



CARLA CRISTINA MORATORI

**TRANSFERÊNCIA DE CALOR  
NA ZONA DE AQUECIMENTO  
DE UM LEITO MÓVEL DE XISTO**

**CAMPINAS  
2014**



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA  
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: ENGENHARIA QUÍMICA**

**CARLA CRISTINA MORATORI**

**“TRANSFERÊNCIA DE CALOR  
NA ZONA DE AQUECIMENTO DE  
UM LEITO MÓVEL DE XISTO”**

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Química da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Antonio Carlos Luz Lisbôa

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELA ALUNA CARLA CRISTINA MORATORI E APROVADA PELA BANCA EXAMINADORA EM 10 DE JULHO DE 2014.



---

Prof. Antonio Carlos Luz Lisbôa - Orientador

**CAMPINAS  
2014**

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura  
Elizangela Aparecida dos Santos Souza - CRB 8/8098

M797t Moratori, Carla Cristina, 1985-  
Transferência de calor na zona de aquecimento de um leito móvel de xisto /  
Carla Cristina Moratori. – Campinas, SP : [s.n.], 2014.

Orientador: Antonio Carlos Luz Lisbôa.  
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de  
Engenharia Química.

1. Xisto. 2. Transferência de calor. 3. Modelagem de processos. 4. Pirólise. I.  
Lisbôa, Antônio Carlos Luz, 1954-. II. Universidade Estadual de Campinas.  
Faculdade de Engenharia Química. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

**Título em outro idioma:** Heat transfer on the heating zone of an oil shale moving bed

**Palavras-chave em inglês:**

Shale

Heat transfer

Process modelling

Pyrolysis

**Área de concentração:** Engenharia Química

**Titulação:** Mestre em Engenharia Química

**Banca examinadora:**

Antonio Carlos Luz Lisbôa [Orientador]

José Vicente Hallak D'Angelo

Márcio Luiz de Souza-Santos

**Data de defesa:** 10-07-2014

**Programa de Pós-Graduação:** Engenharia Química

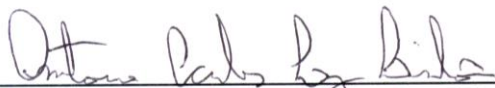
**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA  
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: ENGENHARIA QUÍMICA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Transferência de calor na  
zona de aquecimento de um  
leito móvel de xisto**

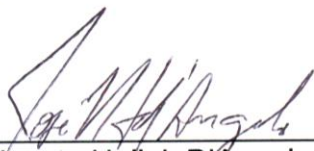
Autora: Carla Cristina Moratori  
Orientador: Prof. Antonio Carlos Luz Lisbôa

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta dissertação:



---

Prof. Dr. Antonio Carlos Luz Lisbôa, Presidente  
FEQ - UNICAMP



---

Prof. Dr. José Vicente Hallak D'Angelo  
FEQ - UNICAMP



---

Prof. Dr. Márcio Luiz de Souza-Santos  
FEM - UNICAMP

---

Campinas, 10 de julho de 2014.



## RESUMO

O xisto é uma rocha compacta de origem sedimentar, formada por componentes orgânicos complexos distribuídos numa matriz mineral. A matéria orgânica, chamada querogênio, é liberada sob aquecimento em temperaturas acima de 350 °C em reatores conhecidos como retortas, como óleo e gás. Este óleo quando refinado produz destilados com as mesmas características encontradas nos de petróleo, sendo considerado uma fonte de energia alternativa. A energia contida no xisto é, em termos mundiais, maior que a contida no carvão e muito maior que a contida nas reservas de petróleo convencional. Grande parte do carbono orgânico existente na Terra está presente sob a forma de combustíveis fósseis e a maior parte destes encontra-se no xisto. Para o projeto dos reatores de leito móvel para pirólise é necessário o conhecimento de várias etapas, inclusive sobre os balanços térmicos entre as partículas de xisto e a corrente gasosa. Estas trocas de calor podem ser avaliadas por modelos matemáticos e solucionadas por métodos numéricos. São estudados diferentes modelos – temperatura ambiente fixa, partícula sem gradiente térmico e partícula com gradiente térmico, ambas dentro da retorta - buscando aproximar à situação vivenciada na realidade do processo onde as partículas de xisto apresentam heterogeneidade na temperatura em seu interior devido ao seu tamanho e a troca realizada com o gás. Para complementar o estudo, é feita uma análise de sensibilidade paramétrica - calor específico do xisto e do gás, condutividade térmica e o coeficiente de transferência de calor – para os diferentes modelos construídos.

*Palavras-chave:* xisto, transferência de calor, modelagem de processo, pirólise.





## **ABSTRACT**

Oil shale is a sedimentary rock, made up of organic material scattered throughout a mineral matrix. The organic matter, named kerogen, is released under heating at temperatures above 350 °C, producing, upon condensation, oil and gas. The oil may be refined to produce similar derivatives to petroleum ones, therefore constituting an alternative energy source. Oil shale is by far the most abundant source of energy worldwide, more than coal, oil sand and petroleum. A large amount of organic carbon on Earth is locked in fossil fuels and most of it into oil shale reserves. The erection of oil shale processing facilities requires the design of retorts that house moving beds in which heat and mass are transferred between gaseous streams and shale. These exchanges may be calculated by heat and mass transfer balances, solved usually by numerical methods. This study analyzes the heat transfer between the gas stream and shale under various circumstances concerning the gas temperature and shale temperature, such as the development of a temperature gradient within the largest shale particles. It also carries out a parametric sensitivity analysis to investigate the effect of some parameters that affect the heat transfer, such as shale and gas specific heats, shale thermal conductivity and heat transfer coefficient.

*Key-words:* shale, heat transfer, process modelling, pyrolysis.



# SUMÁRIO

<b>RESUMO .....</b>	<b>VII</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>IX</b>
<b>AGRADECIMENTOS.....</b>	<b>XV</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>XIX</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>XXIII</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS.....</b>	<b>XXV</b>
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>5</b>
2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	5
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>7</b>
3.1. XISTO .....	7
3.1.1. Reservas.....	8
3.1.2. Propriedades Químicas .....	9
3.1.3. Diferença entre óleo de xisto e petróleo .....	14
3.1.4. Formas de transformação do betume.....	14
3.2. INDÚSTRIA DO XISTO - HISTÓRICO .....	15
3.3. UNIDADE DE NEGÓCIOS DA INDUSTRIALIZAÇÃO DE XISTO (SIX) .....	17
3.3.1. Mineração .....	18
3.3.2. Processo Petrosix .....	20
3.3.3. Derivados do Xisto .....	22
3.3.4. Pesquisa e desenvolvimento .....	23
3.4. DESVOLATILIZAÇÃO DO XISTO .....	24
3.5. COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	26
<b>4. METODOLOGIA E MODELAGEM MATEMÁTICA.....</b>	<b>27</b>
4.1. MÉTODO NUMÉRICO .....	28
4.1.1. Método das Linhas.....	28
4.1.2. Método de Runge-Kutta-Fehlberg .....	29
4.1.3. Método de Zero da Função .....	30
4.2. DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS .....	31
4.2.1. Calor Específico - $c_p$ .....	32
4.2.2. Condutividade Térmica - $k$ .....	33
4.2.3. Coeficiente de Transferência de Calor - $h$ .....	33
4.2.4. Razão entre Área Superficial das Partículas e Volume do Leito - $a$ .....	35
4.2.5. Dimensões das partículas .....	37
4.3. BALANÇO DE ENERGIA.....	39
4.3.1. Balanço Térmico Global .....	39
4.3.2. Balanço Térmico na Partícula.....	42
4.3.3. Balanço Térmico na Retorta – Temperatura Homogênea nas Partículas.....	43
4.3.4. Balanço Térmico na Retorta – Temperatura Heterogênea nas Partículas .....	44
<b>5. RESULTADOS .....</b>	<b>47</b>
5.1. BALANÇO TÉRMICO GLOBAL NA RETORTA .....	47
5.2. BALANÇO TÉRMICO NA PARTÍCULA .....	47

5.2.1. Efeito da dimensão das partículas de xisto .....	48
5.2.2. Efeito do coeficiente de transferência de calor – $h$ .....	51
5.2.3. Efeito da condutividade térmica do xisto – $k$ .....	53
5.3. BALANÇO TÉRMICO NA RETORTA – TEMPERATURA HOMOGÊNEA NAS PARTÍCULAS.....	56
5.3.1. Efeito da dimensão das partículas de xisto .....	57
5.3.2. Efeito do coeficiente de transferência de calor – $h$ .....	58
5.3.3. Efeito do calor específico do xisto - $c_x$ .....	59
5.3.4. Efeito do calor específico do gás – $c_g$ .....	60
5.4. BALANÇO TÉRMICO NA RETORTA – TEMPERATURA HETEROGÊNEA NAS PARTÍCULAS.....	61
5.4.1. Efeito da dimensão das partículas de xisto .....	63
5.4.2. Efeito do coeficiente de transferência de calor – $h$ .....	68
5.4.3. Efeito da condutividade térmica do xisto – $k$ .....	70
5.4.4. Efeito do calor específico do xisto - $c_x$ .....	73
5.4.5. Efeito do calor específico do gás – $c_g$ .....	75
<b>6. CONCLUSÕES.....</b>	<b>79</b>
<b>7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>83</b>
<b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>85</b>
<b>9. APÊNDICES .....</b>	<b>89</b>
9.1. PROGRAMAS FORTRAN.....	89
9.1.1. Programa cubo_dim.f .....	89
9.1.2. Programa retorta_homo.for .....	92
9.1.3. Programa retorta_media.for.....	93
9.1.4. Programa retorta_incre.for.....	96
9.2. RESULTADOS DOS PROGRAMAS FORTRAN.....	100
9.2.1. Programa cubo_dim.for .....	100
9.2.2. Programa retorta_homo.for .....	110
9.2.3. Programa retorta_media.for .....	110
9.2.4. Programa retorta_incre.for .....	120

*À minha família: mãe e irmão,  
meu porto seguro e  
eterna motivação*



## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço à Deus, meu guia, que ilumina minha vida e dá forças para enfrentar as adversidades.

Ao Professor Lisbôa, que antes de ser meu orientador e colega de profissão, foi um amigo que me ajudou nas minhas dúvidas, acalmou meus anseios e colaborou no meu amadurecimento. Posso afirmar que, desde o primeiro contato na graduação, me mostrou a engenharia química com muita estima e trouxe importantes conhecimentos para o meu aprendizado.

À minha família, mãe e irmão, que sempre me motivou e deu condições para lutar pelos meus sonhos. Mesmo com as dificuldades, estiveram do meu lado com palavras de incentivo e não me deixaram parar de lutar pelos meus objetivos.

À UNICAMP e à FEQ, por possibilitar conhecer muitas pessoas e aprender diversos novos assuntos, que colaboraram tanto no meu crescimento acadêmico, como humano.





*“Se as coisas são inatingíveis... ora!  
Não é motivo para não querê-las...  
Que tristes os caminhos, se não fora  
A mágica presença das estrelas!”*

Mário Quintana



## LISTA DE FIGURAS

<b>FIGURA 1:</b> ESQUEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE MATÉRIA ORGÂNICA EM UMA PARTÍCULA DE XISTO (LISBÔA, 1997) .....	13
<b>FIGURA 2:</b> ESQUEMA DO PROCESSO PETROSIX (LISBÔA, 1997) .....	20
<b>FIGURA 3:</b> DIMENSÕES DA RETORTA E CORTE ILUSTRATIVO DO LEITO DE PIRÓLISE DO MÓDULO INDUSTRIAL.....	32
<b>FIGURA 4:</b> PARTÍCULA DE XISTO CRU DO PROCESSO PETROSIX .....	38
<b>FIGURA 5:</b> REPRESENTAÇÃO ILUSTRATIVA DO LEITO DE PIRÓLISE IDENTIFICANDO AS VARIÁVEIS ENVOLVIDAS NO BALANÇO DE ENERGIA.....	40
<b>FIGURA 6:</b> POSICIONAMENTO DO SISTEMA DE COORDENADAS CARTESIANAS NA PARTÍCULA CÚBICA DE XISTO (LISBÔA, 1997) .....	42
<b>FIGURA 7:</b> TEMPERATURA NO CENTRO E NO VÉRTICE PARA PARTÍCULAS CÚBICAS COM DIFERENTES ARESTAS EXPOSTAS À TEMPERATURA DE 400 °C .....	49
<b>FIGURA 8:</b> DIFERENÇA ENTRE AS TEMPERATURAS NO CENTRO E NO VÉRTICE PARA PARTÍCULAS CÚBICAS COM DIFERENTES ARESTAS EXPOSTAS À TEMPERATURA DE 400 °C .....	49
<b>FIGURA 9:</b> TEMPERATURA NO CENTRO E NO VÉRTICE PARA PARTÍCULAS PARALELEPIPÉDICAS EXPOSTAS À TEMPERATURA DE 400 °C.....	50
<b>FIGURA 10:</b> DIFERENÇA ENTRE AS TEMPERATURAS NO CENTRO E NO VÉRTICE PARA PARTÍCULAS PARALELEPIPÉDICAS EXPOSTAS À TEMPERATURA DE 400 °C .....	51
<b>FIGURA 11:</b> TEMPERATURA NO CENTRO E NO VÉRTICE DA PARTÍCULA PADRÃO EXPOSTA À TEMPERATURA DE 400 °C PARA DIFERENTES COEFICIENTES DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR .....	52
<b>FIGURA 12:</b> DIFERENÇA ENTRE AS TEMPERATURAS NO CENTRO E NO VÉRTICE DA PARTÍCULA PADRÃO EXPOSTA À TEMPERATURA DE 400 °C PARA DIFERENTES COEFICIENTES DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR .....	52
<b>FIGURA 13:</b> TEMPERATURA NO CENTRO E NO VÉRTICE DA PARTÍCULA PADRÃO EXPOSTA À TEMPERATURA DE 400 °C PARA DIFERENTES CONDUTIVIDADES TÉRMICAS DO XISTO.....	53
<b>FIGURA 14:</b> DIFERENÇA ENTRE AS TEMPERATURAS NO CENTRO E NO VÉRTICE DA PARTÍCULA PADRÃO EXPOSTA À TEMPERATURA DE 400 °C PARA DIFERENTES CONDUTIVIDADES TÉRMICAS DO XISTO.....	54
<b>FIGURA 15:</b> TEMPERATURA NO CENTRO E NO VÉRTICE DA PARTÍCULA PADRÃO EXPOSTA À TEMPERATURA DE 400 °C PARA DIFERENTES CALORES ESPECÍFICOS DO XISTO .....	55
<b>FIGURA 16:</b> DIFERENÇA ENTRE AS TEMPERATURAS NO CENTRO E NO VÉRTICE DA PARTÍCULA PADRÃO EXPOSTA À TEMPERATURA DE 400 °C PARA DIFERENTES CALORES ESPECÍFICOS DO XISTO .....	55
<b>FIGURA 17:</b> PERFIL DE TEMPERATURA DO GÁS E DE PARTÍCULAS CÚBICAS DE XISTO (SEM GRADIENTE TÉRMICO) COM DIFERENTES ARESTAS NA RETORTA .....	57

<b>FIGURA 18:</b> PERFIL DE TEMPERATURA DO GÁS E DE PARTÍCULAS PARALELEPIPÉDICAS DE XISTO (SEM GRADIENTE TÉRMICO) NA RETORTA .....	58
<b>FIGURA 19:</b> PERFIL DE TEMPERATURA DO GÁS E DA PARTÍCULA PADRÃO DE XISTO (SEM GRADIENTE TÉRMICO) NA RETORTA PARA DIFERENTES COEFICIENTES DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR .....	59
<b>FIGURA 20:</b> PERFIL DE TEMPERATURA DO GÁS E DE PARTÍCULA PADRÃO DE XISTO (SEM GRADIENTE TÉRMICO) NA RETORTA PARA DIFERENTES CALORES ESPECÍFICOS DO XISTO ..	60
<b>FIGURA 21:</b> PERFIL DE TEMPERATURA DO GÁS E DE PARTÍCULA PADRÃO DE XISTO (SEM GRADIENTE TÉRMICO) NA RETORTA PARA DIFERENTES CALORES ESPECÍFICOS DO GÁS .....	61
<b>FIGURA 22:</b> TEMPERATURA NO CENTRO E NO VÉRTICE PARA PARTÍCULAS CÚBICAS DE XISTO (COM GRADIENTE TÉRMICO) COM DIFERENTES ARESTAS NA RETORTA .....	63
<b>FIGURA 23:</b> DIFERENÇA ENTRE AS TEMPERATURAS NO CENTRO E NO VÉRTICE PARA PARTÍCULAS CÚBICAS DE XISTO (COM GRADIENTE TÉRMICO) COM DIFERENTES ARESTAS NA RETORTA ..	64
<b>FIGURA 24:</b> PERFIL DE TEMPERATURA DO GÁS E DA SUPERFÍCIE DE PARTÍCULAS CÚBICAS DE XISTO (COM GRADIENTE TÉRMICO) COM DIFERENTES ARESTAS NA RETORTA .....	64
<b>FIGURA 25:</b> TEMPERATURA NO CENTRO E NO VÉRTICE PARA PARTÍCULAS PARALELEPIPÉDICAS DE XISTO (COM GRADIENTE TÉRMICO) NA RETORTA .....	66
<b>FIGURA 26:</b> DIFERENÇA ENTRE AS TEMPERATURAS NO CENTRO E NO VÉRTICE PARA PARTÍCULAS PARALELEPIPÉDICAS DE XISTO (COM GRADIENTE TÉRMICO) NA RETORTA .....	66
<b>FIGURA 27:</b> PERFIL DE TEMPERATURA DO GÁS E DA SUPERFÍCIE DE PARTÍCULAS PARALELEPIPÉDICAS DE XISTO (COM GRADIENTE TÉRMICO) NA RETORTA .....	67
<b>FIGURA 28:</b> TEMPERATURA NO CENTRO E NO VÉRTICE DA PARTÍCULA PADRÃO DE XISTO (COM GRADIENTE TÉRMICO) NA RETORTA PARA DIFERENTES COEFICIENTES DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR .....	68
<b>FIGURA 29:</b> DIFERENÇA ENTRE AS TEMPERATURAS NO CENTRO E NO VÉRTICE DA PARTÍCULA PADRÃO DE XISTO (COM GRADIENTE TÉRMICO) NA RETORTA PARA DIFERENTES COEFICIENTES DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR .....	69
<b>FIGURA 30:</b> PERFIL DE TEMPERATURA DO GÁS E DA SUPERFÍCIE DA PARTÍCULA PADRÃO DE XISTO (COM GRADIENTE TÉRMICO) NA RETORTA PARA DIFERENTES COEFICIENTES DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR .....	69
<b>FIGURA 31:</b> TEMPERATURA NO CENTRO E NO VÉRTICE DA PARTÍCULA PADRÃO DE XISTO (COM GRADIENTE TÉRMICO) NA RETORTA PARA DIFERENTES CONDUTIVIDADES TÉRMICAS DO XISTO .....	71
<b>FIGURA 32:</b> DIFERENÇA ENTRE AS TEMPERATURAS NO CENTRO E NO VÉRTICE DA PARTÍCULA PADRÃO DE XISTO (COM GRADIENTE TÉRMICO) NA RETORTA PARA DIFERENTES CONDUTIVIDADES TÉRMICAS DO XISTO .....	71
<b>FIGURA 33:</b> PERFIL DE TEMPERATURA DO GÁS E DA SUPERFÍCIE DA PARTÍCULA PADRÃO DE XISTO (COM GRADIENTE TÉRMICO) NA RETORTA PARA DIFERENTES CONDUTIVIDADES TÉRMICAS DO XISTO .....	72

<b>FIGURA 34:</b> TEMPERATURA NO CENTRO E NO VÉRTICE DA PARTÍCULA PADRÃO DE XISTO (COM GRADIENTE TÉRMICO) NA RETORTA PARA DIFERENTES CALORES ESPECÍFICOS DO XISTO ..	73
<b>FIGURA 35:</b> DIFERENÇA ENTRE AS TEMPERATURAS NO CENTRO E NO VÉRTICE DA PARTÍCULA PADRÃO DE XISTO (COM GRADIENTE TÉRMICO) NA RETORTA PARA DIFERENTES CALORES ESPECÍFICOS DO XISTO .....	74
<b>FIGURA 36:</b> PERFIL DE TEMPERATURA DO GÁS E DA SUPERFÍCIE DA PARTÍCULA PADRÃO DE XISTO (COM GRADIENTE TÉRMICO) NA RETORTA PARA DIFERENTES CALORES ESPECÍFICOS DO XISTO .....	74
<b>FIGURA 37:</b> TEMPERATURA NO CENTRO E NO VÉRTICE DA PARTÍCULA PADRÃO DE XISTO (COM GRADIENTE TÉRMICO) NA RETORTA PARA DIFERENTES CALORES ESPECÍFICOS DO GÁS .....	76
<b>FIGURA 38:</b> DIFERENÇA ENTRE AS TEMPERATURAS NO CENTRO E NO VÉRTICE DA PARTÍCULA PADRÃO DE XISTO (COM GRADIENTE TÉRMICO) NA RETORTA PARA DIFERENTES CALORES ESPECÍFICOS DO GÁS.....	76
<b>FIGURA 39:</b> PERFIL DE TEMPERATURA DO GÁS E DA SUPERFÍCIE DA PARTÍCULA PADRÃO DE XISTO (COM GRADIENTE TÉRMICO) NA RETORTA PARA DIFERENTES CALORES ESPECÍFICOS DO GÁS .....	77



## LISTA DE TABELAS

<b>TABELA 1:</b> ANÁLISE IMEDIATA TÍPICA DE UMA AMOSTRA DE XISTO CRU DA FORMAÇÃO IRATI FEITA PELA PETROBRAS (LISBÔA, 1997).....	11
<b>TABELA 2:</b> ANÁLISE ELEMENTAR TÍPICA DE UMA AMOSTRA DE XISTO CRU DA FORMAÇÃO IRATI FEITA PELA PETROBRAS (LISBÔA, 1997).....	11
<b>TABELA 3:</b> ANÁLISE DE CINZAS TÍPICA DE UMA AMOSTRA DE XISTO CRU DA FORMAÇÃO IRATI FEITA PELA PETROBRAS (LISBÔA, 1997).....	11
<b>TABELA 4:</b> ANÁLISE QUÍMICA PARA AS DIFERENTES CAMADAS DO XISTO DA FORMAÇÃO IRATI (PIMENTEL, 2001 E LISBÔA, 1997) .....	14
<b>TABELA 5:</b> VALORES DO GÁS DE PIRÓLISE (VAPOR D'ÁGUA) A 400 °C.....	34
<b>TABELA 6:</b> DIÂMETROS MÉDIOS E VALORES DE COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR SEGUNDO LEVENSPIEL (1998) E RASE (1990) PARA PARTÍCULAS DE XISTO COM DIFERENTES DIMENSÕES.....	35
<b>TABELA 7:</b> RAZÕES ENTRE ÁREA SUPERFICIAL E VOLUME DO LEITO PARA DIFERENTES PARTÍCULAS DE XISTO.....	36
<b>TABELA 8:</b> DIMENSÕES DOS PARTÍCULAS PARALELEPÍPICAS DE XISTO .....	38
<b>TABELA 9:</b> VALORES PARA OS PARÂMETROS UTILIZADOS NOS CÁLCULOS .....	39
<b>TABELA 10:</b> VALORES PARA OS PARÂMETROS UTILIZADOS NOS CÁLCULOS PARA AS DIFERENTES PARTÍCULAS ESTUDADAS.....	39





## LISTA DE SÍMBOLOS

$a$	Razão área da partícula e volume do leito	$[m^{-1}]$
$\alpha$	Difusividade térmica	$[m^2 s^{-1}]$
$A_p$	Área superficial da partícula	$[m^2]$
$A_s$	Área transversal do leito	$[m^2]$
$Bi$	Número de Biot	-
$c_g$	Calor específico do gás	$[J kg^{-1} K^{-1}]$
$c_p$	Calor específico	$[J kg^{-1} K^{-1}]$
$c_x$	Calor específico do xisto	$[J kg^{-1} ^\circ C^{-1}]$
$d_p$	Diâmetro da partícula	$[m]$
$E_{c,e}$	Energia cinética na entrada	$[J/kg]$
$E_{c,s}$	Energia cinética na saída	$[J/kg]$
$E_{p,e}$	Energia potencial na entrada	$[J/kg]$
$E_{p,s}$	Energia potencial na saída	$[J/kg]$
$\varepsilon$	Porosidade	-
$h$	Coeficiente de transferência de calor	$[W m^{-2} K^{-1}]$
$\bar{h}$	Coeficiente de transferência de calor médio	$[W m^{-2} K^{-1}]$
$H_e$	Entalpia na entrada	$[J/kg]$
$H_{g,e}$	Entalpia do gás na entrada	$[J/kg]$
$H_{g,s}$	Entalpia do gás na saída	$[J/kg]$
$H_s$	Entalpia na saída	$[J/kg]$
$H_{x,e}$	Entalpia do xisto na entrada	$[J/kg]$
$H_{x,s}$	Entalpia do xisto na saída	$[J/kg]$
$k$	Condutividade térmica	$[W m^{-1} K^{-1}]$
$k_g$	Condutividade térmica do gás	$[W m^{-1} K^{-1}]$
$k_x$	Condutividade térmica do xisto	$[W m^{-1} K^{-1}]$
$L$	Comprimento da aresta da partícula	$[m]$
$L_c$	Comprimento característico	$[m]$
$n$	Número de faces	-
$Nu$	Número de Nusselt	-
$\rho_x$	Massa específica do xisto	$[kg m^{-3}]$

$\rho_g$	Massa específica do gás	[kg m <sup>-3</sup> ]
Pr	Número de Prandtl	-
$Q$	Quantidade de calor	[J]
$\dot{Q}$	Taxa de calor	[J s <sup>-1</sup> ]
$Q_g$	Quantidade de calor do gás	[J]
$Q_x$	Quantidade de calor do xisto	[J]
Re	Número de Reynolds	-
$t$	Tempo	[s]
$T$	Temperatura	[°C]
$T_g$	Temperatura do gás	[°C]
$T_{ge}$	Temperatura do gás na entrada	[°C]
$T_{gs}$	Temperatura do gás na saída	[°C]
$T_{sup}$	Temperatura da superfície da partícula	[°C]
$\overline{T_{sup}}$	Temperatura média da superfície da partícula	[°C]
$T_x$	Temperatura do xisto	[°C]
$T_{xe}$	Temperatura do xisto na entrada	[°C]
$T_{xs}$	Temperatura do xisto na saída	[°C]
$T_{x_0}$	Temperatura inicial do xisto	[°C]
$\mu_g$	Viscosidade dinâmica do gás	[kg m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> ]
$v$	Velocidade do gás	[m s <sup>-1</sup> ]
$V_c$	Volume do cubo	[m <sup>3</sup> ]
$V_p$	Volume da partícula	[m <sup>3</sup> ]
$W$	Trabalho	[J]
$W_e$	Vazão mássica na entrada	[kg s <sup>-1</sup> ]
$W_g$	Vazão mássica do gás	[kg s <sup>-1</sup> ]
$W_{ge}$	Vazão mássica do gás na entrada	[kg s <sup>-1</sup> ]
$W_{gs}$	Vazão mássica do gás na saída	[kg s <sup>-1</sup> ]
$W_s$	Trabalho de eixo	[W]
$W_{sai}$	Vazão mássica na saída	[kg s <sup>-1</sup> ]
$W_x$	Vazão mássica do xisto	[kg s <sup>-1</sup> ]
$W_{xe}$	Vazão mássica do xisto na entrada	[kg s <sup>-1</sup> ]
$W_{xs}$	Vazão mássica do xisto na saída	[kg s <sup>-1</sup> ]

$z_L$	Posição axial no leito	[m]
$\Delta U$	Varição da energia interna	[J]
$\Delta H$	Varição da entalpia	[J/kg]



# 1. INTRODUÇÃO

A sociedade moderna, com o todo desenvolvimento alcançado no decorrer de muitos anos, adquiriu uma dependência cada vez maior de petróleo, ou como combustível (motores, caldeiras e geração de eletricidade) ou como fonte para manufatura de produtos essenciais (vestuário, plásticos, remédios).

Pela facilidade de seu uso e pela capacidade de atender a essas necessidades, o petróleo tornou-se responsável por mais de 40% da energia consumida no mundo (IEA, 2009).

Porém, sendo uma fonte de recurso natural não-renovável, há uma preocupação em relação à diminuição de sua disponibilidade e, além disso, a questão ambiental tem sido alarmante em relação à sua utilização. Países têm buscado acordos para redução das emissões atmosféricas, visando minimizar as consequências do efeito-estufa.

Dessa forma, outras alternativas têm sido buscadas, tanto renováveis como solar, eólica, geotérmica, hidrelétrica e biomassa, quanto não-renováveis como rochas oleíferas, areias betuminosas, carvão e gás natural.

A esperada "tecnologia de fontes renováveis" ainda é uma aposta para o futuro porque a necessidade energética é muito superior ao que essas fontes são capazes de suprir na atualidade. Já o xisto, devido à sua abundância, inclusive superior à do carvão, tem uma expectativa de utilização mais imediata.

Contudo, o aproveitamento dessa fonte energética permanece num estado de desenvolvimento incipiente e bastante inferior ao petróleo e carvão. Isso se deve ao grande investimento que se faz necessário para a exploração de minas e desenvolvimento tecnológico, considerando as crescentes restrições ambientais. Diante disso, os produtos finais derivados do xisto apresentam um custo superior, sendo menos competitivos frente ao petróleo convencional.

Apesar de a indústria do xisto ser mais antiga que a indústria do petróleo, o desenvolvimento de tecnologias de aproveitamento de xisto ainda é um grande desafio para a engenharia, pois o querogênio contido no xisto é “uma mistura complexa de compostos orgânicos” (ALLRED, 1966) difícil de ser tratado no que se refere a estudos cinéticos e aos fenômenos de transferência de calor e massa no processo de pirólise.

Como o suprimento de petróleo é incerto e esgotável, o Brasil tem um interesse estratégico nesse campo por ser detentor da segunda maior reserva mundial desse mineral. Estes depósitos estão localizados nos estados da Bahia, Ceará, Maranhão, Paraná, Rio Grande do Sul, Santa Catarina, São Paulo, Goiás e Amapá (ABREU, 1973). Há uma jazida que apresenta condições mais favoráveis na região de São Mateus do Sul (PR), situada na Bacia do Paraná, pertencente à Formação Irati – parte integrante da coluna de sedimentos paleozóicos de idade Permiana (TONEL et al., 2004).

A exploração dessa reserva vem sendo executada pela SIX (Unidade de Negócios da Industrialização do Xisto), que é uma unidade da Petrobras criada em 1954 para desenvolver estudos sobre o aproveitamento de xisto. Essa unidade possui capacidade instalada de 7 mil toneladas de xisto por dia (PETROBRAS, 2014). Para tanto começou a ser desenvolvido em 1958, pelos técnicos da Petrobras, um processo de transformação de xisto que recebeu o nome de Petrosix, que realiza a retortagem do xisto em um leito móvel.

No entanto, tecnologias de retortagem, como o processo Petrosix, ainda são muito escassas. O xisto é uma rocha anisotrópica com propriedades físicas e químicas que variam dependendo da reserva extrativa. Essas variações são determinadas pelo tipo de sedimento que foi se depositando no decorrer dos anos para formar o xisto.

O Laboratório de Desenvolvimento de Processos em Sistemas Particulados (LDPSP) da Faculdade de Engenharia Química da UNICAMP tem efetuado uma série de pesquisas sobre xisto, nas quais se destacam trabalhos referentes à cinética de

desvolatilização, determinação de calor específico e modelos matemáticos para descrever a perda de massa e transferência de calor no processo de pirólise.

Tal conhecimento constitui um aspecto fundamental quando se deseja aumentar a eficiência do processo de pirólise ou projetar novos tipos de reatores para a retortagem (ALMEIDA, 2005).





## **2. OBJETIVOS**

O presente trabalho busca modelar a transferência de calor entre partículas de xisto e o gás em um leito móvel de pirólise de xisto.

Este estudo torna-se apenas uma das referências para o desenvolvimento de novas retortas de pirólise de xisto. O projeto destes equipamentos não será uma meta a ser atingida, já que os mesmos necessitam de outros estudos para modelar todos os fenômenos presentes em seu interior. Sugestões de mudanças em seus parâmetros de projeto, tais como diâmetro, vazão ou tempo de residência, não atenderiam à realidade industrial somente com a análise da troca térmica na região estudada.

Com as temperaturas obtidas pela resolução numérica, pode-se compreender melhor a interação entre as partículas de xisto e o gás de aquecimento no interior da retorta em diferentes momentos e demonstrar a importância desta etapa para obtenção da temperatura mínima necessária para extração da matéria orgânica deste mineral.

### **2.1. Objetivos Específicos**

Este trabalho apresenta como objetivos:

- Desenvolver modelo matemático tridimensional para uma partícula de xisto exposta a uma temperatura fixa;
- Desenvolver modelo matemático para representar a transferência de calor em contracorrente entre partículas de xisto sem gradiente de temperatura em seu interior e o gás de aquecimento num leito móvel de pirólise de xisto;
- Desenvolver modelo matemático tridimensional para representar a transferência de calor em contracorrente entre partículas de xisto com gradiente de temperatura em seu interior e o gás de aquecimento num leito móvel de pirólise de xisto;

- Elaborar programas na linguagem FORTRAN para os diferentes modelos desenvolvidos para a transferência de calor entre as partículas de xisto e o gás de aquecimento;
- Por método numérico, simular as temperaturas das partículas da rocha e do gás na retorta para os diferentes modelos;
- Avaliar o efeito do tamanho da partícula na distribuição de temperatura dentro da partícula bem como o efeito deste gradiente no balanço térmico na retorta de pirólise do processo Petrosix (reator de leito móvel).
- Realizar análise de sensibilidade paramétrica - condutividade térmica, coeficiente de transferência de calor e calor específico do xisto e do gás – para verificar a influência dessas variáveis no balanço térmico da retorta, já que há dificuldade na definição dos valores para estas propriedades físicas.

Devido à baixa umidade e teor de óleo, o balanço térmico irá abranger, além da zona de aquecimento, as zonas de secagem e de pirólise.

### **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1. Xisto**

Durante vários anos, a denominação xisto foi empregada para designar uma rocha que, por aquecimento, fornece gás e óleo, em consequência da decomposição da matéria orgânica contida.

De acordo com a nomenclatura geológica, o termo mais adequado para descrever esse tipo de rocha é a denominação folhelho. Xisto é definido como uma "rocha metamórfica" cujos componentes apresentam uma orientação bem definida, dispostos em camadas. O termo folhelho descreve uma "rocha sedimentar" de estrutura semelhante, laminada, desfazendo-se em folhas (ABREU, 1973).

Apesar de ser conhecida a denominação geológica correta, a palavra xisto será utilizada como sinônimo de folhelho neste trabalho, já que esta palavra caracteriza um folhelho específico e é utilizada em toda literatura sobre este assunto.

O xisto é uma rocha sedimentar, de granulação média a grande, dura, quase negra, de estrutura folheada e que tende a separar-se em placas finas e irregulares. Possui uma composição variada de minerais, em função da localização geográfica da formação geológica.

O xisto em estudo é classificado como pirobetuminoso pois, quando submetido a altas temperaturas, libera matéria orgânica contida em sua estrutura, denominada querogênio, restando um resíduo carbonáceo. Do material volatilizado, obtém-se uma parcela condensável, o óleo de xisto, e outra parcela não-condensável, que constitui o gás de xisto (LISBÔA, 1997; PIMENTEL, 2001) O querogênio recebeu essa denominação porque era o produto de onde se obtinha o querosene (ABREU, 1973).

Além do xisto pirobetuminoso, Leinz e Amaral (1998) citam o xisto betuminoso dentro da classificação dos xistos. O xisto betuminoso possui em sua estrutura mineral

matéria orgânica quase fluida, na qual seu óleo pode ser extraído por meio de solventes orgânicos comuns.

