

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
SECRETARIA DA INDÚSTRIA, COMÉRCIO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

MODELO NUMÉRICO DE ISOLAÇÃO TÉRMICA INTERNA
TIPO FIBRAS EM DUTOS DE GÁS QUENTE

Armin Nelson Urban Welter

Dissertação apresentada ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares como parte dos requisitos para obtenção do Grau de "Mestre - Área Reactores Nucleares de Potência e Tecnologia do Combustível Nuclear".

Orientador: Ahmet Aydın Konuk

São Paulo
1979

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES

SECRETARIA DA INDÚSTRIA, COMÉRCIO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA

AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Título da Dissertação:

MODELO NUMÉRICO DE ISOLAÇÃO TÉRMICA INTERNA
TIPO FIBRAS EM DUTOS DE GÁS QUENTE

Nome do Autor:

ARMIN NELSON URBAN WELTER



Dissertação apresentada ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares como parte dos requisitos para obtenção do grau de "Mestre - Área Reactores Nucleares de Potencia e Tecnologia do Combustível Nuclear".

Orientador: AHMET AYDIN KONUK

SÃO PAULO

1979

Los meus pais

Erwin A. Welter a M. Marga Urban Welter

Agradecimentos

Dr. Ahmet Aydın Konuk

Orientador

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares

Ao Pessoal do

Centro de Processamento de Dados do IPEN

A todos que direta ou indiretamente contribuíram na realização deste trabalho.

Resumo

Foi desenvolvido um modelo numérico para o estudo da convecção natural em isolamento térmico interno tipo fibras, para dutos cilíndricos nas posições horizontal e vertical. As distribuições de velocidades, temperaturas e de fluxo, obtidas, permitem o cálculo da condutividade térmica efetiva, global e ao longo da parede fria, que são necessários para o projeto do isolamento interno. O número de Nusselt global, foi correlacionado com o número de Rayleigh, para uma rápida avaliação. O modelo foi verificado na faixa onde não ocorre convecção natural, pois só para este caso, existem dados experimentais.

Abstract

A numerical model has been developed to study natural convection in fibrous internal insulation for cylindrical and vertical position. The computed velocity temperature and stream distributions yielded local cold wall and over all effective thermal conductivities, both necessary in the design of the internal insulation. The overall Nusselt number has been correlated with Rayleigh number for an immediate evaluation. The model was verified for non-convective region because experiments has been made only for that region.

Zusammenfassung

Es wurde ein numerisches Modell für das Studium der freien Konvektion in gestopften Faserisierungen für Röhre in Horizontal und Vertikal entwickelt. Die erhaltende Verteilungen der Geschwindigkeiten, Temperaturen und des Flusses, bringen zur Rechenng der termisch effektive leitung, gesamt und entlag der kalten Wand, die für dem Faserisierungenprojekt notwendig sind. Um eine oberflächliche oder kurze Bewertung, wurde die gesamte Nusselt zahl mit die Rayleigh zahl in Beziehung gebracht. Das Modell wurde in ein Streifen in denen die freie Konvektion nicht eintretet, überprüft, denn nur in diesem Fall, ergeben sich Experimentelle daten.

Sumário

	pag.
I. Introdução	1
1.1 Objetivo	5
1.2 Trabalhos Anteriores	6
1.3 Hipoteses	6
1.4 Descrição do Modelo	7
II. Formulação das Equações e Condições de Contorno .	8
2.1 Equacionamento para Cilindro na Posição Ho- rizontal	8
2.1.1 Equação de Conservação de Massa ..	8
2.1.2 Equação de Conservação da Quantida- de de Movimento	10
2.1.3 Equação da Conservação de Energia .	11
2.1.4 Condições de Contorno	12
2.2 Equacionamento para Cilindro na Posição Vertical	12
2.2.1 Equação de Conservação de Massa ..	14
2.2.2 Equação de Conservação da Quantida- de Movimento	14
2.2.3 Equação de Conservação de Energia .	15
2.2.4 Condições de Contorno	15
2.3 Formulação para Paredes Intermediárias ...	16

