiente de convecção  $HCONV = 250 \text{ W/m}^2\text{K}$ , que é o valor correspondente ao do ar, e uma temperatura do fluido (ar)  $TF = 20^\circ \text{ C}$

A especificação da condição de simetria na fronteira Sul, em termos físicos, é equivalente a impor um fluxo de calor nulo nesta fronteira; em termos computacionais, evita a realização de quaisquer cálculos por parte do programa, otimizando o tempo de computação. O funcionamento desta condição consiste em atribuir a temperatura inicial definida aos elementos da malha localizados na fronteira em questão (Sul).

## 2.5 Escolha do ponto monitor

De forma a garantir que os resultados obtidos com recurso ao *TEACH-C* convirjam, é necessário escolher um ponto monitor correto. Este ponto tem que corresponder a coordenadas do sólido onde os gradientes de temperatura no tempo e no espaço são os mais elevados, uma vez que os valores de temperatura nesses pontos serão mais afetados pelo refinamento da malha do que em qualquer outro ponto do sólido. Contudo, convém realçar que para a verificação da convergência das iterações espaciais, analisaram-se também os dados obtidos para a *SOURCE*, apresentados no *RESULTS.txt* a par das temperaturas no ponto monitor. Em Anexo-2, apresentam-se os resultados obtidos a partir do *TEACH-C* e retirados do *RESULTS.txt*, para os dois primeiros instantes temporais bem como para o último. Verifica-se que, em cada instante, a última iteração espacial apresenta um valor de *SOURCE* menor que o valor  $SORMAX = 0,001$ , indicando a convergência do resultado.

Uma vez que o sólido em estudo é um paralelepípedo quadrangular, as zonas de maior transferência de calor nos instantes iniciais serão junto às superfícies onde ocorre convecção. Assim, pontos perto dos cantos do sólido são potenciais candidatos a pontos monitores. Ao escolher um ponto perto dos cantos que fazem interseção entre a fronteira norte e oeste ou norte e este, este irá encontrar-se perto de duas superfícies onde há convecção com o exterior. Enquanto que, ao escolher um ponto perto dos cantos que fazem interseção entre a fronteira sul e oeste ou sul e este, este irá encontrar-se perto de apenas uma superfície que realiza convecção com o exterior, devido à condição de fronteira adiabática imposta na superfície sul.

Para confirmar que o ponto monitor apropriado se deve encontrar perto de um dos cantos junto à fronteira norte, utilizou-se uma malha com  $22 \times 22$  nós e pontos e registou-se a variação da temperatura no espaço e no tempo para os pontos (2,2), que se encontra perto do canto que intersesta a fronteira sul e oeste, e (2,21), que se encontra perto do canto que intersesta a fronteira norte e oeste. Para simplificação do estudo e uma vez que o sólido em questão é simétrico, não foram realizados estudos perto da fronteira este.

Assim, na figura 4 abaixo estão apresentados os valores de temperatura para as primeiras dez

iterações no espaço para  $TIME = 20$  s, para os pontos (2,2) e (2,21). Em anexo são apresentados mais dados para diferentes valores de  $TIME$ .

NITER	SOURCE	T (2,2)	TIME(s)	DT(s)	NSTEP	NITER	SOURCE	T (2,21)	TIME(s)	DT(s)	NSTEP
1	2.6E+00	1.127E+03	20	20	1	1	2.6E+00	1.113E+03	20	20	1
2	2.1E+00	1.118E+03	20	20	1	2	2.1E+00	1.095E+03	20	20	1
3	1.7E+00	1.113E+03	20	20	1	3	1.7E+00	1.084E+03	20	20	1
4	1.4E+00	1.110E+03	20	20	1	4	1.4E+00	1.077E+03	20	20	1
5	1.2E+00	1.107E+03	20	20	1	5	1.2E+00	1.071E+03	20	20	1
6	9.7E-01	1.106E+03	20	20	1	6	9.7E-01	1.067E+03	20	20	1
7	8.0E-01	1.104E+03	20	20	1	7	8.0E-01	1.064E+03	20	20	1
8	6.7E-01	1.103E+03	20	20	1	8	6.7E-01	1.062E+03	20	20	1
9	5.6E-01	1.103E+03	20	20	1	9	5.6E-01	1.060E+03	20	20	1
10	4.6E-01	1.102E+03	20	20	1	10	4.6E-01	1.058E+03	20	20	1

(a) Iterações no espaço para tempo igual a 20 segundos no ponto (2,2)

(b) Iterações no espaço para tempo igual a 20 segundos no ponto (2,21)

Figura 4: Iterações no espaço para  $TIME = 20$ s

Verifica-se que para o ponto (2,2), para  $TIME = 20$  s, a diferença de temperatura ao fim de dez iterações espaciais é igual a  $\Delta T_{(2,2)} = 25^\circ C$  e que para o ponto (2,21) esta diferença de temperatura é consideravelmente maior,  $\Delta T_{(2,21)} = 55^\circ C$ . Já por observação das figuras 17, 18 e 19 apresentadas no Anexo-1, verifica-se que as diferenças de temperatura são muito semelhantes para ambos os pontos.

De seguida, apresentam-se os valores de temperatura da última iteração espacial para dez instantes de tempo diferentes. Também se apresenta a diferença de temperatura entre um instante de tempo e o imediatamente a seguir.

Tabela 1: Iterações no tempo para os pontos (2,2) e (2,21)

(a) Valores de temperatura e $\Delta T$ para o ponto (2,2)			(b) Valores de temperatura e $\Delta T$ para o ponto (2,21)		
DT (s)	T(2,2) (°C)	$\Delta T = T(i+1)-T(i)$ (°C)	DT (s)	T(2,21) (°C)	$\Delta T = T(i+1)-T(i)$ (°C)
20	1099,744	29,20922	20	1052,609	54,71745
40	1070,535	21,85103	40	997,8919	39,45218
60	1048,684	18,37954	60	958,4397	31,73801
80	1030,304	16,53309	80	926,7017	27,07113
100	1013,771	15,52086	100	899,6306	23,94881
120	998,2502	14,97431	120	875,6818	21,71788
140	983,2759	14,69179	140	853,9639	20,04341
160	968,5841	14,55461	160	833,9205	18,73526
180	954,0295	14,48971	180	815,1852	17,67687
200	939,5398		200	797,5084	

A partir da análise das tabelas apresentadas acima, verifica-se que para o ponto (2,21) as variações de temperatura entre cada instante de tempo são muito mais elevadas do que para o ponto (2,2). Concluindo, o ponto mais indicado para ponto monitor é o ponto (2,21). Assim, ao realizar o estudo da malha independente que irá ser apresentado de seguida, foi sempre escolhido um ponto monitor perto do canto que intersesta a fronteira norte e oeste, de forma a garantir que os valores convirjam.

### 3 Resultados

#### 3.1 Número de Biot e Método da Capacitância Global

Para a primeira abordagem ao problema, utilizando o Método da Capacitância Global, foi necessário definir um comprimento característico do corpo: a razão entre o volume e a área de convecção. O uso da área da convecção e não da área da superfície tem como objetivo simular a existência da parede inferior do paralelepípedo pousada no chão (parede adiabática).

$$V = HWL = 0.1728 \text{ m}^3 \qquad A_c = 2HW + 3HL = 2.2752 \text{ m}^2$$

Com estes valores, calculou-se de seguida  $L_c = \frac{V}{A_c} = 0.0759 \text{ m}$  e o parâmetro adimensional  $Bi$ , que tal como se pode verificar é superior a 0.1:

$$Bi = \frac{hL_c}{k} = 0.1569$$

No gráfico da figura 5, apresenta-se a variação da temperatura adimensional em função de um valor arbitrado pelos autores do trabalho ( $Fo = \frac{\alpha t}{(\frac{H}{2})^2}$ ), que será o  $Fo$  considerado para todos os gráficos apresentados neste projeto.

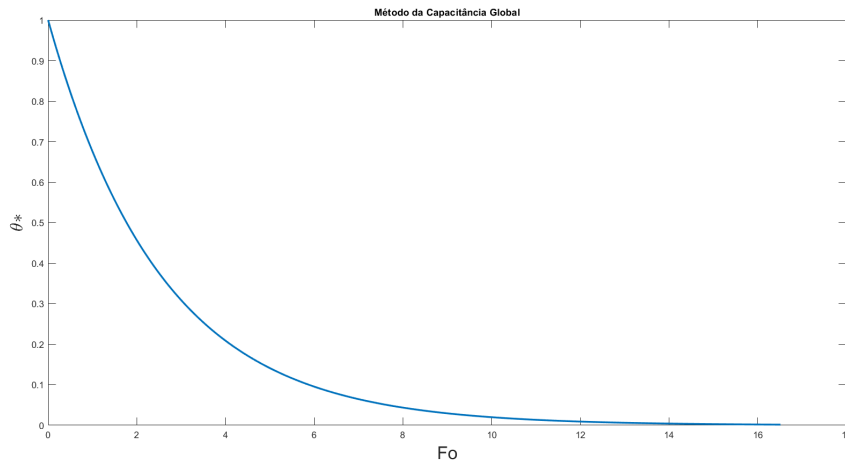


Figura 5: Evolução adimensional de temperaturas com o Método da Capacitância Global

Por simples observação conclui-se que  $\theta^* \rightarrow 0$ , isto é, atinge-se o equilíbrio entre a temperatura do sólido e a temperatura do ar, sendo que a partir de  $Fo \approx 15$  o comportamento da distribuição de temperaturas já se encontra visualmente estabilizado. Este número de Fourier traduz-se num tempo  $t \approx 5450\text{s} \approx 91\text{min}$ , ou seja, este é o tempo aproximado que a barra metálica demora a atingir equilíbrio térmico com o meio exterior. Ainda assim, por se estar a aplicar este método fora da sua zona de validade, a sua precisão não é ideal, o que será discutido na secção 3.7.

#### 3.2 Estudo de independência da malha

De forma a garantir que os resultados obtidos pelo método numérico, com recurso ao *TEACH-C*, apresentem o menor erro possível é necessário realizar um estudo para escolher uma malha que

garanta que os resultados obtidos não são afetados pela mesma. Porém, ao refinar cada vez mais a malha, o tempo de computação também irá aumentar e este é também um fator a ter em conta. Assim, foi definido que se iria analisar a temperatura de nove pontos diferentes para oito instantes de tempo, para cinco malhas diferentes: 12x12, 22x22, 42x42, 62x62 e 82x82. De seguida, foram calculados os valores do erro quadrático médio para cada par ponto-malha. Como valores de referência, foram utilizados os resultados obtidos a partir da análise analítica bidimensional.

Em primeiro lugar, foram definidas as coordenadas dos pontos a avaliar tendo sido escolhidos os seguintes: (0,0120;0,2280), (0,0120;0,1080), (0,0120;0,0120), (0,060;0,2280), (0,060;0,1080), (0,060;0,0120), (0,1080;0,2280), (0,1080;0,1080) e (0,1080;0,0120). De seguida, foram registados os valores da temperatura para oito tempos diferentes: 60 s, 120 s, 500 s, 1000 s, 2000 s, 3000 s, 4000 s e 5000 s.

Por fim, foram calculados os valores dos erros quadráticos médios em função do instante de tempo. Tal como referido anteriormente, os valores de referência utilizados foram obtidos a partir da análise analítica bidimensional para os pontos e instantes escolhidos. Para o cálculo dos erros quadráticos médios foi utilizada a seguinte equação:

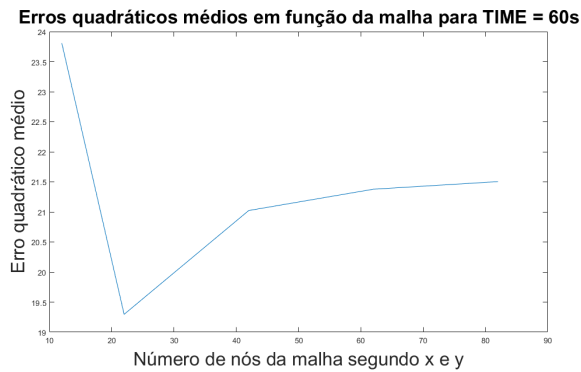
$$EQM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_i - \hat{T}_i)^2 \quad (3.1)$$

onde  $n$  é o número de pontos.

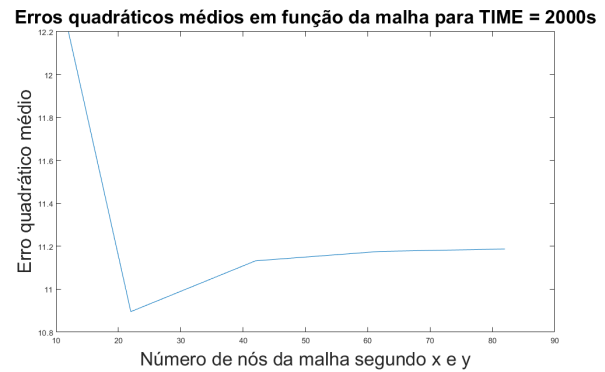
Apresenta-se a título de exemplo a formula do cálculo do erro quadrático médio para o instante  $TIME = 60$  s com uma malha com 12x12 pontos e nós.

$$\begin{aligned} EQM_{60,12 \times 12} = & \frac{1}{9} ((T_{(0,0120;0,2280)} - \hat{T}_{(0,0120;0,2280)})^2 + (T_{(0,0120;0,1080)} - \hat{T}_{(0,0120;0,1080)})^2 + \quad (3.2) \\ & + (T_{(0,0120;0,0120)} - \hat{T}_{(0,0120;0,0120)})^2 + (T_{(0,060;0,2280)} - \hat{T}_{(0,060;0,2280)})^2 + (T_{(0,060;0,1080)} - \hat{T}_{(0,060;0,1080)})^2 + \\ & + (T_{(0,060;0,0120)} - \hat{T}_{(0,060;0,0120)})^2 + (T_{(0,1080;0,2280)} - \hat{T}_{(0,1080;0,2280)})^2 + (T_{(0,1080;0,1080)} - \hat{T}_{(0,1080;0,1080)})^2 + \\ & + (T_{(0,1080;0,0120)} - \hat{T}_{(0,1080;0,0120)})^2) \end{aligned}$$

Para os restantes instantes e malhas o processo é análogo. Assim, foram criados gráficos, para cada instante de tempo, com os valores dos erros quadráticos médios em função da malha utilizada como os apresentados abaixo. Os restantes gráficos são apresentados em Apêndice (figuras 20, 21, 22).



(a) Erros quadráticos médios para as diferentes malhas para o instante de tempo igual a 60 s



(b) Erros quadráticos médios para as diferentes malhas para o instante de tempo igual a 2000 s

Figura 6: Erros quadráticos médios para instantes de tempo iguais a 60 s e 2000 s

Analisando os gráficos apresentados na figura 6, verifica-se, até ser utilizada uma malha com sessenta e dois nós segundo  $x$  e  $y$ , uma diferença significativa nos valores dos erros quadráticos médios. Porém, ao utilizar uma malha com oitenta e dois nós em  $x$  e  $y$ , a diferença do resultado obtido em relação à malha com sessenta e dois nós não justifica o aumento muito significativo do tempo de computação. Assim, considerou-se que a malha mais correta a utilizar é a que tem sessenta e dois nós em  $x$  e  $y$ . Porém, de forma a ser possível escolher exatamente o ponto central do sólido geométrico bem como os pontos centrais das superfícies, foi decidido utilizar uma malha com sessenta e três nós e pontos em  $x$  e  $y$  que garante também a independência dos resultados em relação à malha. Todos os resultados apresentados doravante utilizam uma malha com sessenta e três nós e pontos em  $x$  e  $y$ .

### 3.3 $T(t)$ para o centro geométrico

Encontram-se então reunidas as condições para comparar a precisão dos 4 métodos diferentes, sobrepondo os resultados no mesmo gráfico para números de Fourier equivalentes, de modo a poder comparar os diferentes métodos. Cada solução analítica é apresentada individualmente no apêndice (figuras 23 b) e 25 b), 2D e 3D, respetivamente) e a solução numérica apresenta-se no Anexo-2 na figura 30. Na figura 7 apresenta-se a solução obtida com o Método da Capacitância Global (LCM), a solução analítica 2D e a solução numérica (*TEACH-C*), e decidiu omitir-se a solução analítica tridimensional, uma vez que se sobrepunha à solução bidimensional, e como se vai observar na subsecção 3.6, a aproximação a um problema 3D é válida desde o plano central vertical ( $z^*=0$ ) até quase  $z^*=0.9$ .

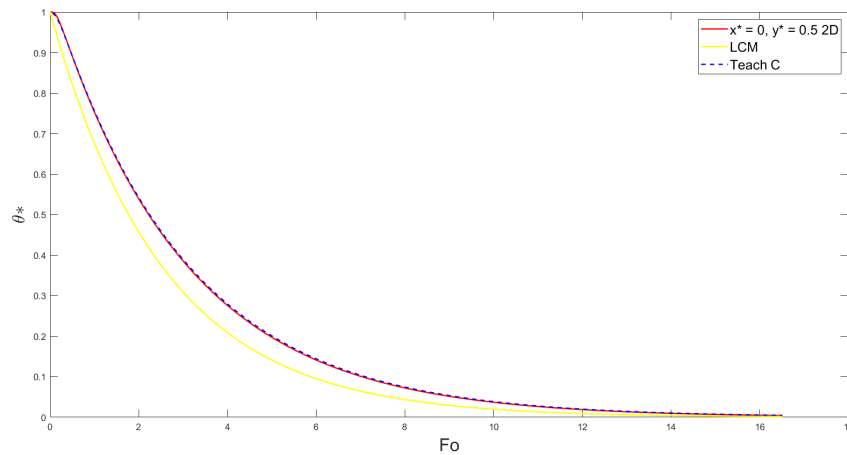


Figura 7: Evolução adimensional de temperaturas para o centro geométrico

Observa-se que a evolução temporal da temperatura neste ponto do sólido apresenta resultados aproximadamente iguais para o método analítico 2D e para o método numérico (*TEACH-C*), enquanto que o Método da Capacitância Global traduz diferentes resultados dos restantes.

### 3.4 $T(t)$ para os centros das faces laterais

Nesta subsecção, apresentam-se os gráficos de  $T(t)$  para os centros das faces laterais, para os diversos métodos em análise. Em apêndice são apresentados separadamente os gráficos para a solução analítica (figuras 23 a) e 24 para o caso bidimensional e 25 a) e 26 para a análise tridimensional) e em Anexo-2 apresenta-se a solução numérica (figuras 29, 31 e 32). A solução analítica 3D, mais uma vez, é negligenciada, uma vez que é muito semelhante à solução 2D.

O gráfico da figura 8, apresenta a evolução da temperatura para o centro da face do topo do objeto em estudo.

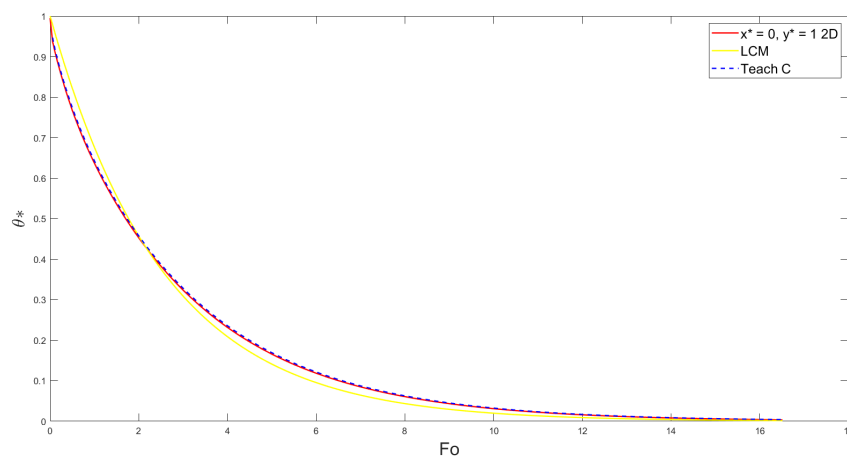


Figura 8: Evolução adimensional de temperaturas para o centro da face superior do corpo

O seguinte gráfico, por simetria, representa a evolução de temperatura de ambas as faces laterais.

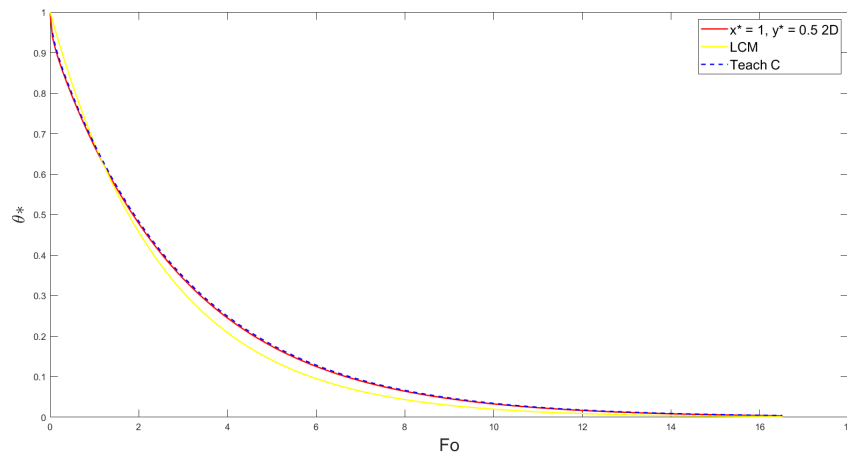


Figura 9: Evolução adimensional de temperaturas para o centro das faces laterais do corpo

O último gráfico é representativo da evolução de temperatura na face inferior do sólido e apresenta a maior discrepância entre o Método da Capacitância Global e os modelos analítico e numérico, que será abordada na secção 3.7.

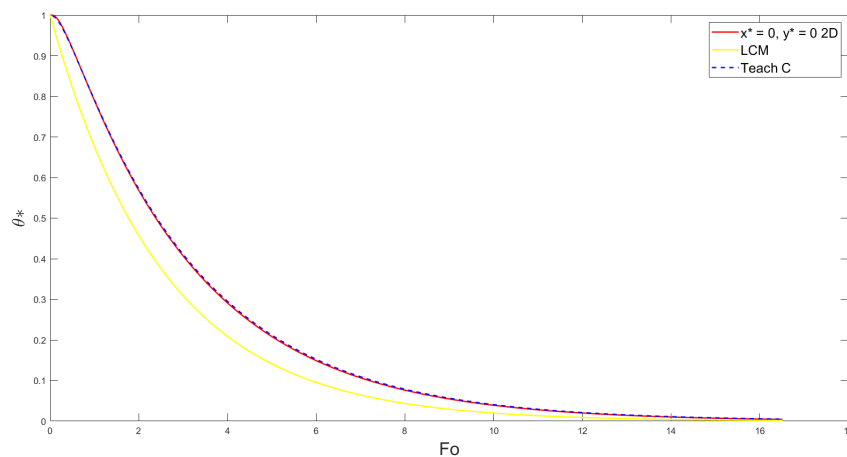


Figura 10: Evolução adimensional de temperaturas para o centro da face inferior do corpo

No geral, a discrepância elevada entre o Método da Capacitância Global e os restantes está associada ao uso do método fora do limite  $Bi < 0.1$ .

A proximidade entre os métodos analíticos bidimensionais e tridimensionais será analisada na secção 3.6. É importante realçar que na análise realizada com recurso ao *TEACH-C*, os pontos analisados não correspondem exatamente às coordenadas da superfície mas sim aos pontos mais próximos destas. Assim, para o centro da superfície superior do corpo, cuja coordenada real seria (0,1200;0,2400), a coordenada analisada foi (0,1200;0,2380). Para o centro da face lateral a coordenada analisada foi (0,0020;0,1200) e para o centro da face inferior foi (0,1200;0,0020). Porém, uma vez que os pontos analisados se encontram muito próximo das coordenadas reais, é aceitável utilizar estes valores de temperatura.



### 3.5 Análise do número de termos utilizados na solução analítica

Especificando a solução exata analítica que se determinou para este problema, e que permite obter os valores da variação da temperatura em função do tempo, em qualquer ponto do objeto, esta assume a seguinte forma:

$$\theta^*(x^*, y^*, z^*, Fo) = \left( \sum_{n=1}^{20} C_{x,n} e^{-\xi_{x,n}^2 Fo} \cos(\xi_{x,n} x^*) \right) \left( \sum_{n=1}^{20} C_{y,n} e^{-\xi_{y,n}^2 Fo} \cos(\xi_{y,n} y^*) \right) \left( \sum_{n=1}^{20} C_{z,n} e^{-\xi_{z,n}^2 Fo} \cos(\xi_{z,n} z^*) \right) \quad (3.3)$$

A solução para o problema bidimensional consiste unicamente na multiplicação dos dois primeiros somatórios, com os mesmos coeficientes.