A molécula de querogênio tem uma estrutura tridimensional combinando carbono, hidrogênio, enxofre, nitrogênio e oxigênio, com massa molar tão grande quanto longas cadeias poliméricas.

Durante a pirólise, a extração da matéria orgânica ocorre basicamente em duas etapas: conversão do querogênio em betume e, em seguida, conversão do betume em óleo e gás. Essa última etapa – quando o betume converte-se em gás e óleo vaporizado – é denominada desvolatilização do xisto (PIMENTEL, 2001).

O querogênio é um combustível fóssil semelhante ao petróleo. Porém, este é encontrado na fase líquida. A refinação de óleo de xisto produz os mesmos derivados que o petróleo, tornando-se uma fonte de energia alternativa. A exploração de xisto é limitada por razões econômicas. O processo de produção de óleo de xisto é mais caro que o de produção de petróleo. Mesmo assim, por motivos estratégicos, o Brasil continua investindo na exploração e extração deste óleo.

A preocupação do país é estar preparado para enfrentar novas crises, seja pelo decréscimo da produção mundial devido ao esgotamento das jazidas existentes ou aumento do preço. Assim, devido à disponibilidade do xisto, investigações para sua melhor exploração podem ser uma opção para o país.

#### **3.1.1. Reservas**

O querogênio, encontrado em diversas concentrações em matrizes minerais, como pedras sedimentares ou minerais argilosos (nos quais se inclui o xisto) é o material orgânico mais abundante no mundo. Estimativas mostram que de  $1,2 \times 10^{16}$  toneladas de carbono existente na Terra,  $1,07 \times 10^{16}$  toneladas estão presentes como matéria orgânica insolúvel e a maior quantidade dessa matéria orgânica, o querogênio,

está presente no xisto. As reservas mundiais de xisto são capazes de produzir, aproximadamente,  $4 \times 10^{11}$  toneladas de óleo (WILLIANS, 1983).

Os Estados Unidos possuem a maior reserva mundial de xisto, seguido pelo Brasil, Congo, Jordânia e Marrocos (MELO, 2013).

Aproximadamente 90% da superfície continental da Terra encontra-se coberta com uma camada de rochas sedimentares, o que justifica a existência de vastos depósitos de xisto espalhados ao redor do mundo (YEN, 1976).

A Formação Irati, com cerca de 250 milhões de anos, é o maior depósito de xisto conhecido do país e está localizada nos estados de São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul (LEE, 2001).

No Paraná, no município de São Mateus do Sul, dentro desta Formação, há a exploração do xisto pela Unidade de Negócios da Industrialização do Xisto (SIX) da Petrobras.

### **3.1.2. Propriedades Químicas**

A definição do mineral xisto não caracteriza detalhadamente a composição química do xisto, que depende da localização geográfica e da formação geológica. Qualquer xisto tem em comum a estrutura física – laminar - e um potencial energético.

O xisto consiste em uma matriz mineral pouco porosa, contendo uma quantidade relativamente pequena de matéria orgânica, geralmente não superior a 20% (massa).

Os minerais presentes são basicamente o dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ), o trióxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), o trióxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), o óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ), o óxido de magnésio ( $\text{MgO}$ ) e em menor quantidade outros óxidos.

A matéria orgânica do xisto (querogênio) encontra-se na forma de moléculas muito grandes (massa molar da ordem de 3000) e extremamente ramificadas. Essas moléculas têm uma mobilidade praticamente nula através da matriz mineral que quase não possui poros. A única maneira de aumentar essa mobilidade é a criação de poros e diminuição do tamanho das moléculas. Estes dois fenômenos ocorrem quando o sólido atinge uma temperatura suficientemente alta, começando por volta dos 350 °C, em um ambiente não-oxidante.

Neste estágio, elas começam a transformar-se em moléculas menores (betume), mas ainda com mobilidade limitada. Uma pequena fração dessas moléculas poderia ser, inclusive, extraída da matriz mineral por um solvente apropriado. Aquecendo-se à temperatura de aproximadamente 480 °C, o querogênio e o betume são transformados em moléculas muito menores e com maior mobilidade (óleo e gás). Essas são capazes de deixar a matriz mineral pela superfície, abrindo poros que facilitarão a liberação de componentes na parte mais interna da partícula.

Apenas a fração volátil da matéria orgânica, presente no mineral, sofre este processo de pirólise e subsequente desvolatilização. A fração restante, que a pirólise não é capaz de vaporizar, é constituída basicamente por querogênio parcialmente decomposto e outros resíduos carbônicos que permanecem na matriz mineral.

O material volátil consiste basicamente de carbono, hidrogênio e oxigênio, existindo também, em quantidades menores, nitrogênio e enxofre. As Tabelas 1 a 3 apresentam o resultado das análises químicas do xisto Irati fornecida pela PETROBRAS/SIX.

**Tabela 1: Análise imediata típica de uma amostra de xisto cru da Formação Irati feita pela Petrobras (LISBÔA, 1997)**

<b>Ensaio Fischer – Xisto (% massa)</b>	
Óleo	9,01
Água	1,84
Gás	2,09
Resíduo	87,06

**Tabela 2: Análise elementar típica de uma amostra de xisto cru da Formação Irati feita pela Petrobras (LISBÔA, 1997)**

<b>Análise Final (% massa)</b>	
Carbono (Orgânico)	12,89
Carbono (Mineral)	0,67
Hidrogênio	2,11
Nitrogênio	0,38
Oxigênio	2,15
Enxofre	5,08
Cinzas	76,72

**Tabela 3: Análise de cinzas típica de uma amostra de xisto cru da Formação Irati feita pela Petrobras (LISBÔA, 1997)**

<b>Análise de Cinzas (% massa)</b>	
SiO <sub>2</sub>	60,87
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,62
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,64
CaO	2,70
MgO	3,19
Outros (QSP 100% de cinzas)	9,98

Alguns aspectos destacados das Tabelas 1 a 3 são os seguintes:

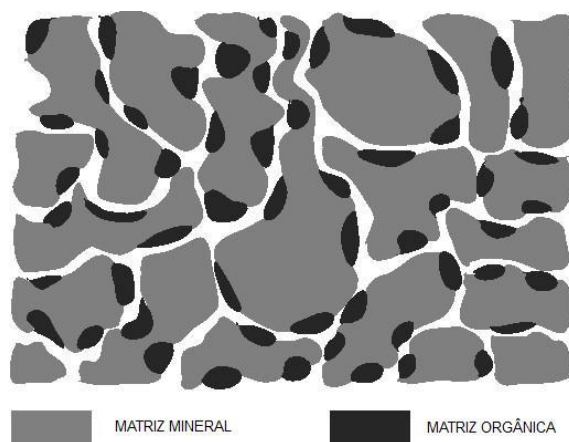
- A quantidade de matéria orgânica aproveitável é muito baixa em relação à quantidade total do mineral original;

- Oxigênio, enxofre e nitrogênio poderão também estar presentes. O enxofre e o nitrogênio podem ser ameaças ambientais, na forma de óxido, ou utilizados para a fabricação de fertilizantes, aminas, etc;

O ensaio Fischer (Tabela 1) revela as quantidades de óleo e gás, além da água, produzidos a partir do material volátil. Esse ensaio é realizado em uma atmosfera inerte para uma determinada curva de aquecimento e permite a determinação do rendimento do óleo, servindo como referência para a determinação da eficiência de processos de pirólise. Trata-se de um ensaio típico do xisto também aplicável ao carvão. A eficiência do processo Petrosix é acima de 90%.

Com respeito às propriedades físicas das partículas do xisto, é importante mencionar que não se observa qualquer variação de tamanho da partícula, para perdas de massa de aproximadamente 20%. Assim sendo, não há quebra da matriz mineral e tão pouco separação entre as lâminas a ponto de representar um aumento brutal da porosidade da matriz mineral. No princípio do processo, a matriz mineral está praticamente isenta de poros, os quais surgem à medida que o material orgânico é pirolisado e volatilizado. A partícula não é facilmente quebrada, fissurada ou dividida; mesmo após a combustão. Isso sugere que a matéria orgânica não se encontra concentrada entre algumas camadas ou algum ponto da matriz mineral, pois isto induziria a uma transformação com provável deformação da partícula. Xistos mais ricos que o Irati podem ser mais susceptíveis a essas ocorrências. Essa realidade é uma justificativa para a distribuição do querogênio esquematizada na Figura 1.





**Figura 1: Esquema de distribuição de matéria orgânica em uma partícula de xisto (LISBÔA, 1997)**

A Figura 1 é somente uma representação para uma partícula que passou pelo processo de pirólise, já que como dito anteriormente, o xisto cru quase não possui porosidade. Estes espaços vazios somente são gerados quando a matéria orgânica se separa da matriz mineral.

O xisto da Formação Irati em São Mateus do Sul é dividido em duas camadas separadas por uma camada intermediária estéril, constituída por dolomitos e folhelhos com teor de óleo muito baixo.

Segundo a Petrobras, a espessura da camada superior é 6 m com um teor médio de óleo (base seca) de 6,4%. A camada inferior apresenta uma espessura média de 2,5 m e um teor médio de óleo (base seca) de 9,1%. Em média, o processo recebe xisto com 7,5% de óleo (base seca) (LISBÔA, 1997).

A Tabela 4 apresenta uma análise química elementar para as duas camadas de xisto descritas acima.

**Tabela 4: Análise química para as diferentes camadas do xisto da Formação Irati (PIMENTEL, 2001 e LISBÔA, 1997)**

<b>Composição Elementar</b>	<b>Camada Superior (% massa)</b>	<b>Camada Inferior (% massa)</b>
Carbono total	12,31	14,50
Carbono mineral	0,32	0,23
Hidrogênio	1,85	2,05
Enxofre Total	4,45	5,53

### **3.1.3. Diferença entre óleo de xisto e petróleo**

Tanto o óleo de xisto como o petróleo são formados basicamente de misturas de hidrocarbonetos. Nos petróleos naturais predominam geralmente compostos parafínicos (saturados) ou hidrocarbonetos de cadeia fechada, mais ou menos estáveis. Nos óleos de xisto existem grandes proporções de não-saturados, como as olefinas e inúmeros compostos instáveis, além da presença de compostos sulfurados, de bases pirimídicas e outros compostos nitrogenados em elevadas proporções.

O óleo de xisto oferece maior dificuldade na refinação, quando se deseja obter os produtos habitualmente retirados do petróleo. Isso ocorre porque o óleo de xisto é obtido por pirólise, enquanto que o petróleo é um produto que se formou há milhões de anos e que, no decorrer dos tempos, sofreu reações secundárias que estabilizaram os componentes instáveis.

### **3.1.4. Formas de transformação do betume**

O mais nobre emprego do xisto é como fonte de energia, sendo que os dois processos mais difundidos são a combustão e a pirólise. A primeira utiliza o xisto como combustível sólido e a segunda como fonte primária de combustível líquido (extração do óleo). O que distingue os dois processos são as faixas de temperatura empregadas e o tipo de atmosfera. Na combustão, a atmosfera é oxidante. Na pirólise, o óleo da rocha betuminosa é extraído numa atmosfera não-oxidante.

O querogênio não pode ser extraído da matriz mineral através de solventes orgânicos, conforme Perrini (1975). É necessária uma reação química capaz de craquear as moléculas complexas (grandes e ramificadas) em substâncias mais simples (menores e menos ramificadas), mediante a ação do calor. Isso ocorre nas reações de pirólise, sendo responsável pela obtenção de um produto mais leve, de maior potencial energético e maior valor agregado, de acordo com Albright (1983).

A pirólise de xisto ocorre tipicamente em temperaturas entre 350 °C e 500 °C. A fonte de energia é um gás quente isento de substâncias oxidantes, assim evitando a combustão da matéria orgânica. A troca de calor permite que a temperatura de pirólise seja atingida e os produtos deixem a matriz mineral na forma de óleo e gás.

Embora essa descrição superficial do processo pareça simples, existem inúmeras possibilidades de pôr em contato o gás de aquecimento e as pedras de xisto. Além disso, os diversos fenômenos que acompanham a reação de decomposição térmica (pirólise) do querogênio dificultam o desenvolvimento tecnológico do processo.

Os fenômenos mais significativos são: a transferência de calor (aquecimento), os processos físico-químicos relativos à pirólise e as transferências de massa (saída do gás e óleo produzido no interior da matriz mineral). Estes fenômenos podem ser estudados detalhadamente através das leis de transferência e cinética química.

A etapa de aquecimento pode ser considerada a determinante para a ocorrência do processo, já que sem a sua existência os outros processos estão impossibilitados e, além disso, ocupa a maior parte do tempo de residência das partículas de xisto na retorta.

### **3.2. Indústria do Xisto - Histórico**

De acordo com os informes de Dyni (2000), as primeiras utilizações do xisto se remetem ao século XVII. A partir de então, sua utilidade e formas de processamento foram das mais variadas.

Ainda de acordo com Dyni (2000), em 1637, na Suécia, o xisto era aquecido com fogo de madeira, para extração de alumínio, potássio e sulfato (sal utilizado para fixar as cores, na indústria têxtil). Mais tarde, no final do século XIX, o xisto era submetido à retortagem em pequena escala, para extração de hidrocarbonetos; tais processos foram utilizados até 1966, inclusive durante a segunda guerra mundial. Em 1966, devido à redução dos preços do petróleo se termina ou se limita de modo geral a produção de xisto minerado. Nessa época, os produtos mais conhecidos do óleo de xisto eram o querosene e óleo para lâmpadas, parafina, óleo combustível, lubrificantes e graxas, naftas, gás de iluminação e o fertilizante químico sulfato de amônio. Na década de 1960, das reservas de xisto sueco são extraídas centenas de toneladas de urânio e poucas quantidades de vanádio, além dos hidrocarbonetos.

Dyni (2000) afirma que a França e a Escócia dão início à exploração comercial do xisto em 1839 e 1859, respectivamente. Os escoceses atingem em 1881 um milhão de toneladas de xisto minerado por ano. A produção cresce, estando entre 1 a 4 milhões de toneladas por ano em 1955.

O emprego do xisto como fonte de petróleo não-convencional é pouco significativo em termos comerciais mundiais. Um maior entusiasmo, especulação e investimento ocorreram na década de 70 durante as crises do petróleo.

Alguns exemplos dos investimentos mundiais (EUA, Japão e Canadá), comentadas por Lisbôa (1997), estão resumidos a seguir.

De 1981 a 1983, nos Estados Unidos, a UNOCAL investiu US\$ 650 milhões em uma planta de pirólise de leito móvel de capacidade 10 mil bbl/dia de óleo de xisto. A planta nunca atingiu a capacidade de projeto e foi fechada em 1991. A Chevron desenvolveu o Processo de Leito Turbulento, onde havia o processo de pirólise acoplado a um processo de combustão para aproveitamento dos gases quentes.

No Japão, nasce a JOSECO (Japan Oil Shale Engineering Company) em 1981. Foi construída uma planta piloto, tipo batelada, de 12,5 t/h. O processo compreendia

dois leitos móveis numa mesma retorta. O leito superior extraía o óleo, enquanto o inferior gaseificava as partículas. O xisto gaseificado era submetido à queima em um leito fluidizado. O investimento foi de US\$ 130 milhões.

O processo canadense TACIUK foi aplicado com êxito para o xisto, que é pirolisado em um tambor rotativo e, em seguida, queimado na região anular entre o citado tambor e um tambor externo (concêntricos).

A exploração do xisto no Brasil teve início nos anos 50 pela CIXB (Companhia de Industrialização do Xisto Brasileiro), a qual foi incorporada pela Petrobras quando da sua criação em 1954. Desde então, a Petrobras possui um organismo, a Unidade de Negócios da Industrialização do Xisto (SIX), encarregada do assunto.

### **3.3. Unidade de Negócios da Industrialização de Xisto (SIX)**

Pertencente à área de negócio do Abastecimento e situada em São Mateus do Sul, no Paraná, e única mineradora do sistema Petrobras, a Unidade de Negócios da Industrialização do Xisto (SIX) extrai do solo as riquezas do xisto, obtém produtos de alta qualidade e busca consolidar novos negócios estratégicos para o País, com segurança em suas operações, foco em rentabilidade e, principalmente, respeito ao meio ambiente e ao ser humano.

As pesquisas para exploração do xisto tiveram início em 1950, com a criação da Comissão da Industrialização do Xisto Betuminoso (CIXB) pelo governo federal. Em 1954, a Comissão foi incorporada à Petrobras, a qual criou a Superintendência da Industrialização do Xisto, na época com sede em Tremembé (SP), onde foram feitos estudos em escala piloto com o processo de pirólise denominado Petrosix, que empregava um leito móvel.

Em 1959, a diretoria da Petrobras aprovou a construção de uma usina em São Mateus do Sul, que começou a operar em 1972. Nessa região, o xisto possuía menor umidade, maior riqueza em matéria orgânica, maior proximidade da superfície e vasta

área para exploração de grandes minas. A retorta protótipo, que entrou em operação nesse ano, possuía 35 m de altura e 5,5 m de diâmetro com capacidade de processar 65 t/h de xisto.

Foram obtidos resultados encorajadores com a retorta protótipo e estudos experimentais em escala piloto de várias técnicas de contato entre o xisto e gases de aquecimento, que levaram a construção de uma retorta industrial de 260 t/h, que entrou em operação em 1991. Com a entrada em operação deste Módulo Industrial, concluiu-se esta importante etapa de consolidação da tecnologia Petrobras de extração e processamento do xisto, denominada Petrosix<sup>®</sup>.

Segundo estudos da empresa, uma usina de xisto economicamente viável teria aproximadamente 20 módulos industriais como esse.

Apesar de não ser o principal produto de investimento da Petrobras e de num cenário competitivo, de abertura total do mercado, não conseguir se sustentar, o desenvolvimento tecnológico do xisto tem sido buscado e várias pesquisas são realizadas na SIX. Principalmente durante períodos de alta do petróleo, especulações se fazem presentes por pesquisadores do setor energético de vários países que procuram um intercâmbio com a SIX.

O trabalho realizado na SIX foi sobretudo empírico e, do ponto de vista técnico-científico, muito pode ser feito para conhecer melhor a pirólise do xisto. Essa tecnologia será fundamental no momento de ampliar a exploração do xisto, isto é, quando as conjunturas políticas e econômicas tornarem competitivo o processo.

#### **3.3.1. Mineração**

Em São Mateus do Sul o xisto é encontrado em duas camadas distintas: a camada superior, com seis metros de espessura e a camada inferior com cerca de dois metros e meio. Elas são cobertas por um capeamento de solo cuja espessura varia

com a topografia e são separadas por uma camada de material estéril (que não contém óleo) com cerca de nove metros.

Por meio do Petrosix, a SIX processa mais de 7 mil toneladas de xisto por dia.

A mineração tem como missão assegurar o fornecimento de xisto às retortas, na quantidade e qualidade previstas no Plano de Produção, ao mínimo custo e dentro das condições adequadas de segurança e respeito ao meio ambiente.

A lavra de minas, que é feita a céu aberto, tem como objetivo fornecer blocos de minério com dimensões adequadas ao tratamento e realizar a recuperação de áreas mineradas.

O tratamento de minérios, por sua vez, produz um minério granulado, que alimenta o processo de retortagem para extração do óleo e outros produtos do xisto.

A Petrobras mantém em sua unidade um programa de recuperação ambiental com o objetivo de reabilitar as áreas mineradas. O trabalho é composto pela recomposição das matas com espécies nativas e o retorno da fauna aos terrenos reabilitados.

A recuperação das áreas mineradas se procede de forma sistemática no decorrer da lavra. Os materiais sólidos isentos de óleo gerados na britagem e na retortagem são devolvidos para a mina e são depositados nos vãos gerados entre as pilhas de estéril, para regularização da topografia. Nessas áreas são depositados argila e solo vegetal para recuperação de área.

Na seqüência, começa o processo de restauração da flora, iniciado pelo plantio das espécies pioneiras (bracatinga), e sucessivamente passando pelas fases de introdução das espécies secundárias iniciais, secundárias tardias, espécies ameaçadas de extinção. Passado um ano desse processo, inicia-se o enriquecimento, onde essas

áreas recebem o tratamento dos desbastes e de inclusão das espécies raras da flora nativa.

### 3.3.2. Processo Petrosix

O processo pode ser visualizado na Figura 2.

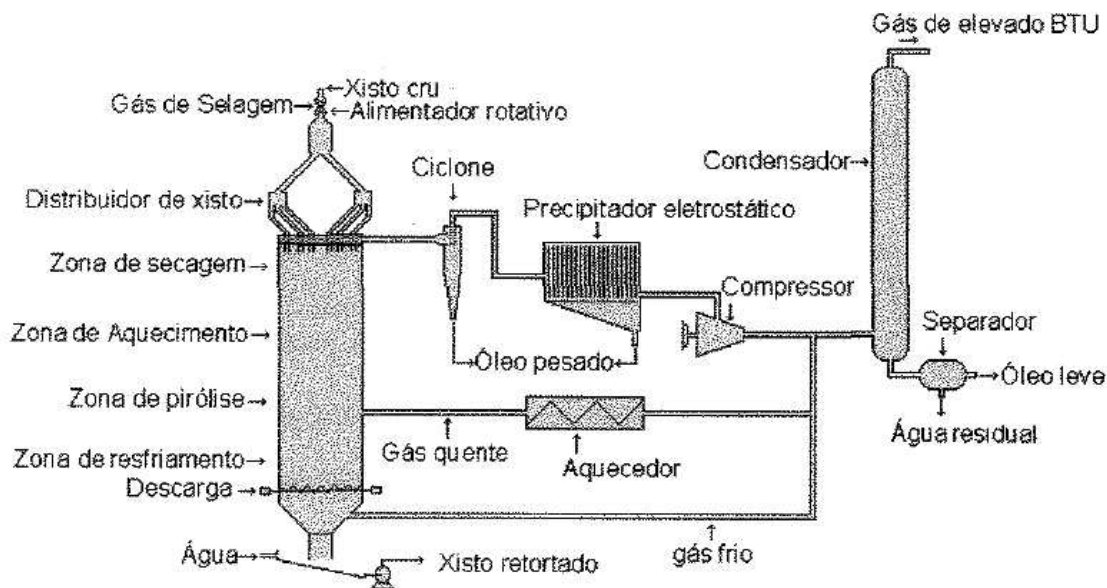


Figura 2: Esquema do processo Petrosix (LISBÔA, 1997)

O processo Petrosix é constituído basicamente por um leito móvel que tem como principal característica a simplicidade operacional.

O xisto depois de minerado a "céu aberto", vai para um britador no qual as partículas são reduzidas a um tamanho que varia de 6 mm a 70 mm. Essas partículas são peneiradas e levadas a uma retorta para serem pirolisadas. Frações finas, que não podem ser processadas, são separadas.

Na retorta, as partículas de xisto são distribuídas no topo do reator de onde se movem lentamente por gravidade, em um leito compactado, para a parte inferior do reator.



Como a distribuição de gás e sólido através do leito é uma questão de especial atenção, a Petrobras projetou um sistema de distribuição de sólidos exclusivo para a retorta. Efetivamente, problemas de caminhos preferenciais e aglomerações ocorrem e influenciam nos fenômenos de transferência de calor e perda de massa. Porém, neste trabalho, leva-se em consideração que a distribuição de gás é uniforme.

A energia necessária para a pirólise é fornecida por uma corrente gasosa de elevada temperatura que entra na zona de retortagem e se mistura com uma segunda corrente, injetada na base da retorta, para recuperar o calor do xisto já retortado. Esta corrente gasosa é constituída por aproximadamente 85% de vapor d'água e o restante pelos gases (gás de processo e óleo vaporizado) oriundo do próprio xisto.

No processo, as partículas de xisto são aquecidas da temperatura ambiente até aproximadamente 773 K. O material orgânico presente no xisto (querogênio) é pirolisado e volatilizado.

Na retorta, há quatro zonas distintas por onde escoam as partículas de xisto:

- Zona de secagem: o xisto frio entra em contato com a corrente ascendente de gases quentes e, por aquecimento, libera a umidade. A água contida se incorpora à corrente de gases na forma de vapor.
- Zona de aquecimento: após perder a umidade, as partículas atravessam a zona de aquecimento, onde a quantidade de calor recebida eleva a temperatura até o ponto em que se inicia a pirólise.
- Zona de pirólise: neste ponto ocorre a liberação de vapores de óleo, gases de pirólise e vapor d'água.
- Zona de resfriamento: o xisto após retortado é resfriado, perdendo grande parte do calor para o fluxo gasoso de reciclo frio ascendente.

Os vapores ascendentes, provenientes da zona de pirólise, se condensam logo abaixo do topo da retorta ao entrar em contato com o xisto frio, formando uma neblina de óleo que é arrastada pelo gás.

A mistura de fluidos composta por gases, vapor d'água e neblina de óleo deixam a retorta logo abaixo do topo e atravessam um conjunto de operações unitárias projetadas para as devidas separações, como ciclones e precipitadores eletrostáticos.

Após retortado, o xisto é descarregado em um coletor, misturado com água e bombeado em suspensão até uma represa.

#### 3.3.3. Derivados do Xisto

Entre os produtos oriundos do xisto que a Petrobras gera estão o óleo combustível, a nafta, gás combustível, gás liquefeito e enxofre e ainda produtos que podem ser utilizados nas indústrias de asfalto, cimenteira, agrícola e de cerâmica.

Os óleos combustíveis industriais obtidos a partir do xisto são indicados para o consumo industrial em centros urbanos. Trata-se de um tipo de óleo de alta fluidez e de elevada facilidade de manuseio, eliminando a necessidade de pré-aquecimento, com conseqüente redução dos custos operacionais de queima, caracterizando-se assim como ideal para regiões de clima frio.

Dentre as unidades de produção, estão as seguintes, com seus respectivos objetivos:

- **Retortagem:** processamento de xisto para a obtenção de óleo e gás;
- **Tratamento de gás:** produção de gás combustível a partir do xisto, GLP e enxofre;
- **Pré-fracionamento de óleo:** produção de óleos especiais e produtos de pavimentação e especificação de nafta;

- **Transferência e estocagem:** armazenamento e transferência de produtos para venda;
- **Separação dos sólidos particulados do óleo:** especificação de óleo quanto ao teor de sólidos e processamento de óleo intermediário de refinarias;
- **Expedição de produtos:** emissão de notas fiscais e carregamento de produtos para venda a clientes;
- **Gasoduto:** transferência de gás combustível a cliente;
- **Utilidades:** geração, recebimento e distribuição de utilidades para todas as plantas e atividades.

#### **3.3.4. Pesquisa e desenvolvimento**

A vocação da SIX para pesquisa, de certa forma, confunde-se com a própria criação da SIX, em 1954, quando ocorreu o início do desenvolvimento tecnológico da cadeia produtiva do xisto. Em 1962, com a mudança da SIX de Tremembé para São Mateus do Sul, começaram a ser construídas as primeiras unidades de escala protótipo e piloto de grande porte. Na época, o foco das atividades de pesquisa e desenvolvimento (P&D) era desenvolver um processo para extração de óleo e gás do xisto.

A partir de 1991, houve uma mudança no foco, que passou para P&D em processos de refino, em parceria com o Cenpes (Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello – Petrobras) e a Sede da empresa. Com o tempo, novas unidades e processos foram incorporados, consolidando o parque tecnológico da SIX como um dos maiores do mundo em plantas-piloto.

A SIX funciona hoje como um centro avançado de pesquisa na área de refino, onde são desenvolvidos vários projetos em conjunto com universidades e o Cenpes. O próprio processo Petrosix é também objeto de estudo e desenvolvimento a partir de uma planta-piloto de grande porte específica para esta finalidade. O parque tecnológico da SIX é o maior da América Latina e um dos maiores do mundo em plantas-piloto de grande porte.

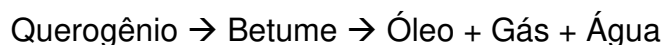
Essas plantas são peças chave do ciclo de desenvolvimento de processos, pois através delas é possível confirmar parâmetros críticos e gerar informações de engenharia para os projetos básicos das plantas industriais.

A excelência tecnológica do centro avançado de pesquisa da SIX é uma forte aliada da Petrobras na busca por soluções na área do refino. As pesquisas realizadas nesse centro de tecnologia permitem a produção de diesel de alta qualidade; geram conhecimento para o aproveitamento do gás na produção de combustíveis líquidos de elevada qualificação; e geram dados sobre a queima de diversos combustíveis e suas emissões, contribuindo assim para o controle de emissões atmosféricas.

O conhecimento gerado na SIX, inclusive nas pesquisas de fontes alternativas de energia e em inovações na área dos biocombustíveis, resulta em padrões comumente aplicados na legislação ambiental e geram patentes importantes para a Petrobras e para o setor petrolífero brasileiro.

#### **3.4. Desvolatilização do Xisto**

Uma infinidade de mecanismos foi proposta para a reação de pirólise do xisto. Geralmente se aceita aquele que sugere a formação inicial de betume, de acordo com observações experimentais dos primeiros instantes da reação e, posteriormente, óleo, gás e água.



O modelo não esclarece suficientemente o fenômeno. Existem dúvidas a respeito: se a produção de óleo, como também, do resíduo carbônico ocorre na primeira, ou apenas na segunda etapa; se o querogênio é convertido completamente ou não. A problemática dessas determinações se deve à dificuldade de se distinguir entre o querogênio e o carbono residual.

Há vários trabalhos que tentam investigar os mecanismos que levam o querogênio aos produtos finais, via reações paralelas e em série. Entre alguns pesquisadores, Li e Yue (2003) assumem a existência de várias reações, um total de 11 reações paralelas de primeira ordem com diferentes energias de ativação e fatores de frequência. Os xistos utilizados foram de Fushum e Maoming da China e Colorado.

A desvolatilização, seja pelo mecanismo químico ou físico, ocorre com uma mudança drástica no volume específico da matéria orgânica, com a transformação em moléculas menores e formação de uma fase gasosa. Isto implica em um grande crescimento da pressão no interior da partícula e um gradiente com relação ao fluido no exterior. A partícula não é quebrada, mas expelle os produtos da reação em altíssima taxa, devido à expansão associada à mudança de fase. Isso faz com que a resistência à transferência de massa seja desprezível.

A temperatura em que o processo começa é por volta de 350 °C, dependendo do tipo do xisto. Inicialmente, água, gás e hidrocarbonetos leves são liberados. À medida que a temperatura se aproxima de 550 °C é liberado mais água, gás e hidrocarbonetos pesados. Se o xisto atinge uma temperatura acima de 550 °C e permanece nela durante uma hora, a desvolatilização dos hidrocarbonetos termina e os voláteis alcançam produção máxima. Na temperatura acima de 550 °C, há decomposição dos carbonatos com liberação de CO<sub>2</sub> e perda de massa (LISBÔA, 1977).

### 3.5. Coeficiente de transferência de calor

O coeficiente de transferência de calor no regime laminar pode ser definido por diferentes equações.

Na literatura, a equação de Levenspiel (1998) é:

$$Nu = \frac{\bar{h} \cdot d_p}{k} = 2 + 1,8 \cdot Re^{\frac{1}{2}} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

Reorganizando a equação, o coeficiente de transferência de calor é apresentado na Equação 2.

$$\bar{h} = \frac{k}{d_p} \left( 2 + 1,8 \cdot Re^{\frac{1}{2}} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \right) \quad (2)$$

Outra equação empírica para previsão do coeficiente de calor é a equação de Rase (1990). A mesma é utilizada para modelos de reator de leito fixo. Segundo seu autor, a previsão do desempenho de reatores adiabáticos é muito incerta a não ser que o coeficiente de transporte seja conhecido para um reator similar e de testes reais. Abaixo, a equação de Rase é descrita:

$$Nu = \frac{\bar{h} \cdot d_p}{k} = 2 + 1,1 \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \cdot Re^{0,6} \quad (3)$$

O coeficiente de transferência obtido com a Equação 3 é apresentado na Equação 4.

$$\bar{h} = \frac{k}{d_p} \left( 2 + 1,1 \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \cdot Re^{0,6} \right) \quad (4)$$

## 4. METODOLOGIA E MODELAGEM MATEMÁTICA

Este trabalho faz parte de uma série de pesquisas desenvolvidas pelo laboratório de Desenvolvimento de Processos com Sistemas Particulados (LDPSP) da Faculdade de Engenharia Química da UNICAMP.

Os dados operacionais são baseados na retorta de pirólise de xisto da Unidade de Negócios da Industrialização do Xisto - SIX - do sistema Petrobras, localizada no município de São Mateus do Sul, no estado do Paraná.

Para a construção do modelo são seguidas as etapas descritas abaixo:

1. Definição dos parâmetros envolvidos.
2. Balanço global de troca térmica na retorta.
3. Balanço térmico na partícula de xisto.
4. Balanço térmico ao longo da altura da retorta, considerando temperatura homogênea nas partículas de xisto.
5. Balanço térmico ao longo da altura da retorta, considerando gradiente de temperatura nas partículas de xisto.

Após a construção do modelo, são avaliados os efeitos do tamanho de partículas cúbicas e paralelepípedicas bem como o efeito do gradiente de temperatura nas partículas no balanço térmico na retorta (reator de leite móvel). Realizaram-se análises de sensibilidade paramétrica para verificar o efeito da alteração do coeficiente de transferência de calor, de condutividade térmica do xisto e calores específicos do xisto e do gás no balanço térmico na retorta.

Para a solução do problema, os programas gerados em linguagem FORTRAN são resolvidos por método numérico.

## **4.1. Método Numérico**

Em geral, equações diferenciais parciais (EDP) são difíceis de resolver analiticamente. Para alguns casos, existem soluções analíticas utilizando algum tipo de transformação de variáveis ou muitas transformações. Esses casos são, em geral, catalogados.

Muitas equações de transferência de calor não podem ser resolvidas analiticamente devido à sua complexidade. No entanto, para o interesse da engenharia, pode-se empregar algum método numérico que permita encontrar o resultado com uma precisão suficiente.

Alguns métodos numéricos para a solução de equações diferenciais parciais começam pela transformação das equações em equações ordinárias discretizando as derivadas espaciais. A precisão e estabilidade dos resultados obtidos dependem da escolha do método.

O processo de discretização representa uma etapa fundamental da solução. A EDP é escrita na forma discretizada em cada ponto de uma malha – conjunto de pontos – criada no espaço envolvido, gerando um sistema de equações diferenciais ordinárias (EDO). Quanto maior o número de pontos, mais precisa a solução e menor o erro em relação à solução exata. Num sistema tridimensional, o número de equações é elevado, podendo atingir facilmente as dezenas, ou mesmo centenas. Necessita-se, portanto, de um método robusto, de boa velocidade e precisão.

### **4.1.1. Método das Linhas**

Um método que atende a essas características, para a solução da equação diferencial parcial é o Método Numérico das Linhas de Schiesser (1991, 1994).



Schiesser trabalha com a discretização das derivadas espaciais, pelo método das diferenças finitas, obtendo-se equações diferenciais ordinárias que são resolvidas pelo método de Runge-Kutta-Fehlberg. O número de equações diferenciais ordinárias a serem resolvidas é igual ao número de pontos da grade.

#### **4.1.2. Método de Runge-Kutta-Fehlberg**

O sistema de EDOs é composto por equações diferenciais no tempo após discretização das derivadas espaciais.

A solução desse sistema de EDOs pode ser obtida através de um dos métodos de integração, como é o caso dos métodos de Runge-Kutta. Os métodos de Runge-Kutta de 4ª e 5ª ordem oferecem bom equilíbrio entre velocidade e precisão.

Foi escolhido o método de Runge-Kutta-Fehlberg, que consiste em um método de 5ª ordem (PRESS, 1992; STARK, 1970). Nesse se emprega a diferença entre as soluções de 5ª e 4ª ordem como parâmetro para avaliar o erro da integração e corrigir o passo automaticamente. Tal método tem uma precisão muito alta e para os casos em que o sistema de EDOs não é rígido, são bastante rápidos.