	pag
III. Método e Solução Numérica	17
3.1 Cilindro na Posição Horizontal	17
3.1.1 Equação da Quantidade de Movimento	19
3.1.2 Equação da Energia	20
3.1.3 Condições de Contorno	21
3.1.4 Soluções Interativas das Equações Algébricas	23
3.2 Cilindro na Posição Vertical	26
3.2.1 Equação da Quantidade de Movimento	26
3.2.2 Equação da Energia	28
3.2.3 Condições de Contorno	28
3.3 Paredes Intermediárias	30
IV. Resultados	32
4.1 Cilindro na Posição Horizontal	32
4.1.1 Distribuições de Velocidades e Tem peraturas	32
4.1.2 Condutividade Térmica Efetiva	41
4.1.3 Número de Nusselt Global e Local .	42
4.2 Cilindro na Posição Vertical	51
V. Conclusão	61
Nomenclaturas	63
Anexo I	65
Anexo II	70
Referencias	111

Lista de Figuras

		pag
1	Isolamento térmico tipo fibras, entre duas paredes paralelas	3
2	Geometria do cilindro na posição horizontal considerada no modelo	9
3	Geometria do cilindro na posição vertical considerada no modelo	13
4	Rede considerada na aplicação das diferenças finitas, no caso do cilindro na posição horizontal ...	18
5	Matriz da equação da quantidade de movimento e condições de contorno, para uma rede de 4x4 malhas .. Os x's são os coeficientes não nulos	24
6	Diagrama de blocos utilizado nos programas	25
7	Rede considerada na aplicação das diferenças finitas no caso do cilindro na posição vertical	27
8-a	Linhas de fluxo para cilindro na posição horizontal, sem considerar cilindros intermediários , Ra = 495 ; Nu = 3.0	33
8-b	Temperaturas adimensionais para cilindro na posição horizontal, sem considerar cilindros intermediários, Ra = 495 ; Nu = 3.0	34

9-a	Linhas de fluxo para cilindro na posição horizontal, considerando um cilindro intermediário, Ra = 498; Nu = 2.81	35
9-b	Temperaturas adimensionais para cilindro na posição horizontal, considerando um cilindro intermediário, Ra = 498 ; Nu = 2.81	36
10-a	Linhas de fluxo para cilindro na posição horizontal, considerando dois cilindros intermediários , Ra = 449 ; Nu = 2.6	37
10-b	Temperaturas adimensionais para cilindro na posição horizontal, considerando dois cilindros intermediários, Ra = 449 ; Nu = 2.6	38
11-a	Componentes angulares das velocidades de massa para cilindro na posição horizontal, sem considerar a existência de cilindros intermediários, Ra = 495 ; Nu = 3.0	39
11-b	Componentes radiais das velocidades de massa, para cilindro na posição horizontal, sem considerar a existência de cilindros intermediários, Ra = 495 ; Nu = 3.0	40
12	Correlação do número de Nusselt global para cilindro na posição horizontal e para a posição vertical, considerando nenhum, um e dois cilindros intermediários	45
13	Variação do número de Nusselt com a pressão, obtida na KFA, para o gás hélio	48
14	Variação do número de Nusselt com a pressão, obtida na KFA, para o ar	49

9-a	Linhas de fluxo para cilindro na posição horizontal, considerando um cilindro intermediário, Ra = 498; Nu = 2.81	35
9-b	Temperaturas adimensionais para cilindro na posição horizontal, considerando um cilindro intermediário, Ra = 498 ; Nu = 2.81	36
10-a	Linhas de fluxo para cilindro na posição horizontal, considerando dois cilindros intermediários , Ra = 449 ; Nu = 2.6	37
10-b	Temperaturas adimensionais para cilindro na posição horizontal, considerando dois cilindros intermediários, Ra = 449 ; Nu = 2.6	38
11-a	Componentes angulares das velocidades de massa para cilindro na posição horizontal, sem considerar a existência de cilindros intermediários, Ra = 495 ; Nu = 3.0	39
11-b	Componentes radiais das velocidades de massa, para cilindro na posição horizontal, sem considerar a existência de cilindros intermediários, Ra = 495 ; Nu = 3.0	40
12	Correlação do número de Nusselt global para cilindro na posição horizontal e para a posição vertical, considerando nenhum, um e dois cilindros intermediários	45
13	Variação do número de Nusselt com a pressão, obtida na KFA, para o gás hélio	48
14	Variação do número de Nusselt com a pressão, obtida na KFA, para o ar	49