Uma aproximação popular para este problema consiste em utilizar apenas o primeiro termo destes somatórios, que é válida para um número de Fourier ( $Fo = \frac{\alpha t}{L^2}$ ) superior a 0.2. Ora, um número de Fourier superior a 0.2 implica, na dimensão longitudinal da barra, aguardar cerca de 72 segundos para que o arrefecimento real da barra seja semelhante àquele descrito pelo modelo. Assim, e apesar de existirem tabelas em anexo do Incropera [1] com as quatro primeiras raízes  $\xi_n$  da equação transcendental já apresentada, decidiu-se calcular as 20 primeiras raízes através da função "fzero" do MATLAB, que permite determinar as raízes de equações não lineares.

O uso de um número mais elevado de termos surtiu um efeito palpável na suavidade dos gráficos obtidos. Ainda assim, apesar de se conseguir determinar um número arbitrariamente elevado de termos, optou-se pela inclusão de apenas 20 por não existir uma melhoria significativa de resultados com a inclusão de termos de ordem superior e de forma a não comprometer a rapidez dos cálculos.

Os coeficientes presentes na equação estão, assim, apresentados em anexo na tabela 2.

O seguinte gráfico traduz, para a solução analítica 2D, a influência do número de termos usados na construção de  $\theta^*$ , no qual se observa que os instantes iniciais são os mais influenciados pelo número de termos usados, enquanto que, após estes instantes, todas as soluções são semelhantes.

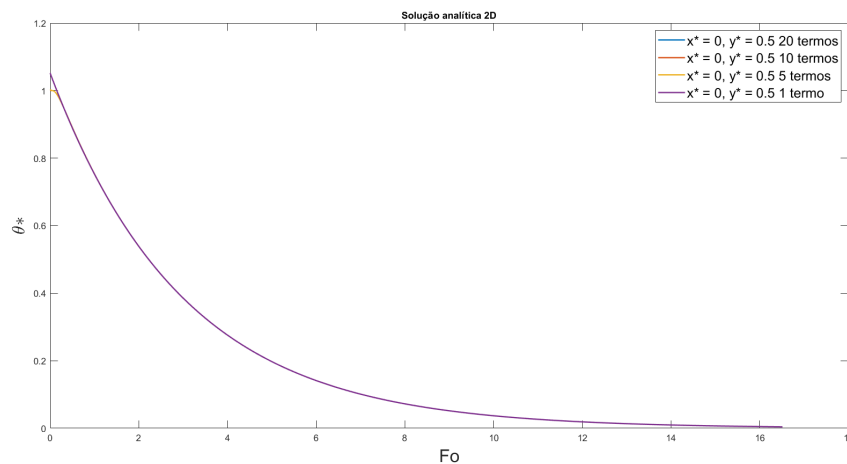


Figura 11: Comparação do número de termos utilizados na solução analítica

No gráfico apresentado na figura 12, é feito um *zoom* dos instantes iniciais acima referidos, observando-se que o uso de um termo não acompanha o comportamento das soluções construídas com 5, 10 e

20 termos, enquanto que estas revelam resultados semelhantes. As soluções convergem a partir de  $Fo \approx 0.3$ .

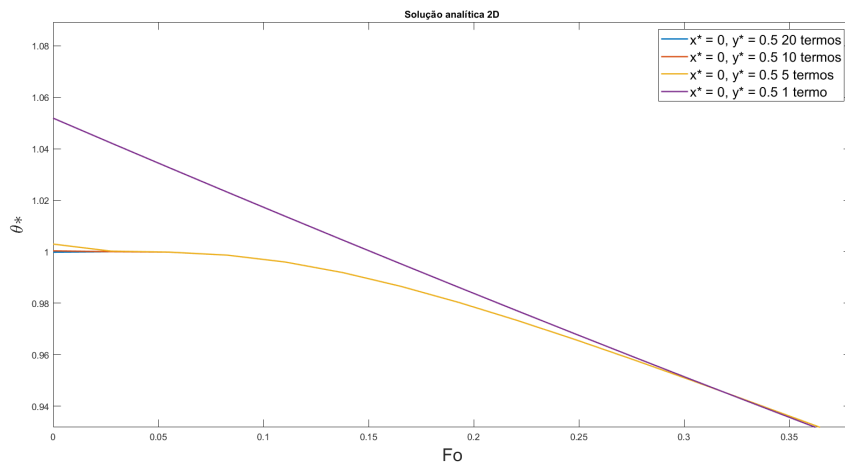


Figura 12: Comparação do número de termos utilizados na solução analítica (zoom)

### 3.6 Verificação da aproximação a um problema 2D

Uma das suposições iniciais importantes para este problema foi que poderia ser aproximado a um problema 2D, tanto que o método de elementos finitos foi realizado para a simulação do plano vertical central do corpo. Nesta secção serão apresentados os resultados do método analítico, que apoiam esta aproximação, como se pode observar na figura 13.

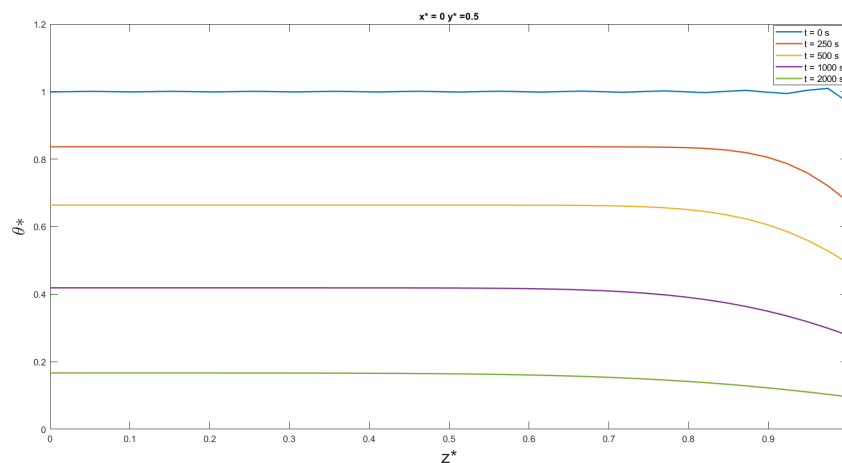


Figura 13: Variação da temperatura em função de  $z$  para diferentes valores de tempo

Para os restantes pares de pontos  $(x^*, y^*)$  em apêndice (figuras 27 e 28), continua a verificar-se que a temperatura se mantém constante em aproximadamente 90% da extensão do corpo em  $z$ . De notar que o ponto de dissociação do valor constante se afasta da superfície  $z^* = 1$  com o passar do tempo. Assim, esta suposição vai perdendo validade à medida que o arrefecimento toma lugar.

### 3.7 Discussão

Um dos focos do presente trabalho é comparar a precisão dos diferentes métodos utilizados, algo que foi apresentado visualmente na figura 7 para o centro geométrico do corpo e nas figuras 8, 9 e 10 para as diferentes faces do corpo.

As condições de fronteira deste arrefecimento implicam que todas as soluções converjam necessariamente para  $t = 0$  ( $T(x, y, z, 0) = T_i$ ) e  $t \rightarrow \infty$  ( $T(x, y, z, \infty) = T_{ar}$ ). A evolução entre estas duas temperaturas assume um carácter aproximadamente exponencial em qualquer ponto do corpo em estudo, como se pôde comprovar nos diferentes gráficos apresentados.

Este comportamento era esperado pois surge diretamente da equação de calor, que dita que a taxa à qual o material num certo ponto muda de temperatura é proporcional à diferença de temperaturas para com o material circundante, um indicador inconfundível duma evolução exponencial.

Assim, tendo em conta que se está a lidar com uma situação de convecção forçada, é vantajoso discutir a eficácia deste método relativamente a uma convecção natural aproximando o arrefecimento observado a um modelo simplificado de decaimento exponencial  $t = -\frac{\ln 2}{k} = -\frac{\ln 2 \rho V C}{h A_s} \propto \frac{1}{h}$ , como apresentado na secção 2.2 para o método de capacitância global.

Uma vez que o coeficiente de convecção utilizado foi  $250 \text{ W/m}^2\text{K}$  e os coeficientes de convecção natural se situam habitualmente entre  $5$  e  $25 \text{ W/m}^2\text{K}$  [3], pode-se esperar que o tempo de meia vida, ou seja, o intervalo de tempo para que a temperatura do corpo passasse para metade da inicial, fosse 10 a 50 vezes superior caso se estivesse a lidar com um problema de convecção natural.

Assim, apesar das malhas mais refinadas demorarem vários minutos a ser simuladas, o facto de se trabalhar com convecção forçada ajudou a não sobrecarregar ainda mais o "runtime" do projeto, pois atingiu-se o estado de equilíbrio térmico mais rapidamente.

#### 3.7.1 Diferença entre método da Capacitância Global e solução analítica

Como abordado anteriormente, espera-se que todas as soluções coincidam para  $t = 0$  e  $t \rightarrow \infty$ . Uma vez que o Método da Capacitância Global considera que o corpo tem uma distribuição de temperaturas uniforme em todos os momentos e que existe uma condução de calor instantânea dentro do sólido, seria de esperar que os pontos mais longínquos das superfícies de convecção fossem afetados mais negativamente. Desta forma, compreende-se que os valores de erro absoluto sejam superiores no centro geométrico quando comparados com o centro da face lateral, como se observa na figura 14. Foi também observado anteriormente que o centro da face inferior do corpo foi o mais afetado por este efeito por ser o mais longínquo, em média, da dissipação convectiva.

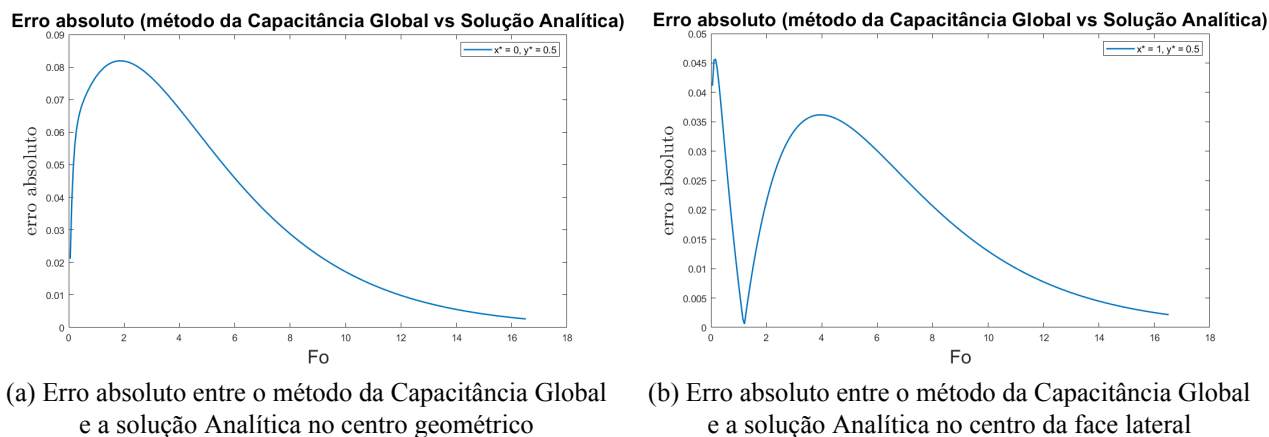


Figura 14

### 3.7.2 Diferença entre método numérico e solução analítica

Como se comprova por análise dos gráficos apresentados de seguida, a diferença entre estes métodos não ultrapassa o limiar do 0.01 e por isso é relativamente reduzida quando comparada à anterior diferença entre métodos. Assim, pode-se afirmar que, apesar do método de sobreposição utilizado só ser utilizado em certos casos especiais como abordado na descrição do problema em estudo, este rendeu resultados satisfatórios e muito semelhantes à simulação numérica. O maior fator para o surgimento destes erros será o facto da simulação não ter em conta a dimensão longitudinal da barra. Ainda assim, e sobretudo para os pontos apresentados (no plano vertical central), a influência deste efeito é reduzida.

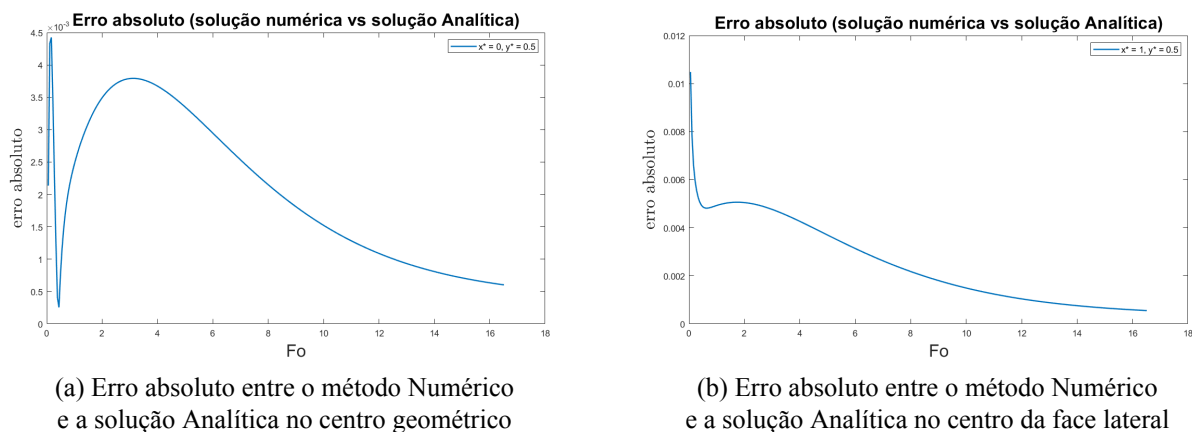


Figura 15

### 3.7.3 Distribuição espacial de temperaturas

Na seguinte figura apresenta-se a distribuição de temperatura numa fase final do arrefecimento, como se pode comprovar pelo reduzido gradiente de temperaturas e pela proximidade do corpo à temperatura do ar. Salienta-se que a temperatura das extremidades nordeste e noroeste do corpo foram sempre as mais reduzidas ao longo da simulação e, de forma análoga, as temperaturas mais elevadas

se verificaram sempre para o centro da face inferior do corpo, como seria de esperar segundo o que já se discutiu anteriormente.

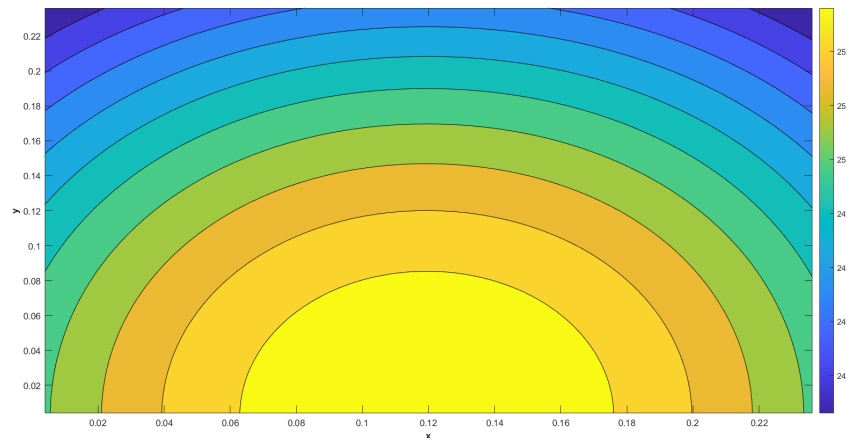


Figura 16: Gráfico 2D das Temperaturas obtido através do *TEACH-C*

## 4 Conclusão

Em seguida, apresentam-se as mais importantes conclusões retiradas ao longo da realização deste projeto.

A aplicação do Método da Capacitância Global foi feita apesar do número de Biot obtido se localizar ligeiramente fora da zona de validade do método. Isto comprometeu a sua precisão e observou-se que foi o único método cujas previsões não se assemelharam proximamente aos restantes. Assim, a aproximação de temperatura constante em todo o corpo não se revelou satisfatória.

Relativamente aos restantes métodos, foi possível, então, constatar uma boa correlação entre dados numéricos e analíticos. Realizou-se um estudo de independência da malha para garantir que esta fonte de erro não afetava significativamente os resultados finais. Também foi feita uma análise ao número de termos utilizados para os somatórios da solução analítica, de forma a garantir que estes não eram insuficientes. Para além disto, foi necessário comparar a solução analítica bidimensional e a tridimensional de forma a validar uma das suposições iniciais do trabalho, de que este problema se poderia aproximar a um caso bidimensional.

Um aspeto importante que foi possível de observar e que se esperava replicar no projeto foi o facto das extremidades do sólido apresentarem os maiores gradientes de temperatura, por constituírem superfícies de convecção. De modo análogo, a superfície inferior, considerada adiabática, foi a que mostrou uma evolução mais lenta.

Apesar das diferenças apontadas entre métodos, pode-se verificar que na sua generalidade, todos têm semelhantes tempos de meia vida (intervalo de tempo para a temperatura do corpo passar para a metade) e de estabilização.

## Referências

- [1] F.P. Incropera, D.P. de Witt, T.L Bergman e A.S. Lavine, Fundamentals of Heat and Mass Transfer 8ª Edição, (capítulos 5 e 6) John Wiley & Sons, Hoboken, 2018
- [2] Y. Yener e S. Kakac, Heat Conduction 4ª edição, (capítulo 6) CRC Press, Boca Raton, 2008
- [3] [https://help.solidworks.com/2011/portuguese-brazilian/SolidWorks/cworks/LegacyHelp/Simulation/AnalysisBackground/ThermalAnalysis/Convection\\_Topics/Convection\\_Heat\\_Coefficient.htm](https://help.solidworks.com/2011/portuguese-brazilian/SolidWorks/cworks/LegacyHelp/Simulation/AnalysisBackground/ThermalAnalysis/Convection_Topics/Convection_Heat_Coefficient.htm) (acedido a 28/10/2022)

## Apêndice

NITER	SOURCE	T (2,2)	TIME(s)	DT(s)	NSTEP	NITER	SOURCE	T (2,21)	TIME(s)	DT(s)	NSTEP
1	3.9E-01	2.048E+02	2000	20	100	1	3.9E-01	1.689E+02	2000	20	100
2	3.4E-01	2.044E+02	2000	20	100	2	3.4E-01	1.685E+02	2000	20	100
3	2.8E-01	2.040E+02	2000	20	100	3	2.8E-01	1.682E+02	2000	20	100
4	2.4E-01	2.037E+02	2000	20	100	4	2.4E-01	1.680E+02	2000	20	100
5	2.0E-01	2.035E+02	2000	20	100	5	2.0E-01	1.678E+02	2000	20	100
6	1.7E-01	2.032E+02	2000	20	100	6	1.7E-01	1.676E+02	2000	20	100
7	1.4E-01	2.030E+02	2000	20	100	7	1.4E-01	1.674E+02	2000	20	100
8	1.2E-01	2.029E+02	2000	20	100	8	1.2E-01	1.673E+02	2000	20	100
9	9.8E-02	2.027E+02	2000	20	100	9	9.8E-02	1.672E+02	2000	20	100
10	8.2E-02	2.026E+02	2000	20	100	10	8.2E-02	1.671E+02	2000	20	100

(a) Iterações no espaço para tempo igual a 2000 segundos no ponto (2,2)

(b) Iterações no espaço para tempo igual a 2000 segundos no ponto (2,21)

Figura 17

NITER	SOURCE	T (2,2)	TIME(s)	DT(s)	NSTEP	NITER	SOURCE	T (2,21)	TIME(s)	DT(s)	NSTEP
1	6.4E-02	5.011E+01	4000	20	200	1	6.4E-02	4.425E+01	4000	20	200
2	5.5E-02	5.003E+01	4000	20	200	2	5.5E-02	4.419E+01	4000	20	200
3	4.6E-02	4.997E+01	4000	20	200	3	4.6E-02	4.414E+01	4000	20	200
4	3.9E-02	4.992E+01	4000	20	200	4	3.9E-02	4.410E+01	4000	20	200
5	3.2E-02	4.988E+01	4000	20	200	5	3.2E-02	4.406E+01	4000	20	200
6	2.7E-02	4.984E+01	4000	20	200	6	2.7E-02	4.403E+01	4000	20	200
7	2.3E-02	4.981E+01	4000	20	200	7	2.3E-02	4.401E+01	4000	20	200
8	1.9E-02	4.979E+01	4000	20	200	8	1.9E-02	4.399E+01	4000	20	200
9	1.6E-02	4.976E+01	4000	20	200	9	1.6E-02	4.397E+01	4000	20	200
10	1.3E-02	4.974E+01	4000	20	200	10	1.3E-02	4.396E+01	4000	20	200

(a) Iterações no espaço para tempo igual a 4000 segundos no ponto (2,2)

(b) Iterações no espaço para tempo igual a 4000 segundos no ponto (2,21)

Figura 18

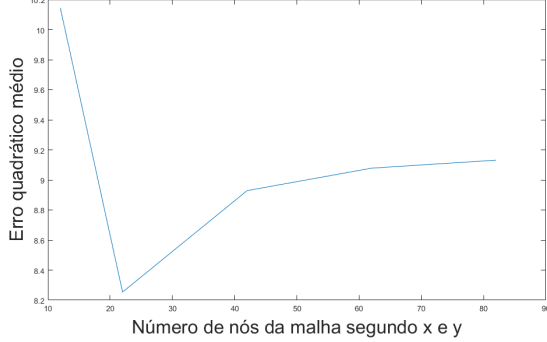
NITER	SOURCE	T (2,2)	TIME(s)	DT(s)	NSTEP	NITER	SOURCE	T (2,21)	TIME(s)	DT(s)	NSTEP
1	1.1E-02	2.515E+01	6000	20	300	1	1.1E-02	2.415E+01	6000	20	300
2	9.3E-03	2.514E+01	6000	20	300	2	9.3E-03	2.414E+01	6000	20	300
3	7.8E-03	2.513E+01	6000	20	300	3	7.8E-03	2.413E+01	6000	20	300
4	6.6E-03	2.512E+01	6000	20	300	4	6.6E-03	2.413E+01	6000	20	300
5	5.5E-03	2.512E+01	6000	20	300	5	5.5E-03	2.412E+01	6000	20	300
6	4.6E-03	2.511E+01	6000	20	300	6	4.6E-03	2.412E+01	6000	20	300
7	3.9E-03	2.510E+01	6000	20	300	7	3.9E-03	2.411E+01	6000	20	300
8	3.3E-03	2.510E+01	6000	20	300	8	3.3E-03	2.411E+01	6000	20	300
9	2.7E-03	2.510E+01	6000	20	300	9	2.7E-03	2.410E+01	6000	20	300
10	2.3E-03	2.509E+01	6000	20	300	10	2.3E-03	2.410E+01	6000	20	300

(a) Iterações no espaço para tempo igual a 6000 segundos no ponto (2,2)

(b) Iterações no espaço para tempo igual a 6000 segundos no ponto (2,21)

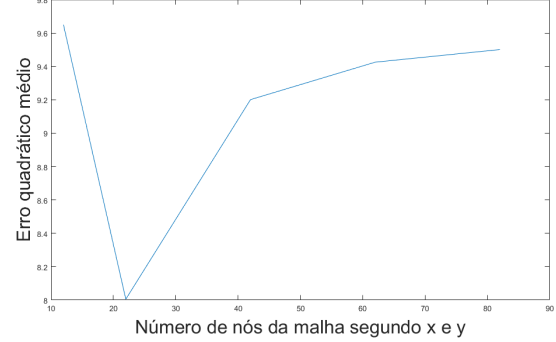
Figura 19

Erros quadráticos médios em função da malha para TIME = 120s



(a) Erros quadráticos médios para as diferentes malhas para o instante de tempo igual a 120 s

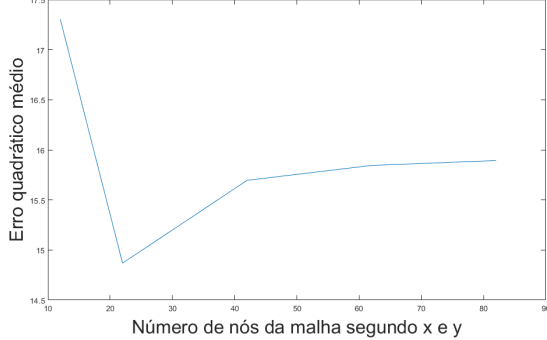
Erros quadráticos médios em função da malha para TIME = 500s



(b) Erros quadráticos médios para as diferentes malhas para o instante de tempo igual a 500 s