As Equações 5 e 6 representam a relação entre um ponto conhecido  $(x_i, y_i)$  e um novo ponto  $(x_{i+1}, y_{i+1})$  a ser calculado com o incremento  $h$  da variável independente  $(x)$ .

$$x_{i+1} = x_i + h \quad (5)$$

$$y_{i+1}^{(v)} = y_i + \frac{16}{35}k_1 + \frac{6656}{12825}k_3 + \frac{28561}{56430}k_4 - \frac{9}{50}k_5 + \frac{2}{55}k_6 \quad (6)$$

O erro admissível é avaliado como sendo a diferença entre os termos de quinta e quarta ordem, de acordo com a Equação 7, sendo o método de 4ª ordem dado pela Equação 8.

$$y_{i+1}^{(v)} - y_{i+1}^{(iv)} = \frac{1}{360}k_1 - \frac{128}{4275}k_3 + \frac{2197}{75240}k_4 + \frac{1}{50}k_5 + \frac{2}{55}k_6 \quad (7)$$

$$y_{i+1}^{(iv)} = y_i + \frac{25}{216}k_1 + \frac{1408}{2565}k_3 + \frac{2197}{4104}k_4 - \frac{1}{5}k_5 \quad (8)$$

Os valores dos  $k$ 's envolvidos nas Equações 5 a 8 são dados pelas Equações 9 a 14.

$$k_1 = h \frac{dy}{dx}(x_i, y_i) \quad (9)$$

$$k_2 = h \frac{dy}{dx}\left(x_i + \frac{1}{4}h, y_i + \frac{1}{4}k_1\right) \quad (10)$$

$$k_3 = h \frac{dy}{dx}\left(x_i + \frac{3}{8}h, y_i + \frac{3}{32}k_1 + \frac{9}{32}k_2\right) \quad (11)$$

$$k_4 = h \frac{dy}{dx}\left(x_i + \frac{12}{13}h, y_i + \frac{1932}{2197}k_1 - \frac{7200}{2197}k_2 + \frac{7296}{2197}k_3\right) \quad (12)$$

$$k_5 = h \frac{dy}{dx}\left(x_i + h, y_i + \frac{439}{216}k_1 - 8k_2 + \frac{3680}{513}k_3 - \frac{845}{4104}k_4\right) \quad (13)$$

$$k_6 = h \frac{dy}{dx}\left(x_i + \frac{1}{2}h, y_i - \frac{8}{27}k_1 + 2k_2 - \frac{3544}{2565}k_3 + \frac{1859}{4104}k_4 + \frac{11}{40}k_5\right) \quad (14)$$

O possível inconveniente dos métodos de Runge-Kutta é aplicá-los ao caso em que existe grande rigidez numérica. De maneira simplificada, a rigidez numérica ocorre quando o sistema de EDOs apresenta elementos que variam em diferentes escalas. Nesse caso, para alcançar a precisão desejada, pode ser necessário o uso de passos inviavelmente pequenos. Os métodos como Euler implícito ou os de Adam-Moulton de múltiplos passos são então comumente empregados.

### 4.1.3. Método de Zero da Função

Para a determinação simultânea dos perfis de temperatura do gás e do xisto, além da solução simultânea de EDOs, é necessário utilizar um método de busca de raiz, já que o método é iterativo.

Na busca de raízes de funções, a utilização de métodos intervalares (*“bracketing methods”*) consiste na checagem da mudança de sinal da variável dependente dentro de um intervalo estimado da variável independente. A partir do intervalo inicial, utilizam-

se diferentes métodos para diminuir a largura desse intervalo a fim de se obter a solução correta (PRESS, 1992; STARK, 1970).

Métodos de buscas incrementais são métodos intervalares que detectam subintervalos nos quais ocorre a mudança de sinal e o refino da busca do zero da função é feito pela redução do intervalo.

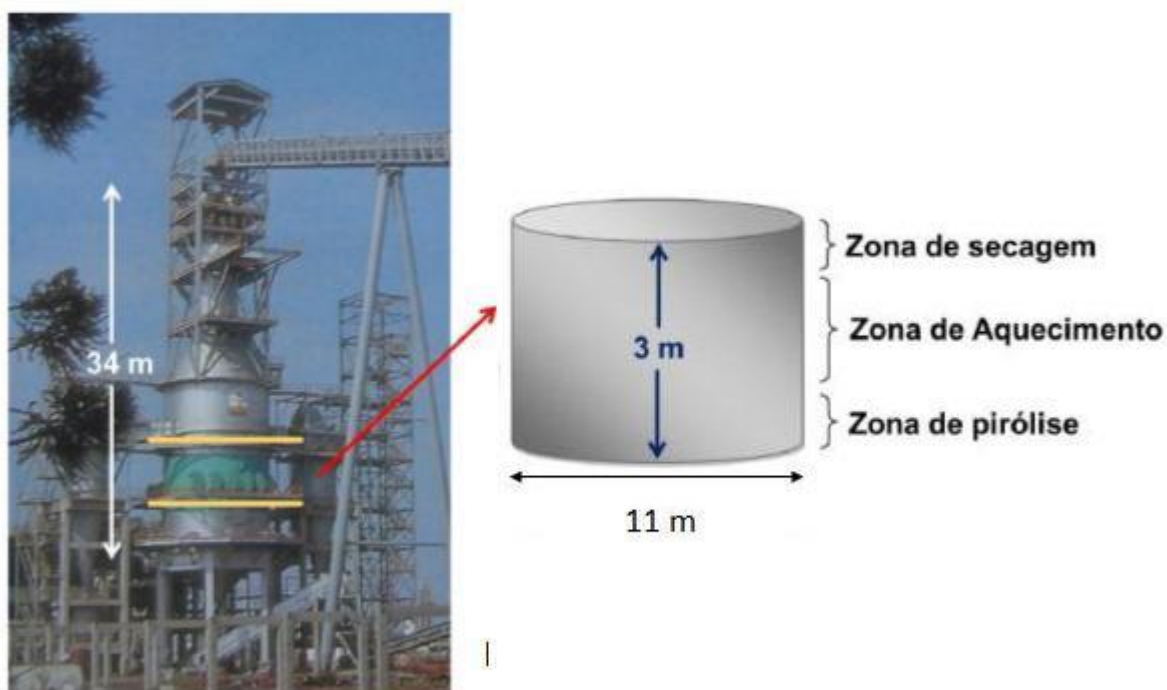
A busca incremental divide o intervalo formado inicialmente em diversos subintervalos e nesses busca-se onde ocorre a mudança de sinal. O processo é repetido no subintervalo em que a raiz foi detectada, dividindo o subintervalo em pedaços menores.

Um desafio da busca incremental é a escolha do comprimento do incremento. Se o comprimento é muito pequeno, a busca pode demorar muito tempo. Se o comprimento for muito grande, há possibilidade de o incremento abarcar várias raízes, se elas estiverem muito próximas, não sendo possível detectá-las.

## **4.2. Definição dos Parâmetros**

As propriedades físicas do xisto usadas na modelagem foram obtidas em trabalhos realizados no LDPSP ou outras fontes citadas.

A retorta em estudo possui 34 metros de altura e diâmetro de 5,5 metros (protótipo), porém a região de estudo se restringe a 3 metros de altura. Essa região de 3 metros compreende a zona de secagem, de aquecimento e pirólise (Figura 3).



**Figura 3: Dimensões da retorta e corte ilustrativo do leito de pirólise do módulo industrial**

Acima do leito, situa-se o sistema de carga e, abaixo, o sistema de descarga. A entrada da corrente gasosa está localizada ligeiramente abaixo da zona de pirólise e a saída ocorre ligeiramente acima da zona de secagem pela lateral da retorta.

#### 4.2.1. Calor Específico - $c_p$

O calor específico do xisto foi obtido no trabalho de Lee (2001) que realizou ensaios no calorímetro de varredura diferencial DSC-50. A equação encontrada no seu trabalho para a faixa de temperatura compreendida entre 100 °C e 300 °C para xisto cru é:

$$c_x = -126 + 30,1 \cdot T - 2,36 \cdot 10^{-1} \cdot T^2 + 7,62 \cdot 10^{-4} \cdot T^3 - 8,63 \cdot 10^{-7} \cdot T^4 \text{ [J kg}^{-1} \text{ °C}^{-1}] \quad (15)$$

Para uma temperatura de 250 °C, o calor específico do xisto é 1184 J kg<sup>-1</sup> °C<sup>-1</sup>. Essa temperatura é média entre as temperaturas de entrada e saída das partículas de xisto na retorta industrial do processo Petrosix que são 25 °C e 480 °C.

O calor específico do gás foi considerado igual ao do vapor d'água devido a sua predominância na constituição da corrente gasosa (85% massa). Para uma temperatura intermediária de 400 °C, o calor específico é de 2050 J kg<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>. Na retorta industrial do processo Petrosix, essa corrente de aquecimento encontra-se entre temperaturas de 550 °C e 260 °C.

#### **4.2.2. Condutividade Térmica – k**

Segundo Schön (1996), a condutividade térmica da partícula de xisto é 3,84 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>. O autor afirma que este valor pode variar entre 1,5 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup> e 5 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>, dependendo das condições geológicas do local da rocha.

Seipold e Huenges (1997) ratificam o efeito da anisotropia e afirmam que geralmente a condutividade térmica é baixa na direção perpendicular e mais alta na direção paralela ao plano de foliação. Neste trabalho, a condutividade térmica foi considerada homogênea na partícula.

Segundo Spiers (1977), a condutividade térmica da corrente gasosa é definida pela Equação 16:

$$k = -0,7929310^{-2} + 0,7603010^{-4} \cdot T + 0,31270^{-7} \cdot T^2 - 0,1080510^{-10} \cdot T^3 [\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}] \quad (16)$$

A Equação 16 pode ser utilizada para temperaturas compreendidas entre 250 K e 2000 K para vapor d'água e 1 atm. A condutividade na temperatura de 673 K (400 °C) é 0,054 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>.

#### **4.2.3. Coeficiente de Transferência de Calor – h**

A Equação 2 proposta por Levenspiel (1998), já apresentada na Seção 3.5, permite o cálculo do coeficiente de transferência de calor (*h*) no regime de leito fixo.

$$\bar{h} = \frac{k}{d_p} \left( 2 + 1,8 \cdot \text{Re}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{Pr}^{\frac{1}{3}} \right) \quad (2)$$

A Tabela 5 apresenta as propriedades do fluido vapor d'água utilizadas no trabalho.

**Tabela 5: Valores do gás de pirólise (vapor d'água) a 400 °C**

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidades
Massa Específica <sup>1</sup>	$\rho_g$	0,327	[kg m <sup>-3</sup> ]
Vazão Mássica	$W_g$	14,44	[kg s <sup>-1</sup> ]
Viscosidade dinâmica <sup>2</sup>	$\mu_g$	0,00002426	[kg m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> ]
Condutividade térmica <sup>3</sup>	$k_g$	0,054108	[W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
Calor específico	$c_g$	2050	[J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]

Fonte: <sup>1</sup> Lee (2001), <sup>2</sup> Geankoplis (2003), <sup>3</sup> Spiers (1977)

Para o cálculo do coeficiente de transferência de calor pela Equação 2 é necessária a velocidade do gás (Equação 17), assim como os números de Reynolds e Prandtl, descritos pelas Equações 18 e 19.

$$v = \frac{W_g}{\rho_g \cdot A_s} \quad (17)$$

$$\text{Re} = \frac{\rho_g \cdot v \cdot d_p}{\mu_g} \quad (18)$$

$$\text{Pr} = \frac{\mu_g \cdot c_g}{k_g} \quad (19)$$

A velocidade é calculada para uma vazão mássica do gás de 80% da vazão mássica do xisto, que é 65 t/h. A velocidade do gás na retorta é 1,86 m/s.

Como para o cálculo do coeficiente de transferência de calor é necessária a utilização do diâmetro da partícula, adotou-se para as partículas cúbicas o próprio valor da aresta e para as partículas paralelepípedicas a média aritmética entre as três dimensões. Foi considerada esta simplificação, já que o diâmetro da esfera de igual volume aos paralelepípedos estudados coincide com o valor da média aritmética.

Os números de Prandtl e de Reynolds variam com as dimensões das diferentes partículas estudadas.

Outra equação empírica para previsão do coeficiente de troca térmica é a equação de Rase (1990) – Equação 4. É adequada para reatores de leito fixo.

$$\bar{h} = \frac{k}{d_p} \left( 2 + 1,1 \cdot \text{Pr}^{\frac{1}{3}} \cdot \text{Re}^{0,6} \right) \quad (4)$$

Os valores encontrados para o coeficiente de transferência de calor segundo Levenspiel (1998) e Rase (1990) para as partículas de xisto com diferentes dimensões são apresentados na Tabela 6.

**Tabela 6: Diâmetros médios e valores de coeficiente de transferência de calor segundo Levenspiel (1998) e Rase (1990) para partículas de xisto com diferentes dimensões**

	Dimensões (cm)	dp (m)	h (J/(s.m2.K))	
			Levenspiel (1998)	Rase (1990)
<b>Cúbica</b>	2	0,02	38,81	43,42
	6	0,06	21,09	26,30
	10	0,1	16,02	21,05
	14	0,14	13,40	18,23
<b>Paralelepípedica</b>	14x7x4	0,08	18,05	23,18
	12x6x3	0,07	19,40	24,58
	9x5x3	0,06	21,09	26,30

Pela Tabela 6, pode-se confirmar que há uma coerência nos valores dos coeficientes de transferência de calor para ambas equações. Para o trabalho, foi adotada a equação de Levenspiel (1998).

#### **4.2.4. Razão entre Área Superficial das Partículas e Volume do Leito – a**

A razão entre a área superficial de uma única partícula e o volume que ela ocupa no leito é dada pelas Equações 20 a 23.

A área superficial da partícula de arestas iguais é calculada pela Equação 20:

$$A_p = n \cdot L^2 \quad (20)$$

A partícula cúbica terá volume calculado pela Equação 21:

$$V_c = L^3 \quad (21)$$

Adotando-se porosidade do leito de 0,5, calcula-se o volume ocupado por essa partícula no leito pela Equação 22.

$$V_p = \frac{V_c}{\varepsilon} \quad (22)$$

Finalmente, a razão entre a área superficial e o volume do leito ocupado para uma partícula cúbica é dado pela Equação 23.

$$a = \frac{A_p}{V_p} \quad (23)$$

Procede-se de forma semelhante para partículas paralelepípedicas.

Na Tabela 7 encontram-se as razões entre área superficial das partículas e volume do leito para as diferentes partículas de xisto.

**Tabela 7: Razões entre área superficial e volume do leito para diferentes partículas de xisto**

	Dimensões (cm)	a (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )
<b>Cúbica</b>	2	150
	6	50
	10	30
	14	21
<b>Paralelepípedica</b>	14x7x4	46
	12x6x3	58
	9x5x3	64

Como efetivamente nem toda a área esteja exposta para contato, será considerado para o parâmetro “a” a metade do valor da Tabela 7 nos balanços térmicos.



#### **4.2.5. Dimensões das partículas**

No processo de pirólise de xisto da Petrobras, após a britagem, diferentes tamanhos de partículas são inseridos na retorta.

Como descrito na Seção 3.3.2, frações finas são separadas e retornadas à mina. Partículas de dimensão superior a 3 polegadas também não conseguem passar na peneira para entrada no processo.

Como o tamanho influencia a troca térmica entre as partículas de xisto e o gás, adotaram-se partículas com diferentes dimensões neste trabalho.

Serão analisadas partículas cúbicas com arestas de 2 cm, 6 cm, 10 cm e 14 cm. Vale salientar que essas duas últimas não conseguiriam entrar no processo, já que ultrapassam o limite superior de passagem na peneira. As mesmas só foram adotadas como ferramenta de estudo para analisar o grau de impacto destas dimensões para o balanço térmico na retorta.

Usualmente, encontram-se partículas com arestas de diferentes dimensões – paralelepípedos. Para sua entrada na retorta, são necessárias duas arestas com dimensões inferiores a 3 polegadas para encaixar nas aberturas da peneira.

A Figura 4 apresenta uma partícula retirada do transportador de correia do processo Petrosix. Suas dimensões definem a maior partícula paralelepipedica a ser estudada neste trabalho.



**Figura 4: Partícula de xisto cru do Processo Petrosix**

As dimensões da partícula da Figura 4 (P1) foram consideradas 20% maiores que a de uma partícula cujo tamanho é adotado como padrão.

A Tabela 8 apresenta dimensões das partículas paralelepipedicas, assim como suas siglas, que são utilizadas no trabalho.

**Tabela 8: Dimensões dos partículas paralelepipedicas de xisto**

Paralelepipedo	(%)	Comprimento (cm)	Altura (cm)	Profundidade (cm)
P1	120	14	7	4
P2	100	12	6	3
P3	80	9	5	3

A adoção desse padrão (P2) torna-se necessária durante as análises de sensibilidade paramétrica. Como se almeja verificar o impacto das mudanças em determinadas variáveis individualmente, os demais parâmetros devem ser mantidos constantes e utilizar um padrão que se assemelha ao processo industrial é a melhor escolha.

Foram adotadas variações de até 20 % nas dimensões das partículas paralelepipedicas que permitiram analisar o grau do impacto dos tamanhos nos perfis de temperatura de ambas correntes na troca térmica.

### 4.3. Balanço de Energia

Os valores utilizados nos cálculos para as trocas térmicas entre as partículas de xisto e o gás se encontram nas Tabelas 9 e 10.

**Tabela 9: Valores para os parâmetros utilizados nos cálculos**

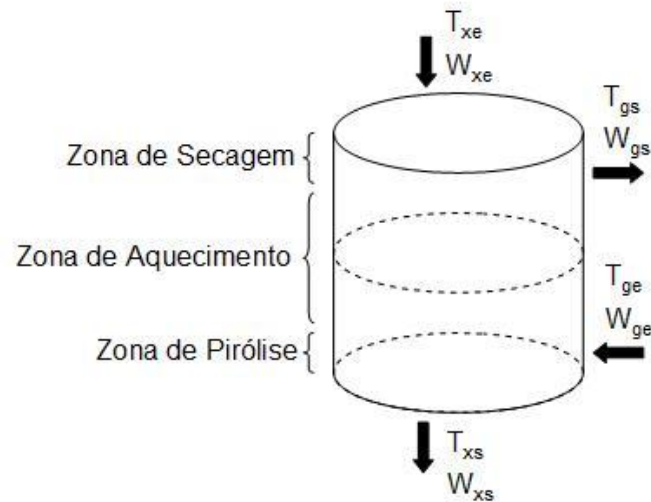
Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidades
Área transversal do leito	$A_s$	23,76	[m <sup>2</sup> ]
Calor específico do gás	$c_g$	2050	[J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
Calor específico do xisto	$c_x$	1184	[J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
Condutividade térmica do xisto	$k_x$	3,84	[W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
Massa Específica do xisto	$\rho_x$	2100	[kg m <sup>-3</sup> ]
Vazão Mássica do gás	$W_g$	14,44	[kg s <sup>-1</sup> ]
Vazão Mássica do xisto	$W_x$	18,06	[kg s <sup>-1</sup> ]
Velocidade do gás	$v$	1,86	[m s <sup>-1</sup> ]

**Tabela 10: Valores para os parâmetros utilizados nos cálculos para as diferentes partículas estudadas**

	Dimensões (cm)	h (W/(m2.K))	a (m2/m3)
<b>Cúbica</b>	2	38,81	75
	6	21,09	25
	10	16,02	15
	14	13,40	11
<b>Paralelepipedica</b>	P1 - 14x7x4	18,05	23
	P2 - 12x6x3	19,40	29
	P3 - 9x5x3	21,09	32

#### 4.3.1. Balanço Térmico Global

O balanço global de troca térmica numa retorta requer as vazões e temperaturas de entrada e saída do xisto e do gás. A Figura 5 apresenta a disposição das correntes de entrada e saída do sistema adotado.



**Figura 5: Representação ilustrativa do leito de pirólise identificando as variáveis envolvidas no balanço de energia**

Uma partícula de xisto no topo do leito à temperatura ambiente ( $T_{xe} = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ), desloca-se pela gravidade, saindo da retorta a uma temperatura maior ( $T_{xs}$ ). Seu tempo de residência é aproximadamente 90 minutos. O gás, aquecido a aproximadamente  $550 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $T_{ge}$ ) entra na retorta na base do leito e ascende em contracorrente com o xisto, saindo a uma temperatura menor ( $T_{gs}$ ). Inicialmente, o xisto passa por uma região de secagem, depois de aquecimento e, finalmente, de pirólise (Figura 5). Os valores adotados para temperaturas de entrada e tempo de residência são similares ao caso industrial.

Na situação estudada, como as partículas de xisto são pobres em óleo e com baixa umidade, a vazão mássica do xisto de entrada é considerada a mesma na saída ( $W_{xe} = W_{xs} = W_x$ ). Conseqüentemente, a vazão mássica da corrente de gás é assumida constante ( $W_{ge} = W_{gs} = W_g$ ). Rigorosamente, essas condições são válidas apenas na região de aquecimento.

Devido à baixa umidade e teor de óleo, o balanço térmico abrange aproximadamente também as regiões de secagem e pirólise como demonstrado na Figura 5. As características do xisto estudado (umidade e teor de óleo baixos) permitem que o modelo se assemelhe com o aquecimento de um material inerte.

Assim,  $W_x$  será a vazão mássica na entrada da retorta e não no início da zona de aquecimento e  $W_g$  a vazão mássica na saída da zona de pirólise e não no fim da zona de aquecimento (o gás de aquecimento está em contra-corrente).

Rigorosamente, as temperaturas na entrada na zona de aquecimento estariam em torno de 100 °C e na sua saída 350 °C.

Considerando a equação da conservação da energia:

$$\Delta U = Q - W \quad (24)$$

Desdobrando os termos da Equação 24, obtém-se a Equação 25.

$$\sum_s (H_s + E_{c,s} + E_{p,s}) \cdot W_{sai} - \sum_e (H_e + E_{c,e} + E_{p,e}) \cdot W_e = \dot{Q} - W_s \quad (25)$$

Considerando um sistema em regime estacionário e adiabático, desprezam-se os termos de variação da energia cinética e potencial. Além disso, não ocorre trabalho de eixo no sistema.

$$(H_{g,s} \cdot W_g + H_{x,s} \cdot W_x) - (H_{g,e} \cdot W_g + H_{x,e} \cdot W_x) = 0 \quad (26)$$

A variação de entalpia para gases, nas condições da retorta, e para sólidos é:

$$\Delta H = \int_{T_i}^{T_f} c_p dT \quad (27)$$

Aplicando-se a Equação 27 para as correntes de xisto e do gás:

$$W_g \cdot \left( \int_{T_{ge}}^{T_{gs}} c_g dT \right) = W_x \cdot \left( \int_{T_{xe}}^{T_{xs}} c_x dT \right) \quad (28)$$

Considerando constantes os calores específicos, os balanços de energia são dados pelas Equações 29 a 31.

$$Q_x = Q_g \quad (29)$$

$$Q_x = W_x \cdot c_x \cdot (T_{xs} - T_{xe}) \quad (30)$$

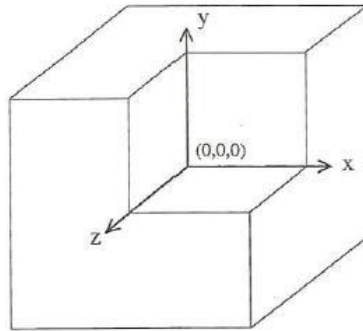
$$Q_g = W_g \cdot c_g \cdot (T_{gs} - T_{ge}) \quad (31)$$

O calor latente não foi considerado devido não ser significativo neste processo.

### 4.3.2. Balanço Térmico na Partícula

Nessa seção, é apresentado o modelo matemático que descreve o perfil de temperaturas no interior das partículas de xisto expostas a uma corrente gasosa de temperatura fixa  $T_g$ .

A origem do sistema de coordenadas cartesiano (ponto 0,0,0) foi colocada no centro da partícula, como mostra a Figura 6.



**Figura 6: Posicionamento do sistema de coordenadas cartesianas na partícula cúbica de xisto (LISBÔA, 1997)**

Supondo valores constantes para as propriedades físicas da partícula de xisto, o balanço de energia pode ser descrito pela equação diferencial parcial (EDP) apresentada na Equação 32.

$$\frac{\partial T_x}{\partial t} = \alpha \cdot \left( \frac{\partial^2 T_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_x}{\partial z^2} \right) \quad (32)$$

em que  $\alpha = \frac{k_x}{\rho_x c_x}$ , a difusividade térmica do xisto.

Essa equação considera a variação da temperatura em função do tempo dependente das características do material (representadas pela difusividade térmica  $\alpha$  do xisto) e que o gradiente de temperatura está presente em todas as direções da partícula (representado pelo operador Laplaciano estendido a todas as coordenadas do espaço cartesiano).

As condições de contorno das partículas são mostradas nas Equações de 33 a 39.

$$x = 0 \quad \frac{\partial T_x}{\partial x} = 0 \quad (33)$$

$$x = \frac{L}{2} \quad -k_x \cdot \frac{\partial T_x}{\partial x} = h \cdot (T_{\text{sup}} - T_g) \quad (34)$$

$$y = 0 \quad \frac{\partial T_x}{\partial y} = 0 \quad (35)$$

$$y = \frac{L}{2} \quad -k_x \cdot \frac{\partial T_x}{\partial y} = h \cdot (T_{\text{sup}} - T_g) \quad (36)$$

$$z = 0 \quad \frac{\partial T_x}{\partial z} = 0 \quad (37)$$

$$z = \frac{L}{2} \quad -k_x \cdot \frac{\partial T_x}{\partial z} = h \cdot (T_{\text{sup}} - T_g) \quad (38)$$

$$t = 0 \quad T_x = T_{x_0} \quad (39)$$

As condições de contorno na superfície da partícula (Equações 34, 36 e 38) são do terceiro tipo: o calor trocado por condução é igual ao calor trocado por convecção.

A solução numérica da EDP foi obtida por discretização das dimensões espaciais, gerando um conjunto de equações diferenciais ordinárias – uma para cada ponto de uma malha estabelecida na partícula – que é então resolvido.

### **4.3.3. Balanço Térmico na Retorta – Temperatura Homogênea nas Partículas**

Nesta seção é apresentado o modelo matemático que calcula a troca térmica na retorta entre a corrente gasosa e o xisto, considerando partículas sem gradiente térmico em seu interior. A corrente gasosa com calor específico constante  $c_g$  está numa temperatura variável  $T_g$  e a partícula está numa temperatura variável  $T_x$ . Ambas temperaturas variáveis são calculadas e variam ao longo do eixo vertical da retorta.

Os balanços de energia do xisto e do gás ao longo de um comprimento  $dz$  são dados pelas Equações 40 e 41:

$$\frac{\partial T_x}{\partial z_L} = \frac{h \cdot a \cdot A_t}{W_x \cdot c_c} \cdot (T_g - T_x) \quad (40)$$

$$\frac{\partial T_g}{\partial z_L} = \frac{h \cdot a \cdot A_t}{W_g \cdot c_g} \cdot (T_g - T_x) \quad (41)$$

As condições de contorno são:

$$z_L = 0 \qquad T_x = T_{xe} \qquad T_g = T_{gs} \quad (42)$$

Os balanços de energia podem ser aplicados ao longo de toda a retorta para os casos de umidade de xisto baixa e pequena perda de material pela pirólise (teor de óleo baixo). Caso contrário, torna-se válida somente na região de aquecimento onde não há alterações nas vazões de xisto e gás. A solução das equações permite encontrar as temperaturas do gás e do xisto ao longo da retorta.

A integração começa pelo topo da retorta, local em que a temperatura do gás que deixa o leito é desconhecida. A temperatura do gás ( $T_{gs}$ ) no topo é, contudo, uma condição de contorno (Equação 41). Portanto, a solução requer que essa temperatura seja proposta e variada até que, pela integração até a base da retorta, a correta temperatura do gás na entrada seja atingida. Esse cálculo pode ser realizado por método numérico, fixando-se uma tolerância para a diferença entre o valor calculado e o valor conhecido da temperatura do gás que entra na retorta. No trabalho, será usado um método intervalar de busca incremental para encontrar a solução.

#### **4.3.4. Balanço Térmico na Retorta – Temperatura Heterogênea nas Partículas**

Nesta seção é apresentado o modelo matemático que calcula a troca térmica na retorta entre a corrente gasosa e as partículas de xisto, considerando que estas possuem gradiente térmico em seu interior. A corrente gasosa com calor específico constante  $c_g$  está numa temperatura variável  $T_g$  e a superfície da partícula está numa temperatura variável  $\overline{T_{sup}}$ . Ambas temperaturas variáveis são calculadas e variam ao longo do eixo vertical da retorta.



A temperatura do xisto utilizada -  $\overline{T_{\text{sup}}}$  - no balanço térmico corresponde a média aritmética das temperaturas superficiais (faces expostas à transferência de calor com a corrente gasosa).

As Equações 43 e 44 descrevem o perfil de temperaturas no xisto e no gás.

$$\frac{\partial T_x}{\partial t} = \alpha \cdot \left( \frac{\partial^2 T_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_x}{\partial z^2} \right) \quad (43)$$

$$\frac{\partial T_g}{\partial t} = \frac{h \cdot a \cdot A_t \cdot v}{W_g \cdot c_g} \cdot (T_g - \overline{T_{\text{sup}}}) \quad (44)$$

As condições de contorno são:

$$x = 0 \quad \frac{\partial T_x}{\partial x} = 0 \quad (45)$$

$$x = \frac{L}{2} \quad -k_x \cdot \frac{\partial T_x}{\partial x} = h \cdot (\overline{T_{\text{sup}}} - T_g) \quad (46)$$

$$y = 0 \quad \frac{\partial T_x}{\partial y} = 0 \quad (47)$$

$$y = \frac{L}{2} \quad -k_x \cdot \frac{\partial T_x}{\partial y} = h \cdot (\overline{T_{\text{sup}}} - T_g) \quad (48)$$

$$z = 0 \quad \frac{\partial T_x}{\partial z} = 0 \quad (49)$$

$$z = \frac{L}{2} \quad -k_x \cdot \frac{\partial T_x}{\partial z} = h \cdot (\overline{T_{\text{sup}}} - T_g) \quad (50)$$

$$t = 0 \quad T_x = T_{xe} \quad T_g = T_{gs} \quad (51)$$

A solução numérica da EDP, com suas condições de contorno, foi obtida por discretização das dimensões espaciais, o que gera um conjunto de equações diferenciais ordinárias – uma para cada ponto de uma malha estabelecida na partícula – que é então resolvido. Portanto, na Equação 43, cada T calculado representa a temperatura de um nó da malha dentro da partícula.

Da mesma forma do modelo matemático anterior, a integração começa pelo topo da retorta, local em que a temperatura do gás que deixa o leito é desconhecida. A temperatura do gás ( $T_{gs}$ ) no topo é, contudo, uma condição de contorno (Equação 51).

Portanto, a solução requer que essa temperatura seja proposta e variada até que, pela integração até a base da retorta, a correta temperatura do gás na entrada seja atingida. A solução foi obtida pelo método intervalar de busca incremental.

## 5. RESULTADOS

### 5.1. Balanço Térmico Global na Retorta

Como analisado na Seção 4.3.1, o calor recebido pelo xisto é o mesmo cedido pelo gás. As Equações 30 e 31 determinam as taxas de troca de calor na transferência estudada.

$$Q_x = W_x \cdot c_x \cdot (T_{xs} - T_{xe}) \quad (30)$$

$$Q_g = W_g \cdot c_g \cdot (T_{gs} - T_{ge}) \quad (31)$$

Para o xisto, adota-se um valor de vazão mássica de 65 t/h, calor específico de  $1184 \text{ J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ , temperatura de entrada no topo da retorta de  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  e temperatura de saída de  $469 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Para o gás, uma vazão mássica correspondente a 80% da vazão mássica do xisto, calor específico igual a  $2050 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ , temperatura da entrada de  $550 \text{ }^\circ\text{C}$  na base da retorta e temperatura de saída de  $229 \text{ }^\circ\text{C}$ .

O balanço térmico global acima foi calculado com temperatura homogênea na partícula de xisto e as temperaturas de saída similares ao caso industrial. Caso a partícula considerada possua gradiente térmico, deve ser adotada a temperatura média da partícula.

Nas condições consideradas, as quantidades de calor dadas pelas Equações 30 e 31 possuem valores próximos a  $9500 \text{ kJ s}^{-1}$ .

### 5.2. Balanço Térmico na Partícula

Nesta seção, apresenta-se o balanço térmico nas partículas, que gera temperaturas em cada ponto de uma malha tridimensional dentro das partículas de

xisto expostas a um gás com temperatura fixa de 400 °C por um período de 90 minutos, igual ao tempo de residência do xisto dentro da retorta Petrosix.

O programa utilizado está na Seção 9.1.1 e os resultados gerados para um dos casos apresentados na Seção 9.2.1.

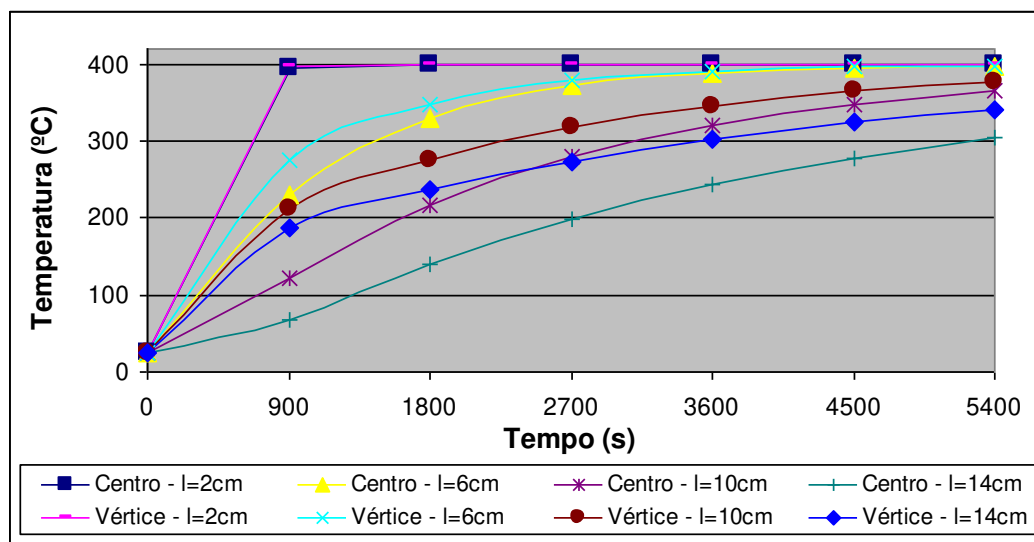
O programa necessita como dados de entrada: coeficiente de transferência de calor, condutividade térmica do xisto, calor específico do xisto, massa específica do xisto, a temperatura fixa adotada e dimensões da partícula.

A malha tridimensional de temperaturas possui 11 pontos em cada um dos eixos, totalizando 1331 pontos.

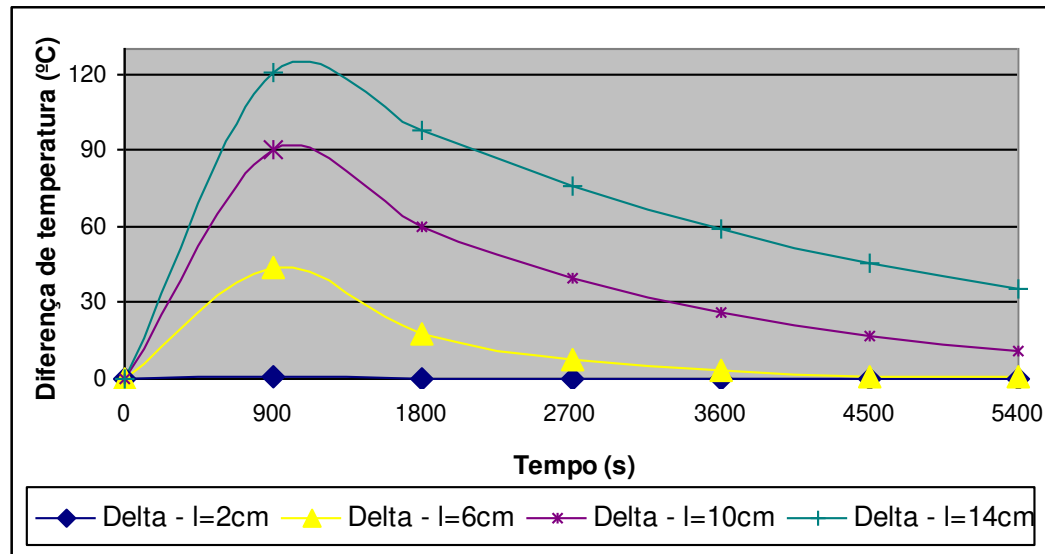
Realizou-se uma análise de sensibilidade paramétrica que leva em consideração algumas variáveis que podem impactar na transferência de calor.