	pag	
15	Variação do número de Nusselt local ao longo da parede fria, para cilindro na posição horizontal .	50
16-a	Linhas de fluxo para cilindro na posição vertical, sem considerar cilindros intermediários, $RA = 502$ $Nu = 3.26$	52
16-b	Temperaturas adimensionais para cilindro na posi- ção vertical, sem considerar cilindros intermediá- rios, $Ra = 512$; $Nu = 3.26$	53
17-a	Linhas de fluxo para cilindro na posição vertical considerando um cilindro intermediário. $Ra = 279$ $Nu = 2.11$	54
17-b	Temperaturas adimensionais para cilindro na posi- ção vertical, considerando um cilindro intermediá- rio, $Ra = 279$; $Nu = 2.11$	55
18-a	Linhas de fluxo para cilindro na posição vertical considerando dois cilindros intermediários, $Ra = 160$; $Nu = 1.83$	56
18-b	Temperaturas adimensionais para cilindro na posi- ção vertical, considerando dois cilindros inter- mediários, $Ra = 160$; $Nu = 1.83$	57
19-a	Componentes axiais das velocidades de massa, para cilindro na posição vertical, sem considerar a existência de cilindros intermediários, $Ra = 512$; $Nu = 3.26$	58
19-b	Componentes radiais das velocidades de massa, pa- ra cilindro na posição vertical, sem considerar a existência de cilindros intermediários, $Ra = 512$; $Nu = 3.26$	59

	pag
20	Variação do número de Nusselt local ao longo da parede fria, para cilindro na posição vertical .. 60
21	Vaso de pressão utilizado para determinar a permeabilidade e a condutividade térmica das fibras ... 66
22	Diagrama da permeabilidade versus pressão, obtido nos testes preliminares no IPEN 68

I. Introdução

Os excelentes resultados obtidos na operação dos protótipos dos reatores nucleares à alta temperatura (HTGR), Peach Botton (EUA), Dragon (Inglaterra) e AVR (Alemanha Ocidental), mostram a viabilidade de utilizar estes reatores em processos químicos e industriais, que requerem fornecimento de calor em temperaturas superiores a 750°C.

Estes reatores nucleares, operam com refrigerante à temperatura que varia de 800 a 950°C e pressão da ordem de 40 a 50 bar, dependendo do tipo de reator. Nos reatores para turbina a hélio (HHT) [1,2], a temperatura de projeto do gás é de 850°C, e para o projeto do protótipo do "Nuclear Process Heat" (PNP) - [1,2,3] é de 950°C.

Devido as condições do refrigerante (alta pressão e temperatura), é necessário uma barreira térmica interna, ou isolamento térmico interno, tanto no vaso de pressão do reator, como nos dutos que conduzem o gás refrigerante, para proteger as paredes da alta temperatura, sujeitando-as apenas, à ação da alta pressão.

Até o presente momento, foram testados em laboratório, três sistemas de isolamento, aplicáveis nas paredes do vaso de pressão do reator e nos dutos condutores de gás quente. Os sistemas de isolamento: testados foram, o de folhas metálicas [1,2,4,5,6,7], de fibras de Kaowool [1,2,8,9] e o cerâmico feito de carbono [1,2,10].

Os resultados obtidos nos testes, mostraram que os isolamentos de folhas metálicas e de fibras, apresentaram melhor eficiência térmica, enquanto que o cerâmico, que é o de menor custo, apresentou uma série de deficiências durante os testes preliminares [1,2] .