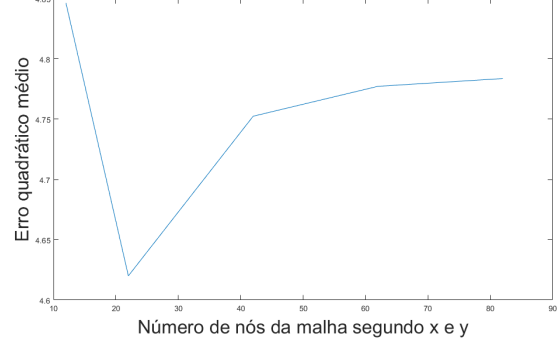
Figura 20: Erros quadráticos médios para instantes de tempo iguais a 120 s e 500 s

Erros quadráticos médios em função da malha para TIME = 1000s



(a) Erros quadráticos médios para as diferentes malhas para o instante de tempo igual a 1000 s

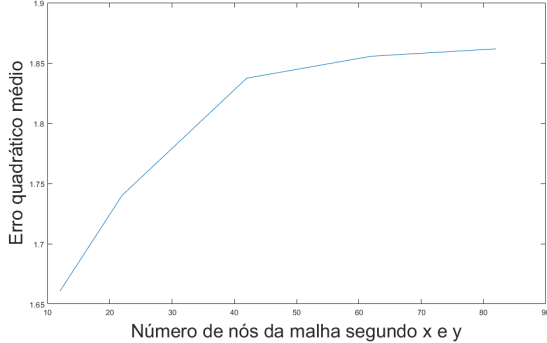
Erros quadráticos médios em função da malha para TIME = 3000s



(b) Erros quadráticos médios para as diferentes malhas para o instante de tempo igual a 3000 s

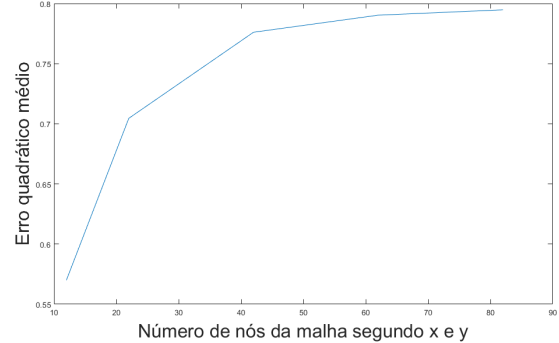
Figura 21: Erros quadráticos médios para instantes de tempo iguais a 1000 s e 3000 s

Erros quadráticos médios em função da malha para TIME = 4000s



(a) Erros quadráticos médios para as diferentes malhas para o instante de tempo igual a 4000 s

Erros quadráticos médios em função da malha para TIME = 5000s



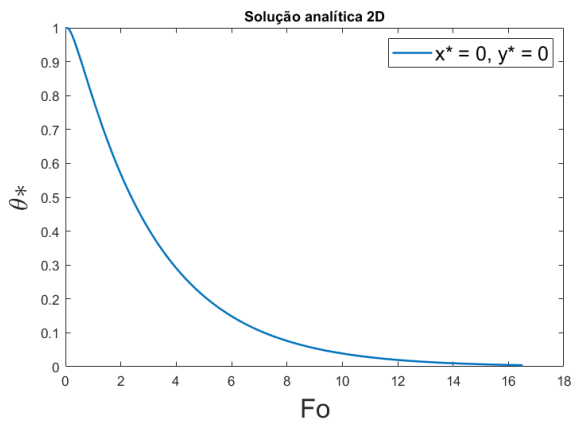
(b) Erros quadráticos médios para as diferentes malhas para o instante de tempo igual a 5000 s

Figura 22: Erros quadráticos médios para instantes de tempo iguais a 4000 s e 5000 s

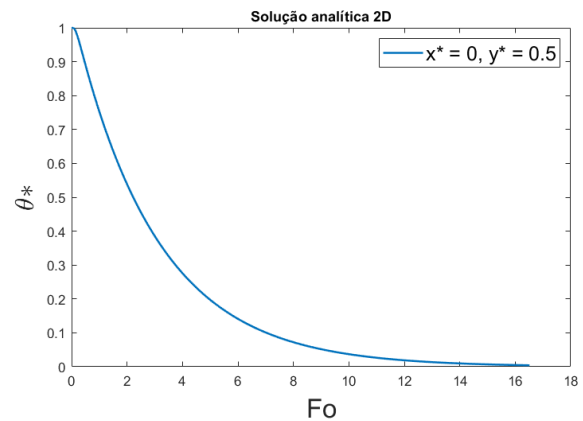


Tabela 2: Coeficientes utilizados para o cálculo da solução exata tridimensional

n	$\xi_{x,n}$	$C_{x,n}$	$\xi_{y,n}$	$C_{y,n}$	$\xi_{z,n}$	$C_{z,n}$
1	0.4783	1.038	0.6510	1.070	1.2011	1.213
2	3.2185	-0.04662	3.2911	$-8.666 \cdot 10^{-2}$	3.8228	-0.2921
3	6.3224	0.01232	6.3610	$2.414 \cdot 10^{-2}$	6.7156	0.1181
4	9.4510	$-5.534 \cdot 10^{-3}$	9.4771	$-1.097 \cdot 10^{-2}$	9.7330	$-6.055 \cdot 10^{-2}$
5	12.5861	$3.125 \cdot 10^{-3}$	12.6057	$6.217 \cdot 10^{-3}$	12.8039	$3.610 \cdot 10^{-2}$
6	15.7237	$-2.003 \cdot 10^{-3}$	15.7395	$-3.993 \cdot 10^{-3}$	15.9005	$-2.378 \cdot 10^{-2}$
7	18.8627	$1.393 \cdot 10^{-3}$	18.8758	$2.779 \cdot 10^{-3}$	19.0112	$1.679 \cdot 10^{-2}$
8	22.0024	$-1.024 \cdot 10^{-3}$	22.0137	$-2.044 \cdot 10^{-3}$	22.1303	$-1.246 \cdot 10^{-2}$
9	25.1426	$7.841 \cdot 10^{-4}$	25.1525	$1.566 \cdot 10^{-3}$	25.2548	$9.600 \cdot 10^{-3}$
10	28.2831	$-6.197 \cdot 10^{-4}$	28.2919	$-1.238 \cdot 10^{-3}$	28.3831	$-7.620 \cdot 10^{-3}$
11	31.4238	$5.020 \cdot 10^{-4}$	31.4317	$1.003 \cdot 10^{-3}$	31.5140	$6.192 \cdot 10^{-3}$
12	34.5647	$-4.150 \cdot 10^{-4}$	34.5719	$-8.293 \cdot 10^{-4}$	34.6467	$-5.130 \cdot 10^{-3}$
13	37.7057	$3.487 \cdot 10^{-4}$	37.7123	$6.970 \cdot 10^{-4}$	37.7810	$4.319 \cdot 10^{-3}$
14	40.8468	$-2.972 \cdot 10^{-4}$	40.8528	$-5.940 \cdot 10^{-4}$	40.9163	$-3.685 \cdot 10^{-3}$
15	43.9879	$2.562 \cdot 10^{-4}$	43.9936	$5.122 \cdot 10^{-4}$	44.0525	$3.181 \cdot 10^{-3}$
16	47.1292	$-2.232 \cdot 10^{-4}$	47.1344	$-4.463 \cdot 10^{-4}$	47.1895	$-2.774 \cdot 10^{-3}$
17	50.2704	$1.962 \cdot 10^{-4}$	50.2753	$3.923 \cdot 10^{-4}$	50.3270	$2.440 \cdot 10^{-3}$
18	53.4117	$-1.738 \cdot 10^{-4}$	53.4164	$-3.475 \cdot 10^{-4}$	53.4650	$-2.162 \cdot 10^{-3}$
19	56.5531	$1.550 \cdot 10^{-4}$	56.5574	$3.100 \cdot 10^{-4}$	56.6034	$1.930 \cdot 10^{-3}$
20	59.6944	$-1.391 \cdot 10^{-4}$	59.6986	$-2.782 \cdot 10^{-4}$	59.7421	$-1.733 \cdot 10^{-3}$

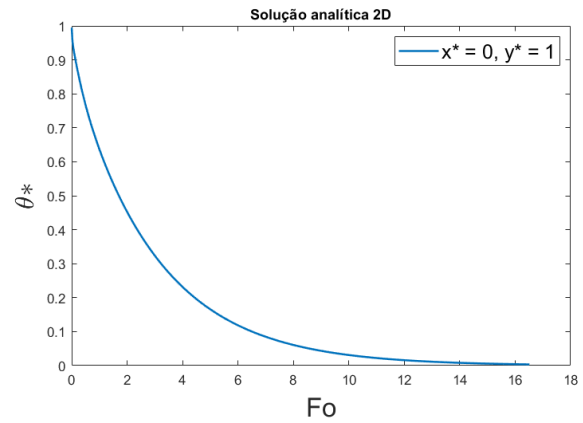
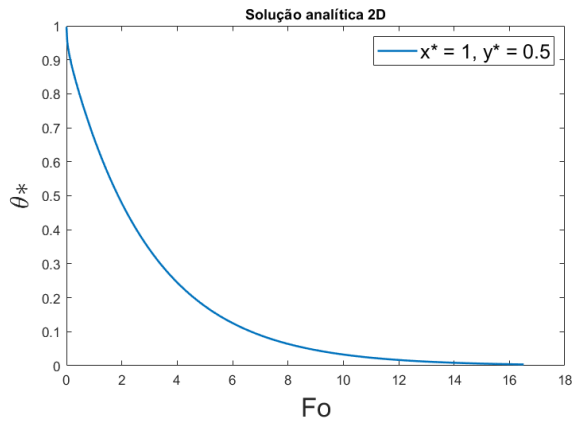


(a) Evolução adimensional de temperaturas para o centro da face inferior do corpo



(b) Evolução adimensional de temperaturas para o centro geométrico

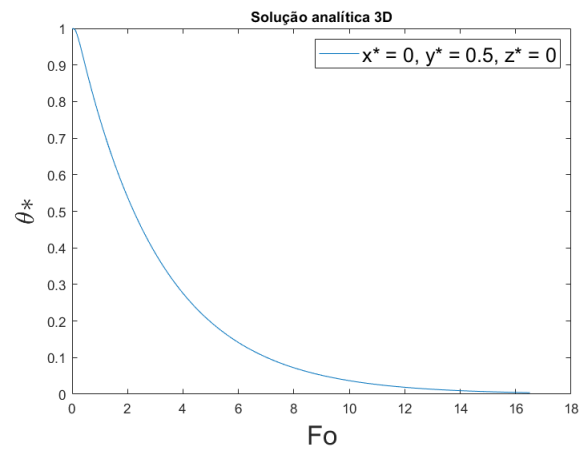
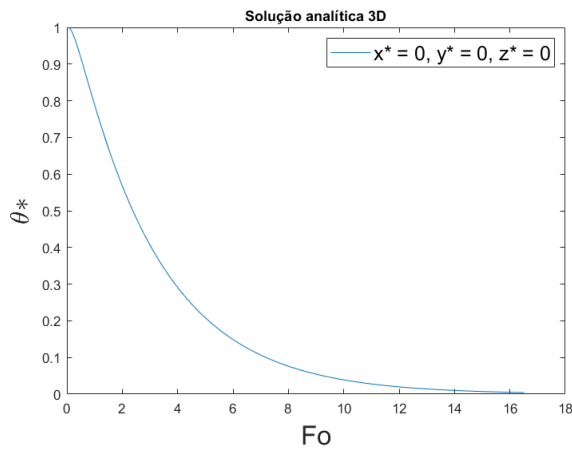
Figura 23: Evolução adimensional de temperaturas - solução analítica 2D



(a) Evolução adimensional de temperaturas para o centro das faces laterais do corpo

(b) Evolução adimensional de temperaturas para o centro da face do topo

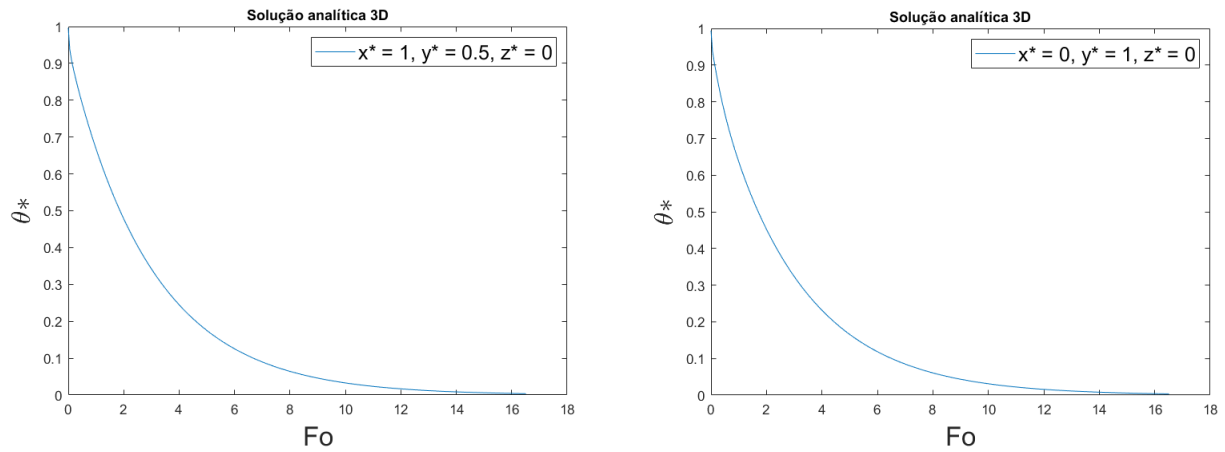
Figura 24: Evolução adimensional de temperaturas - solução analítica 2D



(a) Evolução adimensional de temperaturas para o centro da face inferior do corpo

(b) Evolução adimensional de temperaturas para o centro geométrico

Figura 25: Evolução adimensional de temperaturas - solução analítica 3D



(a) Evolução adimensional de temperaturas para o centro das faces laterais do corpo (b) Evolução adimensional de temperaturas para o centro da face do topo

Figura 26: Evolução adimensional de temperaturas - solução analítica 3D

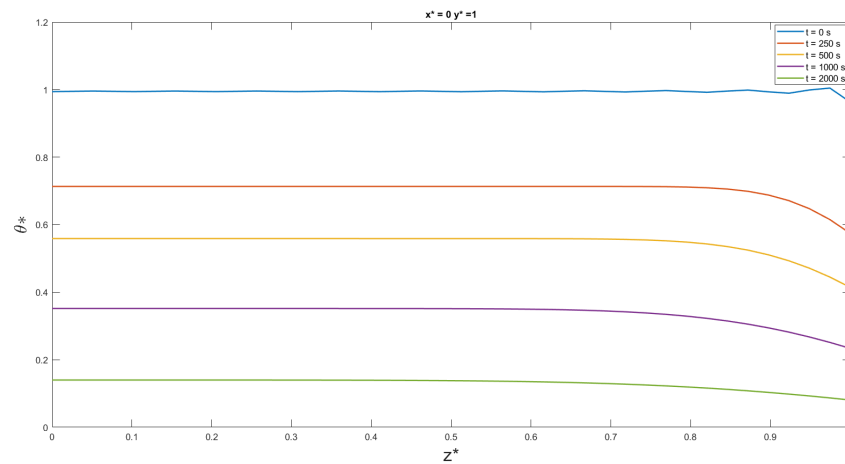


Figura 27: Variação da temperatura em função de z para diferentes valores de tempo

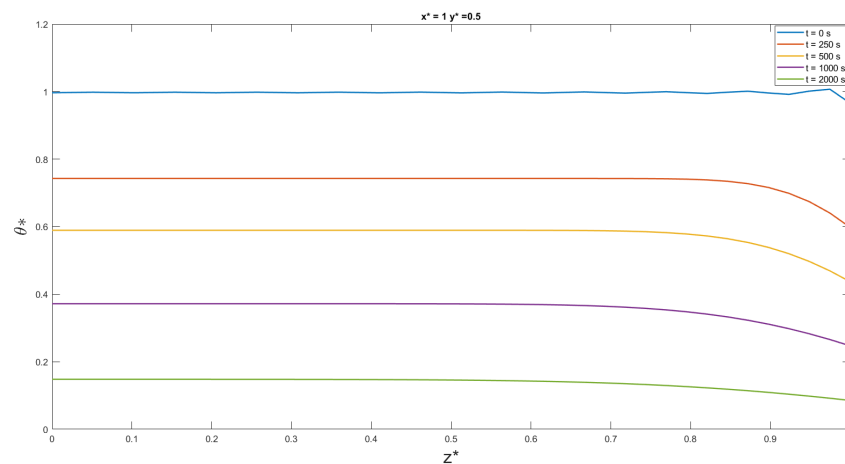


Figura 28: Variação da temperatura em função de z para diferentes valores de tempo

## Anexos

### Anexo-1

#### TeachC.m

```

1  %------%
2  %------%
3  %               Programa TEACH C (versão MATLAB)
4  %               CONTROL
5  %
6  %       Este programa permite resolver problemas de condução de calor
7  %               bidimensional com as seguintes variantes:
8  %
9  %       - Coordenadas cartesianas ou coordenadas cilíndricas ...
10 %       (axissimétrico)
11 %       - Regime estacionário ou transiente (não estacionário)
12 %       - Condutividade térmica (k) uniforme ou variável
13 %       (com a temperatura ou com o espaço)
14 %       - Com a utilização dos três tipos de condições de fronteira ...
15 %       existentes
16 %
17 %       - Temperatura imposta
18 %       - Fluxo imposto
19 %       - Convecção na fronteira do corpo
20 %
21 %               FS
22 %               09/05/2011
23 %------%
24 %------%
25 %
26 % Apaga variáveis e limpa a consola
27 clear all
28 close all
29 clc
30
31 % Utiliza o formato longo (15 dígitos) para maior precisão
32 format long
33
34 % Cria ficheiro para escrever os resultados
35 fid=fopen ( 'RESULTS.txt' , 'w' );
36

```

```
35
36 %----- Capitulo 0 - Preliminares -----%
37
38 % Define o número de nós da malha segundo x e y
39 %%%% Alterável %%%%
40 IT=63;
41 JT=63;
42
43 % Define o número de pontos da malha segundo x e y
44 %%%% Alterável %%%%
45 NI=63;
46 NJ=63;
47
48 % Constante
49 GREAT=1.0E30 ;
50
51
52 %----- Capitulo 1 - Parâmetros e Índices de controlo -----%
53
54 % Define o tipo de coordenadas (cartesianas - 0 0;
55 % cilíndricas vertical 1 0; cilíndricas horizontais 0 1)
56 %%%% Alterável %%%%
57 INCYLX=0;
58 INCYLY=0;
59
60 % Variável intermédia
61 NIM1=NI-1;
62 NJM1=NJ-1;
63
64 % Dimensões totais do domínio de solução , largura e altura [m]
65 %%%% Alterável %%%%
66 W=0.24 ;
67 H=0.24 ;
68
69
70 % Cálculo as abcissas na direção xx
71 DX(1)=W/(NIM1-1) ;
72 X(1)=-0.5 *DX(1) ;
73 for I=2:NI
74     DX(I)=DX(1) ;
75     X(I)=X(I-1)+DX(I-1) ;
76 end
77
```

```

78
79 % Calcula as abcissas na direção yy
80 DY(1)=H/(NJM1-1);
81 Y(1)=-0.5*DY(1);
82 for J=2:NJ
83     DY(J)=DY(1);
84     Y(J)=Y(J-1)+DY(J-1);
85 end
86
87 % Estabelece limites do Domínio
88 for I=1:NI
89     JS (I)=2;
90     JN (I)=NJ-1;
91 end
92
93 % Estabelece ponto monitor segundo x e y (IMON e JMON)
94 %%%% Alterável %%%%
95 IMON=2;
96 JMON=62;
97
98 % Propriedades do material (Tcond=cond,CV=calor esp,DENSIT=dens),
99 % Meio homogéneo
100 % Aço %%%% Alterável %%%%
101 for I=1:NI
102     for J=1:NJ
103         TCON (I,J)=121;
104         CV (I,J)=385;
105         DENSIT (I,J)=7930;
106         if I==1 && J==1
107             BK=TCON (I,J);
108
109         end
110     end
111 end
112
113 % Temperatura inicial
114 TINIC=1150;
115
116 % Parâmetros de controlo do programa
117 %%%% Alterável %%%%
118 % Número máximo de iterações
119 MAXIT=400;
120 % Número máximo de interações no tempo

```

```

121 MAXSTP=300;
122 % O output deverá conter os valores de T em intervalos de
123 NITPRI=400;
124 % "NITPRI" para "NSTPRI" iterações no tempo
125 NSTPRI=1;
126
127 % Factor de sub relaxação , Máximo resíduo e intervalo de tempo (s)
128 %%% Alterável %%%
129 URFT=1;
130 SORMAX=0.001 ;
131 DT=20;
132
133 % Selecciona o Regime---Estacionário->INTIME=0, Transiente->INTIME=1
134 %%% Alterável %%%
135 INTIME=1;
136
137 if INTIME==0
138     MAXSTP=1;
139 end
140
141 % Indica se as propriedades são constantes --- constantes->INPRO=0,
142 % variáveis->INPRO=1
143 %%% Alterável %%%
144 INPRO=0;
145
146
147 %----- Capitulo 2 - Operações iniciais -----%
148
149 % Calcula dimensões da malha e anula vectores/matrizes
150 % Chama função INIT
151 [RX,DXEP,DXPW,SEW,XU,RU,RY,DYPS,DYNP,SNS,YV,RV,AN,AS,AE,AW,SU,SP,GAMH, ...
    TOLD,T,X,Y]=INIT (INCYLX,INCYLY,NI,NJ,NIM1,NJM1,X,Y,TINIC) ;
152 TIME=0.0 ;
153
154 % Impõe valores de fronteira e inicializa variável dependente
155
156 % Valores de fronteira
157 %%% Alterável %%%
158 TTOP=20;
159 TBOT=1150;
160 TLEFT=0;
161 TRIGHT=0;
162

```

```

163
164 % Uma vez que de acordo com o enunciado não há temperatura imposta ...
    em nenhuma das faces estes valores não irão ter importância nos ...
    resultados ,estando apenas a adicionar tempo de computação
165
166 % for I=2:NIM1
167 %     T (I,1)=TBOT;
168 %     T (I,NJ)=TTOP;
169 % end
170 %
171 % for J=2:NJM1
172 %     T (1,J)=TLEFT;
173 %     T (NI,J)=TRIGHT;
174 % end
175
176
177 % Inicializa variável dependente
178 % Inicializa campo de propriedades do material
179 % Chama função PROPS
180 [GAMH]=PROPS(NI,NJ,TCON,GAMH);
181
182
183 % Cálculo do factor de normalização do resíduo
184 AK=BK;
185 SNORM=AK*(TTOP-TBOT)*W/H;
186 SNORM=abs(SNORM);
187
188 % Escreve as especificações do problema
189 fprintf(fid,'CONDUCTION IN RECTANGULAR BAR WITH PRESCRIBED SURFACE ...
    TEMPERATURE \r \n \r \n');
190 fprintf(fid,'HEIGHT, H [M]-----= %10.3f ...
    \r \n',H);
191 fprintf(fid,'WEIGHT, W [M]-----= %10.3f ...
    \r \n',W);
192 fprintf(fid,'SPECIFIC HEAT, CV [J/KG.K]-----= %10.3f ...
    \r \n',CV(1,1));
193 fprintf(fid,'THERMAL CONDUCTIVITY, TCON [W/M.K]-----= %10.3f ...
    \r \n',TCON(1,1));
194 fprintf(fid,'DENSIT, DENSIT [KG/M3] -----= %10.2f ...
    \r \n',DENSIT(1,1));
195 fprintf(fid,'INITIAL TIME STEP, DT [S] -----= %10.1f ...
    \r \n',DT);