### 5.2.1. Efeito da dimensão das partículas de xisto

As temperaturas do centro e do vértice de partículas cúbicas com diferentes arestas expostas a um gás com temperatura fixa de 400 °C por um período de 90 minutos são apresentadas na Figura 7. A Figura 8 apresenta a diferença de temperatura entre o vértice (mais alta) e o centro (mais baixa) da partícula.



**Figura 7: Temperatura no centro e no vértice para partículas cúbicas com diferentes arestas expostas à temperatura de 400 °C**



**Figura 8: Diferença entre as temperaturas no centro e no vértice para partículas cúbicas com diferentes arestas expostas à temperatura de 400 °C**

Como pode ser visto nas Figuras 7 e 8, as diferenças de temperatura entre o vértice e o centro tornam-se mais acentuadas para partículas com maior dimensão e são mais proeminentes no início do processo.

A partícula cúbica de 2 cm não apresentou gradiente de temperatura em seu interior. Este fato pode ser justificado com o cálculo do número de Biot que desempenha um papel fundamental nos problemas de condução que envolvem efeitos convectivos nas superfícies (INCROPERA, 2008).

O número de Biot é apresentado na Equação 52.

$$Bi = \frac{h.L_c}{k} \quad (52)$$

Se a condição de  $Bi < 0,1$  for satisfeita, a hipótese de distribuição de temperatura uniforme no sólido é razoável.

Considerando  $L_c$  igual a 1 cm (metade da aresta da partícula), condutividade térmica  $3,84 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  e coeficiente de transferência de calor é  $38,8 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ , o Bi é 0,1, indicando que o resultado obtido no modelo é coerente, já que apresenta gradiente de temperatura no interior da partícula cúbica de 2 cm desprezível.

As temperaturas no centro e no vértice de partículas paralelepípedicas com diferentes dimensões expostas à temperatura fixa de  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  por um período de 90 minutos são apresentadas na Figura 9. As dimensões das partículas P1 (maior), P2 e P3 (menor) podem ser encontradas na Tabela 7. A Figura 10 apresenta a diferença de temperatura entre o vértice (mais alta) e o centro (mais baixa) na partícula.

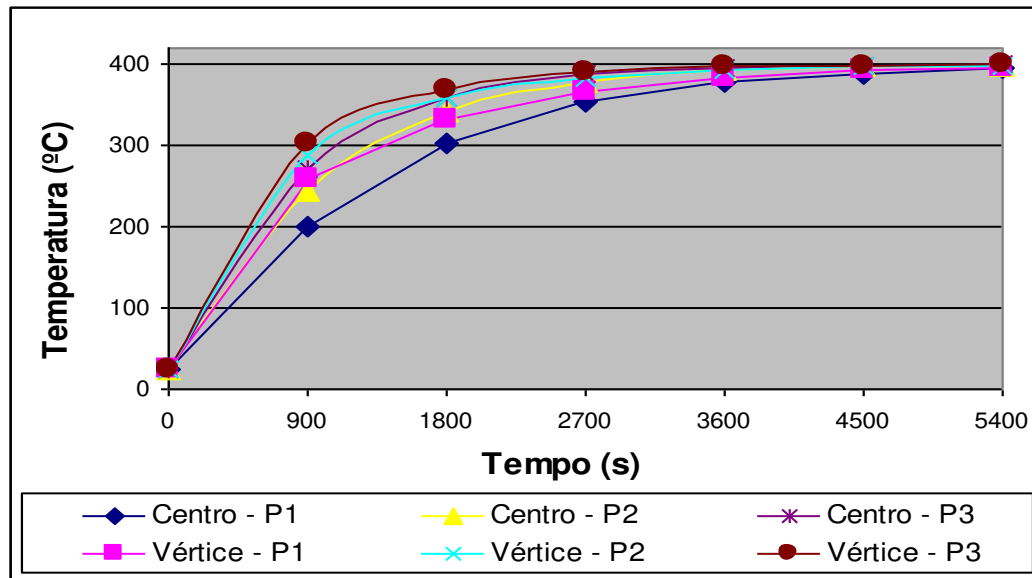
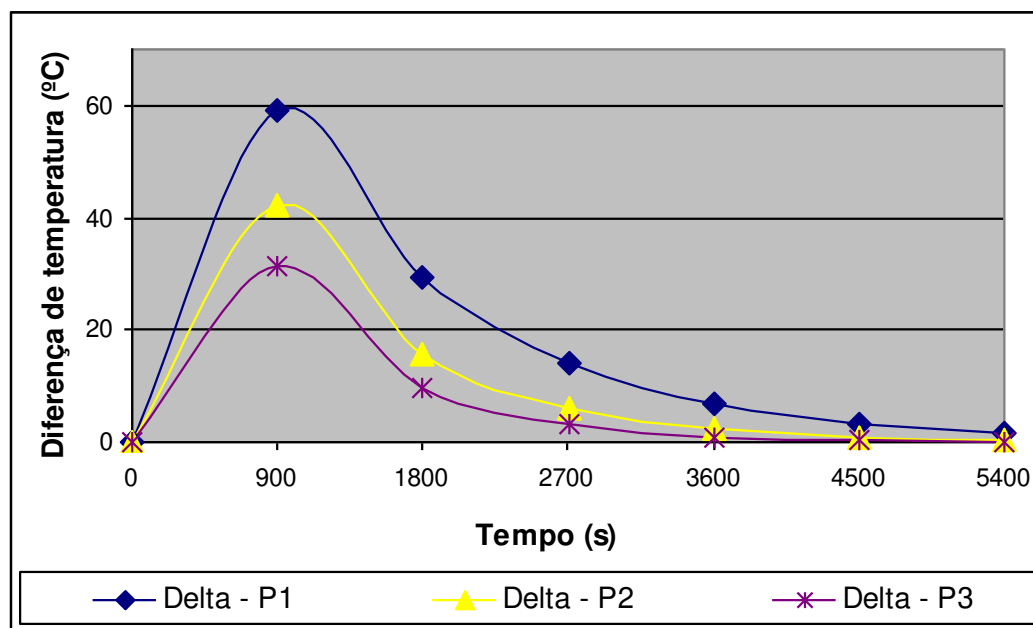


Figura 9: Temperatura no centro e no vértice para partículas paralelepípedicas expostas à temperatura de  $400 \text{ }^\circ\text{C}$



**Figura 10: Diferença entre as temperaturas no centro e no vértice para partículas paralelepípedicas expostas à temperatura de 400 °C**

A mesma conclusão obtida para partículas cúbicas vale para as partículas paralelepípedicas: como pode ser visto nas Figuras 9 e 10, as diferenças de temperatura entre o vértice e o centro tornam-se mais acentuadas para partículas paralelepípedicas com maiores dimensões e são mais proeminentes no início do processo.

### 5.2.2. Efeito do coeficiente de transferência de calor – h

As temperaturas calculadas nos pontos da malha tridimensional na partícula padrão de xisto exposta à temperatura fixa de 400 °C por um período de 90 minutos são função do coeficiente de transferência de calor. A Figura 11 apresenta o efeito dos valores do coeficiente de transferência de calor na temperatura do centro e do vértice da partícula padrão. O valor central do “h” adotado foi  $19,40 \text{ J s}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ . A diferença entre as temperaturas do vértice (mais alta) e do centro (mais baixa) é apresentada na Figura 12.

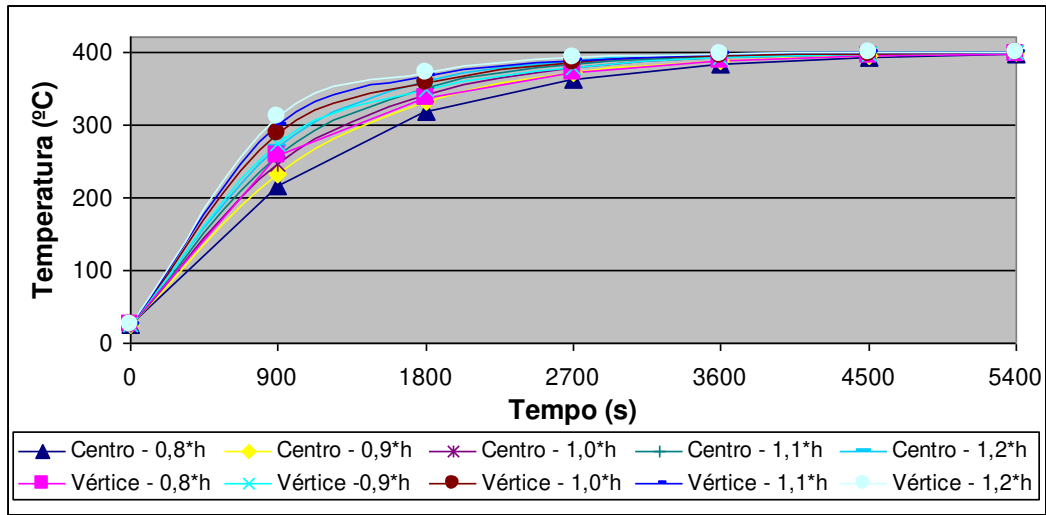


Figura 11: Temperatura no centro e no vértice da partícula padrão exposta à temperatura de 400 °C para diferentes coeficientes de transferência de calor

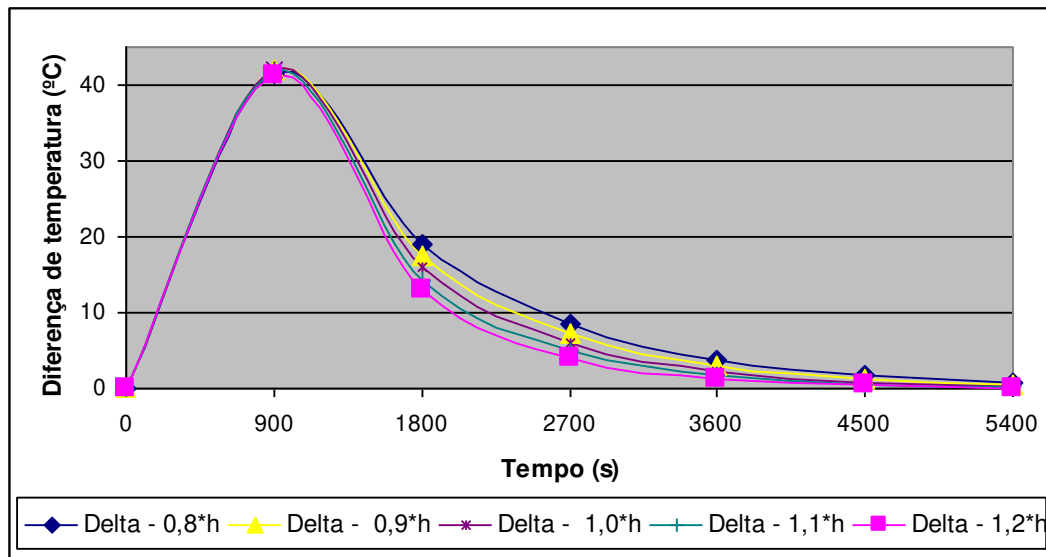


Figura 12: Diferença entre as temperaturas no centro e no vértice da partícula padrão exposta à temperatura de 400 °C para diferentes coeficientes de transferência de calor

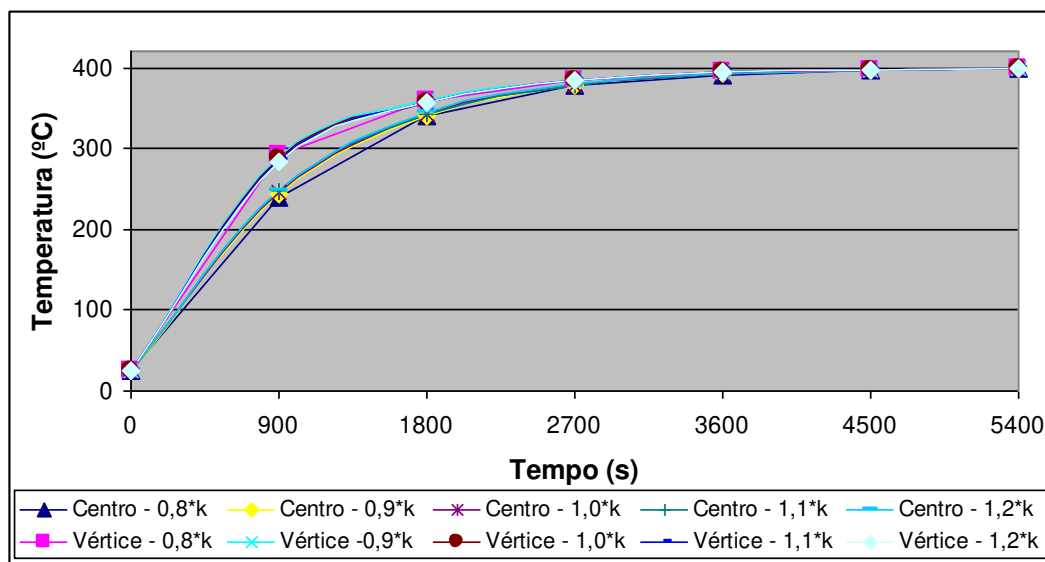
No tempo de 900 segundos, as diferenças de temperatura entre o vértice e o centro da partícula estão em torno de 42 °C para qualquer coeficiente de transferência de calor. Essas diferenças no tempo de 5400 segundos são desprezíveis para qualquer valor do coeficiente de transferência de calor.



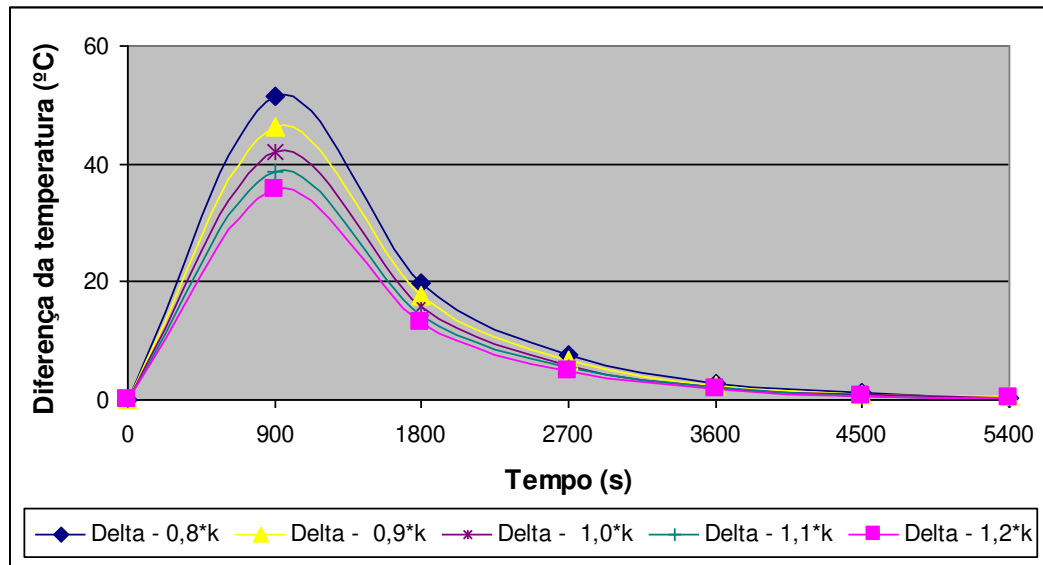
Pode-se afirmar que as diferenças de temperatura entre o vértice e o centro são inversamente proporcionais ao coeficiente de transferência de calor. As diferenças são levemente maiores com menores coeficientes de transferência de calor e diminuem no decorrer do tempo. Quanto maior for coeficiente de transferência de calor, maiores são as temperaturas na partícula.

### 5.2.3. Efeito da condutividade térmica do xisto – k

As temperaturas calculadas nos pontos da malha tridimensional na partícula padrão de xisto exposta à temperatura de 400 °C por um período de 90 minutos são função da condutividade térmica do xisto. A Figura 13 apresenta o efeito dos valores da condutividade térmica nas temperaturas do centro e do vértice da partícula padrão. O valor central de “k” adotado é 3,84 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>. A diferença das temperaturas entre o vértice (mais alta) e o centro (mais baixa) é apresentada na Figura 14.



**Figura 13: Temperatura no centro e no vértice da partícula padrão exposta à temperatura de 400 °C para diferentes condutividades térmicas do xisto**



**Figura 14: Diferença entre as temperaturas no centro e no vértice da partícula padrão exposta à temperatura de 400 °C para diferentes condutividades térmicas do xisto**

No tempo de 900 segundos, verificam-se diferenças de temperatura entre o vértice e o centro da partícula de 51,5 °C e 35,6 °C para o menor (0,8\*k) e o maior (1,2\*k) valor da condutividade térmica do xisto, respectivamente. Essas diferenças no tempo de 5400 segundos são desprezíveis para qualquer valor da condutividade térmica.

Observa-se que as diferenças de temperatura entre o vértice e o centro da partícula são inversamente proporcionais à condutividade térmica do xisto. Como pode ser visto nas Figuras 13 e 14, as diferenças são levemente maiores com menores condutividades térmicas do xisto e diminuem no decorrer do tempo. As temperaturas, quanto maior for condutividade térmica do xisto, apresentam valores mais elevados.

#### 5.2.4. Efeito do calor específico do xisto - $c_x$

As temperaturas dos pontos calculadas na malha tridimensional da partícula padrão de xisto exposta à 400 °C por um período de 90 minutos são função dos valores de calor específico do xisto. A Figura 15 apresenta o efeito dos valores do calor específico do xisto nas temperaturas do centro e do vértice da partícula padrão. O valor

central de “C<sub>x</sub>” adotado foi 1184 J kg<sup>-1</sup> °C<sup>-1</sup>. A diferença das temperaturas entre o vértice (mais alta) e o centro (mais baixa) na partícula é apresentada na Figura 16.

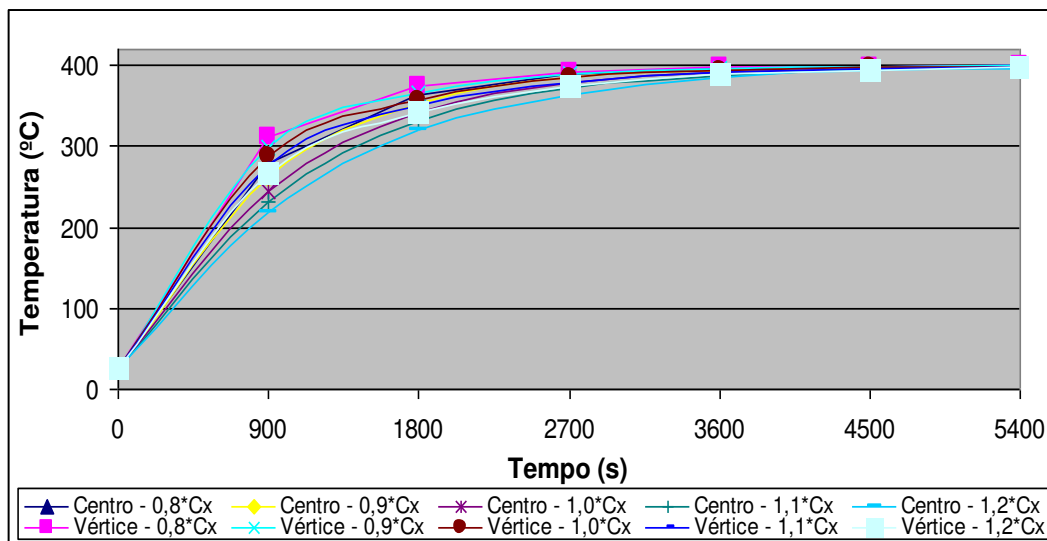


Figura 15: Temperatura no centro e no vértice da partícula padrão exposta à temperatura de 400 °C para diferentes calores específicos do xisto

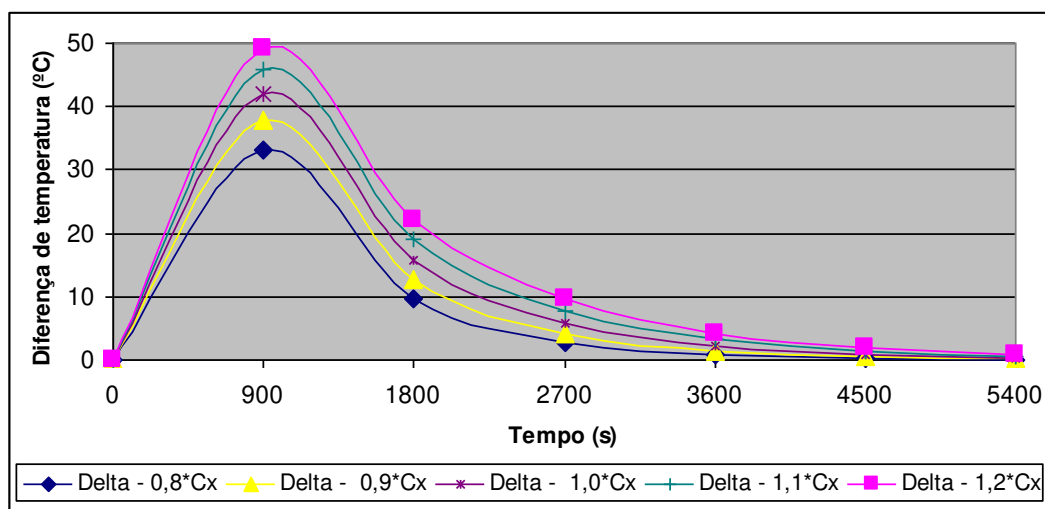


Figura 16: Diferença entre as temperaturas no centro e no vértice da partícula padrão exposta à temperatura de 400 °C para diferentes calores específicos do xisto

No tempo de 900 segundos, verificam-se diferenças de temperatura entre o vértice e o centro da partícula de 33,1 °C e 49,2 °C para o menor (0,8°Cp) e o maior

( $1,2 \cdot C_p$ ) valor do calor específico do xisto, respectivamente. Essas diferenças no tempo de 5400 segundos são desprezíveis para qualquer valor do calor específico do xisto.

Diferentemente do coeficiente de transferência de calor e da condutividade térmica do xisto, pode-se concluir que as diferenças de temperatura entre o vértice e o centro da partícula são diretamente proporcionais ao calor específico do xisto. Como pode ser visto nas Figuras 15 e 16, as diferenças são levemente maiores com maiores calores específicos do xisto e diminuem no decorrer do tempo. As temperaturas, quanto menor for o calor específico do xisto, apresentam valores mais elevados.

Apesar das diferenças de temperatura entre o vértice e o centro da partícula serem pequenas, elas ocorrem, pois quanto maior o calor específico, maior a quantidade de energia necessária para a mudança de temperatura. Assim, a partícula de xisto com maior calor específico apresentará a maior diferença devido à dificuldade um pouco maior em alterar a temperatura do que a de menor calor específico com a mesma quantidade de energia.

### **5.3. Balanço Térmico na Retorta – Temperatura Homogênea nas Partículas**

Considera-se nesta seção um balanço térmico na retorta, envolvendo as correntes de gás e xisto, em que as partículas de xisto são consideradas com temperatura uniforme. A corrente gasosa com calor específico constante  $c_g$  está numa temperatura variável  $T_g$  e a partícula está numa temperatura variável  $T_x$ ; ambas variam ao longo do eixo vertical da retorta. O perfil das temperaturas é apresentado nesta seção.

O programa utilizado está na Seção 9.1.2 e os resultados gerados para um dos casos apresentados na Seção 9.2.2.

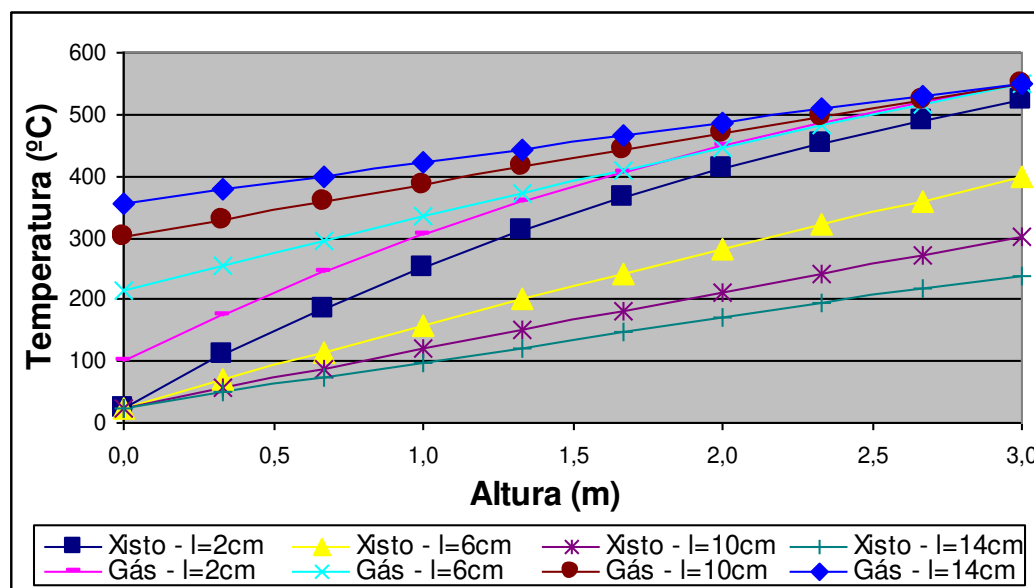
O programa necessita como dados de entrada: altura da seção estudada, coeficiente de transferência de calor, razão da área da partícula e volume do leito, área transversal do leito, calor específico do xisto e do gás e vazões mássicas do xisto e do gás.

No decorrer da altura da zona de transferência de calor estudada, foram calculadas temperaturas do xisto e gás para 10 diferentes pontos.

Realizou-se uma análise de sensibilidade paramétrica que leva em consideração algumas variáveis que podem impactar na transferência de calor.

### 5.3.1. Efeito da dimensão das partículas de xisto

As temperaturas das partículas cúbicas e paralelepípedicas de xisto com diferentes dimensões, assim como as da corrente gasosa, ao longo do eixo vertical da retorta, são apresentadas nas Figuras 17 e 18.



**Figura 17: Perfil de temperatura do gás e de partículas cúbicas de xisto (sem gradiente térmico) com diferentes arestas na retorta**

Enquanto para uma partícula cúbica de xisto de 2 cm de aresta, a sua temperatura de saída e da corrente gasosa são 524,1 °C e 99,4 °C, para uma partícula cúbica com 14 cm de aresta, as temperaturas são 239,4 °C e 356,4 °C.

Como pode ser visto na Figura 17 e pelos dados apresentados, a temperatura da saída das partículas de xisto é maior para a menor dimensão da partícula. A temperatura do gás na saída é tanto maior quanto maior a dimensão da partícula. Uma partícula maior necessita de maior energia para se aquecer totalmente.

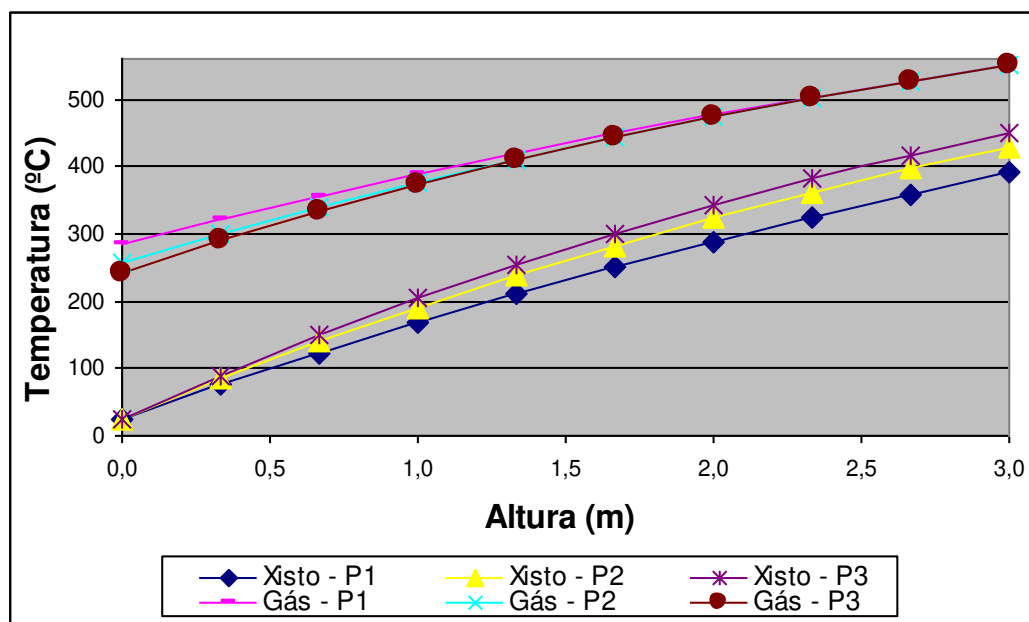
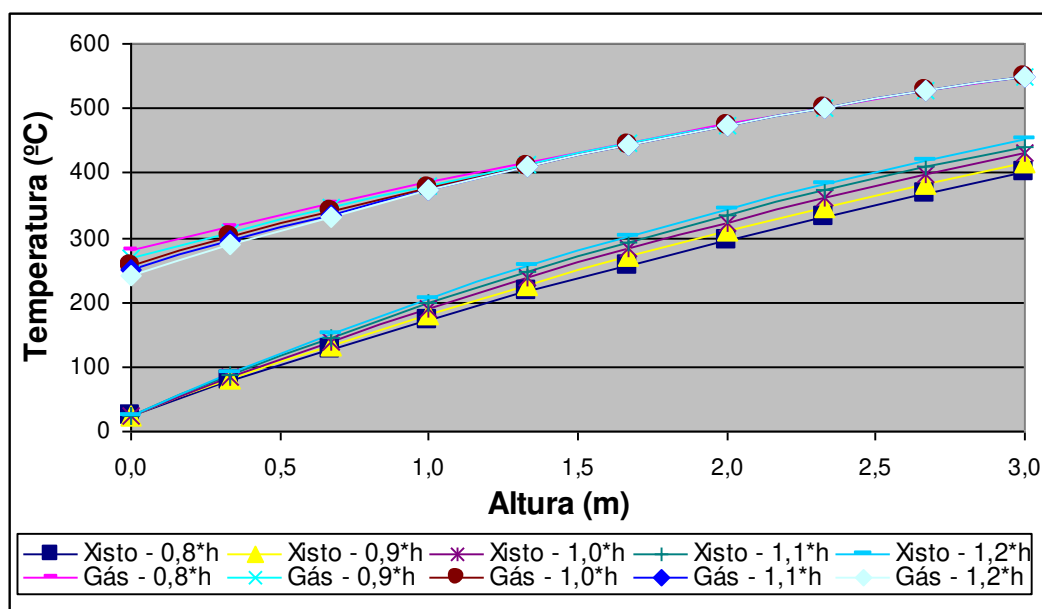


Figura 18: Perfil de temperatura do gás e de partículas paralelepípedicas de xisto (sem gradiente térmico) na retorta

A mesma conclusão é obtida para partículas paralelepípedicas como pode ser verificado na Figura 18. Para a maior partícula (P1), a sua temperatura de saída e a da corrente gasosa são 390,8 °C e 285,8 °C. Para a menor (P3), as temperaturas da partícula e da corrente gasosa são 449,9 °C e 243,0 °C.

### 5.3.2. Efeito do coeficiente de transferência de calor – h

As temperaturas da partícula padrão de xisto e as da corrente gasosa, ao longo do eixo vertical da retorta, para diferentes coeficientes de transferência de calor, são apresentadas na Figura 19.



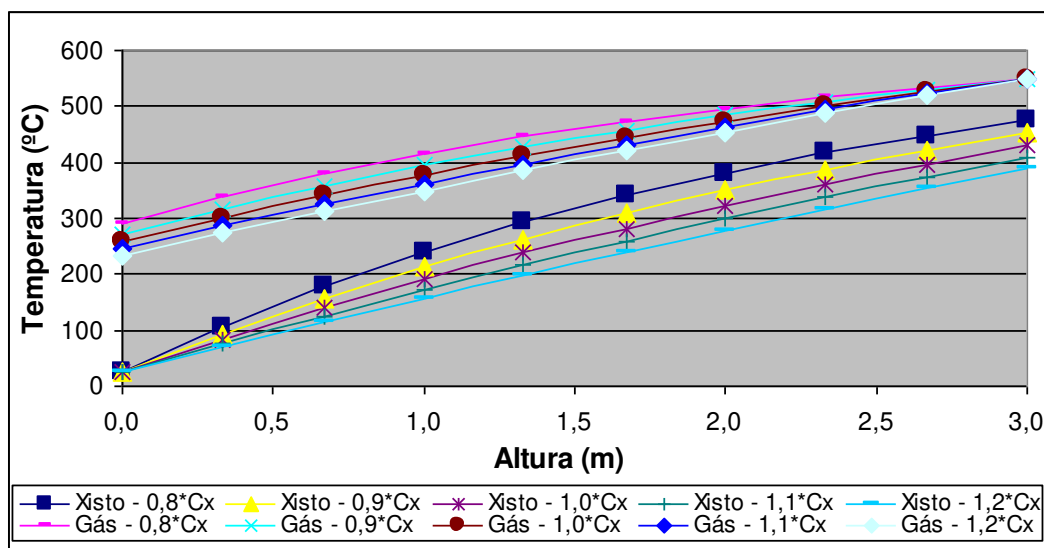
**Figura 19: Perfil de temperatura do gás e da partícula padrão de xisto (sem gradiente térmico) na retorta para diferentes coeficientes de transferência de calor**

Para um menor coeficiente de transferência de calor ( $0,8 \cdot h$ ), as temperaturas de saída da partícula de xisto e da corrente gasosa são  $400,2 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $279,0 \text{ }^\circ\text{C}$ . Para um maior coeficiente de transferência de calor ( $1,2 \cdot h$ ), as temperaturas são  $451,8 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $241,7 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Como pode ser visto na Figura 19, a temperatura da saída das partículas de xisto é maior para o maior coeficiente de transferência de calor. Enquanto a temperatura do gás na saída é maior para o menor coeficiente de transferência de calor. Quanto maior o coeficiente de transferência de calor, maior a quantidade de energia que a corrente gasosa cede e, portanto, maior a temperatura das partículas de xisto. Conseqüentemente, a temperatura do gás será menor.

### 5.3.3. Efeito do calor específico do xisto - $c_x$

As temperaturas da partícula padrão de xisto e as da corrente gasosa, ao longo do eixo vertical da retorta, para diferentes valores de calor específico do xisto, são apresentadas na Figura 20.



**Figura 20: Perfil de temperatura do gás e de partícula padrão de xisto (sem gradiente térmico) na retorta para diferentes calores específicos do xisto**

Para uma partícula de xisto com menor calor específico ( $0,8 \cdot c_x$ ), sua temperatura na saída e a da corrente gasosa são  $474,2 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $290,4 \text{ }^\circ\text{C}$ . Para um maior calor específico do xisto ( $1,2 \cdot c_x$ ), as temperaturas são  $389,2 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $234,3 \text{ }^\circ\text{C}$ .