Considerando o alto custo do isolamento de folhas metálicas, e as deficiências apresentadas pelo isolamento cerâmico, a probabilidade de ser utilizado o isolamento de fibras no projeto dos HTGR é grande, pois, para tubos de até 5 metros, sua utilização é economicamente viável; no caso de dutos longos, o sistema de isolamento a ser utilizado, está em fase de estudos de alternativas, sendo que o isolamento cerâmico, mesmo apresentando deficiências, está incluído nas alternativas em estudo .

O isolamento interno tipo fibras, foi testado na Jülich, Alemanha Ocidental (KFA) [8] em cilindros horizontais, e está sendo testado no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo (IPEN), [11,12] em um cilindro na posição vertical. As secções de testes utilizadas, foram construídas conforme o esquema da figura 1, projetadas para minimizar a convecção forçada e natural dentro do isolamento, que deteriora o efeito isolante do gás.

O acesso do gás ao isolamento para equalizar a pressão, é feito por pequenos orifícios circunferenciais no duto interno. A equalização da pressão é necessária, para não sujeitar a parede interna, que fica em contacto com o gás quente, à alta pressão. Pelas mesmas razões, é permitida a passagem de gás entre a parede intermediária e o separador transversal em "V".

Os separadores transversais em V, estão localizados ao lado dos orifícios, sendo eles uma barreira física entre os planos de orifícios circunferenciais, para evitar a convecção forçada do gás, ou circulação de gás entre planos de orifícios separa