```



```

196 fprintf(fid,'SOURCE NORMALIZATION FACTOR, SNORM -----= %8.3E \r ...
    \n',SNORM);
197 fprintf(fid,'NUMBER OF NODES IN X DIRECTION, NI -----= %10d \r ...
    \n',NI);
198 fprintf(fid,'NUMBER OF NODES IN Y DIRECTION, NJ -----= %10d \r ...
    \n',NJ);
199 fprintf(fid,'\r \n');
200
201 % Chama a função PRINT para imprimir o campo de temperaturas inicial
202 PRINT(1,1,NI,NJ,X,Y,T,fid)
203
204
205 %----- Capitulo 3 - Iterações no tempo e no espaço -----%
206
207 % Indica os pontos de controlo
208 % Imprime o rótulo das informações das iterações no ponto monitor
209 fprintf (fid,'NITER          SOURCE          T (%d,%d)      TIME(s)      ...
    DT(s)      NSTEP',IMON,JMON);
210 fprintf (fid,'\r \n');
211
212 Temperatura_monitor = zeros(MAXSTP,2);
213 Temperatura_centrogeo = zeros(MAXSTP,2);
214 Temperatura_centrosurfN = zeros(MAXSTP,2);
215 Temperatura_centrosurfO = zeros(MAXSTP,2);
216 Temperatura_centrosurfS = zeros(MAXSTP,2);
217 %Tmesh = zeros(8,2,9);
218 %c = 1;
219
220 %Para malha de 82x82
221 % Pts_grid = [5,78;6,77;5,38;6,37;5,6;6,5;21,78;22,77;21,38;22,37; ...
    21,6;22,5;37,78;38,77;37,38;38,37;37,6;38,5];
222
223 %Para malha de 62x62
224 % Pts_grid = [4,59;5,58;4,29;5,28;4,5;5,4;16,59;17,58;16,29;17,28; ...
    16,5;17,4;28,59;29,58;28,29;29,28;28,5;29,4];
225
226 %Para malha de 42x42
227 % Pts_grid = [3,40;4,39;3,20;4,19;3,4;4,3;11,40;12,39;11,20;12,19; ...
    11,4;12,3;19,40;20,39;19,20;20,19;19,4;20,3];
228
229 %Para malha de 22x22
230 % Pts_grid = [2,21;3,20;2,11;3,10;2,3;3,2;6,21;7,20;6,11;7,10;6,2; ...
    7,3;10,21;11,20;10,11;11,10;10,2;11,3];

```

```

231
232 %Para malha de 12x12
233 %Pts_grid = [2,11;2,6;2,2;4,11;4,6;4,2;6,11;6,6;6,2];
234
235 % Iterações no tempo
236 for NSTEP=1:MAXSTP
237     TIME=TIME+DT;
238     for I=1:NI
239         for J=1:NJ
240             TOLD(I,J)=T(I,J);
241         end
242     end
243
244 % Iterações no espaço
245 for NITER=1:MAXIT
246
247     % Chama a função CALCT para o cálculo das temperaturas
248     [AN,AS,AE,AW,SU,SP,GAMH,CV,DENSIT,TOLD,T,RESORT]=CALCT(NI,NJ, ...
        NIM1,NJM1,RX,DXEP,SEW,RU,RY,DYNP,SNS,RV,AN,AS,AE,AW,SU,SP, ...
        GAMH,CV,DENSIT,TOLD,T,URFT,JS,JN,INTIME,DT,Y,X,XU,YV,GREAT);
249
250     % Chama a função PROPS no caso de as propriedades variarem
251     if INPRO==1
252         [GAMH]=PROPS(NI,NJ,TCON,GAMH);
253     end
254
255     % Actualização de condições de fronteira e fontes se necessário
256
257     % Cálculo do resíduo normalizado
258     SOURCE=(RESORT/SNORM);
259
260     % Imprime a informação das iterações no ponto monitor
261     fprintf(fid,'%5d',NITER);
262     fprintf(fid,'%14.1E',SOURCE);
263     fprintf(fid,'%14.3E',T(IMON,JMON));
264     fprintf(fid,'%11d',TIME);
265     fprintf(fid,'%10d',DT);
266     fprintf(fid,'%9d',NSTEP);
267     fprintf(fid,'\r \n');
268
269
270     % Imprime Temperaturas em intervalos especificados por NITPRI
271     if mod(NITER,NITPRI)==0

```

```

272         PRINT(1,1,NI,NJ,X,Y,T,fid)
273
274         if NSTEP≠MAXSTP || SOURCE>SORMAX
275             % Imprime o rótulo das informações das iterações no ...
                ponto monitor
276             fprintf(fid,'NITER          SOURCE          T (%d,%d)          ...
                TIME(s)          DT(s)          NSTEP',IMON,JMON);
277             fprintf(fid,'\r \n');
278         end
279     end
280
281
282     % Testa resíduo do processo iterativo
283     if SOURCE<SORMAX
284         break
285     end
286
287     % Termina cálculos se a solução não converge (MAXIT e ...
        RESÍDUO<10)
288     if NITER≥MAXIT && SOURCE≥10
289         error('myApp:argChk','Não Convergiu segundo o critério ...
                especificado \n')
290     end
291
292
293     % Termina ciclo no espaço
294     end
295
296
297 %Para malha 82x82, 62x62, 42x42 e 22x22
298 %         if NSTEP == 3 || NSTEP == 6 || NSTEP == 25 || NSTEP == 50 || ...
                NSTEP == 100 || NSTEP == 150 || NSTEP == 200 || NSTEP == 250
299 %
300 %         Tmesh(c,1,1) = ...
                (T(Pts_grid(1,1),Pts_grid(1,2))+T(Pts_grid(2,1),Pts_grid(2,2)))/2;
301 %         Tmesh(c,2,1) = TIME;
302 %         Tmesh(c,1,2) = ...
                (T(Pts_grid(3,1),Pts_grid(3,2))+T(Pts_grid(4,1),Pts_grid(4,2)))/2;
303 %         Tmesh(c,2,2) = TIME;
304 %         Tmesh(c,1,3) = ...
                (T(Pts_grid(5,1),Pts_grid(5,2))+T(Pts_grid(6,1),Pts_grid(6,2)))/2;
305 %         Tmesh(c,2,3) = TIME;

```

```

306 %          Tmesh(c,1,4) = ...
          (T(Pts_grid(7,1),Pts_grid(7,2))+T(Pts_grid(8,1),Pts_grid(8,2)))/2;
307 %          Tmesh(c,2,4) = TIME;
308 %          Tmesh(c,1,5) = ...
          (T(Pts_grid(9,1),Pts_grid(9,2))+T(Pts_grid(10,1),Pts_grid(10,2)))/2;
309 %          Tmesh(c,2,5) = TIME;
310 %          Tmesh(c,1,6) = ...
          (T(Pts_grid(11,1),Pts_grid(11,2))+T(Pts_grid(12,1),Pts_grid(12,2)))/2;
311 %          Tmesh(c,2,6) = TIME;
312 %          Tmesh(c,1,7) = ...
          (T(Pts_grid(13,1),Pts_grid(13,2))+T(Pts_grid(14,1),Pts_grid(14,2)))/2;
313 %          Tmesh(c,2,7) = TIME;
314 %          Tmesh(c,1,8) = ...
          (T(Pts_grid(15,1),Pts_grid(15,2))+T(Pts_grid(16,1),Pts_grid(16,2)))/2;
315 %          Tmesh(c,2,8) = TIME;
316 %          Tmesh(c,1,9) = ...
          (T(Pts_grid(17,1),Pts_grid(17,2))+T(Pts_grid(18,1),Pts_grid(18,2)))/2;
317 %          Tmesh(c,2,9) = TIME;
318 %          c = c+1;
319 %          end
320
321 %Para malha 12x12
322 %          if NSTEP == 3 || NSTEP == 6 || NSTEP == 25 || NSTEP == 50 || ...
          NSTEP == 100 || NSTEP == 150 || NSTEP == 200 || NSTEP == 250
323 %
324 %          Tmesh(c,1,1) = T(Pts_grid(1,1),Pts_grid(1,2));
325 %          Tmesh(c,2,1) = TIME;
326 %          Tmesh(c,1,2) = T(Pts_grid(2,1),Pts_grid(2,2));
327 %          Tmesh(c,2,2) = TIME;
328 %          Tmesh(c,1,3) = T(Pts_grid(3,1),Pts_grid(3,2));
329 %          Tmesh(c,2,3) = TIME;
330 %          Tmesh(c,1,4) = T(Pts_grid(4,1),Pts_grid(4,2));
331 %          Tmesh(c,2,4) = TIME;
332 %          Tmesh(c,1,5) = T(Pts_grid(5,1),Pts_grid(5,2));
333 %          Tmesh(c,2,5) = TIME;
334 %          Tmesh(c,1,6) = T(Pts_grid(6,1),Pts_grid(6,2));
335 %          Tmesh(c,2,6) = TIME;
336 %          Tmesh(c,1,7) = T(Pts_grid(7,1),Pts_grid(7,2));
337 %          Tmesh(c,2,7) = TIME;
338 %          Tmesh(c,1,8) = T(Pts_grid(8,1),Pts_grid(8,2));
339 %          Tmesh(c,2,8) = TIME;
340 %          Tmesh(c,1,9) = T(Pts_grid(9,1),Pts_grid(9,2));
341 %          Tmesh(c,2,9) = TIME;

```

```

342 %      c = c+1;
343 %      end
344
345     Temperatura_monitor(NSTEP,1) = T(IMON,JMON);
346     Temperatura_monitor(NSTEP,2) = TIME;
347     Temperatura_centrogeo(NSTEP,1) = T(32,32);
348     Temperatura_centrogeo(NSTEP,2) = TIME;
349     Temperatura_centrosurfN(NSTEP,1) = T(32,62);
350     Temperatura_centrosurfN(NSTEP,2) = TIME;
351     Temperatura_centrosurfO(NSTEP,1) = T(2,32);
352     Temperatura_centrosurfO(NSTEP,2) = TIME;
353     Temperatura_centrosurfS(NSTEP,1) = T(32,2);
354     Temperatura_centrosurfS(NSTEP,2) = TIME;
355
356
357
358     fprintf(fid, '\r \n \r \n \r \n');
359
360     % Imprime a solução convergida no intervalo especificado por NSTPRI
361     if mod(NSTEP,NSTPRI)==0 && mod(NITER,NITPRI)~=0
362         PRINT(1,1,NI,NJ,X,Y,T,fid)
363     end
364
365     if NSTEP~=MAXSTP
366         % Imprime o rótulo das informações das iterações no ponto ...
367         % monitor
368         fprintf(fid, 'NITER      SOURCE      T (%d,%d)      TIME(s) ...
369                 DT(s)      NSTEP',IMON,JMON);      NSTEP',IMON,JMON);
370         fprintf(fid, '\r \n');
371
372     end
373
374     % Termina ciclo no tempo
375     end
376
377     % for sheet = 1:9
378     %      filename = 'Grid_independency.xlsx';
379     %
380     %      Para malha 82x82
381     %      writematrix(Tmesh(:,:,sheet), filename, 'Sheet',sheet, 'Range', ...
382     %                  'P4:Q11')
383     %
384     %      Para malha 62x62

```

```

382 % writematrix(Tmesh(:,:,sheet), filename, 'Sheet ', sheet, 'Range', ...
    'M4:N11')
383 %
384 % Para malha 42x42
385 % writematrix(Tmesh(:,:,sheet), filename, 'Sheet ', sheet, 'Range', ...
    'J4:K11')
386 %
387 % Para malha 22x22
388 % writematrix(Tmesh(:,:,sheet), filename, 'Sheet ', sheet, 'Range', ...
    'G4:H11')
389 %
390 % Para malha 12x12
391 % writematrix(Tmesh(:,:,sheet), filename, 'Sheet ', sheet, 'Range', ...
    'D4:E11')
392 %
393 % end
394
395 fclose(fid);
396
397 % Desenha gráfico 2D das Temperaturas-----
398
399 % Troca os eixos
400 for jj=1:NI
401     for ii=1:NJ
402         THI(jj,ii)=T(NI+1-jj,ii);
403     end
404 end
405
406 for jj=1:NI
407     for ii=1:NJ
408         THI2(NJ+1-ii,NI+1-jj)=THI(jj,ii);
409     end
410
411 end
412 %%% correcao H para W na orientacao x %%%
413
414 ZX=W/(NI-1);
415 ZJ=(H/(NJ-1));
416
417 % Plot da Temperatura Final
418 [X,Y]=meshgrid(0:ZX:W,H:-ZJ:0);
419
420 THI2=THI2(2:end-1,2:end-1);

```

```

421 X=X(2:end-1,2:end-1);
422 Y=Y(2:end-1,2:end-1);
423
424 figure(1)
425 % O número 10 remete para as cores utilizadas
426 contourf (X,Y,THI2,10);
427 colorbar;
428 xlabel( '\bfx ' )
429 ylabel( '\bfy ' )
430 zlabel( '\bfT ' )
431
432
433
434 %Cálculo do número de Fourier
435 L = 3;
436 alpha = TCON(1,1)/(DENSIT(1,1)*CV(1,1));
437 L_c = 0.12;
438 Fourier = (alpha*Temperatura_monitor(:,2))/L_c^2;
439
440 %Plots
441
442 theta_star_centrogeo = (Temperatura_centrogeo(:,1) -20)/(TINIC-20);
443
444 figure();
445 plot(Fourier,theta_star_centrogeo)
446 title(['Temperatura adimensionalizada (\theta^*) em função do Número ...
de Fourier para T(32,32)'],'FontSize',14);
447 xlabel('N{\''{u}}mero de Fourier','Interpreter','latex','FontSize',14)
448 ylabel('$\theta^*','$','Interpreter','latex','FontSize',16)
449
450
451 theta_star_centrosurfN = (Temperatura_centrosurfN(:,1) -20)/(TINIC-20);
452
453 figure();
454 plot(Fourier,theta_star_centrosurfN)
455 title(['Temperatura adimensionalizada (\theta^*) em função do Número ...
de Fourier para T(32,62)'],'FontSize',14);
456 xlabel('N{\''{u}}mero de Fourier','Interpreter','latex','FontSize',14)
457 ylabel('$\theta^*','$','Interpreter','latex','FontSize',16)
458
459
460 theta_star_centrosurfO = (Temperatura_centrosurfO(:,1) -20)/(TINIC-20);
461

```

```

462 figure();
463 plot(Fourier,theta_star_centrosurfO)
464 title(['Temperatura adimensionalizada (\theta^*) em função do Número ...
         de Fourier para T(2,32)'], 'FontSize',14);
465 xlabel('N\{'\{u\}mero de Fourier','Interpreter','latex','FontSize',14)
466 ylabel('$\theta^*$', 'Interpreter','latex','FontSize',16)
467
468 theta_star_centrosurfS = (Temperatura_centrosurfS(:,1) -20)/(TINIC-20);
469
470 figure();
471 plot(Fourier,theta_star_centrosurfS)
472 title(['Temperatura adimensionalizada (\theta^*) em função do Número ...
         de Fourier para T(32,2)'], 'FontSize',14);
473 xlabel('N\{'\{u\}mero de Fourier','Interpreter','latex','FontSize',14)
474 ylabel('$\theta^*$', 'Interpreter','latex','FontSize',16)
475
476 %% Método analítico && comparação
477 H = 0.24;
478 W = 0.24;
479 L = 3.00;
480 h = 250; %W/m^2K
481 T_in = 1150; %°C
482 T_amb = 20;
483 ro = 7930;
484 c = 385;
485 k = 121;
486 v = 39.6*10^-6;
487 alpha = k/(ro*c);
488 L_x = 0.12;
489 L_y = 0.24;
490 L_z = 1.50;
491 Bi_x = h*L_x/k;
492 Bi_y = h*L_y/k;
493 Bi_z = h*L_z/k;
494
495 Bi = [Bi_x Bi_y Bi_z];
496
497
498
499 for l=1:3
500     fun = @(csi) csi*tan(csi) - Bi(l);
501     j=1;
502     for i=1:200

```



```

503         out = fzero(fun, i-1);
504         if abs(fun(out)) < 0.05
505             if j == 1
506                 csi(1, j) = out;
507                 j = j + 1;
508             elseif out ~= csi(1, j-1) && out - csi(1, j-1) > 0.5
509                 csi(1, j) = out;
510                 j = j + 1;
511             end
512         end
513     end
514 end
515
516
517 for i = 1:20
518     ksi_x(i) = csi(1, i+1);
519     ksi_y(i) = csi(2, i+1);
520     ksi_z(i) = csi(3, i+1);
521 end
522 x = linspace(0, 1, 6);
523 y = linspace(0, 1, 20);
524 z = linspace(0, 1, 5);
525 theta_estrela_x = 0;
526 theta_estrela_y = 0;
527 theta_estrela_z = 0;
528
529 V_corpo = H*W*L;
530 A_corpo = H*W*2 + H*L*2 + W*L;
531 x = [0 1];
532 y = [0 0.5 1];
533 theta_estrela_x = 0;
534 theta_estrela_y = 0;
535 theta_estrela_z = 0;
536 theta_estrela = 0;
537 z = [0 1];
538 t = linspace(0, 6000, 301);
539 for k = 1:length(z)
540     for i = 1:2
541         for j = 1:3
542             for p = 1:length(ksi_x)
543                 C_x(p) = 4*sin(ksi_x(p))/(2*ksi_x(p) + ...
                    sin(2*ksi_x(p)));

```

```

544         C_y(p) = 4*sin(ksi_y(p))/(2*ksi_y(p) + ...
            sin(2*ksi_y(p)));
545         C_z(p) = 4*sin(ksi_z(p))/(2*ksi_z(p) + ...
            sin(2*ksi_z(p)));
546         theta_estrela_x = theta_estrela_x + ...
            C_x(p)*exp(-ksi_x(p)^2*alpha.*t/(H/2)^2)* ...
            cos(ksi_x(p)*x(i));
547         theta_estrela_y = theta_estrela_y + ...
            C_y(p)*exp(-ksi_y(p)^2*alpha.*t/(W/2)^2)* ...
            cos(ksi_y(p)*y(j));
548         theta_estrela_z = theta_estrela_z + ...
            C_z(p)*exp(-ksi_z(p)^2*alpha.*t/(L/2)^2)* ...
            cos(ksi_z(p)*z(k));
549     end
550
551     theta_estrela_2D = theta_estrela_x.*theta_estrela_y;
552     theta_estrela_3D =
553         theta_estrela_x.*theta_estrela_y.*theta_estrela_z;
554     theta_star_lcm = exp(-h*A_corpo/(ro*V_corpo*c).*t);
555     erro_2D_3D = abs(theta_estrela_3D - theta_estrela_2D);
556     erro_LCM_3D = abs(theta_star_lcm - theta_estrela_3D);
557     theta_estrela_x = 0;
558     theta_estrela_y = 0;
559     theta_estrela_z = 0;
560     figure()
561
562     if i==1 && j==1 && k==1
563         plot(t*alpha/(H/2)^2, theta_estrela_2D, 'r-', ...
            t*alpha/(H/2)^2, theta_star_lcm, 'y-', ...
            alpha*Temperatura_monitor(:,2)/L_c^2, ...
            theta_star_centrosurfS, 'b--', 'LineWidth', 1.5)
564         legend(sprintf('x* = %g, y* = %g 2D', x(i), y(j)), ...
            sprintf('LCM'), 'Teach C', 'Location', 'northeast', ...
            'Orientation', 'vertical', 'FontSize', 15)
565         ylabel("$\theta$", 'Interpreter', ...
            'latex', 'FontSize', 20)
566         xlabel("Fo", 'FontSize', 20)
567     elseif i==1 && j==1 && k==2
568         plot(t*alpha/(H/2)^2, theta_estrela_2D, 'r-', ...
            t*alpha/(H/2)^2, theta_estrela_3D, 'm--', ...
            t*alpha/(H/2)^2, theta_star_lcm, 'y-', ...
            alpha*Temperatura_monitor(:,2)/L_c^2, ...
            theta_star_centrosurfS, 'b--', 'LineWidth', 1.5)

```

```

569         legend(sprintf('x* = %g, y* = %g 2D', x(i), ...
                        y(j)), sprintf('x* = %g, y* = %g, z* = %g ...
                        3D', x(i), y(j), z(k)), sprintf('LCM'), 'Teach ...
                        C', 'Location', 'northeast', 'Orientation', ...
                        'vertical', 'FontSize', 15)
570     ylabel("$\theta$", 'Interpreter', ...
            'latex', 'FontSize', 20)
571     xlabel("Fo", 'FontSize', 20)
572     elseif i==1 && j==2 && k==1
573         plot(t*alpha/(H/2)^2, theta_estrela_2D, 'r-', ...
              t*alpha/(H/2)^2, theta_star_lcm, 'y-', ...
              alpha*Temperatura_monitor(:,2)/L_c^2, ...
              theta_star_centrogeo, 'b--', 'LineWidth', 1.5)
574         legend(sprintf('x* = %g, y* = %g 2D', x(i), y(j)), ...
                  sprintf('LCM'), 'Teach C', 'Location', ...
                  'northeast', 'Orientation', 'vertical', 'FontSize', ...
                  15)
575         ylabel("$\theta$", 'Interpreter', ...
                'latex', 'FontSize', 20)
576         xlabel("Fo", 'FontSize', 20)
577         elseif i==1 && j==2 && k==2
578         plot(t*alpha/(H/2)^2, theta_estrela_2D, 'r-', ...
              t*alpha/(H/2)^2, theta_estrela_3D, 'm--', ...
              t*alpha/(H/2)^2, theta_star_lcm, 'y-', ...
              alpha*Temperatura_monitor(:,2)/L_c^2, ...
              theta_star_centrogeo, 'b--', 'LineWidth', 1.5)
579         legend(sprintf('x* = %g, y* = %g 2D', x(i), ...
                        y(j)), sprintf('x* = %g, y* = %g, z* = %g 3D', ...
                        x(i), y(j), z(k)), sprintf('LCM'), 'Teach C', ...
                        'Location', 'northeast', 'Orientation', 'vertical', ...
                        'FontSize', 15)
580         ylabel("$\theta$", 'Interpreter', 'latex', ...
                'FontSize', 20)
581         xlabel("Fo", 'FontSize', 20)
582         elseif i==1 && j==3 && k==1
583         plot(t*alpha/(H/2)^2, theta_estrela_2D, 'r-', ...
              t*alpha/(H/2)^2, theta_star_lcm, 'y-', ...
              alpha*Temperatura_monitor(:,2)/L_c^2, ...
              theta_star_centrosurfN, 'b--', 'LineWidth', 1.5)
584         legend(sprintf('x* = %g, y* = %g 2D', x(i), y(j)), ...
                  sprintf('LCM'), 'Teach C', 'Location', ...
                  'northeast', 'Orientation', 'vertical', 'FontSize', ...
                  15)

```

```

585         ylabel("$\theta$", 'Interpreter', 'latex', ...
               'FontSize', 20)
586         xlabel("Fo", 'FontSize', 20)
587         elseif i==1 && j==3 && k==2
588             plot(t*alpha/(H/2)^2, theta_estrela_2D, ...
                  'r-', t*alpha/(H/2)^2, theta_estrela_3D, 'm-', ...
                  t*alpha/(H/2)^2, theta_star_lcm, 'y-', ...
                  alpha*Temperatura_monitor(:,2)/L_c^2, ...
                  theta_star_centrosurfN, 'b--', 'LineWidth', 1.5)
589             legend(sprintf('x* = %g, y* = %g 2D', x(i), ...
                             y(j)), sprintf('x* = %g, y* = %g, z* = %g 3D', ...
                             x(i), y(j), z(k)), sprintf('LCM'), 'Teach C', ...
                     'Location', 'northeast', 'Orientation', ...
                     'vertical', 'FontSize', 15)
590             ylabel("$\theta$", ...
                   'Interpreter', 'latex', 'FontSize', 20)
591             xlabel("Fo", 'FontSize', 20)
592             elseif i==2 && j==2 && k==1
593                 plot(t*alpha/(H/2)^2, theta_estrela_2D, 'r-', ...
                      t*alpha/(H/2)^2, theta_star_lcm, 'y-', ...
                      alpha*Temperatura_monitor(:,2)/L_c^2, ...
                      theta_star_centrosurfO, 'b--', 'LineWidth', 1.5)
594                 legend(sprintf('x* = %g, y* = %g 2D', x(i), y(j)), ...
                         sprintf('LCM'), 'Teach C', 'Location', 'northeast', ...
                         'Orientation', 'vertical', 'FontSize', 15)
595                 ylabel("$\theta$", 'Interpreter', ...
                       'latex', 'FontSize', 20)
596                 xlabel("Fo", 'FontSize', 20)
597                 elseif i==2 && j==2 && k==2
598                     plot(t*alpha/(H/2)^2, theta_estrela_2D, 'r-', ...
                           t*alpha/(H/2)^2, theta_estrela_3D, 'm-', ...
                           t*alpha/(H/2)^2, theta_star_lcm, 'y-', ...
                           alpha*Temperatura_monitor(:,2)/L_c^2, ...
                           theta_star_centrosurfO, 'b--', 'LineWidth', 1.5)
599                     legend(sprintf('x* = %g, y* = %g 2D', x(i), y(j)), ...
                             sprintf('x* = %g, y* = %g, z* = %g 3D', x(i), ...
                             y(j), z(k)), sprintf('LCM'), 'Teach C', ...
                     'Location', 'northeast', 'Orientation', ...
                     'vertical', 'FontSize', 15)
600                     ylabel("$\theta$", 'Interpreter', ...
                           'latex', 'FontSize', 20)
601                     xlabel("Fo", 'FontSize', 20)
602                 else