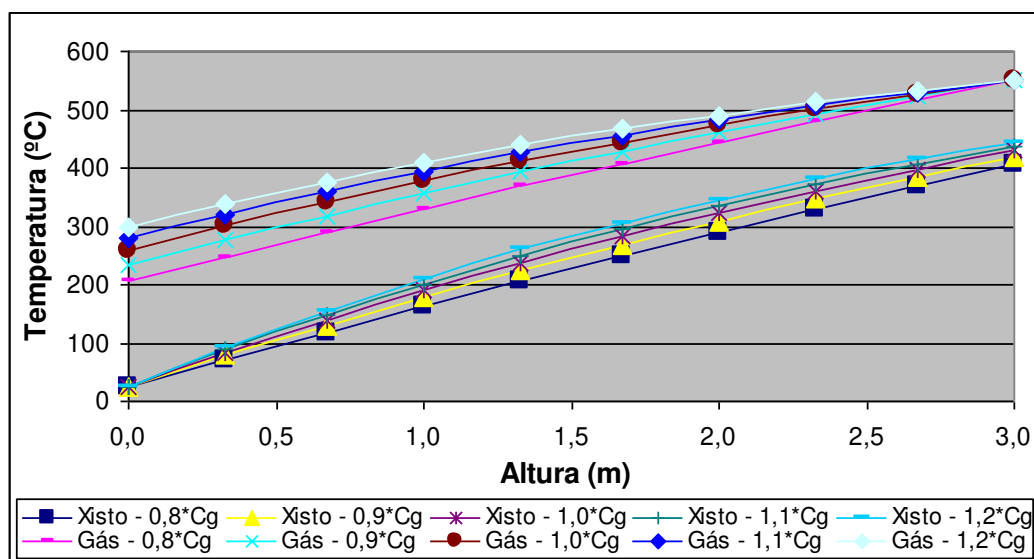
Ao analisar a Figura 20, a temperatura da saída das partículas de xisto e do gás são maiores para o menor calor específico do xisto, acarretando menores diferenças de temperatura entre gás e xisto, diminuindo a quantidade de calor perdida pelo gás, mantendo sua temperatura mais alta.

Quanto maior o calor específico do xisto, maior a quantidade de energia necessária para um aumento na temperatura da partícula. Dessa forma, o xisto terá menor temperatura na saída com um maior calor específico do xisto.

### 5.3.4. Efeito do calor específico do gás – $c_g$

As temperaturas da partícula padrão de xisto e as da corrente gasosa, ao longo do eixo vertical da retorta, para diferentes valores de calor específico do gás, são apresentadas na Figura 21.





**Figura 21: Perfil de temperatura do gás e de partícula padrão de xisto (sem gradiente térmico) na retorta para diferentes calores específicos do gás**

Para o gás com menor calor específico ( $0,8 \cdot c_g$ ), sua temperatura na saída é de  $205,0 \text{ }^\circ\text{C}$  e a temperatura de saída da partícula de xisto é de  $407,0 \text{ }^\circ\text{C}$ . Para maior calor específico do gás ( $1,2 \cdot c_g$ ), as temperaturas na saída para a corrente gasosa e para a partícula de xisto são  $297,7 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $444,1 \text{ }^\circ\text{C}$ , respectivamente.

A Figura 21 indica que a temperatura de saída das partículas de xisto e do gás são maiores para o maior calor específico do gás.

Quanto maior o calor específico do gás, maior a quantidade de energia necessária para mudança da sua temperatura. Dessa forma, o gás com maior calor específico terá maior temperatura na saída em relação àquele com menor calor específico, acarretando uma maior diferença com o xisto, aumentando sua temperatura.

#### 5.4. Balanço Térmico na Retorta – Temperatura Heterogênea nas Partículas

Nesta seção analisa-se a troca térmica na retorta entre a corrente gasosa e as partículas de xisto, considerando gradiente térmico em seu interior. A corrente gasosa com calor específico constante  $c_g$  está numa temperatura variável  $T_g$  e a superfície da

partícula está numa temperatura variável  $\overline{T_{\text{sup}}}$ . Ambas temperaturas variam ao longo do eixo vertical da retorta.

Os programas utilizados estão na Seção 9.1.3 e 9.1.4 e os resultados gerados para um dos casos apresentados na Seção 9.2.3 e 9.2.4, respectivamente.

Os programas necessitam como dados de entrada: coeficiente de transferência de calor, condutividade térmica do xisto, razão da área da partícula e volume do leito, área transversal do leito, calor específico do xisto e do gás, vazão mássica do gás, velocidade do gás, massa específica do xisto e dimensões da partícula.

A única diferença entre os programas é que o primeiro necessita, além dos dados de entrada acima, a temperatura de saída do gás. Esta é calculada no segundo programa que necessita que seja estipulado um intervalo para os testes necessário no método de busca incremental.

Os programas foram divididos, pois como a busca pela temperatura de saída do gás é muito lenta, todas as vezes que o mesmo fizesse um teste, seriam impressos todos os pontos da malha tridimensional. Assim, para simplificação, adotou-se somente a impressão dos valores das temperaturas do gás e do xisto na saída e a diferença necessária para o cálculo da solução. Dessa forma, era mais fácil descobrir se o intervalo adotado atendia ao almejado.

Após a obtenção da temperatura de saída do gás no segundo programa, seu valor era inserido no primeiro para o cálculo da malha tridimensional de temperaturas. Da mesma forma que na partícula exposta à temperatura fixa, esta possui 11 pontos em cada um dos eixos, totalizando 1331 pontos.

A equação 1332 é correspondente à temperatura do gás.

Realizou-se uma análise de sensibilidade paramétrica que leva em consideração algumas variáveis que podem impactar no balanço térmico em análise.

### 5.4.1. Efeito da dimensão das partículas de xisto

As temperaturas do centro e do vértice de partículas cúbicas para as diferentes dimensões são apresentadas na Figura 22. A Figura 23 apresenta a diferença da temperatura entre o vértice (mais alta) e o centro (mais baixa) da partícula.

As temperaturas médias da superfície das partículas cúbicas do xisto e as da corrente gasosa, ao longo do tempo de residência na retorta, são apresentadas na Figura 24.

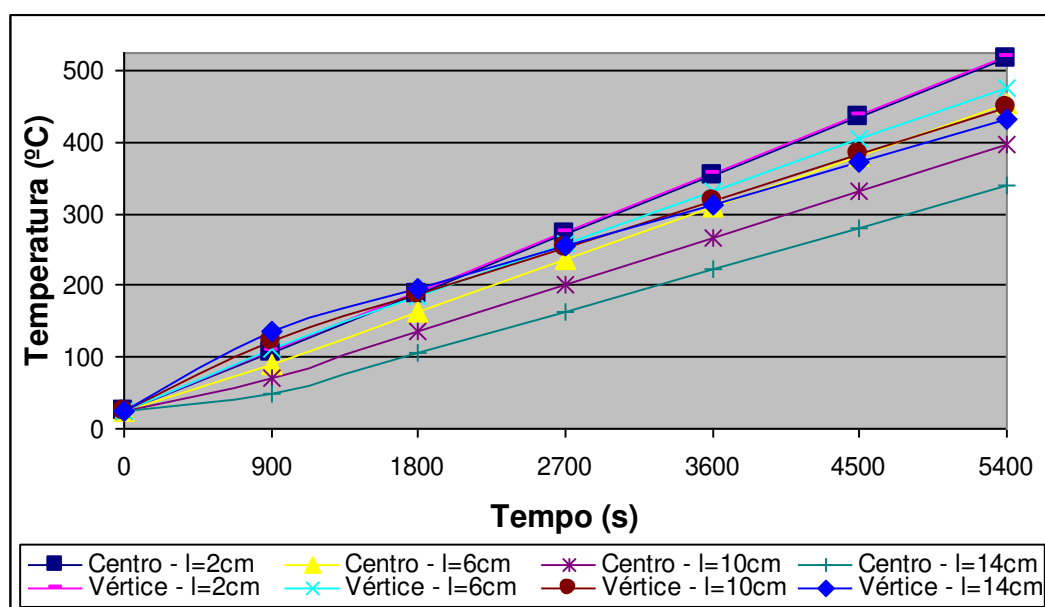


Figura 22: Temperatura no centro e no vértice para partículas cúbicas de xisto (com gradiente térmico) com diferentes arestas na retorta

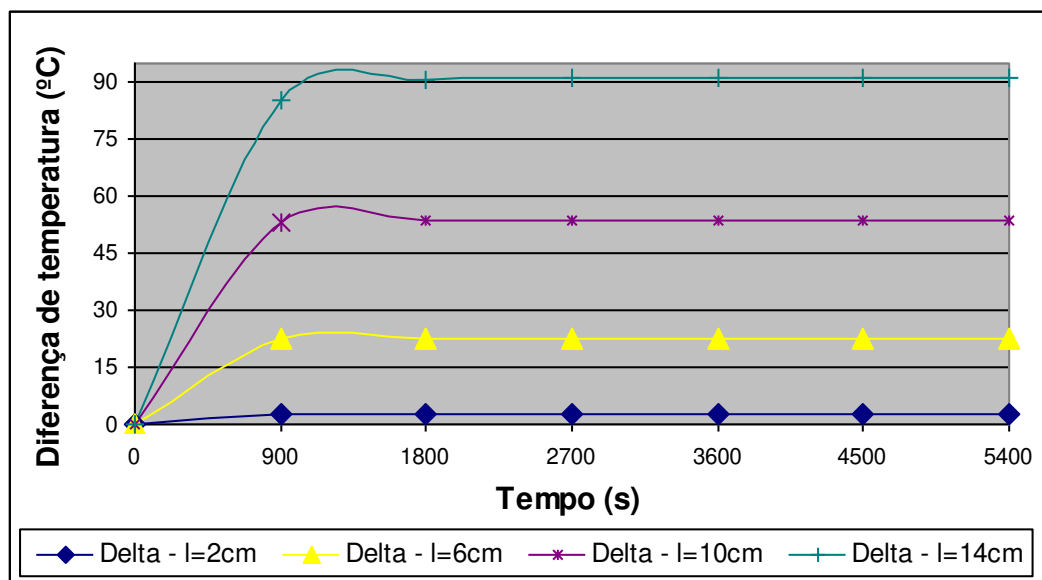


Figura 23: Diferença entre as temperaturas no centro e no vértice para partículas cúbicas de xisto (com gradiente térmico) com diferentes arestas na retorta

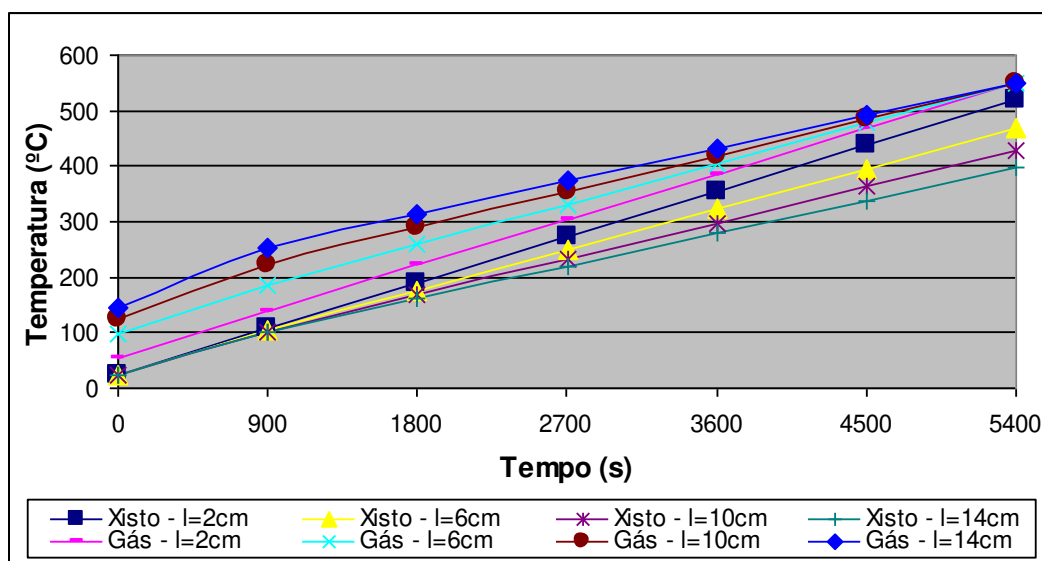


Figura 24: Perfil de temperatura do gás e da superfície de partículas cúbicas de xisto (com gradiente térmico) com diferentes arestas na retorta

Como pode ser visto nas Figuras 22 e 23, a diferença entre a temperatura do vértice e do centro torna-se mais acentuada para partículas com maior diâmetro. Para partículas cúbicas de 2 cm de aresta, há uma diferença de 2,9 °C enquanto para partículas cúbicas de 14 cm de aresta, em torno de 91 °C.

Para uma partícula de xisto com 2 cm de aresta, sua temperatura de saída e da saída da corrente gasosa são 519,2 °C e 54,6 °C, respectivamente. Para uma partícula com 14 cm de aresta, as temperaturas são 396,8 °C e 143,4 °C.

Analisando a Figura 24, verifica-se que a temperatura na saída das partículas de xisto é maior para a partícula de menor dimensão, enquanto que a temperatura do gás na saída é maior quando a dimensão da partícula é maior. Resultado análogo ao obtido para partículas de xisto com temperatura homogênea em seu interior.

Partículas menores conseguem se aquecer mais facilmente apresentando temperaturas maiores e, conseqüentemente, o gás cede maior energia.

As temperaturas no centro e no vértice para as partículas paralelepípedicas com diferentes dimensões são apresentadas na Figura 25. A Figura 26 apresenta as diferenças das temperaturas entre o vértice (mais alta) e o centro (mais baixa) da partícula.

As temperaturas médias da superfície das partículas paralelepípedicas do xisto e as da corrente gasosa, ao longo do tempo de residência na retorta, são apresentadas na Figura 27.

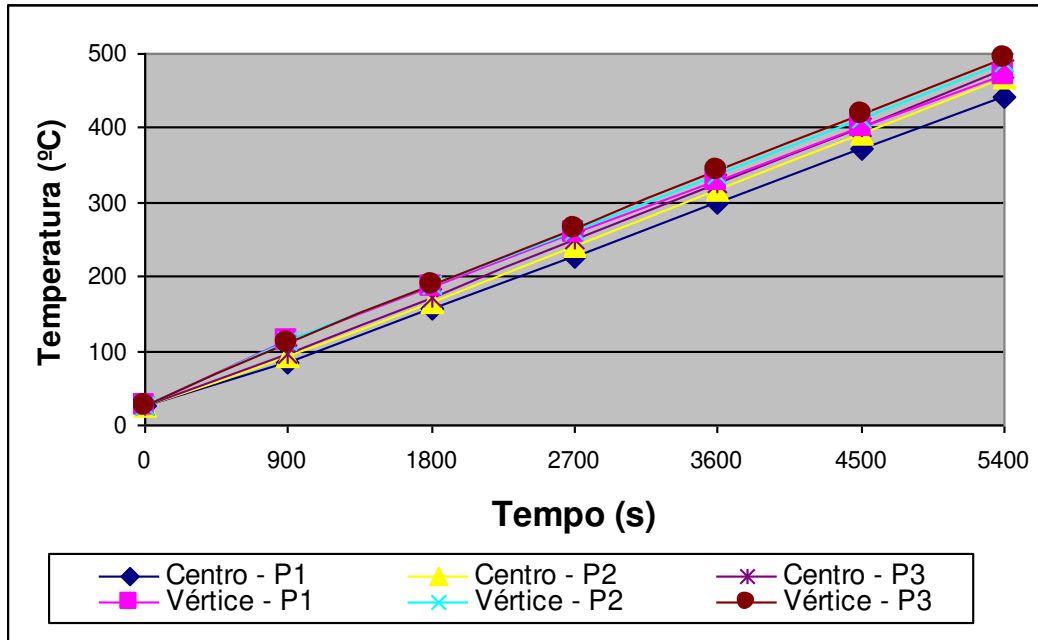


Figura 25: Temperatura no centro e no vértice para partículas paralelepípedicas de xisto (com gradiente térmico) na retorta

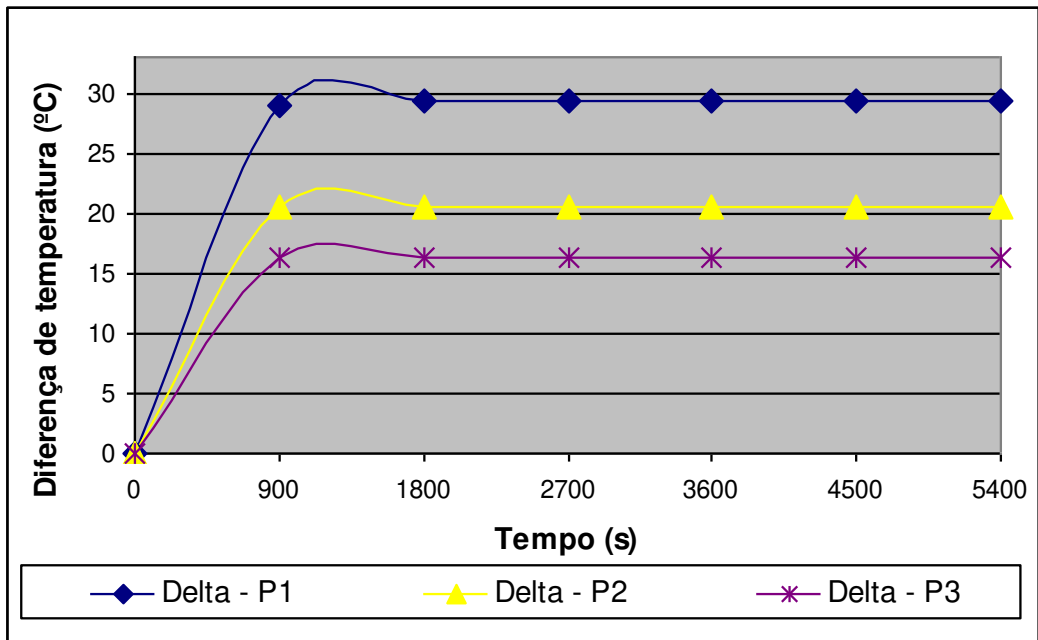
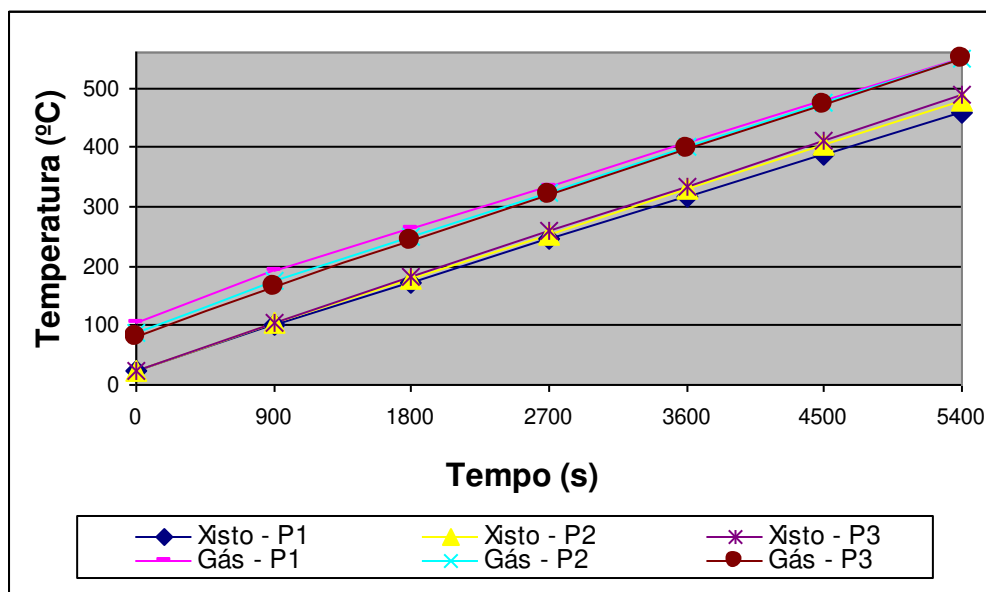


Figura 26: Diferença entre as temperaturas no centro e no vértice para partículas paralelepípedicas de xisto (com gradiente térmico) na retorta



**Figura 27: Perfil de temperatura do gás e da superfície de partículas paralelepípedicas de xisto (com gradiente térmico) na retorta**

A mesma conclusão feita para partículas cúbicas se aplica para partículas paralelepípedicas.

Para a maior partícula paralelepípedica (P1), a diferença entre a temperatura do vértice e do centro é em torno de  $29^{\circ}\text{C}$ . Já a menor (P3) apresenta diferença em torno de  $16^{\circ}\text{C}$ . Nessa situação, não se observa uma diferença da temperatura decrescente com o tempo como no caso do gás com temperatura fixa.

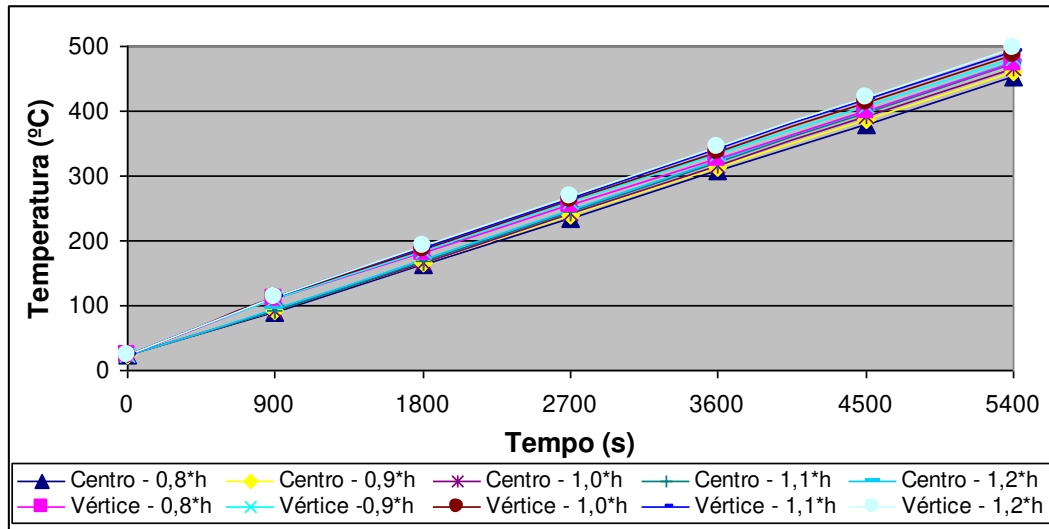
Para a maior partícula paralelepípedica (P1), a temperatura de saída é de  $459,8^{\circ}\text{C}$  e a da corrente gasosa é  $103,1^{\circ}\text{C}$ . Já para a menor (P3), as temperaturas são  $488,3^{\circ}\text{C}$  e  $80,0^{\circ}\text{C}$ .

Com essa informação e análise da Figura 27, verifica-se que a temperatura da saída das partículas paralelepípedicas de xisto é maior para a dimensão menor da partícula, enquanto que a temperatura do gás na saída é maior quando a dimensão da partícula é maior. Resultado também verificado com partículas com temperatura uniforme.

### 5.4.2. Efeito do coeficiente de transferência de calor – h

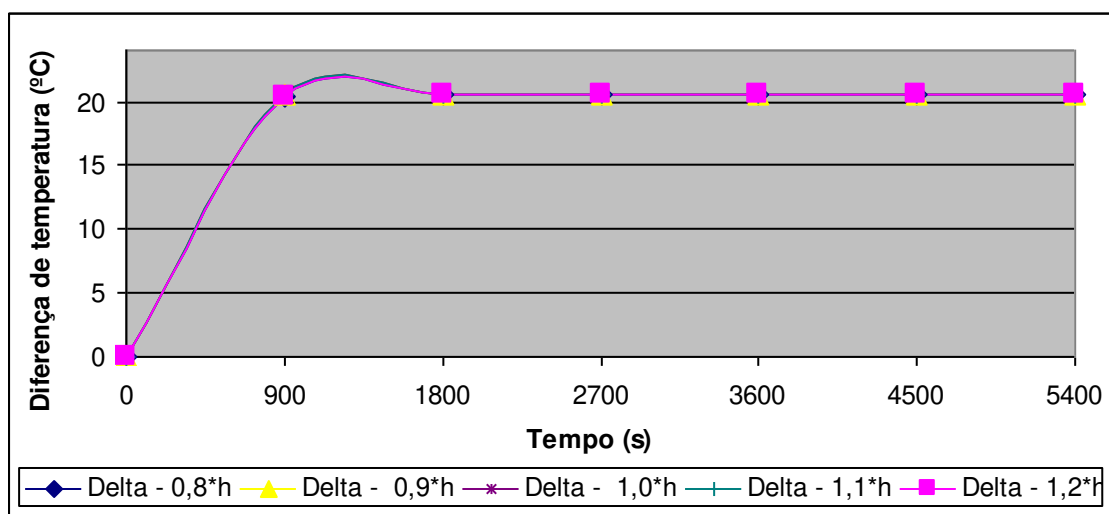
As temperaturas no centro e no vértice da partícula padrão de xisto para diferentes valores do coeficiente de transferência de calor, expostas a um gás por um período de 90 minutos, são apresentadas na Figura 28. A Figura 29 apresenta as diferenças das temperaturas entre o vértice (mais alta) e o centro (mais baixa) das partículas.

A temperatura média da superfície da partícula padrão de xisto para diferentes valores de coeficiente de transferência de calor, e a da corrente gasosa, ao longo do tempo de residência na retorta, são apresentadas na Figura 30.

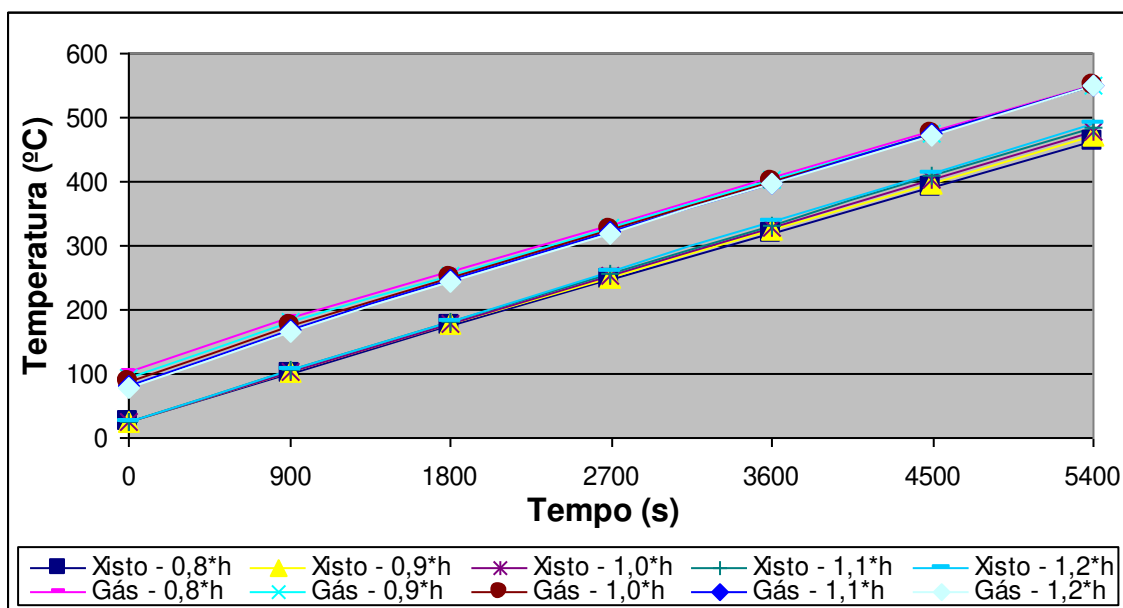


**Figura 28: Temperatura no centro e no vértice da partícula padrão de xisto (com gradiente térmico) na retorta para diferentes coeficientes de transferência de calor**





**Figura 29: Diferença entre as temperaturas no centro e no vértice da partícula padrão de xisto (com gradiente térmico) na retorta para diferentes coeficientes de transferência de calor**



**Figura 30: Perfil de temperatura do gás e da superfície da partícula padrão de xisto (com gradiente térmico) na retorta para diferentes coeficientes de transferência de calor**

Como pode ser visto nas Figuras 28 e 29, a diferença entre a temperatura do vértice e do centro da partícula padrão de xisto considerando diferentes valores do coeficiente de transferência de calor é similar e encontra-se em torno de 20,5 °C.

Há uma ligeira diferença entre as temperaturas do vértice e do centro da partícula para diferentes valores do coeficiente de transferência de calor. Para o menor valor do coeficiente de transferência de calor ( $0,8 \cdot h$ ) no tempo de 5400 segundos, as temperaturas são de  $472,6 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $452,1 \text{ }^\circ\text{C}$ , respectivamente. Para o maior valor de coeficiente de transferência de calor ( $1,2 \cdot h$ ) no tempo de 5400 segundos, as temperaturas são  $498,1 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $477,6 \text{ }^\circ\text{C}$ , respectivamente.

Com menor coeficiente de transferência de calor, as temperaturas de saída da partícula e da corrente gasosa são  $464,0 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $102,4 \text{ }^\circ\text{C}$ . Para o maior coeficiente de transferência de calor, as temperaturas são  $489,6 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $76,9 \text{ }^\circ\text{C}$ .

A Figura 30 indica que a temperatura média da superfície das partículas de xisto na saída é levemente maior quando o coeficiente de transferência de calor é também maior. A temperatura do gás na saída é maior quando o coeficiente é menor. Quanto maior o coeficiente de transferência de calor, maior a quantidade de energia que a corrente gasosa cede e, portanto, maior a temperatura das partículas de xisto. Consequentemente, a temperatura do gás será menor.

### **5.4.3. Efeito da condutividade térmica do xisto – k**

As temperaturas no centro e no vértice da partícula padrão de xisto para diferentes valores de condutividade térmica, expostas a um gás por um período de 90 minutos, são apresentadas na Figura 31. A Figura 32 apresenta as diferenças das temperaturas entre o vértice (mais alta) e o centro (mais baixa) da partícula.

A temperatura média da superfície da partícula padrão de xisto para diferentes valores de condutividade térmica do xisto e a da corrente gasosa, ao longo do tempo de residência na retorta, são apresentadas na Figura 33.

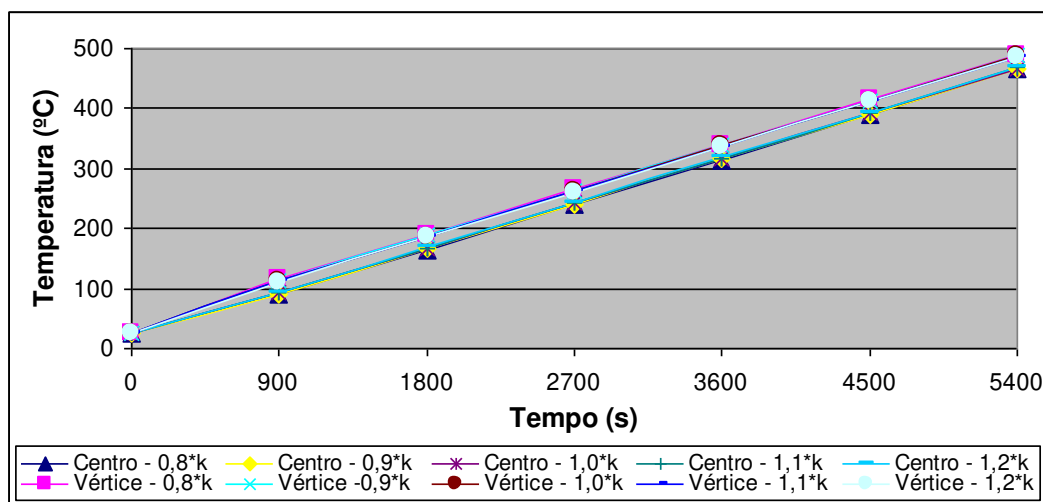


Figura 31: Temperatura no centro e no vértice da partícula padrão de xisto (com gradiente térmico) na retorta para diferentes condutividades térmicas do xisto

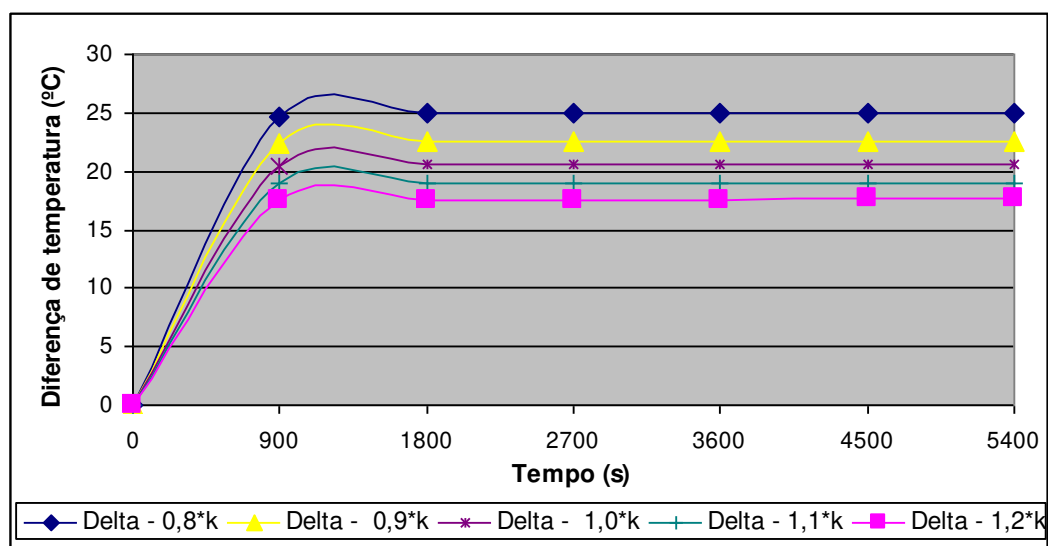
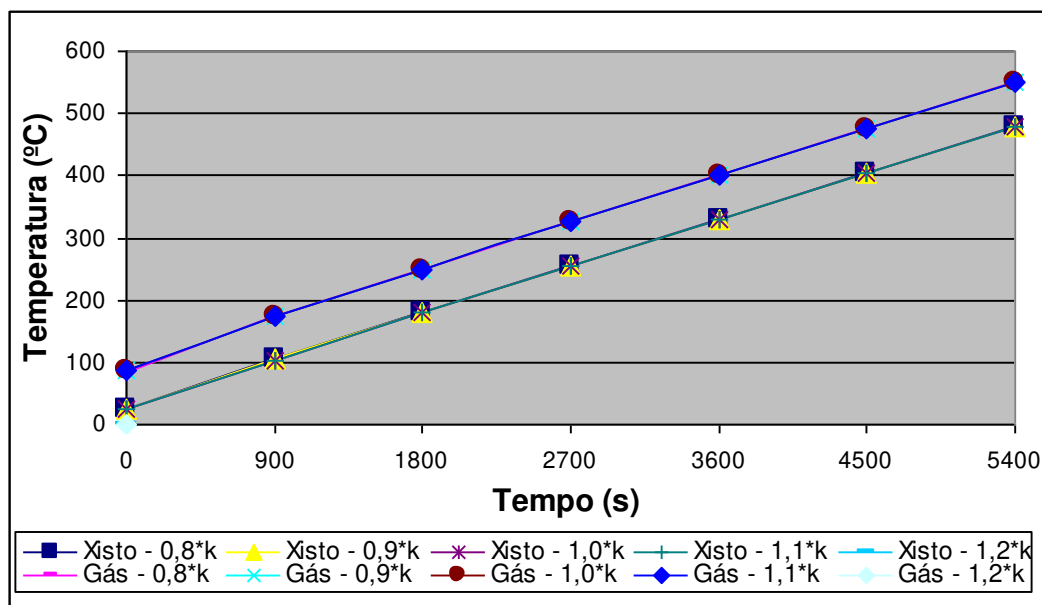


Figura 32: Diferença entre as temperaturas no centro e no vértice da partícula padrão de xisto (com gradiente térmico) na retorta para diferentes condutividades térmicas do xisto



**Figura 33: Perfil de temperatura do gás e da superfície da partícula padrão de xisto (com gradiente térmico) na retorta para diferentes condutividades térmicas do xisto**

Como pode ser visto nas Figuras 31 e 32, as diferenças entre as temperaturas do vértice e do centro tornam-se levemente maiores para partículas com menor valor de condutividade térmica do xisto. Enquanto para o menor valor de condutividade térmica do xisto (0,8\*k) está em torno de 24,9 °C, para o maior (1,2\*k) está por volta de 17,6 °C.