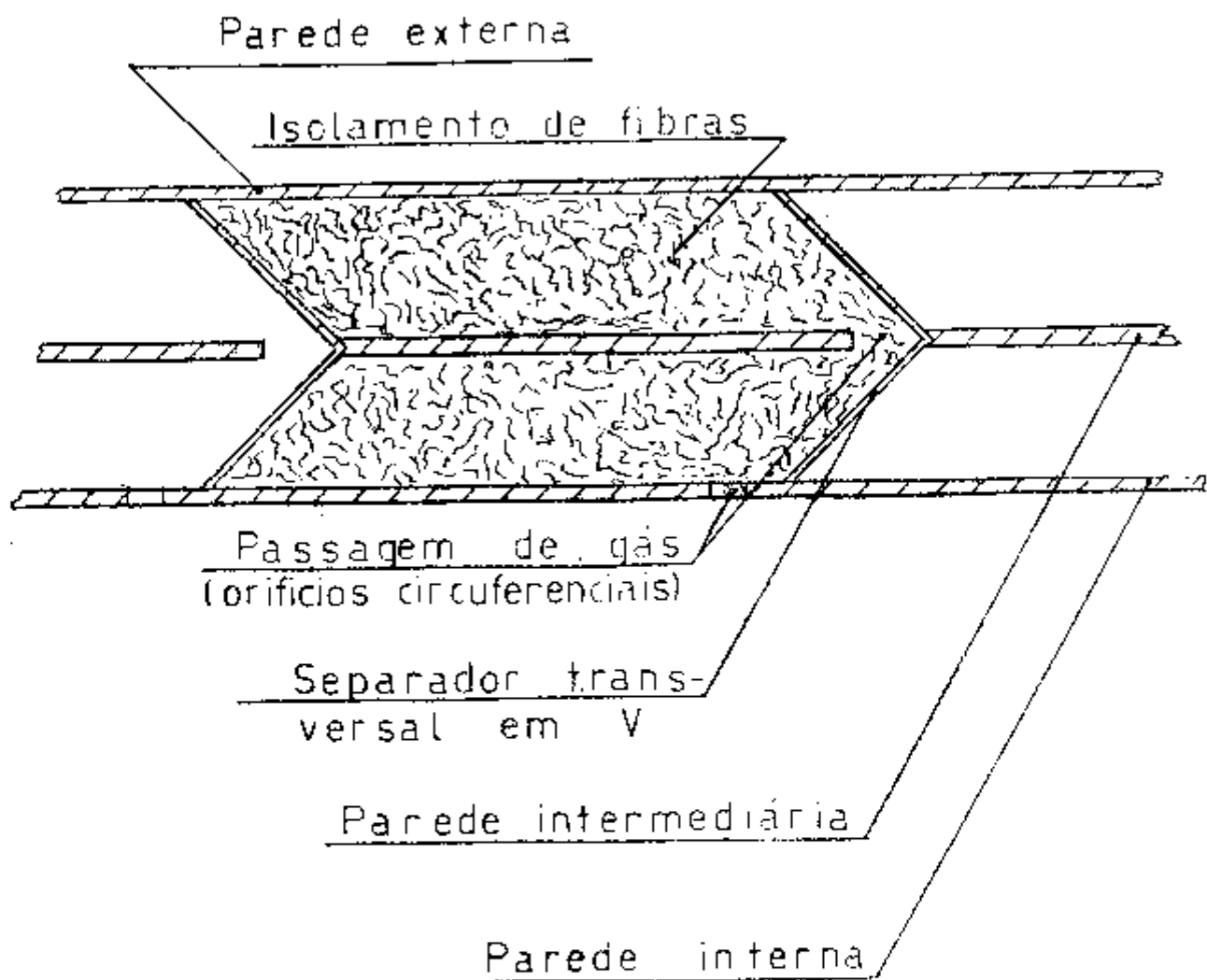


Figura 1 Isolamento térmico interno tipo fibras, entre duas paredes paralelas.

dos axialmente, devido ao gradiente de pressão axial no duto.

Eliminado o problema da convecção forçada, existe ainda o problema da convecção natural, devido a alta pressão do gás e a alta diferença de temperatura entre a face quente e fria do isolamento, resultando em alta diferença de densidade, provocando a circulação natural do gás existente no isolamento. A parede, ou as paredes intermediárias, são introduzidas para confinar a convecção natural, aumentando a eficiência do isolamento.

Nos ensaios realizados [8,11,12], a densidade de compactação das fibras foi alta, da ordem de 280 a 400 kg/m³, para aumentar a sua resistência à circulação do gás. A alta densidade de compactação causa, porém, melhor contacto entre as fibras, aumentando a condução de calor através delas, o que deteriora também a eficiência do isolamento.

Os testes realizados nos laboratórios da KFA, cobriram a faixa de pressão de 5 a 40 bar e de temperatura do gás de 200 a 400°C, mantendo a parede fria à temperatura da ordem de 40°C. Os resultados obtidos para os gases ensaiados (hêlio e ar), mostram que nas condições ensaiadas, o número de Nusselt, definido como $Nu = \lambda_{ef} / \lambda_{gás}$, onde λ_{ef} é a condutividade térmica efetiva do isolamento e $\lambda_{gás}$ a condutividade térmica do gás, não varia com a pressão.

Destes resultados, conforme explicado no item 5 deste trabalho "O número de Nusselt é proporcional à pressão, quando há convecção natural deduz-se que, não ocorreu convecção natural para as condições testadas. Sabendo-se que não ocorreu convecção forçada devido a existência das peças V, todo o calor transferido pelo isolamento, foi apenas por condução no gás e nas fibras.

Nos testes em andamento no IPEN com gás hêlio, manteve-se, até o presente momento, a temperatura à 500°C, e foi varia

da a pressão de 5 a 20 bar. O número de Nusselt obtido para cada caso foi o mesmo, podendo ser dito, que também não houve ocorrência de convecção natural.

Os testes realizados até o presente momento (em condições de laboratório), mostram que a convecção natural e a convecção forçada, foram eliminadas nas seções de isolamento tipo fibras testadas, porém são necessárias experiências extensivas, com pressões e temperaturas de operação do HTGR, para comprovar a eficiência deste tipo de isolamento.

Para as condições de operação, é provável que não exista convecção forçada, devido as peças em V localizadas entre os planos de orifícios, impedindo a ligação de pontos com ΔP (ligação de pontos afastados axialmente). A convecção natural por sua vez, poderá surgir nas condições de operação do reator, onde a pressão mais alta do gás, combinada com maior diferença de temperatura, resulta em maior diferença de densidade, aumentando a possibilidade de surgimento de circulação ou convecção natural do gás.