```

```

603         plot(t*alpha/(H/2)^2,theta_estrela_2D,'r-', ...
               t*alpha/(H/2)^2,theta_estrela_3D,'m-', ...
               t*alpha/(H/2)^2,theta_star_lcm,'y-', ...
               'LineWidth',1.5)
604         legend(sprintf('x* = %g, y* = %g 2D', x(i), ...
                          y(j)),sprintf('x* = %g, y* = %g, z* = %g 3D', ...
                          x(i), y(j), z(k)),sprintf('LCM'),'Location', ...
               'northeast','Orientation','vertical','FontSize', ...
               15)
605         ylabel("$\theta$", 'Interpreter', ...
               'latex','FontSize', 20)
606         xlabel("Fo", 'FontSize', 20)
607     end
608 end
609 end
610 end
611
612
613 % cálculo dos erros
614 x = linspace(0, 1, 6);
615 y = linspace(0, 1, 20);
616 z = linspace(0, 1, 5);
617 theta_estrela_x = 0;
618 theta_estrela_y = 0;
619 theta_estrela_z = 0;
620
621 V_corpo = H*W*L;
622 A_corpo = H*W*2 + H*L*2 + W*L;
623 x = [0 1];
624 y = [0 0.5 1];
625 theta_estrela_x = 0;
626 theta_estrela_y = 0;
627 theta_estrela_z = 0;
628 theta_estrela = 0;
629 z = 0;
630 t = linspace(20, 6000, 300);
631
632 for i=1:2
633     for j=1:3
634         for p=1:length(ksi_x)
635             C_x(p) = 4*sin(ksi_x(p))/(2*ksi_x(p) + sin(2*ksi_x(p)));
636             C_y(p) = 4*sin(ksi_y(p))/(2*ksi_y(p) + sin(2*ksi_y(p)));
637             C_z(p) = 4*sin(ksi_z(p))/(2*ksi_z(p) + sin(2*ksi_z(p)));

```

```

638         theta_estrela_x = theta_estrela_x + ...
            C_x(p)*exp(-ksi_x(p)^2*alpha.*t/(H/2)^2) ...
            *cos(ksi_x(p)*x(i));
639         theta_estrela_y = theta_estrela_y + ...
            C_y(p)*exp(-ksi_y(p)^2*alpha.*t/(W)^2) ...
            *cos(ksi_y(p)*y(j));
640         theta_estrela_z = theta_estrela_z + ...
            C_z(p)*exp(-ksi_z(p)^2*alpha.*t/(L/2)^2) ...
            *cos(ksi_z(p)*z);
641     end
642
643     theta_estrela_2D = theta_estrela_x.*theta_estrela_y;
644     theta_estrela_3D = theta_estrela_x. ...
        *theta_estrela_y.*theta_estrela_z;
645     theta_estrela_2D_t = theta_estrela_2D. ';
646     theta_estrela_3D = theta_estrela_3D. ';
647     theta_star_lcm = exp(-h*A_corpo/(ro*V_corpo*c).*t);
648     erro_2D_3D = abs(theta_estrela_3D - theta_estrela_2D);
649     erro_LCM_3D = abs(theta_star_lcm - theta_estrela_2D);
650     theta_estrela_x = 0;
651     theta_estrela_y = 0;
652     theta_estrela_z = 0;
653
654     if i==1 && j==1
655         erro_teachC = abs(theta_star_centrosurfS - ...
            theta_estrela_2D_t);
656         figure()
657         plot(t*alpha/(H/2)^2, erro_teachC, 'LineWidth',1.5)
658         title('Erro absoluto (solução numérica vs solução ...
            Analítica)', 'FontSize', 20)
659         legend(sprintf('x* = %g, y* = %g', x(i), ...
            y(j)), 'Location', 'northeast', 'Orientation', ...
            'vertical', 'FontSize', 10)
660         ylabel("erro absoluto", 'Interpreter', ...
            'latex', 'FontSize', 20)
661         xlabel("Fo", 'FontSize', 20)
662
663         figure()
664         plot(t*alpha/(H/2)^2, erro_LCM_3D, 'LineWidth',1.5)
665         title('Erro absoluto (método da Capacitância Global vs ...
            Solução Analítica)', 'FontSize', 20)
666         legend(sprintf('x* = %g, y* = %g', x(i), ...
            y(j)), 'Location', 'northeast', 'Orientation', ...

```

```

        'vertical', 'FontSize', 10)
667     ylabel("erro absoluto", 'Interpreter', 'latex', ...
        'FontSize', 20)
668     xlabel("Fo", 'FontSize', 20)
669     elseif i==1 && j==2
670         erro_teachC = abs(theta_star_centrogeo - theta_estrela_2D_t);
671         figure()
672         plot(t*alpha/(H/2)^2, erro_teachC, 'LineWidth', 1.5)
673         title('Erro absoluto (solução numérica vs solução ...
        Analítica)', 'FontSize', 20)
674         legend(sprintf('x* = %g, y* = %g', x(i), ...
        y(j)), 'Location', 'northeast', 'Orientation', ...
        'vertical', 'FontSize', 10)
675         ylabel("erro absoluto", 'Interpreter', ...
        'latex', 'FontSize', 20)
676         xlabel("Fo", 'FontSize', 20)
677
678         figure()
679         plot(t*alpha/(H/2)^2, erro_LCM_3D, 'LineWidth', 1.5)
680         title('Erro absoluto (método da Capacitância Global vs ...
        Solução Analítica)', 'FontSize', 20)
681         legend(sprintf('x* = %g, y* = %g', x(i), ...
        y(j)), 'Location', 'northeast', 'Orientation', ...
        'vertical', 'FontSize', 10)
682         ylabel("erro absoluto", 'Interpreter', ...
        'latex', 'FontSize', 20)
683         xlabel("Fo", 'FontSize', 20)
684     elseif i==1 && j==3
685         erro_teachC = abs(theta_star_centrosurfN - ...
        theta_estrela_2D_t);
686         figure()
687         plot(t*alpha/(H/2)^2, erro_teachC, 'LineWidth', 1.5)
688         title('Erro absoluto (solução numérica vs solução ...
        Analítica)', 'FontSize', 20)
689         legend(sprintf('x* = %g, y* = %g', x(i), ...
        y(j)), 'Location', 'northeast', 'Orientation', ...
        'vertical', 'FontSize', 10)
690         ylabel("erro absoluto", 'Interpreter', ...
        'latex', 'FontSize', 20)
691         xlabel("Fo", 'FontSize', 20)
692
693         figure()
694         plot(t*alpha/(H/2)^2, erro_LCM_3D, 'LineWidth', 1.5)

```

```
695         title('Erro absoluto (método da Capacitância Global vs ...  
           Solução Analítica)', 'FontSize', 20)  
696         legend(sprintf('x* = %g, y* = %g', x(i), ...  
           y(j)), 'Location', 'northeast', 'Orientation', ...  
           'vertical', 'FontSize', 10)  
697         ylabel("erro absoluto", 'Interpreter', ...  
           'latex', 'FontSize', 20)  
698         xlabel("Fo", 'FontSize', 20)  
699         elseif i==2 && j==2  
700             erro_teachC = abs(theta_star_centrosurfO - ...  
               theta_estrela_2D_t);  
701         figure()  
702         plot(t*alpha/(H/2)^2, erro_teachC, 'LineWidth', 1.5)  
703         title('Erro absoluto (solução numérica vs Solução ...  
           Analítica)', 'FontSize', 20)  
704         legend(sprintf('x* = %g, y* = %g', x(i), ...  
           y(j)), 'Location', 'northeast', 'Orientation', ...  
           'vertical', 'FontSize', 10)  
705         ylabel("erro absoluto", 'Interpreter', ...  
           'latex', 'FontSize', 20)  
706         xlabel("Fo", 'FontSize', 20)  
707  
708         figure()  
709         plot(t*alpha/(H/2)^2, erro_LCM_3D, 'LineWidth', 1.5)  
710         title('Erro absoluto (método da Capacitância Global vs ...  
           Solução Analítica)', 'FontSize', 20)  
711         legend(sprintf('x* = %g, y* = %g', x(i), ...  
           y(j)), 'Location', 'northeast', 'Orientation', ...  
           'vertical', 'FontSize', 10)  
712         ylabel("erro absoluto", 'Interpreter', ...  
           'latex', 'FontSize', 20)  
713         xlabel("Fo", 'FontSize', 20)  
714     end  
715 end  
716 end
```



**PROMOD.m**

```

1  %------%
2  %------%
3  %               script: PROMOD (versão MATLAB)
4  %               Define e introduz as Condições de Fronteira
5  %               -Temperatura Imposta
6  %               -Fluxo Imposto
7  %               -Convecção
8  %               -Simetria
9  %               FS
10 %               09/05/2011
11 %------%
12 %------%
13
14 function [AN,AS,AE,AW,SU,SP,T]=PROMOD(NI,NJ,NIM1,NJM1,IL,RV,YV,Y,SNS, ...
    SEW,X,XU,AN,AS,AE,AW,SU,SP,GAMH,T,RY)
15
16
17 %----- Capitulo 0 - Preliminares ...
    -----%
18
19
20 %----- Capitulo 1 - Condição de Fronteira ...
    -----%
21
22 %O Utilizador define o tipo de condição de fronteira (1-Temperatura,
23 %2-Fluxo, 3-Convecção e 4-simetria para a fronteira Norte, Sul, Este e
24 %Oeste (CFN,CFS,CFW,CFE)
25 %%%% Alterável %%%%
26 CFN=3;
27 CFS=4;
28 CFW=3;
29 CFE=3;
30
31 %Identifica o tipo de condição de fronteira
32 I=IL;
33
34 %%%FRONTEIRA ...
    NORTE-----
35 %Temperatura imposta
36 if CFN==1

```

```

37
38     RDYN=RV(NJ) / (YV(NJ) -Y(NJM1)) ;
39     AN(NJM1)=0;
40     DN=GAMH( IL ,NJM1) *SEW( IL ) *RDYN;
41     SU (NJM1)=SU (NJM1)+DN*T( IL ,NJ) ;
42     SP (NJM1)=SP (NJM1) -DN;
43
44
45 %Fluxo imposto
46 elseif CFN==2
47
48     QN=20;                %%%%% alterável %%%%%
49     AN(NJM1)=0;
50     DN=QN*SEW( IL ) *RV(NJ) ;
51     SU (NJM1)=SU (NJM1)+DN;
52     SP (NJM1)=SP (NJM1) ;
53
54
55 %Convecção
56 elseif CFN==3
57
58     HCONV=250;            %%%%% alterável %%%%%
59     TF=20;                %%%%% alterável %%%%%
60     RDYN=YV(NJ) -Y(NJM1) ;
61     AN(NJM1)=0;
62     DN1=RDYN/GAMH( IL ,NJM1) +1/HCONV;
63     DN=SEW( IL ) *RV(NJ) /DN1;
64     SU (NJM1)=SU (NJM1)+DN*TF;
65     SP (NJM1)=SP (NJM1) -DN;
66
67
68 %simetria
69 elseif CFN==4
70
71     AN(NJM1)=0;
72     T( IL ,NJ)=T( IL ,NJM1) ;
73
74
75 %Caso o utilizador tenha introduzido incorrectamente a condição de
76 %fronteira o programa termina
77 else
78     error( 'myApp:argChk', 'Condição de fronteira mal introduzida , o ...
           programa vai encerrar' )

```

```

79
80
81 end
82 %%% -----
83
84 %%%FRONTEIRA ...
      SUL-----
85 %Temperatura imposta
86 if CFS==1
87
88     RDYS=RV(2)/(Y(2)-YV(2));
89     AS(2)=0;
90     DS=GAMH(IL,2)*SEW(IL)*RDYS;
91     SU(2)=SU(2)+DS*T(IL,1);
92     SP(2)=SP(2)-DS;
93
94
95 %Fluxo imposto
96 elseif CFS==2
97
98     QS=0;          %%%% alterável %%%%
99     AS(2)=0;
100    DS=QS*SEW(IL)*RV(2);
101    SU(2)=SU(2)+DS;
102    SP(2)=SP(2);
103
104 elseif CFS==3
105
106    HCONV=12.5;      %%%% alterável %%%%
107    TF=80;           %%%% alterável %%%%
108    RDYS=Y(2)-YV(2);
109    AS(2)=0;
110    DS1=RDYS/GAMH(IL,2)+1/HCONV;
111    DS=SEW(IL)*RV(2)/DS1;
112    SU(2)=SU(2)+DS*TF;
113    SP(2)=SP(2)-DS;
114
115
116 %simetria
117 elseif CFS==4
118
119     AS(2)=0;
120     T(IL,2)=T(IL,2);

```

```

121
122
123 %Caso o utilizador tenha introduzido incorrectamente a condição de
124 %fronteira o programa termina
125 else
126
127     error('myApp:argChk','Condição de fronteira mal introduzida, o ...
        programa vai encerrar')
128
129
130 end
131 %%%-----
132
133 %%%FRONTEIRA ...
    OESTE-----
134 %Temperatura imposta
135 if CFW==1
136
137     if IL==2
138         DXW=X(2)-XU(2);
139         for J=2:NJM1
140             AW(J)=0;
141             DW=GAMH(IL,J)*SNS(J)*RY(J)/DXW;
142             SU(J)=SU(J)+DW*T(1,J);
143             SP(J)=SP(J)-DW;
144         end
145     end
146
147
148 %Fluxo imposto
149 elseif CFW==2
150
151     if IL==2
152         QW=20;                %%%% alterável %%%%
153         for J=2:NJM1
154             AW(J)=0;
155             DW=QW*SNS(J)*RY(J);
156             SU(J)=SU(J)+DW;
157             SP(J)=SP(J);
158         end
159     end
160 end
161

```

```

162
163 %Convecção
164 elseif CFW==3
165
166     if IL==2
167         HCONV=250; %%%%% alterável %%%%%
168         TF=20; %%%%% alterável %%%%%
169         DXW=X(2) -XU(2) ;
170         for J=2:NJM1
171             AW(J)=0;
172             DW1=DXW/GAMH( IL , J ) +1/HCONV;
173             DW=SNS( J ) *RY( J ) /DW1;
174             SU( J )=SU( J )+DW*TF;
175             SP( J )=SP( J ) -DW;
176         end
177     end
178
179
180 elseif CFW==4
181
182     if IL==2
183
184         for J=2:NJM1
185             AW(J)=0;
186             T(1,J)=T(2,J) ;
187         end
188
189     end
190
191
192 %Caso o utilizador tenha introduzido incorrectamente a condição de
193 %fronteira o programa termina
194 else
195
196     error('myApp:argChk','Condição de fronteira mal introduzida , o ...
197           programa vai encerrar')
198
199 end
200 %%% -----
201
202 %%%FRONTEIRA ...
203 ESTE-----

```

```

203 %Temperatura imposta
204 if CFE==1
205
206     if IL==NIM1
207         DXE=XU(NI) -X(NIM1) ;
208         for J=2:NJM1
209             AE(J)=0;
210             DE=GAMH(IL , J)*SNS(J)*RY(J)/DXE;
211             SU(J)=SU(J)+DE*T(NI, J) ;
212             SP(J)=SP(J) -DE;
213
214         end
215     end
216
217
218 %Fluxo imposto
219 elseif CFE==2
220
221     if IL==NIM1
222         QE=0;                %%%%% alterável %%%%%
223         for J=2:NJM1
224             AE(J)=0;
225             DE=QE*SNS(J)*RY(J) ;
226             SU(J)=SU(J)+DE;
227             SP(J)=SP(J) ;
228
229         end
230     end
231
232
233 %Convecção
234 elseif CFE==3
235
236     if IL==NIM1
237         HCONV=250;           %%%%% alterável %%%%%
238         TF=20;              %%%%% alterável %%%%%
239         DXE=XU(NI) -X(NIM1) ;
240         for J=2:NJM1
241             AE(J)=0;
242             DE1=DXE/GAMH(IL , J) +1/HCONV;
243             DE=SNS(J)*RY(J)/DE1;
244             SU(J)=SU(J)+DE*TF;
245             SP(J)=SP(J) -DE;

```

```
246         end
247     end
248
249
250 %simetria
251 elseif CFE==4
252
253     if IL==NIM1
254
255         for J=2:NJM1
256             AE(J)=0;
257             T(NI,J)=T(NIM1,J);
258         end
259
260     end
261
262
263 %Caso o utilizador tenha introduzido incorrectamente a condição de
264 %fronteira o programa termina
265 else
266
267     error('myApp:argChk','Condição de fronteira mal introduzida , o ...
268           programa vai encerrar')
269
270 end
271 %%% -----
272
273
274 %Termina PROMOD
275 end
```