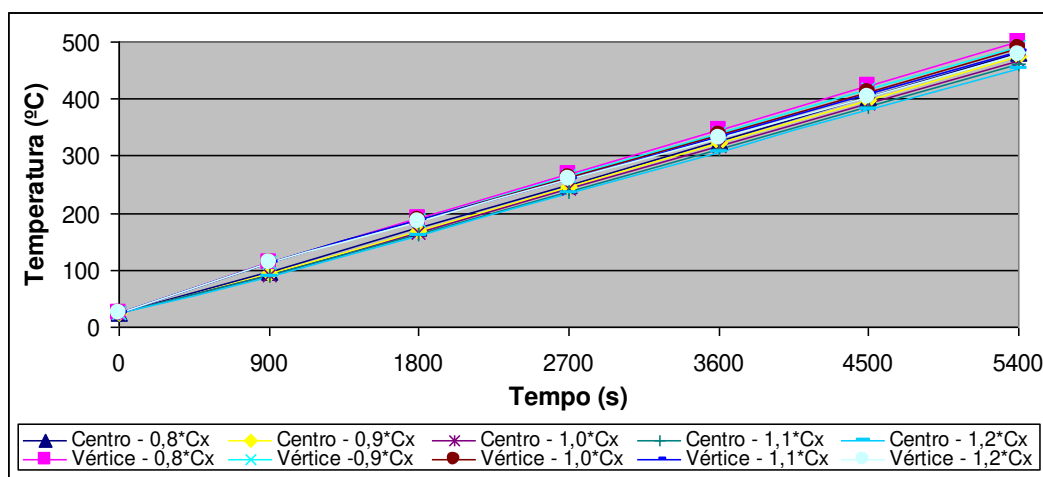
Com a condutividade térmica do xisto, as temperaturas de saída da partícula e da corrente gasosa são 479,4 °C e 85,4 °C. Para a maior condutividade térmica, as temperaturas são 478,8 °C e 88,8 °C, respectivamente.

Com os dados acima e a Figura 33, verifica-se que as temperaturas médias da superfície das partículas de xisto na saída estão extremamente próximas para qualquer condutividade térmica dentro do mesmo tempo. O gás apresenta o mesmo comportamento e também não varia muito para diferentes valores de condutividade térmica para os mesmos tempos.

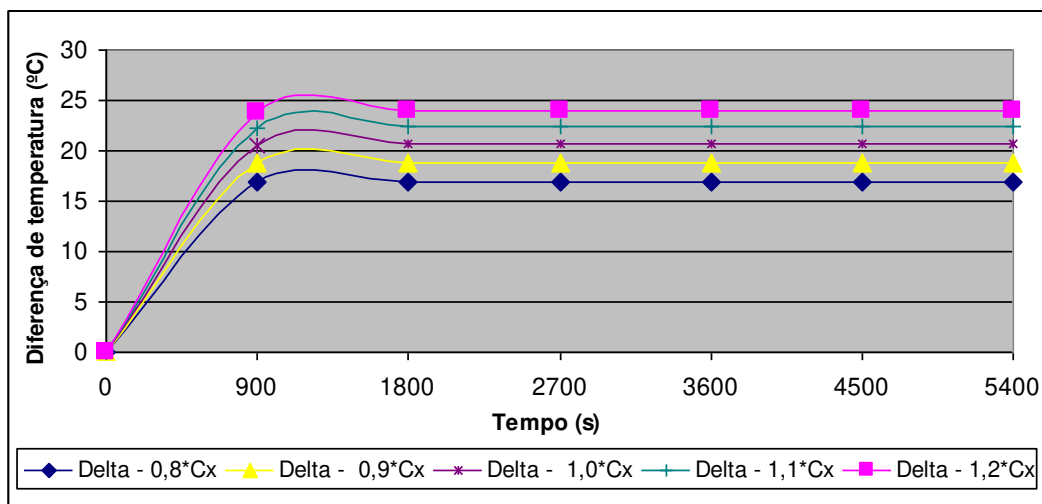
#### 5.4.4. Efeito do calor específico do xisto - $c_x$

As temperaturas no centro e no vértice da partícula padrão de xisto com diferentes valores do seu calor específico, expostas a um gás por um período de 90 minutos, são apresentadas na Figura 34. A Figura 35 apresenta as diferenças das temperaturas entre o vértice (mais alta) e o centro (mais baixa) da partícula.

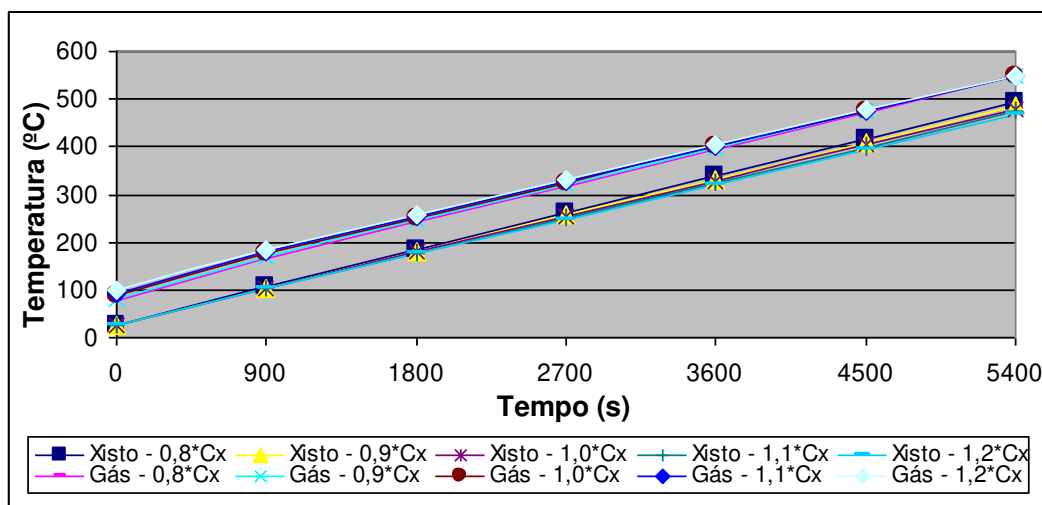
A temperatura média da superfície da partícula padrão de xisto com diferentes valores de calor específico e a da corrente gasosa, ao longo do tempo de residência na retorta, são apresentadas na Figura 36.



**Figura 34: Temperatura no centro e no vértice da partícula padrão de xisto (com gradiente térmico) na retorta para diferentes calores específicos do xisto**



**Figura 35: Diferença entre as temperaturas no centro e no vértice da partícula padrão de xisto (com gradiente térmico) na retorta para diferentes calores específicos do xisto**



**Figura 36: Perfil de temperatura do gás e da superfície da partícula padrão de xisto (com gradiente térmico) na retorta para diferentes calores específicos do xisto**

Há uma ligeira diferença entre as temperaturas do centro e do vértice da partícula para os diferentes valores de calor específico do xisto. Para o menor calor específico do xisto ( $0,8^{\circ}C_x$ ) no tempo de 5400 segundos, essas temperaturas são de  $481,7^{\circ}C$  e  $498,6^{\circ}C$ , respectivamente. Para o maior calor específico do xisto ( $1,2^{\circ}C_x$ ) são  $453,2^{\circ}C$  e  $477,2^{\circ}C$ , respectivamente.

Como pode ser visto nas Figuras 34 e 35, as diferenças entre as temperaturas do centro e do vértice da partícula tornam-se levemente maiores para partículas de xisto com maior calor específico. Enquanto para o menor calor específico do xisto está em torno de 17 °C, para o maior está por volta de 24 °C.

Para uma partícula de xisto com menor calor específico, na saída, sua temperatura e da corrente gasosa são 491,6 °C e 76,4 °C. Para o maior calor específico do xisto, as temperaturas são 467,2 °C e 97,8 °C.

A Figura 36 indica que a temperatura média na superfície das partículas de xisto na saída é maior para um calor específico menor. Consequentemente, a maior temperatura de gás na saída ocorre com maior calor específico do xisto.

Quanto maior o calor específico do xisto, maior a quantidade de energia necessária para aumento da temperatura na partícula. Dessa forma, o xisto terá maior temperatura na saída com um menor calor específico.

#### **5.4.5. Efeito do calor específico do gás – $c_g$**

As temperaturas do centro e do vértice da partícula padrão de xisto, exposta a um gás com diferentes valores de calor específico, por um período de 90 minutos, são apresentadas na Figura 37. A Figura 38 apresenta as diferenças das temperaturas entre o vértice (mais alta) e o centro (mais baixa) da partícula.

A temperatura média da superfície da partícula padrão de xisto assim como a da corrente gasosa com diferentes valores de calor específico, ao longo do tempo de residência na retorta, são apresentadas na Figura 39.

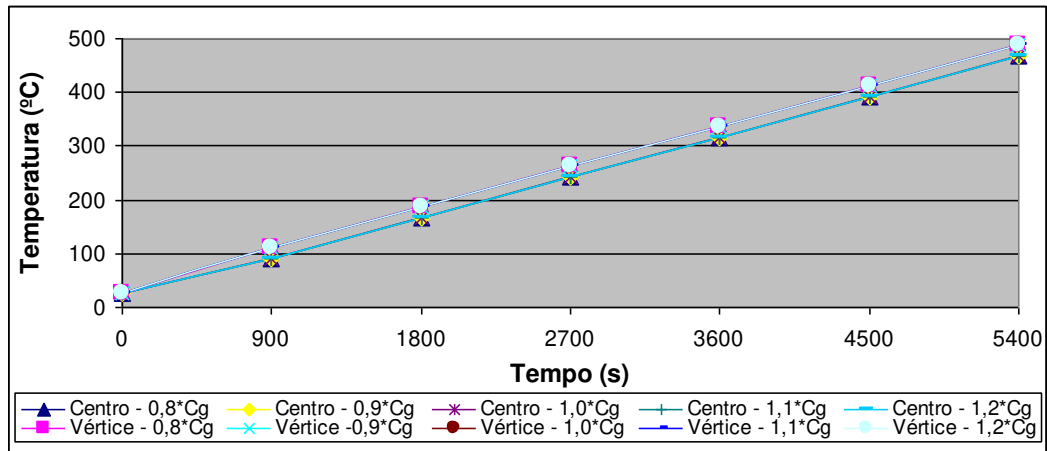


Figura 37: Temperatura no centro e no vértice da partícula padrão de xisto (com gradiente térmico) na retorta para diferentes calores específicos do gás

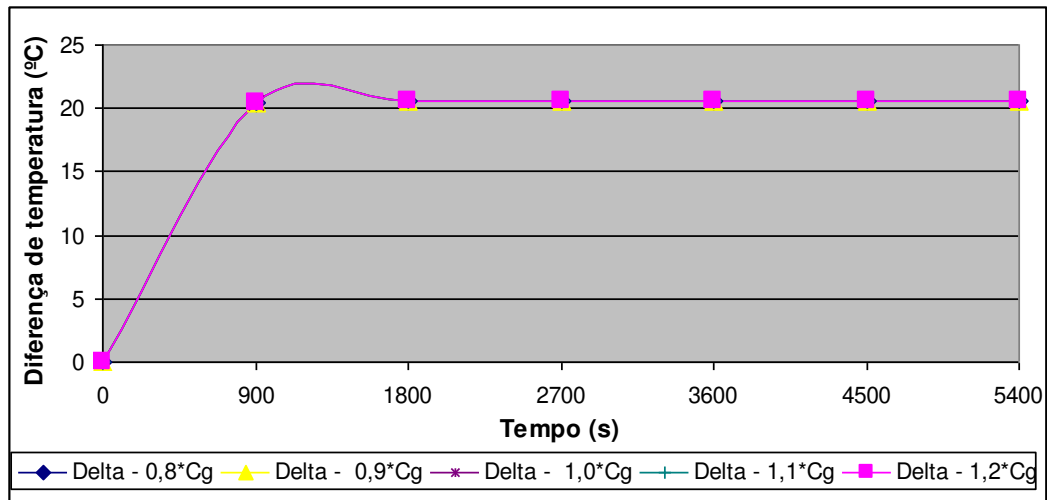
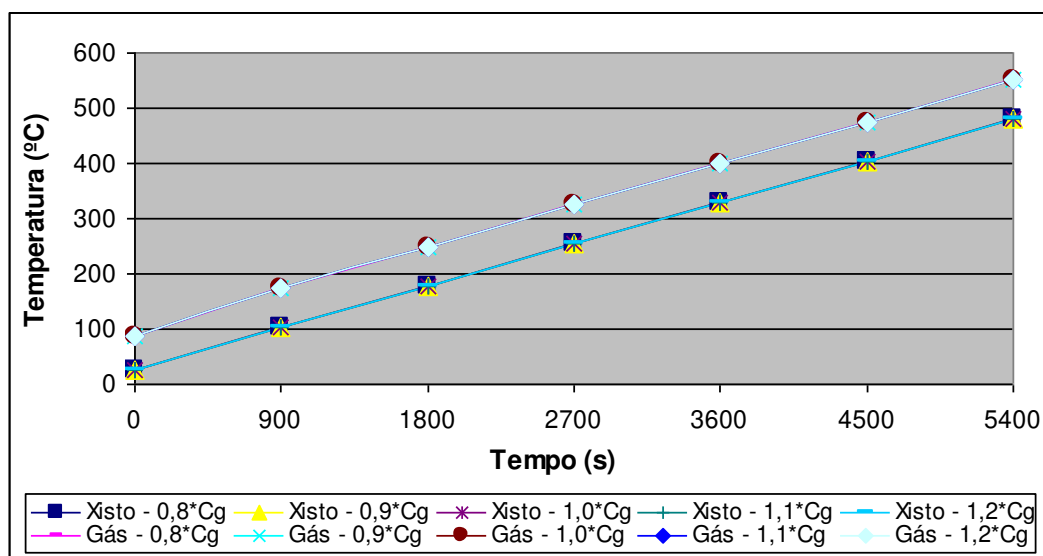


Figura 38: Diferença entre as temperaturas no centro e no vértice da partícula padrão de xisto (com gradiente térmico) na retorta para diferentes calores específicos do gás





**Figura 39: Perfil de temperatura do gás e da superfície da partícula padrão de xisto (com gradiente térmico) na retorta para diferentes calores específicos do gás**

A mudança no calor específico do gás não produziu alteração no balanço térmico na retorta.



## 6. CONCLUSÕES

Por estes estudos preliminares, pode-se concluir que os modelos construídos atendem aos objetivos deste trabalho.

Os programas redigidos em linguagem FORTRAN permitem a obtenção de perfis que caracterizam a retorta de pirólise do processo Petrosix. Os valores não são coincidentes com o módulo industrial, mas para uma análise teórica onde diversas variáveis não são consideradas e outras são adotadas como fixas, eles se tornam excelentes ferramentas de estudo do processo. No processo industrial, as temperaturas de saída na retorta para o xisto é aproximadamente 480 °C e para o gás 260 °C.

Para a malha tridimensional da partícula de xisto se confirma a hipótese de que o núcleo aumenta sua temperatura mais lentamente do que a face externa. Isso pode ser confirmado nas temperaturas obtidas onde o vértice apresenta o maior valor.

Partículas de xisto com maiores dimensões apresentam na saída da retorta temperaturas inferiores e maiores diferenças entre a temperatura do vértice e do centro àquelas apresentadas por menores dimensões. A temperatura do gás é superior para maiores partículas do que menores.

As alterações no coeficiente de transferência de calor impactam mais na retorta quando considerada a partícula com temperatura uniforme. Nessa situação, a diferença entre os valores da temperatura das partículas de xisto para o menor e maior coeficiente de transferência de calor é de 51,6 °C e do gás de 37,3 °C. Enquanto, para partículas com gradiente térmico, ambas são de 25,5 °C. Em relação ao gradiente térmico da partícula, este possui maior influência quando a partícula está exposta à uma temperatura fixa. Quando exposta à temperatura de 400 °C, a diferença entre o vértice e o centro da partícula padrão de xisto atinge um valor máximo de 42,0 °C aos 900 segundos. Na retorta, a diferença se reduz para 20,5 °C nas mesmas condições.

A condutividade térmica do xisto, mesmo com as flutuações no seu valor, não impacta as temperaturas das partículas de xisto e do gás na retorta. No gradiente térmico da partícula de xisto, o maior impacto se mantém para a exposição a uma temperatura fixa. Quando exposta à temperatura de 400 °C, aos 900 segundos, a diferença entre o vértice e o centro da partícula padrão de xisto atinge um valor máximo de 51,5 °C e 35,6 °C para a menor e maior condutividade térmica, respectivamente. Na retorta, as diferenças se reduzem para 24,9 °C e 17,6 °C nas mesmas condições.

A análise da sensibilidade paramétrica para o calor específico do xisto mostra que a influência é mais significativa na retorta quando considerada a partícula com temperatura uniforme. Nessa situação, a diferença entre os valores da temperatura das partículas de xisto para o menor e maior calor específico do xisto é de 85,0 °C e da corrente gasosa de 56,1 °C. Para partículas com gradiente térmico no seu interior, estas diferenças reduzem-se para 24,4 °C e 21,4 °C. Quando analisa-se o gradiente térmico da partícula, este possui maior impacto quando a partícula está exposta à uma temperatura fixa. Quando exposta à temperatura de 400 °C, aos 900 segundos, a diferença entre o vértice e o centro da partícula padrão de xisto atinge um valor máximo de 33,1 °C e 49,2 °C para a menor e maior calor específico do xisto, respectivamente. Na retorta, as diferenças se reduzem para 17 °C e 24 °C nas mesmas condições.

As mudanças no calor específico do gás não alteram as temperaturas das partículas de xisto e do gás na retorta. Na retorta, considerando partículas com temperatura uniforme, a diferença entre os valores da temperatura das partículas de xisto para o menor e maior calor específico é de 37,1 °C e do gás de 92,7 °C.

Após a análise de sensibilidade paramétrica, percebe-se que o modelo que considera a temperatura heterogênea na partícula é bastante consistente. Com as alterações de 20% no valor adotado para os parâmetros, as diferenças nas temperaturas das correntes (quando ocorrem) estão em torno de 20 °C, valor baixo para o processo em questão. Além disso, vale ressaltar que em todas as condições estudadas, as partículas de xisto atingem a temperatura de pirólise.

A representação da etapa de aquecimento do processo de pirólise do xisto foi atendida.

Discussões sobre distribuição dos tamanhos de partículas, vazões e tempo de residência não foram realizadas, já que o modelo é incipiente e necessita aderir muitos outros fenômenos para representar efetivamente a realidade do processo. Com a inserção das outras etapas, sugestões operacionais serão possibilitadas.



## **7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

No presente trabalho, parâmetros como condutividade térmica, calor específico e massa específica foram adotados com valores constantes. Porém, como estas variáveis variam com a temperatura, um estudo levando em consideração esta característica pode ser interessante.

A inclusão das etapas de secagem e pirólise da retorta permitirão uma aproximação real ao processo.

Além disso, estudos da porosidade e proporção de exposição (“superfície molhada”) das partículas de xisto ao meio e da velocidade do gás no leito podem colaborar nos estudos.





## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, S. F. **Recursos minerais do Brasil**. São Paulo: Edgard Blücher. 2<sup>a</sup> Ed. vol. 2. 1973.

ALBRIGHT, L. F.; CRYNES, B. L.; CORCORAN, W. H. **Pyrolysis: Theory and Industrial**, Practice Academic Press Inc, New York, 1983.

ALMEIDA, A. R. F. **Investigação do Mecanismo de Desvolatilização de partículas de xisto**. Dissertação de mestrado. Faculdade de Engenharia Química: UNICAMP. 2005.

DYNI, J. R., **2000 Oil Shale**, U.S. Geological Survey Circular, p.8, Feb. 2000.

IEA (International Energy Agency). **Towards a More Energy Efficient Future: Applying indicators to enhance energy policy**. OECD, IEA. p. 9. Paris, França. 2009.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. Livros Técnicos e Científicos Editora S. A. 6<sup>a</sup> ed. p. 163-166, 282. 2008.

LEE, L. M. **Determinação do calor específico do xisto da Formação Irati e do xisto de New Brunswick, usando o calorímetro de varredura diferencial DSC-50**. Dissertação de mestrado. Faculdade de Engenharia Química: UNICAMP. 2001.

LEINZ, V., AMARAL, S. E. **Geologia Geral**. São Paulo: Editora Nacional, 13<sup>a</sup> edição rev., Vol I. 1998.

LEVENSPIEL, O. **Chemical Reaction Engineering**. New York: John Wiley & Sons. 3<sup>rd</sup> ed. p. 659. 1998.

LI, S., YUE, C., **Study of Pyrolysis Kinetics of Oil Shale**, Fuel, v.82, p.337-342, 2003.

LISBÔA, A. C. L. **Investigations on oil shale particle reactions**. Tese de Doutorado em Engenharia Química. The Faculty of Graduate Studies Chemical and Bio-Resource Engineering, University of British Columbia: Vancouver, Canada. 1997.

LOVO Jr., P., **Transferência de Calor e Perda de Massa no Processo de Pírolise do Xisto em Leito Móvel**. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Química: UNICAMP. 2003.

MELO, L. P. **Transferência de calor em um processo de pirólise de partículas de xisto de um reator industrial**. Dissertação de mestrado. Faculdade de Engenharia Química: UNICAMP. 2013.

PETROBRAS. **Refinaria Six – Industrialização de Xisto**. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/pt/quem-somos/principais-operacoes/?category=1>> Acesso em : Fev. 2014.

PERRINI, E. M. **Oil shale and tar sands**. Califórnia: Noyes Data Corp. 1975.

PIMENTEL, W. R. O. **Aplicação da cinética de primeira ordem ao processo de desvolatilização de xisto**. Dissertação de mestrado. Faculdade de Engenharia Química: UNICAMP. 2001.

PORTO, P. S. S. **Investigações sobre a secagem de partículas de xisto**. Tese de Doutorado. Faculdade de Engenharia Química: UNICAMP. 2005.

PRESS, W. H., TEUKOLSKY, S. A. **Numerical Recipes in FORTRAN – The art of scientific computing**. Cambridge University Press. 2<sup>nd</sup> Edition. 1992.

RASE, H. F. **Fixed-Bed Reactor Design and Diagnostics: Gas-phase Reactions**. Butterworth Publishers. Stoneham, USA. p. 88-91. 1990.

SCHIESSER, W. E. **The Numerical Method of Lines**. Academic Press. 1991.

SCHIESSER, W. E. **Computational Mathematics in Engineering and Applied Science: ODEs, DAEs and PDEs**. CRC Press, Boca Ranton. 1994.

SCHÖN, J. H. **Physical Properties of Rocks: Fundamentals and principles of petrophysics**. Ed. Pergamon. Cap. 8. p.323-378. 1996.

SEIPOLD, U.; HUENGES, E. **Thermal properties of gnaisses and amphibolites – high pressure and high temperature investigations of KTB-rock samples**. Elsevier, Tectonophysics. p. 173-178. 1997.

SPIERS, H. M. **Technical Data on Fuel**. 7th ed. British National Committee. World Energy Conference, London. 1977.

STARK, P. A. **Introdução aos Métodos Numéricos**. Queensborough Community College of the City University of New York. Editora Interciência. 1970.

TONEL, G.; TAFFAREL, S. R.; NOGUERA, J. O. C. **Processamento do xisto**. Centro de Tecnologia. Departamento de Engenharia Química: Universidade Federal de Santa Maria. 2004. Disponível em: <[http://www.oocities.org/br/giovanitonel/chemical\\_eng\\_files/process\\_xisto.htm](http://www.oocities.org/br/giovanitonel/chemical_eng_files/process_xisto.htm)>. Acesso em: Fev. 2014.

WILLIAMS, P. F. V. **Oil shale and their analysis**. Fuel, v. 62, p. 756-771, 1983.

YEN, T. F. **Science and thecnology of oil shale**. Ann Arbor: Ann Arbor Science Publishers, 1976.



## 9. APÊNDICES

### 9.1. Programas Fortran

#### 9.1.1. Programa cubo\_dim.f

```
program cubo_dim
c
c   calcula perfil tridimensional de temperatura de um cubo inicialmente
c   a T=To quando colocada num ambiente a Tg.
c   A integração é realizada pela subrotina desolv (d.f)
c
implicit real*8(a-h,o-z)
real*8 Lx,Ly,Lz
integer flag
dimension T1(1331), Tlp(1331), T(11,11,11), x(11), y(11), z(11)
common /n1/ dx, dy, dz, nx, ny, nz
external rhsf
open(unit=10,file='cubo_dim')
c   Lê nx (número de x pontos do grid), ny (número de y pontos do grid), nz
c   (número de z pontos do grid), ixp (intervalo de impressão para x),
c   Lx (valor máximo para x), Ly (valor máximo para y), Lz (valor máximo
c   para z), dtau (intervalo de tempo para impressão de resultados) e eps
c   (erro permitido).
data ixp,nx,ny,nz,Lx,Ly,Lz/2,11,11,11,6.d-2,3.d-2,1.5d-2/
data hstart,hmin,hmax,eps,dtau/5.d-1,5.d-4,1.d1,1.d-2,9.d2/
neq=nx*ny*nz
tau=0.d0
c   Estabelecimento do grid - espaço e temperaturas iniciais.
dx=Lx/dfloat(nx-1)
dy=Ly/dfloat(ny-1)
dz=Lz/dfloat(nz-1)
do 2 i=1,nx
  x(i)=dfloat(i-1)*dx
  do 2 j=1,ny
    y(j)=dfloat(j-1)*dy
    do 2 k=1,nz
      z(k)=dfloat(k-1)*dz
      T(i,j,k)=2.5d1
2 continue
c   Impressão das temperaturas iniciais t(x,y,z,0).
write(6,100) tau
write(10,100) tau
100 format(' "time" = ',f8.1,/) 
do 5 k=nz,1,-ixp
  write(6,105) z(k)
  write(10,105) z(k)
c   Os valores do formato 105 precisam ser mudados com a troca das dimensões da
c   partícula.
105 format('"z" =',f6.3,/,22x,' x=0.000',2x,'x=0.012',2x,'x=0.024'
+   ,2x,'x=0.036',2x,'x=0,048',2x,'x=0.060',/)
do 5 j=ny,1,-ixp
  write(6,110) y(j), (T(i,j,k),i=1,nx,ixp)
  write(10,110) y(j), (T(i,j,k),i=1,nx,ixp)
110 format(' y=',f6.3,'   T(x,y,z)',6f9.2,/) 
5 continue
c   Parâmetros a serem passadas para a desolv (tridim -> unidimensional).
do 3 k=1,nz
  k1=(k-1)*(nx*ny)
  do 3 j=1,ny
    k2=(j-1)*ny
```

```

do 3 i=1,nx
    Tl(k1+k2+i)=T(i,j,k)
3 continue
flag=1
do 70 jj=2,7
    taup=tau+dtau
    call desolv(rhsf,tau,taup,Tl,eps,hstart,hmin,hmax,Tlp,
+           nfun,flag,neq)
    if(flag.eq.0) then
        write(6,120) taup
        write(10,120) taup
120    format(//1x,'Solucao falha no tempo= ',d10.3,/)
        stop
    endif
c    Retorna vetor para tridimensional.
do 7 k=1,nz
    k1=(k-1)*(nx*ny)
    do 7 j=1,ny
        k2=(j-1)*ny
        do 7 i=1,nx
            T(i,j,k)=Tlp(k1+k2+i)
7    continue
c    Impressão de resultados.
write(6,100) taup
write(10,100) taup
do 9 k=nz,1,-ixp
    write(6,105) z(k)
    write(10,105) z(k)
    do 9 j=ny,1,-ixp
        write(6,110) y(j),(T(i,j,k),i=1,nx,ixp)
        write(10,110) y(j),(T(i,j,k),i=1,nx,ixp)
9    continue
    tau=taup
    do 70 i=1,neq
        Tl(i)=Tlp(i)
70 continue
stop
end

double precision function rhsf (neq,tau,Tl)
implicit real*8(a-h,o-z)
dimension Tl(1331), T(11,11,11)
common /n1/ dx, dy, dz, nx, ny, nz
c    Variáveis de entrada:
c    h = coeficiente de transferência de calor (W m-2 K-1)
c    cond = condutividade térmica (W m-1 K-1)
c    Cp = calor específico do xisto (J kg-1 oC-1)
c    ro = massa específica do xisto (kg m-3)
c    Tg = temperatura fixa do gás (oC)
data h,cond,Cp,ro,Tg/2.458d1,3.84d0,1.184d3,2.1d3,4.d2/
c    Cálculo da difusividade térmica.
alfa=cond/(Cp*ro)
c    Cálculo dos Biot`s para os diferentes eixos.
Bix=(h*dx)/cond
Biy=(h*dy)/cond
Biz=(h*dz)/cond
c    Transformação do vetor de unidimensional para tridimensional.
do 6 m=1,nz
    if ((neq.ge.1.d0+(m-1.d0)*nx*ny).and.(neq.le.nx*ny*m)) then
        k=m
        do 12 l=1,ny
            if ((neq.ge.(1.d0+(m-1.d0)*nx*ny+(l-1.d0)*nx)).and.
+           (neq.le.(m-1.d0)*nx*ny+l*nx)) then

```

```

                j=1
                i=neq-((m-1.d0)*nx*ny+(l-1)*nx)
                end if
12      continue
        end if
6      continue
    do 7 jj=1,ny
        k2=(jj-1)*ny
        do 7 kk=1,nz
            k1=(kk-1)*(nx*ny)
            do 7 ii=1,nx
                T(ii,jj,kk)=Tl(k1+k2+ii)
7      continue
        if (i.eq.1) then
            txx=2.d0*alfa*(T(i+1,j,k)-T(i,j,k))/dx**2
        else if (i.eq.11) then
            t12x=-2.d0*Bix*(T(i,j,k)-Tg)+T(i-1,j,k)
            txx=alfa*(t12x-2.d0*T(i,j,k)+T(i-1,j,k))/dx**2
        else
            txx=alfa*(T(i-1,j,k)-2.d0*T(i,j,k)+T(i+1,j,k))/dx**2
        end if
        if (j.eq.1) then
            tyy=2.d0*alfa*(T(i,j+1,k)-T(i,j,k))/dy**2
        else if (j.eq.11) then
            t12y=-2.d0*Biy*(T(i,j,k)-Tg)+T(i,j-1,k)
            tyy=alfa*(t12y-2.d0*T(i,j,k)+T(i,j-1,k))/dy**2
        else
            tyy=alfa*(T(i,j-1,k)-2.d0*T(i,j,k)+T(i,j+1,k))/dy**2
        end if
        if (k.eq.1) then
            tzz=2.d0*alfa*(T(i,j,k+1)-T(i,j,k))/dz**2
        else if (k.eq.11) then
            t12z=-2.d0*Biz*(T(i,j,k)-Tg)+T(i,j,k-1)
            tzz=alfa*(t12z-2.d0*T(i,j,k)+T(i,j,k-1))/dz**2
        else
            tzz=alfa*(T(i,j,k-1)-2.d0*T(i,j,k)+T(i,j,k+1))/dz**2
        end if
        rhsf=txx+tyy+tzz
    return
end

```

## 9.1.2. Programa retorta\_homo.for

```

program retorta_homo
c
c   Programa calcula temperatura para uma retorta de 3 metros
c   trocando calor com uma gás em contracorrente a Tg variável
c   A integração é realizada pela subrotina desolv (d.f) e incre.f
c
c   Este programa usa o método de Runge-Kutta-Fehlberg para resolver
c   o problema de valor inicial:
c       dy1/dx=h*a*At*(y2-y1)/(Wx*Cpx)      y1(0)=25.          0<x<3
c       dy2/dx=h*a*At*(y2-y1)/(Wg*Cpg)      y2(0)="resultado da incre"  0<x<3
c   com uma acurácia especificada.
c
implicit real*8 (a-h,o-z)
dimension root(1)
common x(10),y(10,2)
external dtg
      n=10.
c   Deve ser estabelecido o intervalo para a busca incremental.
call incre(dtg,300.d0,400.d0,1.d0,1,1.d-4,root,iroot)
if(iroot.ne.0) then
      write(6,10) (i,root(i),i=1,iroot)
      write(17,10) (i,root(i),i=1,iroot)
10  format(1x,'raiz(',i2,') =',f8.4,/)
      write(6,40) (x(i),y(i,1),y(i,2),i=1,n)
      write(17,40) (x(i),y(i,1),y(i,2),i=1,n)
40  format(1x,f5.2,8x,f8.4,8x,f8.4)
endif
if(iroot.eq.0) write(6,20)
20 format(1x,'Nenhuma raiz foi achada.')
stop
end

double precision function dtg (tg)
implicit real*8(a-h,o-z)
dimension ya(2),yo(10),yn(10)
common x(10),y(10,2)
external func
integer flag
      open(unit=17,file='retorta')
c   Deve ser inserida a altura da seção a ser estudada.
data a,b,j/0.d0,3.d0,2/
data eps,hstart,hmin,hmax,n/1.d-5,1.d-1,1.d-5,2.d-1,10/
c   ya(1)= temperatura da entrada do xisto na retorta
ya(1)=25.d0
c   ya(2)=temperatura da saida do gas
ya(2)=tg
x(1)=a
do 5 i=1,j
      y(1,i)=ya(i)
5  continue
      nm=n-1
      dx=(b-a)/nm
      deps=eps/nm
      nofun=0
      do 20 i=2,n
          im=i-1
          x(i)=x(im)+dx
          do 6 k=1,j
              yo(k)=y(im,k)
6  continue

```



```

      call desolv(func,x(im),x(i),yo,deps,hstart,hmin,hmax,
+     yn,nfun,flag,j)
      do 8 k=1,j
        y(i,k)=yn(k)
8     continue
      if(flag.eq.0) then
        write(6,10)x(im)
        write(17,10)x(im)
10     format(1x,'Algoritmo falhou em x= ',d10.3)
        stop
      endif
      nofun=nofun+nfun
20    continue
      dtg=550.0-y(10,2)
      return
      end
c
      double precision function func(j,x,y)
      implicit real*8(a-h,o-z)
      dimension y(11)
c     Variáveis de entrada:
c     h = coeficiente de transferência de calor (W m-2 K-1)
c     a = razão entre área da partícula e volume do leito (m-1)
c     At = área transversal do leito (m2)
c     Wx = vazão mássica do xisto (kg s-1)
c     Wg = vazão mássica do gás (kg s-1)
c     Cpx = calor específico do xisto (J kg-1 oC-1)
c     Cpg = calor específico do xisto (J kg-1 oC-1)
      data h,a,At,Wx,Wg/18.22,1.1d1,23.76,18.06,14.44/
      data Cpx,Cpg/1.184d3,2.05d3/
      goto(10,20) j
10     func=h*a*At*(y(2)-y(1))/(Wx*Cpx)
      return
20     func=h*a*At*(y(2)-y(1))/(Wg*Cpg)
      return
      end

```

### 9.1.3. Programa retorta\_media.for

```

      program retorta
c     Programa calcula perfil tridimensional de temperatura de partículas de xisto
c     para uma retorta de 3 metros trocando calor com uma gás
c     em contracorrente a Tg variável
c     A integração é realizada pela subrotina desolv (d.f)
c     Este programa usa o método de Runge-Kutta-Fehlberg para resolver
c     o problema de valor inicial:
c     Xisto: Matriz 3D
c     Gás: dy2/dt=h*a*At*v*(y2-y1)/(Wg*Cpg) y2(0)=chute 0<t<5400
c     com uma acurácia especificada.
c     Sendo a equação do xisto resolvida pela media das temperaturas 3D do cubo.
c     Temp_media calculada pela subrotina
c     Atentar para o fixar o tempo maximo (L=3 metros)
      implicit real*8(a-h,o-z)
      dimension T(11,11,11),Tl(1332), Tlp(1332), x(11), y(11), z(11)
      external rhsf
      real*8 Lx,Ly,Lz
      common /n1/ dx, dy, dz, nx, ny, nz
      integer flag
      open(unit=8,file='grid')
      open(unit=15,file='retorta_media')
c     Lê nx (número de x pontos do grid), ny (número de y pontos do grid), nz