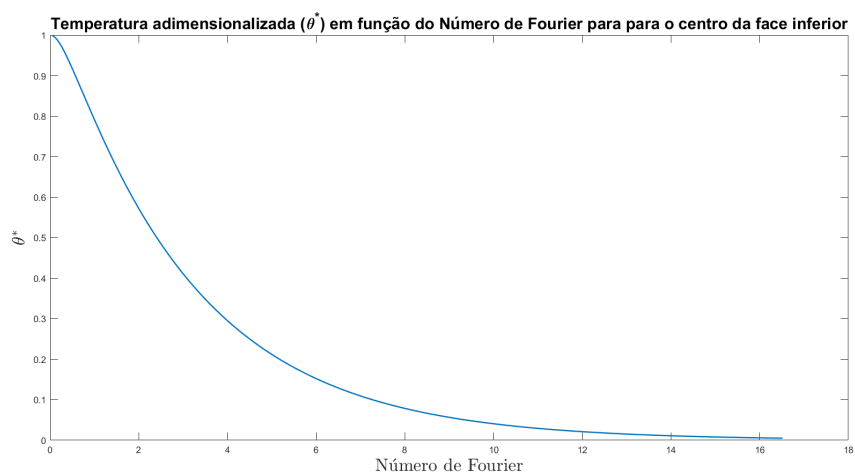
**Anexo-2**

Figura 29: Solução numérica do centro da face inferior

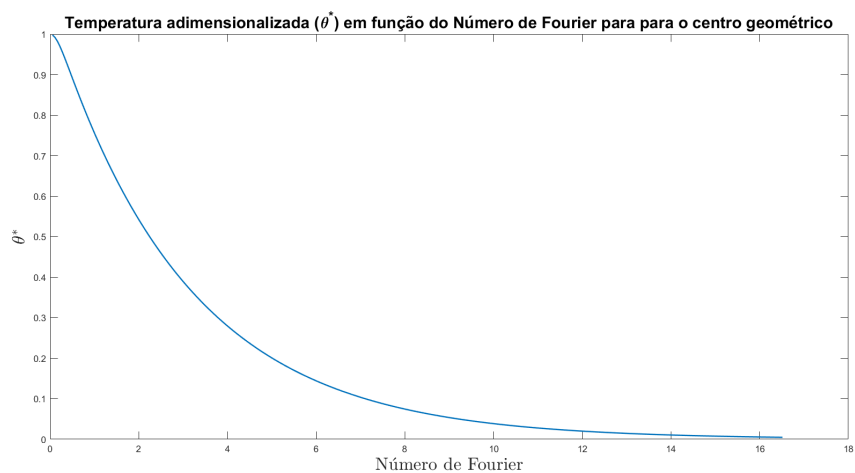


Figura 30: Solução numérica do centro geométrico

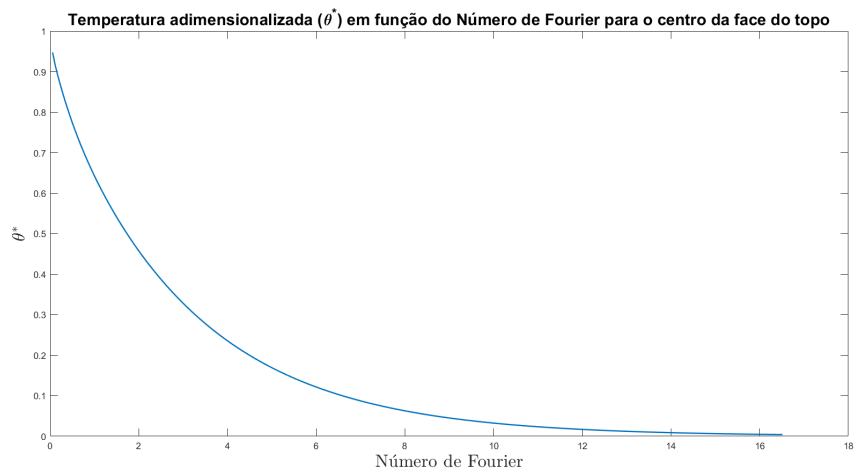


Figura 31: Solução numérica do centro da face do topo



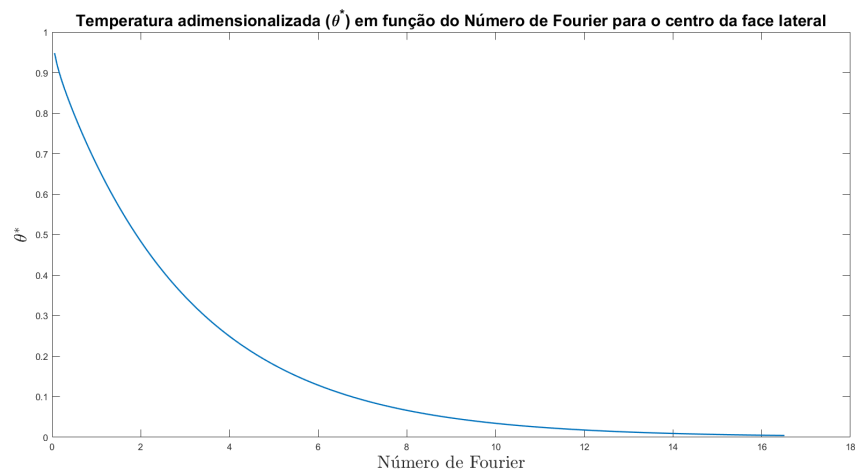


Figura 32: Solução numérica do centro da face lateral

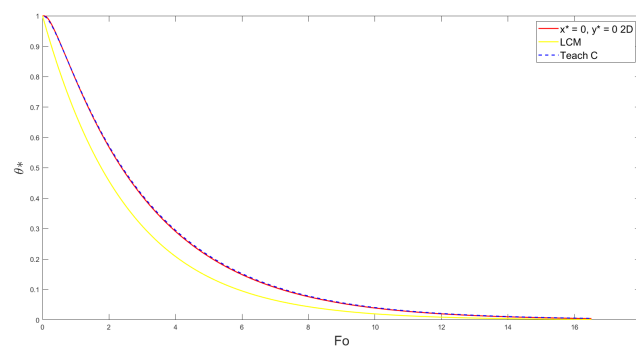


Figura 33: Evolução adimensional de temperaturas

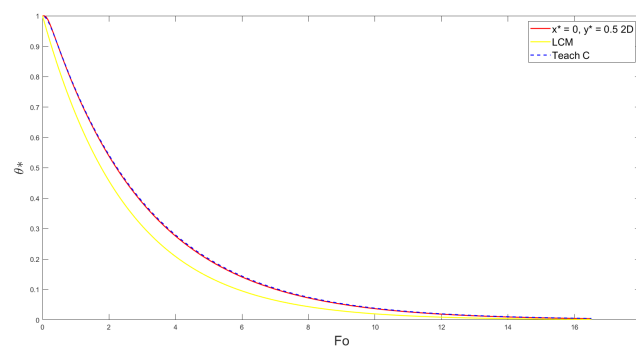


Figura 34: Evolução adimensional de temperaturas

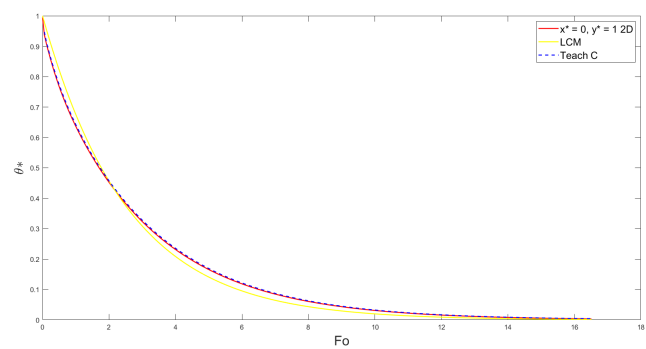


Figura 35: Evolução adimensional de temperaturas

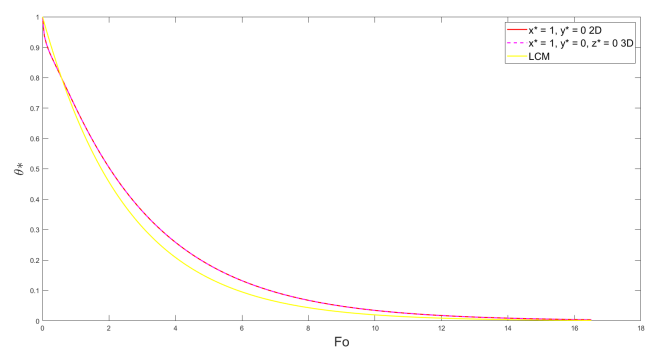


Figura 36: Evolução adimensional de temperaturas

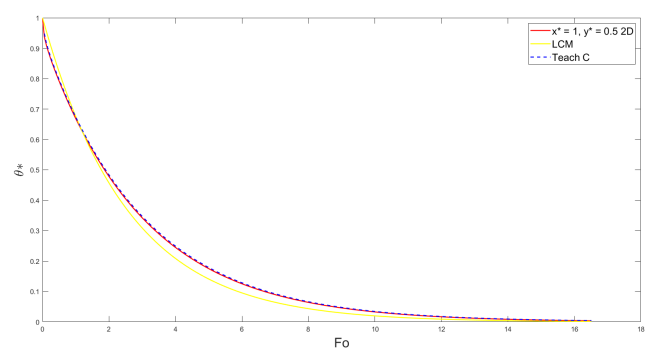


Figura 37: Evolução adimensional de temperaturas

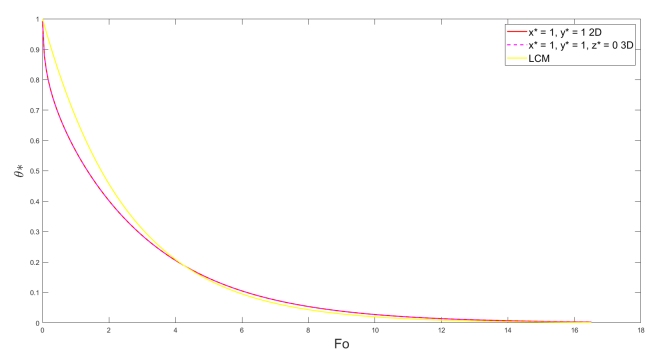


Figura 38: Evolução adimensional de temperaturas

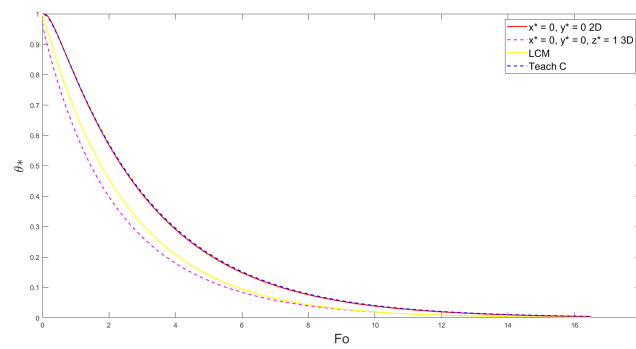


Figura 39: Evolução adimensional de temperaturas

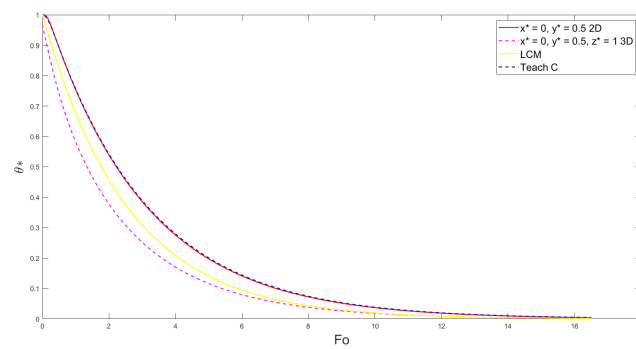


Figura 40: Evolução adimensional de temperaturas

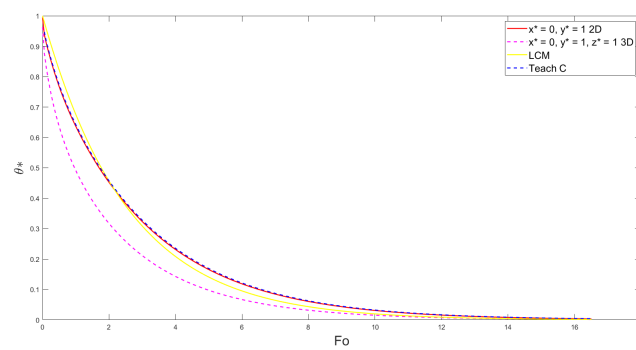


Figura 41: Evolução adimensional de temperaturas

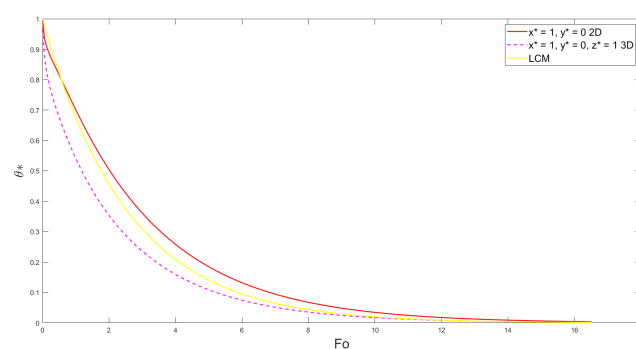


Figura 42: Evolução adimensional de temperaturas

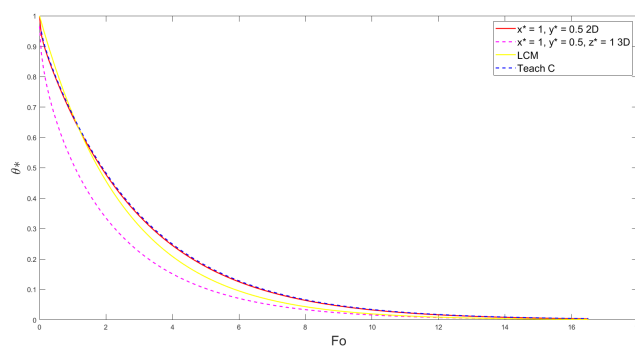


Figura 43: Evolução adimensional de temperaturas

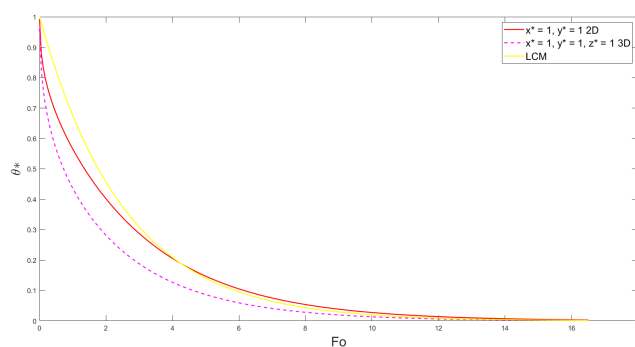


Figura 44: Evolução adimensional de temperaturas

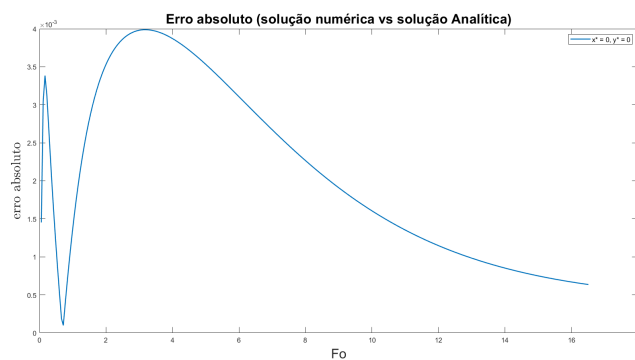


Figura 45: Erro absoluto entre o método Numérico e a solução Analítica

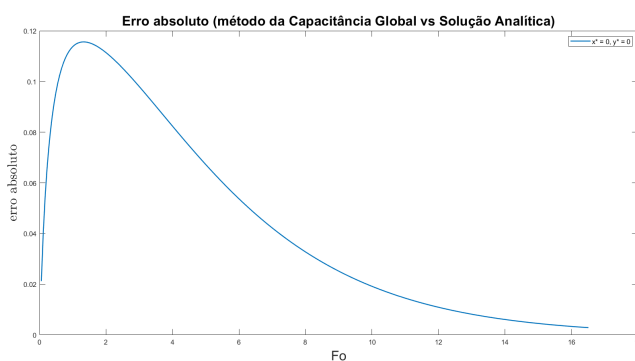


Figura 46: Erro absoluto entre o método da Capacitância Global e a solução Analítica

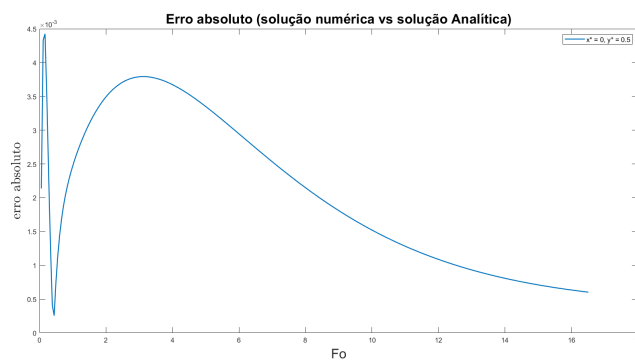


Figura 47: Erro absoluto entre o método Numérico e a solução Analítica

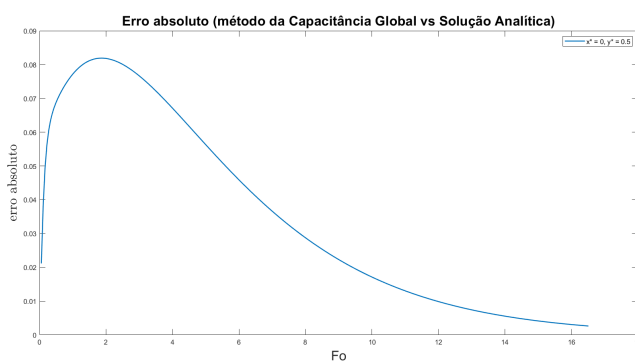


Figura 48: Erro absoluto entre o método da Capacitância Global e a solução Analítica

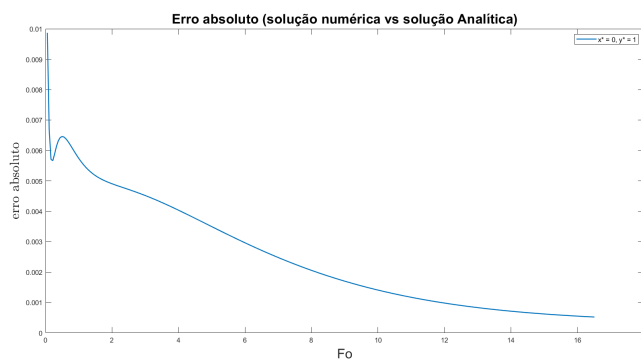


Figura 49: Erro absoluto entre o método Numérico e a solução Analítica

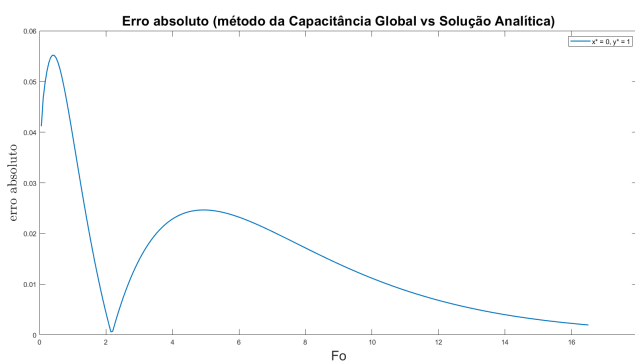


Figura 50: Erro absoluto entre o método da Capacitância Global e a solução Analítica

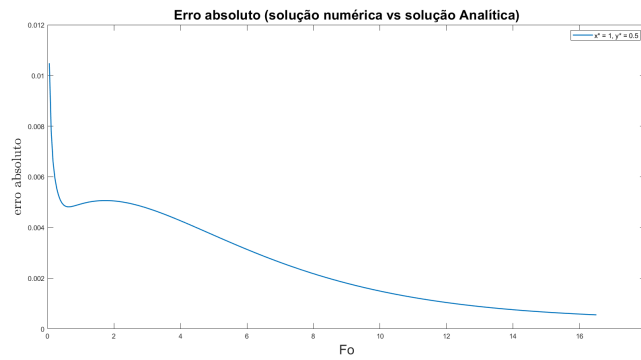


Figura 51: Erro absoluto entre o método Numérico e a solução Analítica

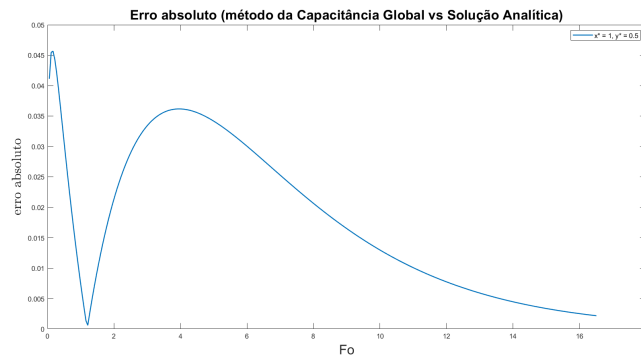


Figura 52: Erro absoluto entre o método da Capacitância Global e a solução Analítica

### ***RESULTS.txt***

	NITER	SOURCE	T (2,62)	TIME(s)	DT(s)	NSTEP
1						
2						
3	1	2.9E+00	1.136E+03	20	20	1
4						
5	2	2.8E+00	1.127E+03	20	20	1
6						
7	3	2.8E+00	1.121E+03	20	20	1
8						
9	4	2.7E+00	1.116E+03	20	20	1
10						
11	5	2.6E+00	1.112E+03	20	20	1
12						
13	6	2.6E+00	1.108E+03	20	20	1
14						
15	7	2.5E+00	1.105E+03	20	20	1
16						
17	8	2.5E+00	1.102E+03	20	20	1
18						

19	9	2.4E+00	1.099E+03	20	20	1
20						
21	10	2.3E+00	1.097E+03	20	20	1
22						
23	11	2.3E+00	1.094E+03	20	20	1
24						
25	12	2.2E+00	1.092E+03	20	20	1
26						
27	13	2.2E+00	1.090E+03	20	20	1
28						
29	14	2.1E+00	1.088E+03	20	20	1
30						
31	15	2.1E+00	1.086E+03	20	20	1
32						
33	16	2.1E+00	1.084E+03	20	20	1
34						
35	17	2.0E+00	1.083E+03	20	20	1
36						
37	18	2.0E+00	1.081E+03	20	20	1
38						
39	19	1.9E+00	1.080E+03	20	20	1
40						
41	20	1.9E+00	1.078E+03	20	20	1
42						
43	21	1.8E+00	1.077E+03	20	20	1
44						
45	22	1.8E+00	1.076E+03	20	20	1
46						
47	23	1.8E+00	1.074E+03	20	20	1
48						
49	24	1.7E+00	1.073E+03	20	20	1
50						
51	25	1.7E+00	1.072E+03	20	20	1
52						
53	26	1.7E+00	1.071E+03	20	20	1
54						
55	27	1.6E+00	1.070E+03	20	20	1
56						
57	28	1.6E+00	1.069E+03	20	20	1
58						
59	29	1.6E+00	1.068E+03	20	20	1
60						
61	30	1.5E+00	1.067E+03	20	20	1

62						
63	31	1.5E+00	1.066E+03	20	20	1
64						
65	32	1.5E+00	1.065E+03	20	20	1
66						
67	33	1.4E+00	1.065E+03	20	20	1
68						
69	34	1.4E+00	1.064E+03	20	20	1
70						
71	35	1.4E+00	1.063E+03	20	20	1
72						
73	36	1.3E+00	1.062E+03	20	20	1
74						
75	37	1.3E+00	1.062E+03	20	20	1
76						
77	38	1.3E+00	1.061E+03	20	20	1
78						
79	39	1.3E+00	1.060E+03	20	20	1
80						
81	40	1.2E+00	1.060E+03	20	20	1
82						
83	41	1.2E+00	1.059E+03	20	20	1
84						
85	42	1.2E+00	1.058E+03	20	20	1
86						
87	43	1.2E+00	1.058E+03	20	20	1
88						
89	44	1.1E+00	1.057E+03	20	20	1
90						
91	45	1.1E+00	1.057E+03	20	20	1
92						
93	46	1.1E+00	1.056E+03	20	20	1
94						
95	47	1.1E+00	1.056E+03	20	20	1
96						
97	48	1.0E+00	1.055E+03	20	20	1
98						
99	49	1.0E+00	1.055E+03	20	20	1
100						
101	50	1.0E+00	1.054E+03	20	20	1
102						
103	51	9.9E -01	1.054E+03	20	20	1
104						



105	52	9.7E -01	1.053E+03	20	20	1
106						
107	53	9.5E -01	1.053E+03	20	20	1
108						
109	54	9.3E -01	1.053E+03	20	20	1
110						
111	55	9.1E -01	1.052E+03	20	20	1
112						
113	56	8.9E -01	1.052E+03	20	20	1
114						
115	57	8.7E -01	1.052E+03	20	20	1
116						
117	58	8.5E -01	1.051E+03	20	20	1
118						
119	59	8.4E -01	1.051E+03	20	20	1
120						
121	60	8.2E -01	1.050E+03	20	20	1
122						
123	61	8.0E -01	1.050E+03	20	20	1
124						
125	62	7.9E -01	1.050E+03	20	20	1
126						
127	63	7.7E -01	1.050E+03	20	20	1
128						
129	64	7.5E -01	1.049E+03	20	20	1
130						
131	65	7.4E -01	1.049E+03	20	20	1
132						
133	66	7.2E -01	1.049E+03	20	20	1
134						
135	67	7.1E -01	1.048E+03	20	20	1
136						
137	68	6.9E -01	1.048E+03	20	20	1
138						
139	69	6.8E -01	1.048E+03	20	20	1
140						
141	70	6.7E -01	1.048E+03	20	20	1
142						
143	71	6.5E -01	1.047E+03	20	20	1
144						
145	72	6.4E -01	1.047E+03	20	20	1
146						
147	73	6.3E -01	1.047E+03	20	20	1

148						
149	74	6.1E -01	1.047E+03	20	20	1
150						
151	75	6.0E -01	1.046E+03	20	20	1
152						
153	76	5.9E -01	1.046E+03	20	20	1
154						
155	77	5.8E -01	1.046E+03	20	20	1
156						
157	78	5.7E -01	1.046E+03	20	20	1
158						
159	79	5.5E -01	1.046E+03	20	20	1
160						
161	80	5.4E -01	1.045E+03	20	20	1
162						
163	81	5.3E -01	1.045E+03	20	20	1
164						
165	82	5.2E -01	1.045E+03	20	20	1
166						
167	83	5.1E -01	1.045E+03	20	20	1
168						
169	84	5.0E -01	1.045E+03	20	20	1
170						
171	85	4.9E -01	1.045E+03	20	20	1
172						
173	86	4.8E -01	1.044E+03	20	20	1
174						
175	87	4.7E -01	1.044E+03	20	20	1
176						
177	88	4.6E -01	1.044E+03	20	20	1
178						
179	89	4.5E -01	1.044E+03	20	20	1
180						
181	90	4.4E -01	1.044E+03	20	20	1
182						
183	91	4.3E -01	1.044E+03	20	20	1
184						
185	92	4.3E -01	1.044E+03	20	20	1
186						
187	93	4.2E -01	1.043E+03	20	20	1
188						
189	94	4.1E -01	1.043E+03	20	20	1
190						

191	95	4.0E -01	1.043E+03	20	20	1
192						
193	96	3.9E -01	1.043E+03	20	20	1
194						
195	97	3.8E -01	1.043E+03	20	20	1
196						
197	98	3.8E -01	1.043E+03	20	20	1
198						
199	99	3.7E -01	1.043E+03	20	20	1
200						
201	100	3.6E -01	1.043E+03	20	20	1
202						
203	101	3.5E -01	1.042E+03	20	20	1
204						
205	102	3.5E -01	1.042E+03	20	20	1
206						
207	103	3.4E -01	1.042E+03	20	20	1
208						
209	104	3.3E -01	1.042E+03	20	20	1
210						
211	105	3.3E -01	1.042E+03	20	20	1
212						
213	106	3.2E -01	1.042E+03	20	20	1
214						
215	107	3.1E -01	1.042E+03	20	20	1
216						
217	108	3.1E -01	1.042E+03	20	20	1
218						
219	109	3.0E -01	1.042E+03	20	20	1
220						
221	110	3.0E -01	1.042E+03	20	20	1
222						
223	111	2.9E -01	1.041E+03	20	20	1
224						
225	112	2.8E -01	1.041E+03	20	20	1
226						
227	113	2.8E -01	1.041E+03	20	20	1
228						
229	114	2.7E -01	1.041E+03	20	20	1
230						
231	115	2.7E -01	1.041E+03	20	20	1
232						
233	116	2.6E -01	1.041E+03	20	20	1

234						
235	117	2.6E -01	1.041E+03	20	20	1
236						
237	118	2.5E -01	1.041E+03	20	20	1
238						
239	119	2.5E -01	1.041E+03	20	20	1
240						
241	120	2.4E -01	1.041E+03	20	20	1
242						
243	121	2.4E -01	1.041E+03	20	20	1
244						
245	122	2.3E -01	1.041E+03	20	20	1
246						
247	123	2.3E -01	1.041E+03	20	20	1
248						
249	124	2.2E -01	1.041E+03	20	20	1
250						
251	125	2.2E -01	1.040E+03	20	20	1
252						
253	126	2.1E -01	1.040E+03	20	20	1
254						
255	127	2.1E -01	1.040E+03	20	20	1
256						
257	128	2.0E -01	1.040E+03	20	20	1
258						
259	129	2.0E -01	1.040E+03	20	20	1
260						
261	130	2.0E -01	1.040E+03	20	20	1
262						
263	131	1.9E -01	1.040E+03	20	20	1
264						
265	132	1.9E -01	1.040E+03	20	20	1
266						
267	133	1.9E -01	1.040E+03	20	20	1
268						
269	134	1.8E -01	1.040E+03	20	20	1
270						
271	135	1.8E -01	1.040E+03	20	20	1
272						
273	136	1.7E -01	1.040E+03	20	20	1
274						
275	137	1.7E -01	1.040E+03	20	20	1
276						

277	138	1.7E -01	1.040E+03	20	20	1
278						
279	139	1.6E -01	1.040E+03	20	20	1
280						
281	140	1.6E -01	1.040E+03	20	20	1
282						
283	141	1.6E -01	1.040E+03	20	20	1
284						
285	142	1.5E -01	1.040E+03	20	20	1
286						
287	143	1.5E -01	1.040E+03	20	20	1
288						
289	144	1.5E -01	1.040E+03	20	20	1
290						
291	145	1.5E -01	1.040E+03	20	20	1
292						
293	146	1.4E -01	1.040E+03	20	20	1
294						
295	147	1.4E -01	1.039E+03	20	20	1
296						
297	148	1.4E -01	1.039E+03	20	20	1
298						
299	149	1.3E -01	1.039E+03	20	20	1
300						
301	150	1.3E -01	1.039E+03	20	20	1
302						
303	151	1.3E -01	1.039E+03	20	20	1
304						
305	152	1.3E -01	1.039E+03	20	20	1
306						
307	153	1.2E -01	1.039E+03	20	20	1
308						
309	154	1.2E -01	1.039E+03	20	20	1
310						
311	155	1.2E -01	1.039E+03	20	20	1
312						
313	156	1.2E -01	1.039E+03	20	20	1
314						
315	157	1.1E -01	1.039E+03	20	20	1
316						
317	158	1.1E -01	1.039E+03	20	20	1
318						
319	159	1.1E -01	1.039E+03	20	20	1

320						
321	160	1.1E -01	1.039E+03	20	20	1
322						
323	161	1.1E -01	1.039E+03	20	20	1
324						
325	162	1.0E -01	1.039E+03	20	20	1
326						
327	163	1.0E -01	1.039E+03	20	20	1
328						
329	164	9.9E -02	1.039E+03	20	20	1
330						
331	165	9.7E -02	1.039E+03	20	20	1
332						
333	166	9.5E -02	1.039E+03	20	20	1
334						
335	167	9.3E -02	1.039E+03	20	20	1
336						
337	168	9.1E -02	1.039E+03	20	20	1
338						
339	169	9.0E -02	1.039E+03	20	20	1
340						
341	170	8.8E -02	1.039E+03	20	20	1
342						
343	171	8.6E -02	1.039E+03	20	20	1
344						
345	172	8.4E -02	1.039E+03	20	20	1
346						
347	173	8.3E -02	1.039E+03	20	20	1
348						
349	174	8.1E -02	1.039E+03	20	20	1
350						
351	175	7.9E -02	1.039E+03	20	20	1
352						
353	176	7.8E -02	1.039E+03	20	20	1
354						
355	177	7.6E -02	1.039E+03	20	20	1
356						
357	178	7.5E -02	1.039E+03	20	20	1
358						
359	179	7.3E -02	1.039E+03	20	20	1
360						
361	180	7.2E -02	1.039E+03	20	20	1
362						