```

```

c      (número de z pontos do grid), ixp (intervalo de impressão para x),
c      Lx (valor máximo para x), Ly (valor máximo para y), Lz (valor máximo para
c      z), dtau (intervalo de tempo para impressão de resultados) e eps (erro
c      permitido).
data ixp,nx,ny,nz,Lx,Ly,Lz/2,11,11,11,6.d-2,3.d-2,1.5d-2/
data hstart,hmin,hmax,eps,dtau/5.d2,5.d-4,1.d3,1.d-4,9.d2/
neq=nx*ny*nz+1
tau=0.d0
c      Estabelecimento do grid - espaço e temperaturas iniciais.
dx=Lx/dfloat(nx-1)
dy=Ly/dfloat(ny-1)
dz=Lz/dfloat(nz-1)
do 2 i=1,nx
  x(i)=dfloat(i-1)*dx
  do 2 j=1,ny
    y(j)=dfloat(j-1)*dy
    do 2 k=1,nz
      z(k)=dfloat(k-1)*dz
c      T(i,j,k) abaixo = temperatura de entrada do xisto
      T(i,j,k)=2.5d1
2 continue
c      T(1332) abaixo = temperatura de saída do gás
      Tl(1332)=8.73765d1
call tsmidia (T,nx,ny,nz,Tsup)
50 format(1x,'Tempo=',f8.2,/,1x,'Tx_med=',f10.4,6x,'Tg=',f10.4,/)
write (6,50) tau,Tsup,Tl(1332)
      write (15,50) tau,Tsup,Tl(1332)
c      Parâmetros a serem passadas para a desolv (tridim -> unidimensional).
do 3 k=1,nz
  k1=(k-1)*(nx*ny)
  do 3 j=1,ny
    k2=(j-1)*ny
    do 3 i=1,nx
      Tl(k1+k2+i)=T(i,j,k)
3 continue
  flag=1
  do 70 jj=2,7
    taup=tau+dtau
    call desolv(rhsf,tau,taup,Tl,eps,hstart,hmin,hmax,Tlp,
+      nfun,flag,neq)
    if(flag.eq.0) then
      write(6,120) taup
120 format(/1x,'Solucao falha no tempo= ',d10.3,/)
      stop
    endif
  do 7 k=1,nz
    k1=(k-1)*(nx*ny)
    do 7 j=1,ny
      k2=(j-1)*ny
      do 7 i=1,nx
        T(i,j,k)=Tlp(k1+k2+i)
7 continue
c      Impressão de resultados.
100 format(' "time" = ',f8.2,/)
      write(8,100) taup
      do 9 k=nz,1,-ixp
c      Os valores do formato 105 precisam ser mudados com a troca das dimensões
c      da partícula.
105 format('"z" = ',f6.3,/,22x,' x=0.000',2x,'x=0.012',2x,'x=0.024'
+      ,2x,'x=0.036',2x,'x=0.048',2x,'x=0.060',/)
      write(8,105) z(k)
      do 9 j=ny,1,-ixp
110 format(' y=',f6.3,' T(x,y,z)',6f9.2,/)

```

```

write(8,110) y(j), (T(i,j,k), i=1, nx, iyp)

9  continue
   call tsmedia (T, nx, ny, nz, Tsup)
   write (6,50) taup, Tsup, Tlp(1332)
   write (15,50) taup, Tsup, Tlp(1332)
   tau=taup
   do 70 i=1, neq
       Tl(i)=Tlp(i)
70  continue
   stop
   end

double precision function rhsf (neq, tau, Tl)
implicit real*8(a-h, o-z)
dimension Tl(1332), T(11,11,11)
common /n1/ dx, dy, dz, nx, ny, nz
c Variáveis de entrada:
c hg = coeficiente de transferência de calor (W m-2 K-1)
c a = razão entre área da partícula e volume do leito (m-1)
c At = área transversal do leito (m2)
c Wg = vazão mássica do gás (kg s-1)
c Wg = 0,8*Wx = 52 ton/h
c Cpg = calor específico do xisto (J kg-1 oC-1)
c v = velocidade do gás (m s-1)
c cond = condutividade térmica (W m-1 K-1)
c Cp = calor específico do xisto (J kg-1 oC-1)
c ro = massa específica do xisto (kg m-3)
c data hg, a, At, Wg, Cpg, v/2.458d1, 2.9d1, 23.76, 1.444d1, 2050, 1.86d0/
c data cond, Cp, ro/3.84d0, 1.184d3, 2.1d3/
c Cálculo da difusividade térmica.
c alfa=cond/(Cp*ro)
c Cálculo dos Biot`s para os diferentes eixos.
Bix=(hg*dx)/cond
Biy=(hg*dy)/cond
Biz=(hg*dz)/cond
c Transformação do vetor de unidimensional para tridimensional.
do 6 m=1, nz
   if ((neq.ge.1.d0+(m-1.d0)*nx*ny).and.(neq.le.nx*ny*m)) then
       k=m
       do 12 l=1, ny
           if ((neq.ge.(1.d0+(m-1.d0)*nx*ny+(l-1.d0)*nx)).and.
+           (neq.le.(m-1.d0)*nx*ny+l*nx)) then
               j=1
               i=neq-((m-1.d0)*nx*ny+(l-1)*nx)
               end if
12      continue
           end if
6      continue
       do 7 jj=1, ny
           k2=(jj-1)*ny
           do 7 kk=1, nz
               k1=(kk-1)*(nx*ny)
               do 7 ii=1, nx
                   T(ii, jj, kk)=Tl(k1+k2+ii)
7      continue
           if (i.eq.1) then
               txx=2.d0*alfa*(T(i+1, j, k)-T(i, j, k))/dx**2
           else if (i.eq.11) then
               ext=-2.d0*Bix*(T(i, j, k)-Tl(1332))+T(i-1, j, k)
               txx=alfa*(ext-2.d0*T(i, j, k)+T(i-1, j, k))/dx**2
           else
               txx=alfa*(T(i-1, j, k)-2.d0*T(i, j, k)+T(i+1, j, k))/dx**2
           end if

```

```

if (j.eq.1) then
    tyy=2.d0*alfa*(T(i,j+1,k)-T(i,j,k))/dy**2
else if (j.eq.11) then
    ext=-2.d0*Biy*(T(i,j,k)-Tl(1332))+T(i,j-1,k)
    tyy=alfa*(ext-2.d0*T(i,j,k)+T(i,j-1,k))/dy**2
else
    tyy=alfa*(T(i,j-1,k)-2.d0*T(i,j,k)+T(i,j+1,k))/dy**2
end if
if (k.eq.1) then
    tzz=2.d0*alfa*(T(i,j,k+1)-T(i,j,k))/dz**2
else if (k.eq.11) then
    ext=-2.d0*Biz*(T(i,j,k)-Tl(1332))+T(i,j,k-1)
    tzz=alfa*(ext-2.d0*T(i,j,k)+T(i,j,k-1))/dz**2
else
    tzz=alfa*(T(i,j,k-1)-2.d0*T(i,j,k)+T(i,j,k+1))/dz**2
end if
rhsf=txx+tyy+tzz
return
if (neq.eq.1332) then
    call tsmedia (T,nx,ny,nz,Tsup)
    rhsf=hg*a*At*v*(Tl(1332)-Tsup)/(Wg*Cpg)
return
end if
end

subroutine tsmedia (T,nx,ny,nz,Tsup)
implicit real*8 (a-h,o-z)
dimension T(nx,ny,nz)
somax=0.d0
    somay=0.d0
    somaz=0.d0
    Tmedx=0.d0
    Tmedy=0.d0
    Tmedz=0.d0
do 20 i=1,nx
    do 20 j=1,ny
        somaz=somaz+T(i,j,nz)
20 continue
do 30 i=1,nx
    do 30 k=1,nz
        somay=somay+T(i,ny,k)
30 continue
do 40 j=1,ny
    do 40 k=1,nz
        somax=somax+T(nx,j,k)
40 continue
    Tmedz=somaz/(nx*ny)
    Tmedy=somay/(nx*nz)
    Tmedx=somax/(ny*nz)
    Tsup=(Tmedx+Tmedy+Tmedz)/3
return
end

```

### 9.1.4. Programa retorta\_incre.for

```

program raiz
c
c   Programa calcula perfil tridimensional de temperatura de
c   partículas de xisto para uma retorta de 3 metros trocando
c   calor com uma gás em contracorrente a Tg variável
c   A integração é realizada pela subrotina desolv (d.f) e incre.f

```

```

c
c     Este programa usa o método de Runge-Kutta-Fehlberg para resolver
c     o problema de valor inicial:
c     Xisto:  Matriz 3D
c     Gás:   dy2/dt=h*a*At*v*(y2-y1)/(Wg*Cpg)   y2(0)= "solução da incre"
c           0<t<5400
c
c     com uma acurácia especificada.
c     Sendo a equação do xisto resolvida pela media das
c     temperaturas 3D do cubo.
c     Temp_media calculada pela subrotina
c     Atentar para o fixar o tempo maximo (L=3 metros)
c     A saída do gás é calculada por incre.f
c
implicit real*8 (a-h,o-z)
dimension root(1)
external dtg
c Deve ser estabelecido o intervalo para a busca incremental.
call incre(dtg,8.73760d1,8.73770d1,5.d-4,1,1.d-4,root,iroot)
if(iroot.ne.0) then
    write(15,10) (i,root(i),i=1,iroot)
10  format(/,1x,'raiz(',i2,') =',f8.4,/)
    print *,'ok'
endif
if(iroot.eq.0) write(6,20)
20 format(1x,'Nenhuma raiz foi achada.')
stop
end

double precision function dtg (tg)
implicit real*8(a-h,o-z)
dimension T(11,11,11),Tl(1332),Tlp(1332),x(11),y(11),z(11),yy(7,2)
external rhsf
real*8 Lx,Ly,Lz
common /nl/ dx, dy, dz, nx, ny, nz
integer flag
    open(unit=15,file='retorta_incre')
c     Lê nx (número de x pontos do grid), ny (número de y pontos do grid), nz
c     (número de z pontos do grid), ixp (intervalo de impressão para x),
c     Lx (valor máximo para x), Ly (valor máximo para y), Lz (valor máximo para
c     z), dtau (intervalo de tempo para impressão de resultados) e eps (erro
c     permitido).
data ixp,nx,ny,nz,Lx,Ly,Lz/2,11,11,11,6.d-2,3.d-2,1.5d-2/
data hstart,hmin,hmax,eps,dtau/5.d2,5.d-3,1.d3,1.d-2,9.d2/
neq=nx*ny*nz+1
tau=0.d0
c     Estabelecimento do grid - espaço e temperaturas iniciais.
dx=Lx/dfloat(nx-1)
dy=Ly/dfloat(ny-1)
dz=Lz/dfloat(nz-1)
do 2 i=1,nx
    x(i)=dfloat(i-1)*dx
    do 2 j=1,ny
        y(j)=dfloat(j-1)*dy
        do 2 k=1,nz
            z(k)=dfloat(k-1)*dz
c     T(i,j,k) abaixo = temperatura de entrada do xisto
        T(i,j,k)=2.5d1
2 continue
c     T(1332) = temperatura de saída do gás
c     Tg = temperatura de saída do gás a ser calculada
        Tl(1332)=tg
        yy(1,2)=Tl(1332)
call tsmedia (T,nx,ny,nz,Tsup)

```

```

yy(1,1)=Tsup
c  Parâmetros a serem passadas para a desolv (tridim -> unidimensional).
do 3 k=1,nz
  k1=(k-1)*(nx*ny)
  do 3 j=1,ny
    k2=(j-1)*ny
    do 3 i=1,nx
      Tl(k1+k2+i)=T(i,j,k)
3 continue
flag=1
do 70 jj=2,7
  taup=tau+dtau
  call desolv(rhsf,tau,taup,Tl,eps,hstart,hmin,hmax,Tlp,
+           nfun,flag,neq)
  if(flag.eq.0) then
    write(6,120) taup
120  format('//1x,'Solucao falha no tempo= ',d10.3,/)
    stop
  endif
do 7 k=1,nz
  k1=(k-1)*(nx*ny)
  do 7 j=1,ny
    k2=(j-1)*ny
    do 7 i=1,nx
      T(i,j,k)=Tlp(k1+k2+i)
7 continue
  call tsmedia (T,nx,ny,nz,Tsup)
  yy(jj,1)=Tsup
  yy(jj,2)=Tlp(1332)
  tau=taup
  do 70 i=1,neq
    Tl(i)=Tlp(i)
70 continue
dtg=550.0-yy(7,2)
write(6,99) yy(7,2),yy(1,2),dtg, Tsup
write(15,99) yy(7,2),yy(1,2),dtg, Tsup
99 format('teste',6x,f9.4,6x,f9.4,6x,f9.4,6x,f9.4)
return
end

double precision function rhsf (neq,tau,Tl)
implicit real*8(a-h,o-z)
dimension Tl(1332), T(11,11,11)
common /nl/ dx, dy, dz, nx, ny, nz
c  Variáveis de entrada:
c  hg = coeficiente de transferência de calor (W m-2 K-1)
c  a = razão entre área da partícula e volume do leito (m-1)
c  At = área transversal do leito (m2)
c  Wg = vazão mássica do gás (kg s-1)
c  Wg = 0,8*Wx = 52 ton/h
c  Cpg = calor específico do xisto (J kg-1 oC-1)
c  v = velocidade do gás (m s-1)
c  cond = condutividade térmica (W m-1 K-1)
c  Cp = calor específico do xisto (J kg-1 oC-1)
c  ro = massa específica do xisto (kg m-3)
data hg,a,At,Wg,Cpg,v/2.458d1,2.9d1,23.76,1.444d1,2050,1.86d0/
data cond,Cp,ro/3.84d0,1.184d3,2.1d3/
c  Cálculo da difusividade térmica.
alfa=cond/(Cp*ro)
c  Cálculo dos Biot`s para os diferentes eixos.
Bix=(hg*dx)/cond
  Biy=(hg*dy)/cond
  Biz=(hg*dz)/cond

```

```

c      Transformação do vetor de unidimensional para tridimensional.
      do 6 m=1,nz
          if ((neq.ge.1.d0+(m-1.d0)*nx*ny).and.(neq.le.nx*ny*m)) then
              k=m
              do 12 l=1,ny
                  if ((neq.ge.(1.d0+(m-1.d0)*nx*ny+(l-1.d0)*nx).and.
+                (neq.le.(m-1.d0)*nx*ny+l*nx)) then
                      j=1
                      i=neq-((m-1.d0)*nx*ny+(l-1)*nx)
                      end if
12          continue
          end if
6      continue
      do 7 jj=1,ny
          k2=(jj-1)*ny
          do 7 kk=1,nz
              k1=(kk-1)*(nx*ny)
              do 7 ii=1,nx
                  T(ii,jj,kk)=Tl(k1+k2+ii)
7          continue
          if (i.eq.1) then
              txx=2.d0*alfa*(T(i+1,j,k)-T(i,j,k))/dx**2
          else if (i.eq.11) then
              ext=-2.d0*Bix*(T(i,j,k)-Tl(1332))+T(i-1,j,k)
              txx=alfa*(ext-2.d0*T(i,j,k)+T(i-1,j,k))/dx**2
          else
              txx=alfa*(T(i-1,j,k)-2.d0*T(i,j,k)+T(i+1,j,k))/dx**2
          end if
          if (j.eq.1) then
              tyy=2.d0*alfa*(T(i,j+1,k)-T(i,j,k))/dy**2
          else if (j.eq.11) then
              ext=-2.d0*Biy*(T(i,j,k)-Tl(1332))+T(i,j-1,k)
              tyy=alfa*(ext-2.d0*T(i,j,k)+T(i,j-1,k))/dy**2
          else
              tyy=alfa*(T(i,j-1,k)-2.d0*T(i,j,k)+T(i,j+1,k))/dy**2
          end if
          if (k.eq.1) then
              tzz=2.d0*alfa*(T(i,j,k+1)-T(i,j,k))/dz**2
          else if (k.eq.11) then
              ext=-2.d0*Biz*(T(i,j,k)-Tl(1332))+T(i,j,k-1)
              tzz=alfa*(ext-2.d0*T(i,j,k)+T(i,j,k-1))/dz**2
          else
              tzz=alfa*(T(i,j,k-1)-2.d0*T(i,j,k)+T(i,j,k+1))/dz**2
          end if
          rhsf=txx+tyy+tzz
      return
      if (neq.eq.1332) then
          call tsmedia (T,nx,ny,nz,Tsup)
          rhsf=hg*a*At*v*(Tl(1332)-Tsup)/(Wg*Cpg)
      return
      end if
end

subroutine tsmedia (T,nx,ny,nz,Tsup)
implicit real*8 (a-h,o-z)
dimension T(nx,ny,nz)
somax=0.d0
  somay=0.d0
  somaz=0.d0
  Tmedx=0.d0
  Tmedy=0.d0
  Tmedz=0.d0
do 20 i=1,nx

```

```

do 20 j=1,ny
    somaz=somaz+T(i,j,nz)
20 continue
do 30 i=1,nx
    do 30 k=1,nz
        somay=somay+T(i,ny,k)
30 continue
do 40 j=1,ny
    do 40 k=1,nz
        somax=somax+T(nx,j,k)
40 continue
    Tmedz=somaz/(nx*ny)
    Tmedy=somay/(nx*nz)
    Tmedx=somax/(ny*nz)
    Tsup=(Tmedx+Tmedy+Tmedz)/3
return
end

```

## 9.2. Resultados dos Programas Fortran

### 9.2.1. Programa cubo\_dim.for

```

"time" =      0.0
"z" = 0.015
           x=0.000  x=0.012  x=0.024  x=0.036  x=0,048  x=0.060
y= 0.030  T(x,y,z)  25.00  25.00  25.00  25.00  25.00  25.00
y= 0.024  T(x,y,z)  25.00  25.00  25.00  25.00  25.00  25.00
y= 0.018  T(x,y,z)  25.00  25.00  25.00  25.00  25.00  25.00
y= 0.012  T(x,y,z)  25.00  25.00  25.00  25.00  25.00  25.00
y= 0.006  T(x,y,z)  25.00  25.00  25.00  25.00  25.00  25.00
y= 0.000  T(x,y,z)  25.00  25.00  25.00  25.00  25.00  25.00
"z" = 0.012
           x=0.000  x=0.012  x=0.024  x=0.036  x=0,048  x=0.060
y= 0.030  T(x,y,z)  25.00  25.00  25.00  25.00  25.00  25.00
y= 0.024  T(x,y,z)  25.00  25.00  25.00  25.00  25.00  25.00
y= 0.018  T(x,y,z)  25.00  25.00  25.00  25.00  25.00  25.00
y= 0.012  T(x,y,z)  25.00  25.00  25.00  25.00  25.00  25.00
y= 0.006  T(x,y,z)  25.00  25.00  25.00  25.00  25.00  25.00
y= 0.000  T(x,y,z)  25.00  25.00  25.00  25.00  25.00  25.00
"z" = 0.009
           x=0.000  x=0.012  x=0.024  x=0.036  x=0,048  x=0.060
y= 0.030  T(x,y,z)  25.00  25.00  25.00  25.00  25.00  25.00
y= 0.024  T(x,y,z)  25.00  25.00  25.00  25.00  25.00  25.00

```



y= 0.018	T(x, y, z)	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00
y= 0.012	T(x, y, z)	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00
y= 0.006	T(x, y, z)	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00
y= 0.000	T(x, y, z)	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00
"z" = 0.006		x=0.000	x=0.012	x=0.024	x=0.036	x=0,048	x=0.060
y= 0.030	T(x, y, z)	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00
y= 0.024	T(x, y, z)	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00
y= 0.018	T(x, y, z)	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00
y= 0.012	T(x, y, z)	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00
y= 0.006	T(x, y, z)	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00
y= 0.000	T(x, y, z)	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00
"z" = 0.003		x=0.000	x=0.012	x=0.024	x=0.036	x=0,048	x=0.060
y= 0.030	T(x, y, z)	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00
y= 0.024	T(x, y, z)	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00
y= 0.018	T(x, y, z)	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00
y= 0.012	T(x, y, z)	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00
y= 0.006	T(x, y, z)	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00
y= 0.000	T(x, y, z)	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00
"z" = 0.000		x=0.000	x=0.012	x=0.024	x=0.036	x=0,048	x=0.060
y= 0.030	T(x, y, z)	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00
y= 0.024	T(x, y, z)	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00
y= 0.018	T(x, y, z)	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00
y= 0.012	T(x, y, z)	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00
y= 0.006	T(x, y, z)	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00
y= 0.000	T(x, y, z)	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00
"time" =		900.0					
"z" = 0.015		x=0.000	x=0.012	x=0.024	x=0.036	x=0,048	x=0.060
y= 0.030	T(x, y, z)	265.61	266.48	269.12	273.51	279.65	287.48
y= 0.024	T(x, y, z)	260.93	261.84	264.57	269.12	275.47	283.57
y= 0.018	T(x, y, z)	257.26	258.20	261.00	265.66	272.18	280.50

**Capítulo 9**

y= 0.012	T(x, y, z)	254.62	255.57	258.43	263.18	269.82	278.29
y= 0.006	T(x, y, z)	253.03	253.99	256.87	261.68	268.39	276.95
y= 0.000	T(x, y, z)	252.50	253.46	256.36	261.18	267.91	276.51
"z" = 0.012		x=0.000	x=0.012	x=0.024	x=0.036	x=0,048	x=0.060
y= 0.030	T(x, y, z)	263.28	264.17	266.85	271.32	277.56	285.53
y= 0.024	T(x, y, z)	258.52	259.45	262.22	266.85	273.31	281.55
y= 0.018	T(x, y, z)	254.79	255.74	258.59	263.33	269.96	278.42
y= 0.012	T(x, y, z)	252.10	253.07	255.97	260.81	267.56	276.18
y= 0.006	T(x, y, z)	250.49	251.46	254.39	259.28	266.11	274.82
y= 0.000	T(x, y, z)	249.94	250.92	253.87	258.77	265.62	274.37
"z" = 0.009		x=0.000	x=0.012	x=0.024	x=0.036	x=0,048	x=0.060
y= 0.030	T(x, y, z)	261.46	262.36	265.08	269.61	275.93	284.01
y= 0.024	T(x, y, z)	256.64	257.58	260.39	265.07	271.62	279.97
y= 0.018	T(x, y, z)	252.86	253.82	256.70	261.51	268.23	276.81
y= 0.012	T(x, y, z)	250.14	251.11	254.05	258.95	265.80	274.53
y= 0.006	T(x, y, z)	248.49	249.48	252.45	257.41	264.33	273.15
y= 0.000	T(x, y, z)	247.95	248.94	251.92	256.89	263.84	272.69
"z" = 0.006		x=0.000	x=0.012	x=0.024	x=0.036	x=0,048	x=0.060
y= 0.030	T(x, y, z)	260.15	261.06	263.81	268.38	274.76	282.91
y= 0.024	T(x, y, z)	255.29	256.23	259.07	263.80	270.41	278.84
y= 0.018	T(x, y, z)	251.47	252.44	255.35	260.21	266.99	275.64
y= 0.012	T(x, y, z)	248.72	249.71	252.68	257.62	264.53	273.34
y= 0.006	T(x, y, z)	247.07	248.07	251.06	256.06	263.05	271.96
y= 0.000	T(x, y, z)	246.51	247.52	250.53	255.54	262.55	271.49
"z" = 0.003		x=0.000	x=0.012	x=0.024	x=0.036	x=0,048	x=0.060
y= 0.030	T(x, y, z)	259.37	260.28	263.04	267.64	274.06	282.25
y= 0.024	T(x, y, z)	254.48	255.43	258.28	263.04	269.68	278.16
y= 0.018	T(x, y, z)	250.64	251.61	254.54	259.42	266.24	274.95
y= 0.012	T(x, y, z)	247.87	248.87	251.85	256.82	263.77	272.63

y= 0.006	T(x, y, z)	246.21	247.21	250.23	255.26	262.28	271.24
y= 0.000	T(x, y, z)	245.65	246.66	249.69	254.73	261.78	270.77
"z" = 0.000		x=0.000	x=0.012	x=0.024	x=0.036	x=0,048	x=0.060
y= 0.030	T(x, y, z)	259.10	260.02	262.79	267.39	273.83	282.04
y= 0.024	T(x, y, z)	254.20	255.16	258.02	262.78	269.44	277.93
y= 0.018	T(x, y, z)	250.36	251.34	254.27	259.16	265.99	274.71
y= 0.012	T(x, y, z)	247.59	248.59	251.57	256.56	263.52	272.40
y= 0.006	T(x, y, z)	245.92	246.93	249.95	254.99	262.02	271.00
y= 0.000	T(x, y, z)	245.36	246.37	249.41	254.46	261.52	270.53
"time" = 1800.0							
"z" = 0.015		x=0.000	x=0.012	x=0.024	x=0.036	x=0,048	x=0.060
y= 0.030	T(x, y, z)	349.72	350.06	351.08	352.76	355.08	358.02
y= 0.024	T(x, y, z)	347.97	348.32	349.38	351.12	353.52	356.56
y= 0.018	T(x, y, z)	346.60	346.96	348.04	349.83	352.30	355.41
y= 0.012	T(x, y, z)	345.61	345.98	347.08	348.90	351.41	354.59
y= 0.006	T(x, y, z)	345.01	345.39	346.50	348.34	350.88	354.09
y= 0.000	T(x, y, z)	344.81	345.19	346.31	348.15	350.70	353.92
"z" = 0.012		x=0.000	x=0.012	x=0.024	x=0.036	x=0,048	x=0.060
y= 0.030	T(x, y, z)	348.85	349.19	350.23	351.94	354.31	357.29
y= 0.024	T(x, y, z)	347.07	347.43	348.50	350.27	352.72	355.81
y= 0.018	T(x, y, z)	345.67	346.04	347.14	348.96	351.47	354.64
y= 0.012	T(x, y, z)	344.67	345.04	346.16	348.01	350.57	353.80
y= 0.006	T(x, y, z)	344.06	344.44	345.57	347.44	350.03	353.29
y= 0.000	T(x, y, z)	343.86	344.24	345.38	347.25	349.85	353.13
"z" = 0.009		x=0.000	x=0.012	x=0.024	x=0.036	x=0,048	x=0.060
y= 0.030	T(x, y, z)	348.16	348.52	349.57	351.30	353.70	356.72
y= 0.024	T(x, y, z)	346.36	346.73	347.81	349.61	352.09	355.22
y= 0.018	T(x, y, z)	344.95	345.32	346.44	348.28	350.82	354.03
y= 0.012	T(x, y, z)	343.93	344.31	345.45	347.32	349.91	353.18
y= 0.006	T(x, y, z)	343.32	343.70	344.85	346.74	349.36	352.67

**Capítulo 9**

y= 0.000	T(x, y, z)	343.11	343.50	344.65	346.55	349.18	352.50
"z" = 0.006							
		x=0.000	x=0.012	x=0.024	x=0.036	x=0,048	x=0.060
y= 0.030	T(x, y, z)	347.68	348.03	349.09	350.84	353.26	356.31
y= 0.024	T(x, y, z)	345.86	346.22	347.32	349.13	351.64	354.79
y= 0.018	T(x, y, z)	344.43	344.81	345.93	347.79	350.36	353.60
y= 0.012	T(x, y, z)	343.40	343.78	344.93	346.83	349.44	352.74
y= 0.006	T(x, y, z)	342.78	343.17	344.33	346.24	348.89	352.23
y= 0.000	T(x, y, z)	342.57	342.96	344.13	346.05	348.70	352.05
"z" = 0.003							
		x=0.000	x=0.012	x=0.024	x=0.036	x=0,048	x=0.060
y= 0.030	T(x, y, z)	347.38	347.74	348.81	350.57	353.00	356.07
y= 0.024	T(x, y, z)	345.55	345.92	347.03	348.85	351.36	354.54
y= 0.018	T(x, y, z)	344.12	344.50	345.63	347.50	350.08	353.34
y= 0.012	T(x, y, z)	343.08	343.47	344.62	346.53	349.16	352.48
y= 0.006	T(x, y, z)	342.46	342.85	344.02	345.94	348.60	351.96
y= 0.000	T(x, y, z)	342.25	342.64	343.81	345.75	348.41	351.78
"z" = 0.000							
		x=0.000	x=0.012	x=0.024	x=0.036	x=0,048	x=0.060
y= 0.030	T(x, y, z)	347.28	347.64	348.71	350.47	352.91	355.99
y= 0.024	T(x, y, z)	345.45	345.82	346.93	348.75	351.27	354.46
y= 0.018	T(x, y, z)	344.01	344.39	345.53	347.40	349.99	353.25
y= 0.012	T(x, y, z)	342.98	343.36	344.52	346.43	349.06	352.39
y= 0.006	T(x, y, z)	342.35	342.74	343.91	345.84	348.50	351.87
y= 0.000	T(x, y, z)	342.14	342.54	343.71	345.64	348.32	351.69
"time" = 2700.0							
"z" = 0.015							
		x=0.000	x=0.012	x=0.024	x=0.036	x=0,048	x=0.060
y= 0.030	T(x, y, z)	381.21	381.34	381.72	382.35	383.22	384.31
y= 0.024	T(x, y, z)	380.56	380.69	381.08	381.73	382.63	383.77
y= 0.018	T(x, y, z)	380.04	380.18	380.58	381.25	382.17	383.34
y= 0.012	T(x, y, z)	379.68	379.81	380.23	380.91	381.85	383.03
y= 0.006	T(x, y, z)	379.45	379.59	380.01	380.70	381.65	382.85

y= 0.000	T(x, y, z)	379.38	379.52	379.94	380.63	381.58	382.78
"z" = 0.012							
		x=0.000	x=0.012	x=0.024	x=0.036	x=0,048	x=0.060
y= 0.030	T(x, y, z)	380.88	381.01	381.40	382.04	382.93	384.04
y= 0.024	T(x, y, z)	380.22	380.35	380.76	381.42	382.33	383.49
y= 0.018	T(x, y, z)	379.70	379.84	380.25	380.93	381.87	383.05
y= 0.012	T(x, y, z)	379.32	379.46	379.88	380.57	381.53	382.74
y= 0.006	T(x, y, z)	379.10	379.24	379.66	380.36	381.33	382.55
y= 0.000	T(x, y, z)	379.02	379.16	379.59	380.29	381.26	382.48
"z" = 0.009							
		x=0.000	x=0.012	x=0.024	x=0.036	x=0,048	x=0.060
y= 0.030	T(x, y, z)	380.63	380.76	381.15	381.80	382.70	383.83
y= 0.024	T(x, y, z)	379.96	380.09	380.50	381.17	382.10	383.27
y= 0.018	T(x, y, z)	379.43	379.57	379.98	380.67	381.62	382.82
y= 0.012	T(x, y, z)	379.05	379.19	379.61	380.32	381.28	382.51
y= 0.006	T(x, y, z)	378.82	378.96	379.39	380.10	381.08	382.32
y= 0.000	T(x, y, z)	378.74	378.89	379.32	380.03	381.01	382.25
"z" = 0.006							
		x=0.000	x=0.012	x=0.024	x=0.036	x=0,048	x=0.060
y= 0.030	T(x, y, z)	380.45	380.58	380.98	381.63	382.54	383.68
y= 0.024	T(x, y, z)	379.77	379.91	380.32	380.99	381.93	383.11
y= 0.018	T(x, y, z)	379.23	379.38	379.80	380.49	381.45	382.66
y= 0.012	T(x, y, z)	378.85	378.99	379.42	380.13	381.11	382.34
y= 0.006	T(x, y, z)	378.62	378.76	379.20	379.91	380.90	382.15
y= 0.000	T(x, y, z)	378.54	378.69	379.12	379.84	380.83	382.08
"z" = 0.003							
		x=0.000	x=0.012	x=0.024	x=0.036	x=0,048	x=0.060
y= 0.030	T(x, y, z)	380.34	380.47	380.87	381.53	382.44	383.58
y= 0.024	T(x, y, z)	379.65	379.79	380.20	380.89	381.83	383.01
y= 0.018	T(x, y, z)	379.12	379.26	379.68	380.38	381.35	382.57
y= 0.012	T(x, y, z)	378.73	378.88	379.31	380.02	381.00	382.24
y= 0.006	T(x, y, z)	378.50	378.64	379.08	379.80	380.79	382.05
y= 0.000	T(x, y, z)	378.42	378.57	379.00	379.73	380.72	381.98
"z" = 0.000							

**Capítulo 9**

		x=0.000	x=0.012	x=0.024	x=0.036	x=0,048	x=0.060
y= 0.030	T(x, y, z)	380.30	380.44	380.83	381.49	382.40	383.55
y= 0.024	T(x, y, z)	379.62	379.75	380.17	380.85	381.79	382.98
y= 0.018	T(x, y, z)	379.08	379.22	379.64	380.35	381.31	382.53
y= 0.012	T(x, y, z)	378.69	378.84	379.27	379.98	380.97	382.21
y= 0.006	T(x, y, z)	378.46	378.60	379.04	379.76	380.76	382.02
y= 0.000	T(x, y, z)	378.38	378.53	378.97	379.69	380.69	381.95
"time" =	3600.0						
"z" = 0.015							
		x=0.000	x=0.012	x=0.024	x=0.036	x=0,048	x=0.060
y= 0.030	T(x, y, z)	392.98	393.03	393.17	393.40	393.73	394.14
y= 0.024	T(x, y, z)	392.73	392.78	392.93	393.17	393.51	393.93
y= 0.018	T(x, y, z)	392.54	392.59	392.74	392.99	393.34	393.77
y= 0.012	T(x, y, z)	392.41	392.46	392.61	392.86	393.22	393.66
y= 0.006	T(x, y, z)	392.32	392.37	392.53	392.79	393.14	393.59
y= 0.000	T(x, y, z)	392.29	392.35	392.50	392.76	393.12	393.57
"z" = 0.012							
		x=0.000	x=0.012	x=0.024	x=0.036	x=0,048	x=0.060
y= 0.030	T(x, y, z)	392.86	392.91	393.05	393.29	393.62	394.04
y= 0.024	T(x, y, z)	392.61	392.66	392.81	393.06	393.40	393.83
y= 0.018	T(x, y, z)	392.41	392.47	392.62	392.87	393.22	393.67
y= 0.012	T(x, y, z)	392.27	392.33	392.48	392.74	393.10	393.55
y= 0.006	T(x, y, z)	392.19	392.24	392.40	392.66	393.02	393.48
y= 0.000	T(x, y, z)	392.16	392.21	392.37	392.64	393.00	393.46
"z" = 0.009							
		x=0.000	x=0.012	x=0.024	x=0.036	x=0,048	x=0.060
y= 0.030	T(x, y, z)	392.76	392.81	392.96	393.20	393.53	393.96
y= 0.024	T(x, y, z)	392.51	392.56	392.71	392.96	393.31	393.75
y= 0.018	T(x, y, z)	392.31	392.37	392.52	392.78	393.13	393.58
y= 0.012	T(x, y, z)	392.17	392.22	392.38	392.64	393.01	393.46
y= 0.006	T(x, y, z)	392.08	392.14	392.30	392.56	392.93	393.39
y= 0.000	T(x, y, z)	392.06	392.11	392.27	392.54	392.90	393.37
"z" = 0.006							
		x=0.000	x=0.012	x=0.024	x=0.036	x=0,048	x=0.060

y= 0.030	T(x, y, z)	392.69	392.74	392.89	393.14	393.47	393.90
y= 0.024	T(x, y, z)	392.44	392.49	392.64	392.90	393.25	393.69
y= 0.018	T(x, y, z)	392.24	392.29	392.45	392.71	393.07	393.52
y= 0.012	T(x, y, z)	392.10	392.15	392.31	392.58	392.94	393.40
y= 0.006	T(x, y, z)	392.01	392.06	392.23	392.49	392.86	393.33
y= 0.000	T(x, y, z)	391.98	392.04	392.20	392.47	392.84	393.31
"z" = 0.003		x=0.000	x=0.012	x=0.024	x=0.036	x=0,048	x=0.060
y= 0.030	T(x, y, z)	392.65	392.70	392.85	393.10	393.44	393.87
y= 0.024	T(x, y, z)	392.40	392.45	392.60	392.86	393.21	393.65
y= 0.018	T(x, y, z)	392.20	392.25	392.41	392.67	393.03	393.49
y= 0.012	T(x, y, z)	392.05	392.11	392.27	392.53	392.90	393.36
y= 0.006	T(x, y, z)	391.97	392.02	392.18	392.45	392.82	393.29
y= 0.000	T(x, y, z)	391.94	391.99	392.15	392.42	392.80	393.27
"z" = 0.000		x=0.000	x=0.012	x=0.024	x=0.036	x=0,048	x=0.060
y= 0.030	T(x, y, z)	392.64	392.69	392.84	393.08	393.43	393.85
y= 0.024	T(x, y, z)	392.38	392.43	392.59	392.84	393.20	393.64
y= 0.018	T(x, y, z)	392.18	392.24	392.39	392.66	393.02	393.47
y= 0.012	T(x, y, z)	392.04	392.09	392.25	392.52	392.89	393.35
y= 0.006	T(x, y, z)	391.95	392.01	392.17	392.44	392.81	393.28
y= 0.000	T(x, y, z)	391.92	391.98	392.14	392.41	392.78	393.26
"time" = 4500.0							
"z" = 0.015		x=0.000	x=0.012	x=0.024	x=0.036	x=0,048	x=0.060
y= 0.030	T(x, y, z)	397.38	397.39	397.45	397.54	397.66	397.81
y= 0.024	T(x, y, z)	397.29	397.30	397.36	397.45	397.58	397.73
y= 0.018	T(x, y, z)	397.21	397.23	397.29	397.38	397.51	397.67
y= 0.012	T(x, y, z)	397.16	397.18	397.24	397.33	397.47	397.63
y= 0.006	T(x, y, z)	397.13	397.15	397.21	397.30	397.44	397.60
y= 0.000	T(x, y, z)	397.12	397.14	397.20	397.29	397.43	397.60
"z" = 0.012		x=0.000	x=0.012	x=0.024	x=0.036	x=0,048	x=0.060