363	181	7.0E -02	1.039E+03	20	20	1
364						
365	182	6.9E -02	1.039E+03	20	20	1
366						
367	183	6.8E -02	1.039E+03	20	20	1
368						
369	184	6.6E -02	1.039E+03	20	20	1
370						
371	185	6.5E -02	1.039E+03	20	20	1
372						
373	186	6.4E -02	1.039E+03	20	20	1
374						
375	187	6.2E -02	1.039E+03	20	20	1
376						
377	188	6.1E -02	1.039E+03	20	20	1
378						
379	189	6.0E -02	1.039E+03	20	20	1
380						
381	190	5.9E -02	1.039E+03	20	20	1
382						
383	191	5.7E -02	1.039E+03	20	20	1
384						
385	192	5.6E -02	1.039E+03	20	20	1
386						
387	193	5.5E -02	1.038E+03	20	20	1
388						
389	194	5.4E -02	1.038E+03	20	20	1
390						
391	195	5.3E -02	1.038E+03	20	20	1
392						
393	196	5.2E -02	1.038E+03	20	20	1
394						
395	197	5.1E -02	1.038E+03	20	20	1
396						
397	198	5.0E -02	1.038E+03	20	20	1
398						
399	199	4.9E -02	1.038E+03	20	20	1
400						
401	200	4.8E -02	1.038E+03	20	20	1
402						
403	201	4.7E -02	1.038E+03	20	20	1
404						
405	202	4.6E -02	1.038E+03	20	20	1

406						
407	203	4.5E -02	1.038E+03	20	20	1
408						
409	204	4.4E -02	1.038E+03	20	20	1
410						
411	205	4.3E -02	1.038E+03	20	20	1
412						
413	206	4.3E -02	1.038E+03	20	20	1
414						
415	207	4.2E -02	1.038E+03	20	20	1
416						
417	208	4.1E -02	1.038E+03	20	20	1
418						
419	209	4.0E -02	1.038E+03	20	20	1
420						
421	210	3.9E -02	1.038E+03	20	20	1
422						
423	211	3.8E -02	1.038E+03	20	20	1
424						
425	212	3.8E -02	1.038E+03	20	20	1
426						
427	213	3.7E -02	1.038E+03	20	20	1
428						
429	214	3.6E -02	1.038E+03	20	20	1
430						
431	215	3.5E -02	1.038E+03	20	20	1
432						
433	216	3.5E -02	1.038E+03	20	20	1
434						
435	217	3.4E -02	1.038E+03	20	20	1
436						
437	218	3.3E -02	1.038E+03	20	20	1
438						
439	219	3.3E -02	1.038E+03	20	20	1
440						
441	220	3.2E -02	1.038E+03	20	20	1
442						
443	221	3.1E -02	1.038E+03	20	20	1
444						
445	222	3.1E -02	1.038E+03	20	20	1
446						
447	223	3.0E -02	1.038E+03	20	20	1
448						



449	224	3.0E -02	1.038E+03	20	20	1
450						
451	225	2.9E -02	1.038E+03	20	20	1
452						
453	226	2.8E -02	1.038E+03	20	20	1
454						
455	227	2.8E -02	1.038E+03	20	20	1
456						
457	228	2.7E -02	1.038E+03	20	20	1
458						
459	229	2.7E -02	1.038E+03	20	20	1
460						
461	230	2.6E -02	1.038E+03	20	20	1
462						
463	231	2.6E -02	1.038E+03	20	20	1
464						
465	232	2.5E -02	1.038E+03	20	20	1
466						
467	233	2.5E -02	1.038E+03	20	20	1
468						
469	234	2.4E -02	1.038E+03	20	20	1
470						
471	235	2.4E -02	1.038E+03	20	20	1
472						
473	236	2.3E -02	1.038E+03	20	20	1
474						
475	237	2.3E -02	1.038E+03	20	20	1
476						
477	238	2.2E -02	1.038E+03	20	20	1
478						
479	239	2.2E -02	1.038E+03	20	20	1
480						
481	240	2.1E -02	1.038E+03	20	20	1
482						
483	241	2.1E -02	1.038E+03	20	20	1
484						
485	242	2.1E -02	1.038E+03	20	20	1
486						
487	243	2.0E -02	1.038E+03	20	20	1
488						
489	244	2.0E -02	1.038E+03	20	20	1
490						
491	245	1.9E -02	1.038E+03	20	20	1

492						
493	246	1.9E -02	1.038E+03	20	20	1
494						
495	247	1.9E -02	1.038E+03	20	20	1
496						
497	248	1.8E -02	1.038E+03	20	20	1
498						
499	249	1.8E -02	1.038E+03	20	20	1
500						
501	250	1.8E -02	1.038E+03	20	20	1
502						
503	251	1.7E -02	1.038E+03	20	20	1
504						
505	252	1.7E -02	1.038E+03	20	20	1
506						
507	253	1.7E -02	1.038E+03	20	20	1
508						
509	254	1.6E -02	1.038E+03	20	20	1
510						
511	255	1.6E -02	1.038E+03	20	20	1
512						
513	256	1.6E -02	1.038E+03	20	20	1
514						
515	257	1.5E -02	1.038E+03	20	20	1
516						
517	258	1.5E -02	1.038E+03	20	20	1
518						
519	259	1.5E -02	1.038E+03	20	20	1
520						
521	260	1.4E -02	1.038E+03	20	20	1
522						
523	261	1.4E -02	1.038E+03	20	20	1
524						
525	262	1.4E -02	1.038E+03	20	20	1
526						
527	263	1.4E -02	1.038E+03	20	20	1
528						
529	264	1.3E -02	1.038E+03	20	20	1
530						
531	265	1.3E -02	1.038E+03	20	20	1
532						
533	266	1.3E -02	1.038E+03	20	20	1
534						

535	267	1.2E -02	1.038E+03	20	20	1
536						
537	268	1.2E -02	1.038E+03	20	20	1
538						
539	269	1.2E -02	1.038E+03	20	20	1
540						
541	270	1.2E -02	1.038E+03	20	20	1
542						
543	271	1.2E -02	1.038E+03	20	20	1
544						
545	272	1.1E -02	1.038E+03	20	20	1
546						
547	273	1.1E -02	1.038E+03	20	20	1
548						
549	274	1.1E -02	1.038E+03	20	20	1
550						
551	275	1.1E -02	1.038E+03	20	20	1
552						
553	276	1.0E -02	1.038E+03	20	20	1
554						
555	277	1.0E -02	1.038E+03	20	20	1
556						
557	278	1.0E -02	1.038E+03	20	20	1
558						
559	279	9.8E -03	1.038E+03	20	20	1
560						
561	280	9.6E -03	1.038E+03	20	20	1
562						
563	281	9.4E -03	1.038E+03	20	20	1
564						
565	282	9.3E -03	1.038E+03	20	20	1
566						
567	283	9.1E -03	1.038E+03	20	20	1
568						
569	284	8.9E -03	1.038E+03	20	20	1
570						
571	285	8.7E -03	1.038E+03	20	20	1
572						
573	286	8.5E -03	1.038E+03	20	20	1
574						
575	287	8.4E -03	1.038E+03	20	20	1
576						
577	288	8.2E -03	1.038E+03	20	20	1

578						
579	289	8.0E -03	1.038E+03	20	20	1
580						
581	290	7.9E -03	1.038E+03	20	20	1
582						
583	291	7.7E -03	1.038E+03	20	20	1
584						
585	292	7.6E -03	1.038E+03	20	20	1
586						
587	293	7.4E -03	1.038E+03	20	20	1
588						
589	294	7.3E -03	1.038E+03	20	20	1
590						
591	295	7.1E -03	1.038E+03	20	20	1
592						
593	296	7.0E -03	1.038E+03	20	20	1
594						
595	297	6.9E -03	1.038E+03	20	20	1
596						
597	298	6.7E -03	1.038E+03	20	20	1
598						
599	299	6.6E -03	1.038E+03	20	20	1
600						
601	300	6.5E -03	1.038E+03	20	20	1
602						
603	301	6.3E -03	1.038E+03	20	20	1
604						
605	302	6.2E -03	1.038E+03	20	20	1
606						
607	303	6.1E -03	1.038E+03	20	20	1
608						
609	304	6.0E -03	1.038E+03	20	20	1
610						
611	305	5.8E -03	1.038E+03	20	20	1
612						
613	306	5.7E -03	1.038E+03	20	20	1
614						
615	307	5.6E -03	1.038E+03	20	20	1
616						
617	308	5.5E -03	1.038E+03	20	20	1
618						
619	309	5.4E -03	1.038E+03	20	20	1
620						

621	310	5.3E -03	1.038E+03	20	20	1
622						
623	311	5.2E -03	1.038E+03	20	20	1
624						
625	312	5.1E -03	1.038E+03	20	20	1
626						
627	313	5.0E -03	1.038E+03	20	20	1
628						
629	314	4.9E -03	1.038E+03	20	20	1
630						
631	315	4.8E -03	1.038E+03	20	20	1
632						
633	316	4.7E -03	1.038E+03	20	20	1
634						
635	317	4.6E -03	1.038E+03	20	20	1
636						
637	318	4.5E -03	1.038E+03	20	20	1
638						
639	319	4.4E -03	1.038E+03	20	20	1
640						
641	320	4.3E -03	1.038E+03	20	20	1
642						
643	321	4.2E -03	1.038E+03	20	20	1
644						
645	322	4.2E -03	1.038E+03	20	20	1
646						
647	323	4.1E -03	1.038E+03	20	20	1
648						
649	324	4.0E -03	1.038E+03	20	20	1
650						
651	325	3.9E -03	1.038E+03	20	20	1
652						
653	326	3.8E -03	1.038E+03	20	20	1
654						
655	327	3.8E -03	1.038E+03	20	20	1
656						
657	328	3.7E -03	1.038E+03	20	20	1
658						
659	329	3.6E -03	1.038E+03	20	20	1
660						
661	330	3.5E -03	1.038E+03	20	20	1
662						
663	331	3.5E -03	1.038E+03	20	20	1

664						
665	332	3.4E -03	1.038E+03	20	20	1
666						
667	333	3.3E -03	1.038E+03	20	20	1
668						
669	334	3.3E -03	1.038E+03	20	20	1
670						
671	335	3.2E -03	1.038E+03	20	20	1
672						
673	336	3.1E -03	1.038E+03	20	20	1
674						
675	337	3.1E -03	1.038E+03	20	20	1
676						
677	338	3.0E -03	1.038E+03	20	20	1
678						
679	339	3.0E -03	1.038E+03	20	20	1
680						
681	340	2.9E -03	1.038E+03	20	20	1
682						
683	341	2.8E -03	1.038E+03	20	20	1
684						
685	342	2.8E -03	1.038E+03	20	20	1
686						
687	343	2.7E -03	1.038E+03	20	20	1
688						
689	344	2.7E -03	1.038E+03	20	20	1
690						
691	345	2.6E -03	1.038E+03	20	20	1
692						
693	346	2.6E -03	1.038E+03	20	20	1
694						
695	347	2.5E -03	1.038E+03	20	20	1
696						
697	348	2.5E -03	1.038E+03	20	20	1
698						
699	349	2.4E -03	1.038E+03	20	20	1
700						
701	350	2.4E -03	1.038E+03	20	20	1
702						
703	351	2.3E -03	1.038E+03	20	20	1
704						
705	352	2.3E -03	1.038E+03	20	20	1
706						

707	353	2.2E -03	1.038E+03	20	20	1
708						
709	354	2.2E -03	1.038E+03	20	20	1
710						
711	355	2.1E -03	1.038E+03	20	20	1
712						
713	356	2.1E -03	1.038E+03	20	20	1
714						
715	357	2.1E -03	1.038E+03	20	20	1
716						
717	358	2.0E -03	1.038E+03	20	20	1
718						
719	359	2.0E -03	1.038E+03	20	20	1
720						
721	360	1.9E -03	1.038E+03	20	20	1
722						
723	361	1.9E -03	1.038E+03	20	20	1
724						
725	362	1.9E -03	1.038E+03	20	20	1
726						
727	363	1.8E -03	1.038E+03	20	20	1
728						
729	364	1.8E -03	1.038E+03	20	20	1
730						
731	365	1.8E -03	1.038E+03	20	20	1
732						
733	366	1.7E -03	1.038E+03	20	20	1
734						
735	367	1.7E -03	1.038E+03	20	20	1
736						
737	368	1.7E -03	1.038E+03	20	20	1
738						
739	369	1.6E -03	1.038E+03	20	20	1
740						
741	370	1.6E -03	1.038E+03	20	20	1
742						
743	371	1.6E -03	1.038E+03	20	20	1
744						
745	372	1.5E -03	1.038E+03	20	20	1
746						
747	373	1.5E -03	1.038E+03	20	20	1
748						
749	374	1.5E -03	1.038E+03	20	20	1

750						
751	375	1.4E -03	1.038E+03	20	20	1
752						
753	376	1.4E -03	1.038E+03	20	20	1
754						
755	377	1.4E -03	1.038E+03	20	20	1
756						
757	378	1.4E -03	1.038E+03	20	20	1
758						
759	379	1.3E -03	1.038E+03	20	20	1
760						
761	380	1.3E -03	1.038E+03	20	20	1
762						
763	381	1.3E -03	1.038E+03	20	20	1
764						
765	382	1.2E -03	1.038E+03	20	20	1
766						
767	383	1.2E -03	1.038E+03	20	20	1
768						
769	384	1.2E -03	1.038E+03	20	20	1
770						
771	385	1.2E -03	1.038E+03	20	20	1
772						
773	386	1.2E -03	1.038E+03	20	20	1
774						
775	387	1.1E -03	1.038E+03	20	20	1
776						
777	388	1.1E -03	1.038E+03	20	20	1
778						
779	389	1.1E -03	1.038E+03	20	20	1
780						
781	390	1.1E -03	1.038E+03	20	20	1
782						
783	391	1.0E -03	1.038E+03	20	20	1
784						
785	392	1.0E -03	1.038E+03	20	20	1
786						
787	393	1.0E -03	1.038E+03	20	20	1
788						
789	394	9.8E -04	1.038E+03	20	20	1

1	NITER	SOURCE	T (2,62)	TIME(s)	DT(s)	NSTEP
---	-------	--------	----------	---------	-------	-------



2						
3	1	2.7E+00	1.036E+03	40	20	2
4						
5	2	2.7E+00	1.034E+03	40	20	2
6						
7	3	2.6E+00	1.032E+03	40	20	2
8						
9	4	2.6E+00	1.031E+03	40	20	2
10						
11	5	2.5E+00	1.029E+03	40	20	2
12						
13	6	2.5E+00	1.028E+03	40	20	2
14						
15	7	2.4E+00	1.026E+03	40	20	2
16						
17	8	2.4E+00	1.025E+03	40	20	2
18						
19	9	2.3E+00	1.024E+03	40	20	2
20						
21	10	2.3E+00	1.022E+03	40	20	2
22						
23	11	2.2E+00	1.021E+03	40	20	2
24						
25	12	2.2E+00	1.020E+03	40	20	2
26						
27	13	2.1E+00	1.019E+03	40	20	2
28						
29	14	2.1E+00	1.018E+03	40	20	2
30						
31	15	2.1E+00	1.017E+03	40	20	2
32						
33	16	2.0E+00	1.016E+03	40	20	2
34						
35	17	2.0E+00	1.015E+03	40	20	2
36						
37	18	1.9E+00	1.014E+03	40	20	2
38						
39	19	1.9E+00	1.013E+03	40	20	2
40						
41	20	1.9E+00	1.012E+03	40	20	2
42						
43	21	1.8E+00	1.012E+03	40	20	2
44						

45	22	1.8E+00	1.011E+03	40	20	2
46						
47	23	1.7E+00	1.010E+03	40	20	2
48						
49	24	1.7E+00	1.009E+03	40	20	2
50						
51	25	1.7E+00	1.009E+03	40	20	2
52						
53	26	1.6E+00	1.008E+03	40	20	2
54						
55	27	1.6E+00	1.007E+03	40	20	2
56						
57	28	1.6E+00	1.007E+03	40	20	2
58						
59	29	1.5E+00	1.006E+03	40	20	2
60						
61	30	1.5E+00	1.005E+03	40	20	2
62						
63	31	1.5E+00	1.005E+03	40	20	2
64						
65	32	1.4E+00	1.004E+03	40	20	2
66						
67	33	1.4E+00	1.004E+03	40	20	2
68						
69	34	1.4E+00	1.003E+03	40	20	2
70						
71	35	1.4E+00	1.003E+03	40	20	2
72						
73	36	1.3E+00	1.002E+03	40	20	2
74						
75	37	1.3E+00	1.002E+03	40	20	2
76						
77	38	1.3E+00	1.001E+03	40	20	2
78						
79	39	1.3E+00	1.001E+03	40	20	2
80						
81	40	1.2E+00	1.000E+03	40	20	2
82						
83	41	1.2E+00	9.998E+02	40	20	2
84						
85	42	1.2E+00	9.993E+02	40	20	2
86						
87	43	1.2E+00	9.989E+02	40	20	2

88						
89	44	1.1E+00	9.985E+02	40	20	2
90						
91	45	1.1E+00	9.981E+02	40	20	2
92						
93	46	1.1E+00	9.978E+02	40	20	2
94						
95	47	1.1E+00	9.974E+02	40	20	2
96						
97	48	1.0E+00	9.970E+02	40	20	2
98						
99	49	1.0E+00	9.967E+02	40	20	2
100						
101	50	1.0E+00	9.963E+02	40	20	2
102						
103	51	9.8E-01	9.960E+02	40	20	2
104						
105	52	9.6E-01	9.957E+02	40	20	2
106						
107	53	9.4E-01	9.954E+02	40	20	2
108						
109	54	9.2E-01	9.951E+02	40	20	2
110						
111	55	9.0E-01	9.948E+02	40	20	2
112						
113	56	8.8E-01	9.945E+02	40	20	2
114						
115	57	8.7E-01	9.942E+02	40	20	2
116						
117	58	8.5E-01	9.939E+02	40	20	2
118						
119	59	8.3E-01	9.936E+02	40	20	2
120						
121	60	8.2E-01	9.934E+02	40	20	2
122						
123	61	8.0E-01	9.931E+02	40	20	2
124						
125	62	7.8E-01	9.929E+02	40	20	2
126						
127	63	7.7E-01	9.926E+02	40	20	2
128						
129	64	7.5E-01	9.924E+02	40	20	2
130						

131	65	7.4E -01	9.922E+02	40	20	2
132						
133	66	7.2E -01	9.919E+02	40	20	2
134						
135	67	7.1E -01	9.917E+02	40	20	2
136						
137	68	6.9E -01	9.915E+02	40	20	2
138						
139	69	6.8E -01	9.913E+02	40	20	2
140						
141	70	6.7E -01	9.911E+02	40	20	2
142						
143	71	6.5E -01	9.909E+02	40	20	2
144						
145	72	6.4E -01	9.907E+02	40	20	2
146						
147	73	6.3E -01	9.905E+02	40	20	2
148						
149	74	6.1E -01	9.904E+02	40	20	2
150						
151	75	6.0E -01	9.902E+02	40	20	2
152						
153	76	5.9E -01	9.900E+02	40	20	2
154						
155	77	5.8E -01	9.898E+02	40	20	2
156						
157	78	5.7E -01	9.897E+02	40	20	2
158						
159	79	5.5E -01	9.895E+02	40	20	2
160						
161	80	5.4E -01	9.894E+02	40	20	2
162						
163	81	5.3E -01	9.892E+02	40	20	2
164						
165	82	5.2E -01	9.891E+02	40	20	2
166						
167	83	5.1E -01	9.889E+02	40	20	2
168						
169	84	5.0E -01	9.888E+02	40	20	2
170						
171	85	4.9E -01	9.886E+02	40	20	2
172						
173	86	4.8E -01	9.885E+02	40	20	2

174						
175	87	4.7E -01	9.884E+02	40	20	2
176						
177	88	4.6E -01	9.882E+02	40	20	2
178						
179	89	4.5E -01	9.881E+02	40	20	2
180						
181	90	4.4E -01	9.880E+02	40	20	2
182						
183	91	4.3E -01	9.879E+02	40	20	2
184						
185	92	4.3E -01	9.878E+02	40	20	2
186						
187	93	4.2E -01	9.877E+02	40	20	2
188						
189	94	4.1E -01	9.875E+02	40	20	2
190						
191	95	4.0E -01	9.874E+02	40	20	2
192						
193	96	3.9E -01	9.873E+02	40	20	2
194						
195	97	3.8E -01	9.872E+02	40	20	2
196						
197	98	3.8E -01	9.871E+02	40	20	2
198						
199	99	3.7E -01	9.870E+02	40	20	2
200						
201	100	3.6E -01	9.869E+02	40	20	2
202						
203	101	3.5E -01	9.868E+02	40	20	2
204						
205	102	3.5E -01	9.868E+02	40	20	2
206						
207	103	3.4E -01	9.867E+02	40	20	2
208						
209	104	3.3E -01	9.866E+02	40	20	2
210						
211	105	3.3E -01	9.865E+02	40	20	2
212						
213	106	3.2E -01	9.864E+02	40	20	2
214						
215	107	3.1E -01	9.863E+02	40	20	2
216						

217	108	3.1E -01	9.863E+02	40	20	2
218						
219	109	3.0E -01	9.862E+02	40	20	2
220						
221	110	3.0E -01	9.861E+02	40	20	2
222						
223	111	2.9E -01	9.860E+02	40	20	2
224						
225	112	2.8E -01	9.860E+02	40	20	2
226						
227	113	2.8E -01	9.859E+02	40	20	2
228						
229	114	2.7E -01	9.858E+02	40	20	2
230						
231	115	2.7E -01	9.858E+02	40	20	2
232						
233	116	2.6E -01	9.857E+02	40	20	2
234						
235	117	2.6E -01	9.856E+02	40	20	2
236						
237	118	2.5E -01	9.856E+02	40	20	2
238						
239	119	2.5E -01	9.855E+02	40	20	2
240						
241	120	2.4E -01	9.854E+02	40	20	2
242						
243	121	2.4E -01	9.854E+02	40	20	2
244						
245	122	2.3E -01	9.853E+02	40	20	2
246						
247	123	2.3E -01	9.853E+02	40	20	2
248						
249	124	2.2E -01	9.852E+02	40	20	2
250						
251	125	2.2E -01	9.852E+02	40	20	2
252						
253	126	2.1E -01	9.851E+02	40	20	2
254						
255	127	2.1E -01	9.851E+02	40	20	2
256						
257	128	2.1E -01	9.850E+02	40	20	2
258						
259	129	2.0E -01	9.850E+02	40	20	2

260						
261	130	2.0E -01	9.849E+02	40	20	2
262						
263	131	1.9E -01	9.849E+02	40	20	2
264						
265	132	1.9E -01	9.848E+02	40	20	2
266						
267	133	1.9E -01	9.848E+02	40	20	2
268						
269	134	1.8E -01	9.847E+02	40	20	2
270						
271	135	1.8E -01	9.847E+02	40	20	2
272						
273	136	1.7E -01	9.847E+02	40	20	2
274						
275	137	1.7E -01	9.846E+02	40	20	2
276						
277	138	1.7E -01	9.846E+02	40	20	2
278						
279	139	1.6E -01	9.846E+02	40	20	2
280						
281	140	1.6E -01	9.845E+02	40	20	2
282						
283	141	1.6E -01	9.845E+02	40	20	2
284						
285	142	1.5E -01	9.844E+02	40	20	2
286						
287	143	1.5E -01	9.844E+02	40	20	2
288						
289	144	1.5E -01	9.844E+02	40	20	2
290						
291	145	1.5E -01	9.843E+02	40	20	2
292						
293	146	1.4E -01	9.843E+02	40	20	2
294						
295	147	1.4E -01	9.843E+02	40	20	2
296						
297	148	1.4E -01	9.842E+02	40	20	2
298						
299	149	1.3E -01	9.842E+02	40	20	2
300						
301	150	1.3E -01	9.842E+02	40	20	2
302						