**Capítulo 9**

y= 0.030	T(x, y, z)	397.33	397.35	397.40	397.49	397.62	397.77
y= 0.024	T(x, y, z)	397.24	397.26	397.31	397.41	397.53	397.69
y= 0.018	T(x, y, z)	397.17	397.18	397.24	397.34	397.47	397.63
y= 0.012	T(x, y, z)	397.11	397.13	397.19	397.29	397.42	397.59
y= 0.006	T(x, y, z)	397.08	397.10	397.16	397.26	397.39	397.56
y= 0.000	T(x, y, z)	397.07	397.09	397.15	397.25	397.38	397.55
"z" = 0.009							
		x=0.000	x=0.012	x=0.024	x=0.036	x=0,048	x=0.060
y= 0.030	T(x, y, z)	397.30	397.31	397.37	397.46	397.58	397.74
y= 0.024	T(x, y, z)	397.20	397.22	397.28	397.37	397.50	397.66
y= 0.018	T(x, y, z)	397.13	397.15	397.21	397.30	397.43	397.60
y= 0.012	T(x, y, z)	397.07	397.09	397.15	397.25	397.39	397.56
y= 0.006	T(x, y, z)	397.04	397.06	397.12	397.22	397.36	397.53
y= 0.000	T(x, y, z)	397.03	397.05	397.11	397.21	397.35	397.52
"z" = 0.006							
		x=0.000	x=0.012	x=0.024	x=0.036	x=0,048	x=0.060
y= 0.030	T(x, y, z)	397.27	397.29	397.34	397.44	397.56	397.72
y= 0.024	T(x, y, z)	397.18	397.19	397.25	397.35	397.48	397.64
y= 0.018	T(x, y, z)	397.10	397.12	397.18	397.28	397.41	397.58
y= 0.012	T(x, y, z)	397.05	397.07	397.13	397.23	397.36	397.53
y= 0.006	T(x, y, z)	397.01	397.03	397.10	397.20	397.33	397.51
y= 0.000	T(x, y, z)	397.00	397.02	397.08	397.19	397.32	397.50
"z" = 0.003							
		x=0.000	x=0.012	x=0.024	x=0.036	x=0,048	x=0.060
y= 0.030	T(x, y, z)	397.25	397.27	397.33	397.42	397.55	397.71
y= 0.024	T(x, y, z)	397.16	397.18	397.24	397.33	397.46	397.63
y= 0.018	T(x, y, z)	397.08	397.10	397.16	397.26	397.40	397.57
y= 0.012	T(x, y, z)	397.03	397.05	397.11	397.21	397.35	397.52
y= 0.006	T(x, y, z)	397.00	397.02	397.08	397.18	397.32	397.49
y= 0.000	T(x, y, z)	396.99	397.01	397.07	397.17	397.31	397.48
"z" = 0.000							
		x=0.000	x=0.012	x=0.024	x=0.036	x=0,048	x=0.060
y= 0.030	T(x, y, z)	397.25	397.27	397.32	397.42	397.54	397.70
y= 0.024	T(x, y, z)	397.15	397.17	397.23	397.33	397.46	397.62



y= 0.018	T(x, y, z)	397.08	397.10	397.16	397.26	397.39	397.56
y= 0.012	T(x, y, z)	397.02	397.04	397.11	397.20	397.34	397.52
y= 0.006	T(x, y, z)	396.99	397.01	397.07	397.17	397.31	397.49
y= 0.000	T(x, y, z)	396.98	397.00	397.06	397.16	397.30	397.48
"time" = 5400.0							
"z" = 0.015							
		x=0.000	x=0.012	x=0.024	x=0.036	x=0,048	x=0.060
y= 0.030	T(x, y, z)	399.02	399.03	399.05	399.08	399.12	399.18
y= 0.024	T(x, y, z)	398.99	398.99	399.01	399.05	399.09	399.15
y= 0.018	T(x, y, z)	398.96	398.97	398.99	399.02	399.07	399.13
y= 0.012	T(x, y, z)	398.94	398.95	398.97	399.00	399.05	399.11
y= 0.006	T(x, y, z)	398.93	398.94	398.96	398.99	399.04	399.10
y= 0.000	T(x, y, z)	398.92	398.93	398.95	398.99	399.04	399.10
"z" = 0.012							
		x=0.000	x=0.012	x=0.024	x=0.036	x=0,048	x=0.060
y= 0.030	T(x, y, z)	399.00	399.01	399.03	399.06	399.11	399.17
y= 0.024	T(x, y, z)	398.97	398.97	399.00	399.03	399.08	399.14
y= 0.018	T(x, y, z)	398.94	398.95	398.97	399.00	399.05	399.12
y= 0.012	T(x, y, z)	398.92	398.93	398.95	398.99	399.04	399.10
y= 0.006	T(x, y, z)	398.91	398.92	398.94	398.98	399.03	399.09
y= 0.000	T(x, y, z)	398.91	398.91	398.94	398.97	399.02	399.09
"z" = 0.009							
		x=0.000	x=0.012	x=0.024	x=0.036	x=0,048	x=0.060
y= 0.030	T(x, y, z)	398.99	399.00	399.02	399.05	399.10	399.16
y= 0.024	T(x, y, z)	398.95	398.96	398.98	399.02	399.07	399.13
y= 0.018	T(x, y, z)	398.93	398.93	398.96	398.99	399.04	399.10
y= 0.012	T(x, y, z)	398.91	398.91	398.94	398.97	399.02	399.09
y= 0.006	T(x, y, z)	398.89	398.90	398.92	398.96	399.01	399.08
y= 0.000	T(x, y, z)	398.89	398.90	398.92	398.96	399.01	399.07
"z" = 0.006							
		x=0.000	x=0.012	x=0.024	x=0.036	x=0,048	x=0.060
y= 0.030	T(x, y, z)	398.98	398.99	399.01	399.04	399.09	399.15
y= 0.024	T(x, y, z)	398.94	398.95	398.97	399.01	399.06	399.12

## Capítulo 9

y= 0.018	T(x, y, z)	398.92	398.92	398.95	398.98	399.03	399.10
y= 0.012	T(x, y, z)	398.90	398.90	398.93	398.96	399.01	399.08
y= 0.006	T(x, y, z)	398.88	398.89	398.91	398.95	399.00	399.07
y= 0.000	T(x, y, z)	398.88	398.89	398.91	398.95	399.00	399.07
"z" = 0.003		x=0.000	x=0.012	x=0.024	x=0.036	x=0,048	x=0.060
y= 0.030	T(x, y, z)	398.97	398.98	399.00	399.04	399.08	399.14
y= 0.024	T(x, y, z)	398.94	398.95	398.97	399.00	399.05	399.11
y= 0.018	T(x, y, z)	398.91	398.92	398.94	398.98	399.03	399.09
y= 0.012	T(x, y, z)	398.89	398.90	398.92	398.96	399.01	399.07
y= 0.006	T(x, y, z)	398.88	398.89	398.91	398.95	399.00	399.06
y= 0.000	T(x, y, z)	398.87	398.88	398.90	398.94	398.99	399.06
"z" = 0.000		x=0.000	x=0.012	x=0.024	x=0.036	x=0,048	x=0.060
y= 0.030	T(x, y, z)	398.97	398.98	399.00	399.03	399.08	399.14
y= 0.024	T(x, y, z)	398.94	398.94	398.97	399.00	399.05	399.11
y= 0.018	T(x, y, z)	398.91	398.92	398.94	398.97	399.02	399.09
y= 0.012	T(x, y, z)	398.89	398.90	398.92	398.96	399.01	399.07
y= 0.006	T(x, y, z)	398.88	398.88	398.91	398.94	399.00	399.06
y= 0.000	T(x, y, z)	398.87	398.88	398.90	398.94	398.99	399.06

### 9.2.2. Programa retorta\_homo.for

```
raiz( 1) =257.6460
0.00      25.0000      257.6460
0.33      84.2258      300.4278
0.67     139.2653      340.1857
1.00     190.4145      377.1334
1.33     237.9484      411.4696
1.67     282.1225      443.3788
2.00     323.1742      473.0325
2.33     361.3243      500.5903
2.67     396.7779      526.2003
3.00     429.7255      550.0000
```

### 9.2.3. Programa retorta\_media.for

```
Tempo=      0.00
Tx_med=     25.0000      Tg=      87.3765
```

Tempo= 900.00		
Tx_med= 103.9637	Tg= 174.8814	
Tempo= 1800.00		
Tx_med= 178.9882	Tg= 249.9337	
Tempo= 2700.00		
Tx_med= 254.0049	Tg= 324.9506	
Tempo= 3600.00		
Tx_med= 329.0215	Tg= 399.9672	
Tempo= 4500.00		
Tx_med= 404.0381	Tg= 474.9838	
Tempo= 5400.00		
Tx_med= 479.0547	Tg= 550.0005	

"time" = 900.00							
"z" = 0.015		x=0.000	x=0.012	x=0.024	x=0.036	x=0.048	x=0.060
y= 0.030	T(x, y, z)	102.47	102.80	103.83	105.66	108.47	112.50
y= 0.024	T(x, y, z)	100.00	100.34	101.41	103.30	106.20	110.38
y= 0.018	T(x, y, z)	98.12	98.48	99.57	101.51	104.49	108.77
y= 0.012	T(x, y, z)	96.81	97.17	98.28	100.26	103.29	107.65
y= 0.006	T(x, y, z)	96.03	96.39	97.52	99.51	102.58	106.98
y= 0.000	T(x, y, z)	95.77	96.13	97.26	99.27	102.34	106.76
"z" = 0.012		x=0.000	x=0.012	x=0.024	x=0.036	x=0.048	x=0.060
y= 0.030	T(x, y, z)	101.22	101.56	102.61	104.47	107.32	111.43
y= 0.024	T(x, y, z)	98.71	99.06	100.14	102.07	105.02	109.27
y= 0.018	T(x, y, z)	96.80	97.16	98.27	100.25	103.28	107.64
y= 0.012	T(x, y, z)	95.46	95.83	96.96	98.97	102.05	106.49
y= 0.006	T(x, y, z)	94.66	95.03	96.18	98.21	101.33	105.81
y= 0.000	T(x, y, z)	94.40	94.77	95.92	97.96	101.09	105.59
"z" = 0.009		x=0.000	x=0.012	x=0.024	x=0.036	x=0.048	x=0.060
y= 0.030	T(x, y, z)	100.25	100.60	101.66	103.54	106.43	110.60

**Capítulo 9**

y= 0.024	T(x, y, z)	97.71	98.06	99.16	101.11	104.10	108.41
y= 0.018	T(x, y, z)	95.77	96.14	97.27	99.27	102.34	106.75
y= 0.012	T(x, y, z)	94.42	94.79	95.93	97.97	101.10	105.59
y= 0.006	T(x, y, z)	93.61	93.98	95.15	97.21	100.36	104.90
y= 0.000	T(x, y, z)	93.34	93.72	94.88	96.95	100.12	104.68
"z" = 0.006							
		x=0.000	x=0.012	x=0.024	x=0.036	x=0.048	x=0.060
y= 0.030	T(x, y, z)	99.56	99.91	100.98	102.89	105.80	110.01
y= 0.024	T(x, y, z)	97.00	97.35	98.46	100.43	103.45	107.80
y= 0.018	T(x, y, z)	95.04	95.41	96.55	98.57	101.67	106.12
y= 0.012	T(x, y, z)	93.67	94.05	95.20	97.26	100.42	104.95
y= 0.006	T(x, y, z)	92.86	93.24	94.41	96.49	99.68	104.26
y= 0.000	T(x, y, z)	92.59	92.97	94.14	96.23	99.43	104.03
"z" = 0.003							
		x=0.000	x=0.012	x=0.024	x=0.036	x=0.048	x=0.060
y= 0.030	T(x, y, z)	99.15	99.50	100.58	102.49	105.42	109.65
y= 0.024	T(x, y, z)	96.57	96.93	98.04	100.02	103.06	107.43
y= 0.018	T(x, y, z)	94.60	94.97	96.12	98.15	101.27	105.75
y= 0.012	T(x, y, z)	93.23	93.60	94.77	96.84	100.01	104.57
y= 0.006	T(x, y, z)	92.41	92.79	93.97	96.06	99.26	103.87
y= 0.000	T(x, y, z)	92.14	92.52	93.70	95.80	99.02	103.64
"z" = 0.000							
		x=0.000	x=0.012	x=0.024	x=0.036	x=0.048	x=0.060
y= 0.030	T(x, y, z)	99.01	99.36	100.44	102.36	105.30	109.53
y= 0.024	T(x, y, z)	96.43	96.79	97.90	99.89	102.93	107.31
y= 0.018	T(x, y, z)	94.46	94.83	95.98	98.01	101.13	105.62
y= 0.012	T(x, y, z)	93.08	93.45	94.62	96.70	99.87	104.44
y= 0.006	T(x, y, z)	92.26	92.64	93.82	95.92	99.13	103.74
y= 0.000	T(x, y, z)	91.99	92.37	93.55	95.66	98.88	103.51
"time" = 1800.00							
"z" = 0.015							
		x=0.000	x=0.012	x=0.024	x=0.036	x=0.048	x=0.060
y= 0.030	T(x, y, z)	177.44	177.78	178.83	180.69	183.51	187.56
y= 0.024	T(x, y, z)	174.97	175.32	176.41	178.33	181.25	185.43

y= 0.018	T(x, y, z)	173.09	173.45	174.57	176.54	179.53	183.83
y= 0.012	T(x, y, z)	171.77	172.14	173.28	175.28	178.33	182.70
y= 0.006	T(x, y, z)	170.99	171.36	172.51	174.54	177.62	182.03
y= 0.000	T(x, y, z)	170.73	171.10	172.26	174.29	177.38	181.81
"z" = 0.012							
		x=0.000	x=0.012	x=0.024	x=0.036	x=0.048	x=0.060
y= 0.030	T(x, y, z)	176.19	176.54	177.61	179.49	182.36	186.48
y= 0.024	T(x, y, z)	173.68	174.04	175.14	177.09	180.06	184.32
y= 0.018	T(x, y, z)	171.77	172.13	173.27	175.27	178.32	182.69
y= 0.012	T(x, y, z)	170.43	170.80	171.95	173.99	177.10	181.54
y= 0.006	T(x, y, z)	169.63	170.01	171.17	173.24	176.37	180.86
y= 0.000	T(x, y, z)	169.37	169.74	170.92	172.98	176.13	180.64
"z" = 0.009							
		x=0.000	x=0.012	x=0.024	x=0.036	x=0.048	x=0.060
y= 0.030	T(x, y, z)	175.22	175.58	176.66	178.57	181.48	185.65
y= 0.024	T(x, y, z)	172.68	173.04	174.16	176.14	179.15	183.46
y= 0.018	T(x, y, z)	170.74	171.11	172.26	174.29	177.38	181.80
y= 0.012	T(x, y, z)	169.38	169.76	170.93	173.00	176.14	180.64
y= 0.006	T(x, y, z)	168.57	168.96	170.14	172.23	175.41	179.96
y= 0.000	T(x, y, z)	168.31	168.69	169.88	171.97	175.16	179.73
"z" = 0.006							
		x=0.000	x=0.012	x=0.024	x=0.036	x=0.048	x=0.060
y= 0.030	T(x, y, z)	174.53	174.89	175.98	177.91	180.85	185.06
y= 0.024	T(x, y, z)	171.96	172.33	173.46	175.45	178.49	182.85
y= 0.018	T(x, y, z)	170.01	170.38	171.54	173.59	176.71	181.18
y= 0.012	T(x, y, z)	168.63	169.02	170.20	172.28	175.46	180.00
y= 0.006	T(x, y, z)	167.82	168.21	169.40	171.51	174.72	179.31
y= 0.000	T(x, y, z)	167.55	167.94	169.14	171.25	174.47	179.08
"z" = 0.003							
		x=0.000	x=0.012	x=0.024	x=0.036	x=0.048	x=0.060
y= 0.030	T(x, y, z)	174.12	174.48	175.58	177.51	180.47	184.70
y= 0.024	T(x, y, z)	171.54	171.90	173.04	175.05	178.10	182.48
y= 0.018	T(x, y, z)	169.57	169.95	171.11	173.17	176.31	180.80

**Capítulo 9**

y= 0.012	T(x, y, z)	168.19	168.57	169.76	171.86	175.05	179.62
y= 0.006	T(x, y, z)	167.37	167.76	168.96	171.08	174.31	178.92
y= 0.000	T(x, y, z)	167.10	167.49	168.69	170.82	174.06	178.69
"z" = 0.000							
		x=0.000	x=0.012	x=0.024	x=0.036	x=0.048	x=0.060
y= 0.030	T(x, y, z)	173.98	174.34	175.44	177.38	180.34	184.58
y= 0.024	T(x, y, z)	171.39	171.76	172.90	174.91	177.97	182.36
y= 0.018	T(x, y, z)	169.42	169.80	170.97	173.03	176.17	180.67
y= 0.012	T(x, y, z)	168.04	168.42	169.62	171.72	174.92	179.49
y= 0.006	T(x, y, z)	167.22	167.61	168.81	170.94	174.17	178.79
y= 0.000	T(x, y, z)	166.95	167.34	168.55	170.68	173.92	178.56
"time" = 2700.00							
"z" = 0.015							
		x=0.000	x=0.012	x=0.024	x=0.036	x=0.048	x=0.060
y= 0.030	T(x, y, z)	252.46	252.80	253.85	255.70	258.53	262.57
y= 0.024	T(x, y, z)	249.99	250.34	251.43	253.34	256.27	260.45
y= 0.018	T(x, y, z)	248.11	248.47	249.58	251.55	254.55	258.84
y= 0.012	T(x, y, z)	246.79	247.16	248.29	250.30	253.35	257.72
y= 0.006	T(x, y, z)	246.01	246.38	247.53	249.55	252.64	257.05
y= 0.000	T(x, y, z)	245.75	246.12	247.27	249.31	252.40	256.83
"z" = 0.012							
		x=0.000	x=0.012	x=0.024	x=0.036	x=0.048	x=0.060
y= 0.030	T(x, y, z)	251.21	251.56	252.62	254.51	257.38	261.50
y= 0.024	T(x, y, z)	248.70	249.05	250.16	252.11	255.08	259.34
y= 0.018	T(x, y, z)	246.78	247.15	248.29	250.29	253.34	257.70
y= 0.012	T(x, y, z)	245.44	245.82	246.97	249.01	252.11	256.56
y= 0.006	T(x, y, z)	244.65	245.02	246.19	248.25	251.39	255.88
y= 0.000	T(x, y, z)	244.38	244.76	245.93	248.00	251.15	255.65
"z" = 0.009							
		x=0.000	x=0.012	x=0.024	x=0.036	x=0.048	x=0.060
y= 0.030	T(x, y, z)	250.24	250.59	251.67	253.58	256.50	260.67
y= 0.024	T(x, y, z)	247.69	248.06	249.18	251.15	254.16	258.48
y= 0.018	T(x, y, z)	245.76	246.13	247.28	249.31	252.40	256.82
y= 0.012	T(x, y, z)	244.40	244.77	245.95	248.01	251.16	255.66

y= 0.006	T(x, y, z)	243.59	243.97	245.16	247.24	250.42	254.97
y= 0.000	T(x, y, z)	243.32	243.71	244.89	246.99	250.18	254.75
"z" = 0.006							
		x=0.000	x=0.012	x=0.024	x=0.036	x=0.048	x=0.060
y= 0.030	T(x, y, z)	249.55	249.90	251.00	252.93	255.86	260.07
y= 0.024	T(x, y, z)	246.98	247.34	248.48	250.47	253.51	257.87
y= 0.018	T(x, y, z)	245.02	245.40	246.56	248.61	251.73	256.19
y= 0.012	T(x, y, z)	243.65	244.03	245.21	247.30	250.48	255.02
y= 0.006	T(x, y, z)	242.84	243.22	244.42	246.53	249.74	254.33
y= 0.000	T(x, y, z)	242.57	242.95	244.15	246.27	249.49	254.10
"z" = 0.003							
		x=0.000	x=0.012	x=0.024	x=0.036	x=0.048	x=0.060
y= 0.030	T(x, y, z)	249.14	249.49	250.59	252.53	255.49	259.72
y= 0.024	T(x, y, z)	246.55	246.92	248.06	250.06	253.12	257.50
y= 0.018	T(x, y, z)	244.58	244.96	246.13	248.19	251.33	255.82
y= 0.012	T(x, y, z)	243.20	243.59	244.78	246.87	250.07	254.64
y= 0.006	T(x, y, z)	242.39	242.77	243.98	246.10	249.32	253.94
y= 0.000	T(x, y, z)	242.11	242.50	243.71	245.84	249.08	253.71
"z" = 0.000							
		x=0.000	x=0.012	x=0.024	x=0.036	x=0.048	x=0.060
y= 0.030	T(x, y, z)	249.00	249.36	250.46	252.40	255.36	259.60
y= 0.024	T(x, y, z)	246.41	246.78	247.92	249.93	252.99	257.38
y= 0.018	T(x, y, z)	244.44	244.82	245.99	248.05	251.19	255.69
y= 0.012	T(x, y, z)	243.06	243.44	244.63	246.73	249.93	254.51
y= 0.006	T(x, y, z)	242.24	242.62	243.83	245.95	249.19	253.81
y= 0.000	T(x, y, z)	241.96	242.35	243.56	245.69	248.94	253.58
"time" = 3600.00							
"z" = 0.015							
		x=0.000	x=0.012	x=0.024	x=0.036	x=0.048	x=0.060
y= 0.030	T(x, y, z)	327.48	327.82	328.87	330.72	333.54	337.59
y= 0.024	T(x, y, z)	325.00	325.36	326.44	328.36	331.28	335.47
y= 0.018	T(x, y, z)	323.13	323.49	324.60	326.57	329.57	333.86
y= 0.012	T(x, y, z)	321.81	322.17	323.31	325.31	328.37	332.73

**Capítulo 9**

y= 0.006	T(x, y, z)	321.02	321.40	322.54	324.57	327.65	332.07
y= 0.000	T(x, y, z)	320.76	321.14	322.29	324.32	327.42	331.85
"z" = 0.012		x=0.000	x=0.012	x=0.024	x=0.036	x=0.048	x=0.060
y= 0.030	T(x, y, z)	326.23	326.57	327.64	329.53	332.40	336.52
y= 0.024	T(x, y, z)	323.71	324.07	325.17	327.13	330.10	334.36
y= 0.018	T(x, y, z)	321.80	322.17	323.30	325.30	328.35	332.72
y= 0.012	T(x, y, z)	320.46	320.83	321.99	324.03	327.13	331.57
y= 0.006	T(x, y, z)	319.66	320.04	321.21	323.27	326.41	330.90
y= 0.000	T(x, y, z)	319.40	319.78	320.95	323.02	326.17	330.67
"z" = 0.009		x=0.000	x=0.012	x=0.024	x=0.036	x=0.048	x=0.060
y= 0.030	T(x, y, z)	325.26	325.61	326.69	328.60	331.51	335.68
y= 0.024	T(x, y, z)	322.71	323.07	324.19	326.17	329.18	333.50
y= 0.018	T(x, y, z)	320.77	321.14	322.29	324.32	327.41	331.84
y= 0.012	T(x, y, z)	319.41	319.79	320.96	323.03	326.17	330.68
y= 0.006	T(x, y, z)	318.61	318.99	320.17	322.26	325.44	329.99
y= 0.000	T(x, y, z)	318.34	318.72	319.91	322.01	325.20	329.76
"z" = 0.006		x=0.000	x=0.012	x=0.024	x=0.036	x=0.048	x=0.060
y= 0.030	T(x, y, z)	324.57	324.92	326.01	327.94	330.88	335.09
y= 0.024	T(x, y, z)	322.00	322.36	323.49	325.49	328.53	332.88
y= 0.018	T(x, y, z)	320.04	320.42	321.58	323.62	326.74	331.21
y= 0.012	T(x, y, z)	318.67	319.05	320.23	322.32	325.49	330.04
y= 0.006	T(x, y, z)	317.85	318.24	319.43	321.54	324.75	329.34
y= 0.000	T(x, y, z)	317.58	317.97	319.17	321.29	324.51	329.11
"z" = 0.003		x=0.000	x=0.012	x=0.024	x=0.036	x=0.048	x=0.060
y= 0.030	T(x, y, z)	324.15	324.51	325.61	327.55	330.50	334.74
y= 0.024	T(x, y, z)	321.57	321.94	323.07	325.08	328.14	332.52
y= 0.018	T(x, y, z)	319.60	319.98	321.15	323.21	326.34	330.83
y= 0.012	T(x, y, z)	318.22	318.61	319.79	321.89	325.08	329.66
y= 0.006	T(x, y, z)	317.40	317.79	318.99	321.11	324.34	328.96
y= 0.000	T(x, y, z)	317.13	317.52	318.73	320.85	324.09	328.73



"z" = 0.000							
		x=0.000	x=0.012	x=0.024	x=0.036	x=0.048	x=0.060
y= 0.030	T(x, y, z)	324.02	324.37	325.47	327.42	330.38	334.62
y= 0.024	T(x, y, z)	321.43	321.79	322.93	324.94	328.01	332.39
y= 0.018	T(x, y, z)	319.46	319.83	321.00	323.07	326.21	330.71
y= 0.012	T(x, y, z)	318.07	318.46	319.65	321.75	324.95	329.53
y= 0.006	T(x, y, z)	317.25	317.64	318.85	320.97	324.20	328.83
y= 0.000	T(x, y, z)	316.98	317.37	318.58	320.71	323.96	328.60
"time" = 4500.00							
"z" = 0.015							
		x=0.000	x=0.012	x=0.024	x=0.036	x=0.048	x=0.060
y= 0.030	T(x, y, z)	402.49	402.83	403.88	405.74	408.56	412.61
y= 0.024	T(x, y, z)	400.02	400.37	401.46	403.38	406.30	410.48
y= 0.018	T(x, y, z)	398.14	398.50	399.62	401.59	404.58	408.88
y= 0.012	T(x, y, z)	396.82	397.19	398.33	400.33	403.38	407.75
y= 0.006	T(x, y, z)	396.04	396.41	397.56	399.59	402.67	407.08
y= 0.000	T(x, y, z)	395.78	396.15	397.31	399.34	402.43	406.86
"z" = 0.012							
		x=0.000	x=0.012	x=0.024	x=0.036	x=0.048	x=0.060
y= 0.030	T(x, y, z)	401.24	401.59	402.66	404.54	407.42	411.53
y= 0.024	T(x, y, z)	398.73	399.09	400.19	402.14	405.11	409.37
y= 0.018	T(x, y, z)	396.82	397.18	398.32	400.32	403.37	407.74
y= 0.012	T(x, y, z)	395.47	395.85	397.00	399.04	402.15	406.59
y= 0.006	T(x, y, z)	394.68	395.06	396.22	398.29	401.42	405.91
y= 0.000	T(x, y, z)	394.41	394.79	395.97	398.03	401.18	405.69
"z" = 0.009							
		x=0.000	x=0.012	x=0.024	x=0.036	x=0.048	x=0.060
y= 0.030	T(x, y, z)	400.27	400.62	401.71	403.62	406.53	410.70
y= 0.024	T(x, y, z)	397.73	398.09	399.21	401.19	404.20	408.51
y= 0.018	T(x, y, z)	395.79	396.16	397.31	399.34	402.43	406.85
y= 0.012	T(x, y, z)	394.43	394.81	395.98	398.04	401.19	405.69
y= 0.006	T(x, y, z)	393.62	394.01	395.19	397.28	400.46	405.01
y= 0.000	T(x, y, z)	393.35	393.74	394.93	397.02	400.21	404.78

**Capítulo 9**

"z" = 0.006		x=0.000	x=0.012	x=0.024	x=0.036	x=0.048	x=0.060
y= 0.030	T(x, y, z)	399.58	399.94	401.03	402.96	405.90	410.11
y= 0.024	T(x, y, z)	397.01	397.38	398.51	400.50	403.54	407.90
y= 0.018	T(x, y, z)	395.06	395.43	396.59	398.64	401.76	406.23
y= 0.012	T(x, y, z)	393.68	394.07	395.25	397.33	400.51	405.05
y= 0.006	T(x, y, z)	392.87	393.26	394.45	396.56	399.77	404.36
y= 0.000	T(x, y, z)	392.60	392.99	394.19	396.30	399.52	404.13
"z" = 0.003		x=0.000	x=0.012	x=0.024	x=0.036	x=0.048	x=0.060
y= 0.030	T(x, y, z)	399.17	399.53	400.62	402.56	405.52	409.75
y= 0.024	T(x, y, z)	396.58	396.95	398.09	400.10	403.15	407.53
y= 0.018	T(x, y, z)	394.62	395.00	396.16	398.22	401.36	405.85
y= 0.012	T(x, y, z)	393.24	393.62	394.81	396.91	400.10	404.67
y= 0.006	T(x, y, z)	392.42	392.81	394.01	396.13	399.36	403.97
y= 0.000	T(x, y, z)	392.15	392.54	393.74	395.87	399.11	403.74
"z" = 0.000		x=0.000	x=0.012	x=0.024	x=0.036	x=0.048	x=0.060
y= 0.030	T(x, y, z)	399.03	399.39	400.49	402.43	405.39	409.63
y= 0.024	T(x, y, z)	396.44	396.81	397.95	399.96	403.02	407.41
y= 0.018	T(x, y, z)	394.47	394.85	396.02	398.08	401.23	405.72
y= 0.012	T(x, y, z)	393.09	393.47	394.66	396.77	399.97	404.54
y= 0.006	T(x, y, z)	392.27	392.66	393.86	395.99	399.22	403.84
y= 0.000	T(x, y, z)	392.00	392.39	393.60	395.73	398.97	403.61
"time" = 5400.00							
"z" = 0.015		x=0.000	x=0.012	x=0.024	x=0.036	x=0.048	x=0.060
y= 0.030	T(x, y, z)	477.51	477.85	478.90	480.75	483.58	487.62
y= 0.024	T(x, y, z)	475.04	475.39	476.48	478.39	481.32	485.50
y= 0.018	T(x, y, z)	473.16	473.52	474.63	476.60	479.60	483.89
y= 0.012	T(x, y, z)	471.84	472.21	473.34	475.35	478.40	482.77
y= 0.006	T(x, y, z)	471.06	471.43	472.58	474.60	477.69	482.10
y= 0.000	T(x, y, z)	470.80	471.17	472.32	474.36	477.45	481.88
"z" = 0.012							

		x=0.000	x=0.012	x=0.024	x=0.036	x=0.048	x=0.060
y= 0.030	T(x, y, z)	476.26	476.61	477.67	479.56	482.43	486.55
y= 0.024	T(x, y, z)	473.75	474.10	475.21	477.16	480.13	484.39
y= 0.018	T(x, y, z)	471.83	472.20	473.33	475.34	478.39	482.75
y= 0.012	T(x, y, z)	470.49	470.86	472.02	474.06	477.16	481.61
y= 0.006	T(x, y, z)	469.69	470.07	471.24	473.30	476.44	480.93
y= 0.000	T(x, y, z)	469.43	469.81	470.98	473.05	476.20	480.70
"z" = 0.009							
		x=0.000	x=0.012	x=0.024	x=0.036	x=0.048	x=0.060
y= 0.030	T(x, y, z)	475.29	475.64	476.72	478.63	481.54	485.72
y= 0.024	T(x, y, z)	472.74	473.11	474.23	476.20	479.21	483.53
y= 0.018	T(x, y, z)	470.81	471.18	472.33	474.36	477.45	481.87
y= 0.012	T(x, y, z)	469.45	469.82	471.00	473.06	476.21	480.71
y= 0.006	T(x, y, z)	468.64	469.02	470.21	472.29	475.47	480.02
y= 0.000	T(x, y, z)	468.37	468.76	469.94	472.04	475.23	479.79
"z" = 0.006							
		x=0.000	x=0.012	x=0.024	x=0.036	x=0.048	x=0.060
y= 0.030	T(x, y, z)	474.60	474.95	476.05	477.98	480.91	485.12
y= 0.024	T(x, y, z)	472.03	472.39	473.53	475.52	478.56	482.92
y= 0.018	T(x, y, z)	470.07	470.45	471.61	473.66	476.78	481.24
y= 0.012	T(x, y, z)	468.70	469.08	470.26	472.35	475.53	480.07
y= 0.006	T(x, y, z)	467.89	468.27	469.47	471.58	474.78	479.38
y= 0.000	T(x, y, z)	467.62	468.00	469.20	471.32	474.54	479.15
"z" = 0.003							
		x=0.000	x=0.012	x=0.024	x=0.036	x=0.048	x=0.060
y= 0.030	T(x, y, z)	474.19	474.54	475.64	477.58	480.54	484.77
y= 0.024	T(x, y, z)	471.60	471.97	473.11	475.11	478.17	482.55
y= 0.018	T(x, y, z)	469.63	470.01	471.18	473.24	476.38	480.87
y= 0.012	T(x, y, z)	468.25	468.64	469.83	471.92	475.12	479.69
y= 0.006	T(x, y, z)	467.44	467.82	469.03	471.15	474.37	478.99
y= 0.000	T(x, y, z)	467.16	467.55	468.76	470.89	474.13	478.76
"z" = 0.000							
		x=0.000	x=0.012	x=0.024	x=0.036	x=0.048	x=0.060
y= 0.030	T(x, y, z)	474.05	474.41	475.51	477.45	480.41	484.65

y= 0.024	T(x, y, z)	471.46	471.83	472.97	474.98	478.04	482.43
y= 0.018	T(x, y, z)	469.49	469.87	471.04	473.10	476.24	480.74
y= 0.012	T(x, y, z)	468.11	468.49	469.68	471.78	474.98	479.56
y= 0.006	T(x, y, z)	467.29	467.67	468.88	471.00	474.24	478.86
y= 0.000	T(x, y, z)	467.01	467.40	468.61	470.74	473.99	478.63

### 9.2.4. Programa retorta\_incre.for

teste	549.9962	87.3760	0.0038	479.0510
teste	550.0005	87.3765	-0.0005	479.0547
teste	549.9967	87.3761	0.0033	479.0514
teste	549.9971	87.3761	0.0029	479.0518
teste	549.9975	87.3762	0.0025	479.0521
teste	549.9979	87.3762	0.0021	479.0525
teste	549.9984	87.3763	0.0016	479.0529
teste	549.9988	87.3763	0.0012	479.0532
teste	549.9992	87.3764	0.0008	479.0536
teste	549.9996	87.3764	0.0004	479.0539
teste	550.0000	87.3765	0.0000	479.0543

raiz( 1) = 87.3765