303	151	1.3E -01	9.842E+02	40	20	2
304						
305	152	1.3E -01	9.841E+02	40	20	2
306						
307	153	1.2E -01	9.841E+02	40	20	2
308						
309	154	1.2E -01	9.841E+02	40	20	2
310						
311	155	1.2E -01	9.841E+02	40	20	2
312						
313	156	1.2E -01	9.840E+02	40	20	2
314						
315	157	1.1E -01	9.840E+02	40	20	2
316						
317	158	1.1E -01	9.840E+02	40	20	2
318						
319	159	1.1E -01	9.840E+02	40	20	2
320						
321	160	1.1E -01	9.839E+02	40	20	2
322						
323	161	1.1E -01	9.839E+02	40	20	2
324						
325	162	1.0E -01	9.839E+02	40	20	2
326						
327	163	1.0E -01	9.839E+02	40	20	2
328						
329	164	1.0E -01	9.838E+02	40	20	2
330						
331	165	9.8E -02	9.838E+02	40	20	2
332						
333	166	9.6E -02	9.838E+02	40	20	2
334						
335	167	9.4E -02	9.838E+02	40	20	2
336						
337	168	9.2E -02	9.838E+02	40	20	2
338						
339	169	9.0E -02	9.837E+02	40	20	2
340						
341	170	8.8E -02	9.837E+02	40	20	2
342						
343	171	8.6E -02	9.837E+02	40	20	2
344						
345	172	8.5E -02	9.837E+02	40	20	2



346						
347	173	8.3E -02	9.837E+02	40	20	2
348						
349	174	8.1E -02	9.837E+02	40	20	2
350						
351	175	8.0E -02	9.836E+02	40	20	2
352						
353	176	7.8E -02	9.836E+02	40	20	2
354						
355	177	7.7E -02	9.836E+02	40	20	2
356						
357	178	7.5E -02	9.836E+02	40	20	2
358						
359	179	7.4E -02	9.836E+02	40	20	2
360						
361	180	7.2E -02	9.836E+02	40	20	2
362						
363	181	7.1E -02	9.835E+02	40	20	2
364						
365	182	6.9E -02	9.835E+02	40	20	2
366						
367	183	6.8E -02	9.835E+02	40	20	2
368						
369	184	6.7E -02	9.835E+02	40	20	2
370						
371	185	6.5E -02	9.835E+02	40	20	2
372						
373	186	6.4E -02	9.835E+02	40	20	2
374						
375	187	6.3E -02	9.835E+02	40	20	2
376						
377	188	6.1E -02	9.834E+02	40	20	2
378						
379	189	6.0E -02	9.834E+02	40	20	2
380						
381	190	5.9E -02	9.834E+02	40	20	2
382						
383	191	5.8E -02	9.834E+02	40	20	2
384						
385	192	5.7E -02	9.834E+02	40	20	2
386						
387	193	5.6E -02	9.834E+02	40	20	2
388						

389	194	5.4E -02	9.834E+02	40	20	2
390						
391	195	5.3E -02	9.834E+02	40	20	2
392						
393	196	5.2E -02	9.834E+02	40	20	2
394						
395	197	5.1E -02	9.833E+02	40	20	2
396						
397	198	5.0E -02	9.833E+02	40	20	2
398						
399	199	4.9E -02	9.833E+02	40	20	2
400						
401	200	4.8E -02	9.833E+02	40	20	2
402						
403	201	4.7E -02	9.833E+02	40	20	2
404						
405	202	4.6E -02	9.833E+02	40	20	2
406						
407	203	4.5E -02	9.833E+02	40	20	2
408						
409	204	4.5E -02	9.833E+02	40	20	2
410						
411	205	4.4E -02	9.833E+02	40	20	2
412						
413	206	4.3E -02	9.833E+02	40	20	2
414						
415	207	4.2E -02	9.833E+02	40	20	2
416						
417	208	4.1E -02	9.832E+02	40	20	2
418						
419	209	4.0E -02	9.832E+02	40	20	2
420						
421	210	3.9E -02	9.832E+02	40	20	2
422						
423	211	3.9E -02	9.832E+02	40	20	2
424						
425	212	3.8E -02	9.832E+02	40	20	2
426						
427	213	3.7E -02	9.832E+02	40	20	2
428						
429	214	3.6E -02	9.832E+02	40	20	2
430						
431	215	3.6E -02	9.832E+02	40	20	2

432						
433	216	3.5E -02	9.832E+02	40	20	2
434						
435	217	3.4E -02	9.832E+02	40	20	2
436						
437	218	3.4E -02	9.832E+02	40	20	2
438						
439	219	3.3E -02	9.832E+02	40	20	2
440						
441	220	3.2E -02	9.832E+02	40	20	2
442						
443	221	3.2E -02	9.832E+02	40	20	2
444						
445	222	3.1E -02	9.832E+02	40	20	2
446						
447	223	3.0E -02	9.831E+02	40	20	2
448						
449	224	3.0E -02	9.831E+02	40	20	2
450						
451	225	2.9E -02	9.831E+02	40	20	2
452						
453	226	2.9E -02	9.831E+02	40	20	2
454						
455	227	2.8E -02	9.831E+02	40	20	2
456						
457	228	2.8E -02	9.831E+02	40	20	2
458						
459	229	2.7E -02	9.831E+02	40	20	2
460						
461	230	2.6E -02	9.831E+02	40	20	2
462						
463	231	2.6E -02	9.831E+02	40	20	2
464						
465	232	2.5E -02	9.831E+02	40	20	2
466						
467	233	2.5E -02	9.831E+02	40	20	2
468						
469	234	2.4E -02	9.831E+02	40	20	2
470						
471	235	2.4E -02	9.831E+02	40	20	2
472						
473	236	2.3E -02	9.831E+02	40	20	2
474						

475	237	2.3E -02	9.831E+02	40	20	2
476						
477	238	2.3E -02	9.831E+02	40	20	2
478						
479	239	2.2E -02	9.831E+02	40	20	2
480						
481	240	2.2E -02	9.831E+02	40	20	2
482						
483	241	2.1E -02	9.831E+02	40	20	2
484						
485	242	2.1E -02	9.831E+02	40	20	2
486						
487	243	2.0E -02	9.831E+02	40	20	2
488						
489	244	2.0E -02	9.830E+02	40	20	2
490						
491	245	2.0E -02	9.830E+02	40	20	2
492						
493	246	1.9E -02	9.830E+02	40	20	2
494						
495	247	1.9E -02	9.830E+02	40	20	2
496						
497	248	1.8E -02	9.830E+02	40	20	2
498						
499	249	1.8E -02	9.830E+02	40	20	2
500						
501	250	1.8E -02	9.830E+02	40	20	2
502						
503	251	1.7E -02	9.830E+02	40	20	2
504						
505	252	1.7E -02	9.830E+02	40	20	2
506						
507	253	1.7E -02	9.830E+02	40	20	2
508						
509	254	1.6E -02	9.830E+02	40	20	2
510						
511	255	1.6E -02	9.830E+02	40	20	2
512						
513	256	1.6E -02	9.830E+02	40	20	2
514						
515	257	1.5E -02	9.830E+02	40	20	2
516						
517	258	1.5E -02	9.830E+02	40	20	2

518						
519	259	1.5E -02	9.830E+02	40	20	2
520						
521	260	1.4E -02	9.830E+02	40	20	2
522						
523	261	1.4E -02	9.830E+02	40	20	2
524						
525	262	1.4E -02	9.830E+02	40	20	2
526						
527	263	1.4E -02	9.830E+02	40	20	2
528						
529	264	1.3E -02	9.830E+02	40	20	2
530						
531	265	1.3E -02	9.830E+02	40	20	2
532						
533	266	1.3E -02	9.830E+02	40	20	2
534						
535	267	1.3E -02	9.830E+02	40	20	2
536						
537	268	1.2E -02	9.830E+02	40	20	2
538						
539	269	1.2E -02	9.830E+02	40	20	2
540						
541	270	1.2E -02	9.830E+02	40	20	2
542						
543	271	1.2E -02	9.830E+02	40	20	2
544						
545	272	1.1E -02	9.830E+02	40	20	2
546						
547	273	1.1E -02	9.830E+02	40	20	2
548						
549	274	1.1E -02	9.830E+02	40	20	2
550						
551	275	1.1E -02	9.830E+02	40	20	2
552						
553	276	1.1E -02	9.830E+02	40	20	2
554						
555	277	1.0E -02	9.830E+02	40	20	2
556						
557	278	1.0E -02	9.830E+02	40	20	2
558						
559	279	9.9E -03	9.830E+02	40	20	2
560						

561	280	9.7E -03	9.830E+02	40	20	2
562						
563	281	9.5E -03	9.830E+02	40	20	2
564						
565	282	9.3E -03	9.830E+02	40	20	2
566						
567	283	9.1E -03	9.829E+02	40	20	2
568						
569	284	9.0E -03	9.829E+02	40	20	2
570						
571	285	8.8E -03	9.829E+02	40	20	2
572						
573	286	8.6E -03	9.829E+02	40	20	2
574						
575	287	8.4E -03	9.829E+02	40	20	2
576						
577	288	8.3E -03	9.829E+02	40	20	2
578						
579	289	8.1E -03	9.829E+02	40	20	2
580						
581	290	7.9E -03	9.829E+02	40	20	2
582						
583	291	7.8E -03	9.829E+02	40	20	2
584						
585	292	7.6E -03	9.829E+02	40	20	2
586						
587	293	7.5E -03	9.829E+02	40	20	2
588						
589	294	7.3E -03	9.829E+02	40	20	2
590						
591	295	7.2E -03	9.829E+02	40	20	2
592						
593	296	7.0E -03	9.829E+02	40	20	2
594						
595	297	6.9E -03	9.829E+02	40	20	2
596						
597	298	6.8E -03	9.829E+02	40	20	2
598						
599	299	6.6E -03	9.829E+02	40	20	2
600						
601	300	6.5E -03	9.829E+02	40	20	2
602						
603	301	6.4E -03	9.829E+02	40	20	2

604						
605	302	6.2E -03	9.829E+02	40	20	2
606						
607	303	6.1E -03	9.829E+02	40	20	2
608						
609	304	6.0E -03	9.829E+02	40	20	2
610						
611	305	5.9E -03	9.829E+02	40	20	2
612						
613	306	5.8E -03	9.829E+02	40	20	2
614						
615	307	5.6E -03	9.829E+02	40	20	2
616						
617	308	5.5E -03	9.829E+02	40	20	2
618						
619	309	5.4E -03	9.829E+02	40	20	2
620						
621	310	5.3E -03	9.829E+02	40	20	2
622						
623	311	5.2E -03	9.829E+02	40	20	2
624						
625	312	5.1E -03	9.829E+02	40	20	2
626						
627	313	5.0E -03	9.829E+02	40	20	2
628						
629	314	4.9E -03	9.829E+02	40	20	2
630						
631	315	4.8E -03	9.829E+02	40	20	2
632						
633	316	4.7E -03	9.829E+02	40	20	2
634						
635	317	4.6E -03	9.829E+02	40	20	2
636						
637	318	4.5E -03	9.829E+02	40	20	2
638						
639	319	4.4E -03	9.829E+02	40	20	2
640						
641	320	4.4E -03	9.829E+02	40	20	2
642						
643	321	4.3E -03	9.829E+02	40	20	2
644						
645	322	4.2E -03	9.829E+02	40	20	2
646						

647	323	4.1E -03	9.829E+02	40	20	2
648						
649	324	4.0E -03	9.829E+02	40	20	2
650						
651	325	3.9E -03	9.829E+02	40	20	2
652						
653	326	3.9E -03	9.829E+02	40	20	2
654						
655	327	3.8E -03	9.829E+02	40	20	2
656						
657	328	3.7E -03	9.829E+02	40	20	2
658						
659	329	3.6E -03	9.829E+02	40	20	2
660						
661	330	3.6E -03	9.829E+02	40	20	2
662						
663	331	3.5E -03	9.829E+02	40	20	2
664						
665	332	3.4E -03	9.829E+02	40	20	2
666						
667	333	3.4E -03	9.829E+02	40	20	2
668						
669	334	3.3E -03	9.829E+02	40	20	2
670						
671	335	3.2E -03	9.829E+02	40	20	2
672						
673	336	3.2E -03	9.829E+02	40	20	2
674						
675	337	3.1E -03	9.829E+02	40	20	2
676						
677	338	3.0E -03	9.829E+02	40	20	2
678						
679	339	3.0E -03	9.829E+02	40	20	2
680						
681	340	2.9E -03	9.829E+02	40	20	2
682						
683	341	2.9E -03	9.829E+02	40	20	2
684						
685	342	2.8E -03	9.829E+02	40	20	2
686						
687	343	2.7E -03	9.829E+02	40	20	2
688						
689	344	2.7E -03	9.829E+02	40	20	2



690						
691	345	2.6E -03	9.829E+02	40	20	2
692						
693	346	2.6E -03	9.829E+02	40	20	2
694						
695	347	2.5E -03	9.829E+02	40	20	2
696						
697	348	2.5E -03	9.829E+02	40	20	2
698						
699	349	2.4E -03	9.829E+02	40	20	2
700						
701	350	2.4E -03	9.829E+02	40	20	2
702						
703	351	2.3E -03	9.829E+02	40	20	2
704						
705	352	2.3E -03	9.829E+02	40	20	2
706						
707	353	2.2E -03	9.829E+02	40	20	2
708						
709	354	2.2E -03	9.829E+02	40	20	2
710						
711	355	2.2E -03	9.829E+02	40	20	2
712						
713	356	2.1E -03	9.829E+02	40	20	2
714						
715	357	2.1E -03	9.829E+02	40	20	2
716						
717	358	2.0E -03	9.829E+02	40	20	2
718						
719	359	2.0E -03	9.829E+02	40	20	2
720						
721	360	2.0E -03	9.829E+02	40	20	2
722						
723	361	1.9E -03	9.829E+02	40	20	2
724						
725	362	1.9E -03	9.829E+02	40	20	2
726						
727	363	1.8E -03	9.829E+02	40	20	2
728						
729	364	1.8E -03	9.829E+02	40	20	2
730						
731	365	1.8E -03	9.829E+02	40	20	2
732						

733	366	1.7E -03	9.829E+02	40	20	2
734						
735	367	1.7E -03	9.829E+02	40	20	2
736						
737	368	1.7E -03	9.829E+02	40	20	2
738						
739	369	1.6E -03	9.829E+02	40	20	2
740						
741	370	1.6E -03	9.829E+02	40	20	2
742						
743	371	1.6E -03	9.829E+02	40	20	2
744						
745	372	1.5E -03	9.829E+02	40	20	2
746						
747	373	1.5E -03	9.829E+02	40	20	2
748						
749	374	1.5E -03	9.829E+02	40	20	2
750						
751	375	1.4E -03	9.829E+02	40	20	2
752						
753	376	1.4E -03	9.829E+02	40	20	2
754						
755	377	1.4E -03	9.829E+02	40	20	2
756						
757	378	1.4E -03	9.829E+02	40	20	2
758						
759	379	1.3E -03	9.829E+02	40	20	2
760						
761	380	1.3E -03	9.829E+02	40	20	2
762						
763	381	1.3E -03	9.829E+02	40	20	2
764						
765	382	1.3E -03	9.829E+02	40	20	2
766						
767	383	1.2E -03	9.829E+02	40	20	2
768						
769	384	1.2E -03	9.829E+02	40	20	2
770						
771	385	1.2E -03	9.829E+02	40	20	2
772						
773	386	1.2E -03	9.829E+02	40	20	2
774						
775	387	1.1E -03	9.829E+02	40	20	2

776						
777	388	1.1E -03	9.829E+02	40	20	2
778						
779	389	1.1E -03	9.829E+02	40	20	2
780						
781	390	1.1E -03	9.829E+02	40	20	2
782						
783	391	1.0E -03	9.829E+02	40	20	2
784						
785	392	1.0E -03	9.829E+02	40	20	2
786						
787	393	1.0E -03	9.829E+02	40	20	2
788						
789	394	9.9E -04	9.829E+02	40	20	2

1	NITER	SOURCE	T (2,62)	TIME(s)	DT(s)	NSTEP
2						
3	1	1.2E -02	2.414E+01	6000	20	300
4						
5	2	1.2E -02	2.413E+01	6000	20	300
6						
7	3	1.2E -02	2.413E+01	6000	20	300
8						
9	4	1.1E -02	2.413E+01	6000	20	300
10						
11	5	1.1E -02	2.413E+01	6000	20	300
12						
13	6	1.1E -02	2.413E+01	6000	20	300
14						
15	7	1.1E -02	2.413E+01	6000	20	300
16						
17	8	1.1E -02	2.413E+01	6000	20	300
18						
19	9	1.0E -02	2.413E+01	6000	20	300
20						
21	10	1.0E -02	2.412E+01	6000	20	300
22						
23	11	1.0E -02	2.412E+01	6000	20	300
24						
25	12	9.8E -03	2.412E+01	6000	20	300
26						
27	13	9.6E -03	2.412E+01	6000	20	300

28						
29	14	9.4E -03	2.412E+01	6000	20	300
30						
31	15	9.2E -03	2.412E+01	6000	20	300
32						
33	16	9.0E -03	2.412E+01	6000	20	300
34						
35	17	8.9E -03	2.412E+01	6000	20	300
36						
37	18	8.7E -03	2.412E+01	6000	20	300
38						
39	19	8.5E -03	2.411E+01	6000	20	300
40						
41	20	8.3E -03	2.411E+01	6000	20	300
42						
43	21	8.2E -03	2.411E+01	6000	20	300
44						
45	22	8.0E -03	2.411E+01	6000	20	300
46						
47	23	7.9E -03	2.411E+01	6000	20	300
48						
49	24	7.7E -03	2.411E+01	6000	20	300
50						
51	25	7.6E -03	2.411E+01	6000	20	300
52						
53	26	7.4E -03	2.411E+01	6000	20	300
54						
55	27	7.3E -03	2.411E+01	6000	20	300
56						
57	28	7.1E -03	2.411E+01	6000	20	300
58						
59	29	7.0E -03	2.410E+01	6000	20	300
60						
61	30	6.8E -03	2.410E+01	6000	20	300
62						
63	31	6.7E -03	2.410E+01	6000	20	300
64						
65	32	6.6E -03	2.410E+01	6000	20	300
66						
67	33	6.4E -03	2.410E+01	6000	20	300
68						
69	34	6.3E -03	2.410E+01	6000	20	300
70						

71	35	6.2E -03	2.410E+01	6000	20	300
72						
73	36	6.1E -03	2.410E+01	6000	20	300
74						
75	37	5.9E -03	2.410E+01	6000	20	300
76						
77	38	5.8E -03	2.410E+01	6000	20	300
78						
79	39	5.7E -03	2.410E+01	6000	20	300
80						
81	40	5.6E -03	2.410E+01	6000	20	300
82						
83	41	5.5E -03	2.410E+01	6000	20	300
84						
85	42	5.4E -03	2.410E+01	6000	20	300
86						
87	43	5.3E -03	2.409E+01	6000	20	300
88						
89	44	5.2E -03	2.409E+01	6000	20	300
90						
91	45	5.1E -03	2.409E+01	6000	20	300
92						
93	46	5.0E -03	2.409E+01	6000	20	300
94						
95	47	4.9E -03	2.409E+01	6000	20	300
96						
97	48	4.8E -03	2.409E+01	6000	20	300
98						
99	49	4.7E -03	2.409E+01	6000	20	300
100						
101	50	4.6E -03	2.409E+01	6000	20	300
102						
103	51	4.5E -03	2.409E+01	6000	20	300
104						
105	52	4.4E -03	2.409E+01	6000	20	300
106						
107	53	4.3E -03	2.409E+01	6000	20	300
108						
109	54	4.2E -03	2.409E+01	6000	20	300
110						
111	55	4.1E -03	2.409E+01	6000	20	300
112						
113	56	4.1E -03	2.409E+01	6000	20	300

114						
115	57	4.0E -03	2.409E+01	6000	20	300
116						
117	58	3.9E -03	2.409E+01	6000	20	300
118						
119	59	3.8E -03	2.409E+01	6000	20	300
120						
121	60	3.8E -03	2.409E+01	6000	20	300
122						
123	61	3.7E -03	2.408E+01	6000	20	300
124						
125	62	3.6E -03	2.408E+01	6000	20	300
126						
127	63	3.5E -03	2.408E+01	6000	20	300
128						
129	64	3.5E -03	2.408E+01	6000	20	300
130						
131	65	3.4E -03	2.408E+01	6000	20	300
132						
133	66	3.3E -03	2.408E+01	6000	20	300
134						
135	67	3.3E -03	2.408E+01	6000	20	300
136						
137	68	3.2E -03	2.408E+01	6000	20	300
138						
139	69	3.1E -03	2.408E+01	6000	20	300
140						
141	70	3.1E -03	2.408E+01	6000	20	300
142						
143	71	3.0E -03	2.408E+01	6000	20	300
144						
145	72	3.0E -03	2.408E+01	6000	20	300
146						
147	73	2.9E -03	2.408E+01	6000	20	300
148						
149	74	2.8E -03	2.408E+01	6000	20	300
150						
151	75	2.8E -03	2.408E+01	6000	20	300
152						
153	76	2.7E -03	2.408E+01	6000	20	300
154						
155	77	2.7E -03	2.408E+01	6000	20	300
156						

157	78	2.6E -03	2.408E+01	6000	20	300
158						
159	79	2.6E -03	2.408E+01	6000	20	300
160						
161	80	2.5E -03	2.408E+01	6000	20	300
162						
163	81	2.5E -03	2.408E+01	6000	20	300
164						
165	82	2.4E -03	2.408E+01	6000	20	300
166						
167	83	2.4E -03	2.408E+01	6000	20	300
168						
169	84	2.3E -03	2.408E+01	6000	20	300
170						
171	85	2.3E -03	2.408E+01	6000	20	300
172						
173	86	2.2E -03	2.408E+01	6000	20	300
174						
175	87	2.2E -03	2.408E+01	6000	20	300
176						
177	88	2.1E -03	2.408E+01	6000	20	300
178						
179	89	2.1E -03	2.408E+01	6000	20	300
180						
181	90	2.1E -03	2.408E+01	6000	20	300
182						
183	91	2.0E -03	2.407E+01	6000	20	300
184						
185	92	2.0E -03	2.407E+01	6000	20	300
186						
187	93	1.9E -03	2.407E+01	6000	20	300
188						
189	94	1.9E -03	2.407E+01	6000	20	300
190						
191	95	1.9E -03	2.407E+01	6000	20	300
192						
193	96	1.8E -03	2.407E+01	6000	20	300
194						
195	97	1.8E -03	2.407E+01	6000	20	300
196						
197	98	1.8E -03	2.407E+01	6000	20	300
198						
199	99	1.7E -03	2.407E+01	6000	20	300

200						
201	100	1.7E -03	2.407E+01	6000	20	300
202						
203	101	1.7E -03	2.407E+01	6000	20	300
204						
205	102	1.6E -03	2.407E+01	6000	20	300
206						
207	103	1.6E -03	2.407E+01	6000	20	300
208						
209	104	1.6E -03	2.407E+01	6000	20	300
210						
211	105	1.5E -03	2.407E+01	6000	20	300
212						
213	106	1.5E -03	2.407E+01	6000	20	300
214						
215	107	1.5E -03	2.407E+01	6000	20	300
216						
217	108	1.4E -03	2.407E+01	6000	20	300
218						
219	109	1.4E -03	2.407E+01	6000	20	300
220						
221	110	1.4E -03	2.407E+01	6000	20	300
222						
223	111	1.4E -03	2.407E+01	6000	20	300
224						
225	112	1.3E -03	2.407E+01	6000	20	300
226						
227	113	1.3E -03	2.407E+01	6000	20	300
228						
229	114	1.3E -03	2.407E+01	6000	20	300
230						
231	115	1.3E -03	2.407E+01	6000	20	300
232						
233	116	1.2E -03	2.407E+01	6000	20	300
234						
235	117	1.2E -03	2.407E+01	6000	20	300
236						
237	118	1.2E -03	2.407E+01	6000	20	300
238						
239	119	1.2E -03	2.407E+01	6000	20	300
240						
241	120	1.1E -03	2.407E+01	6000	20	300
242						



243	121	1.1E -03	2.407E+01	6000	20	300
244						
245	122	1.1E -03	2.407E+01	6000	20	300
246						
247	123	1.1E -03	2.407E+01	6000	20	300
248						
249	124	1.0E -03	2.407E+01	6000	20	300
250						
251	125	1.0E -03	2.407E+01	6000	20	300
252						
253	126	1.0E -03	2.407E+01	6000	20	300
254						
255	127	9.8E -04	2.407E+01	6000	20	300