1.1 Objetivo

O objetivo deste trabalho, é desenvolver um modelo numérico da convecção natural no isolamento térmico interno tipo fibras, em dutos cilíndricos, condutores de gás a alta pressão e temperatura, nas posições horizontal e vertical, que permita a compreensão do fenômeno e que possa ser utilizado no projeto do isolamento. O modelo a ser desenvolvido, deverá permitir também a avaliação do desempenho do isolamento, variando parâmetros de projeto, tais como, configuração geométrica (espessura de isolamento, número de paredes intermediárias e espaçamento entre peças V), e propriedades da isolação (densidade de compactação e diâmetro de fibra).

1.2 Trabalhos Anteriores

Modelos numéricos para o estudo detalhado da convecção natural, já foram feitos, porém apenas para as paredes planas do vaso de pressão do reator HTGR [13,14,15,16]. Estes modelos, consideram o isolamento de fibras como um meio poroso, ou seja, material sólido com espaços vazios no seu interior (poros), preenchidos de gás. Os resultados obtidos nos modelos, foram comprovados por testes experimentais, provando a validade da formulação utilizada [14].

O modelo a ser desenvolvido, utilizará uma formulação semelhante a dos métodos já desenvolvidos, considerando as hipóteses abaixo.

1.3 Hipóteses

O modelo a ser desenvolvido, irá considerar, que todo calor transmitido através do isolamento, será por condução nas fibras e no gás e por convecção do gás, desprezando a irradiação. Irá considerar ainda a não existência de convecção forçada, ou seja, a parede interna é sólida, não permeável. Será assumido também, que a temperatura local do sólido é a mesma do gás. As propriedades do gás (viscosidade, calor específico e condutividade térmica), serão calculadas por fórmulas empíricas [17,18], sendo sempre função da pressão do gás no duto e da temperatura local na isolação. No cálculo da densidade, o gás é considerado perfeito.

As hipóteses acima, são também assumidas, quando da elaboração dos modelos desenvolvidos para geometrias retangulares, já comprovados experimentalmente, com excessão das propriedades do gás, que eram consideradas constantes, sendo calculado apenas as diferentes densidades.

1.4 Descrição do Modelo

Para a formulação do modelo em meios porosos, são escritas as equações de conservação de massa, da quantidade de movimento de energia e as respectivas condições de contorno.

O modelo numérico, consiste na solução, utilizando o método das diferenças finitas, das equações de conservação, que são equações diferenciais parciais não lineares, obtendo as distribuições de velocidades e temperaturas no interior do isolamento, possibilitando a avaliação de desempenho do sistema isolante.

As equações de conservação utilizadas, bem como os resultados obtidos para isolamento interno de cilindros nas posições horizontal e vertical, condutores de gás quente, são apresentados nos itens seguintes.

II. Formulação das Equações e Condições de Contorno

Experiências [15,19], que consistem em medidas de gradiente de pressão (AP) versus velocidade, mostram que o isolamento térmico tipo fibras, se comporta como um meio poroso, obedecendo à "lei de Darcy", i.é, o gradiente de pressão é função linear da velocidade. Para este caso, o escoamento de gás nas fibras, é laminar.

2.1 Equacionamento para Cilindro na Posição Horizontal

(Sem considerar a existência de paredes intermediárias)

As equações de conservação de massa, quantidade de movimento, energia e as condições de contorno, são escritas para isolamento térmico interno tipo fibras, em um cilindro na posição horizontal, considerando metade da secção transversal do mesmo (conforme figura 2), devido a simetria.

O equacionamento é feito em coordenadas polares 'r' e ' θ '. A direção axial é considerada constante e igual a um metro ($L=l_m$), pois as distribuições de temperatura e velocidade não se alteram nesta direção.

As equações de conservação, obtidas a partir de balanços, estão escritas nos itens seguintes.

2.1.1 Equação de Conservação de Massa

A equação de conservação de massa, é dada por:

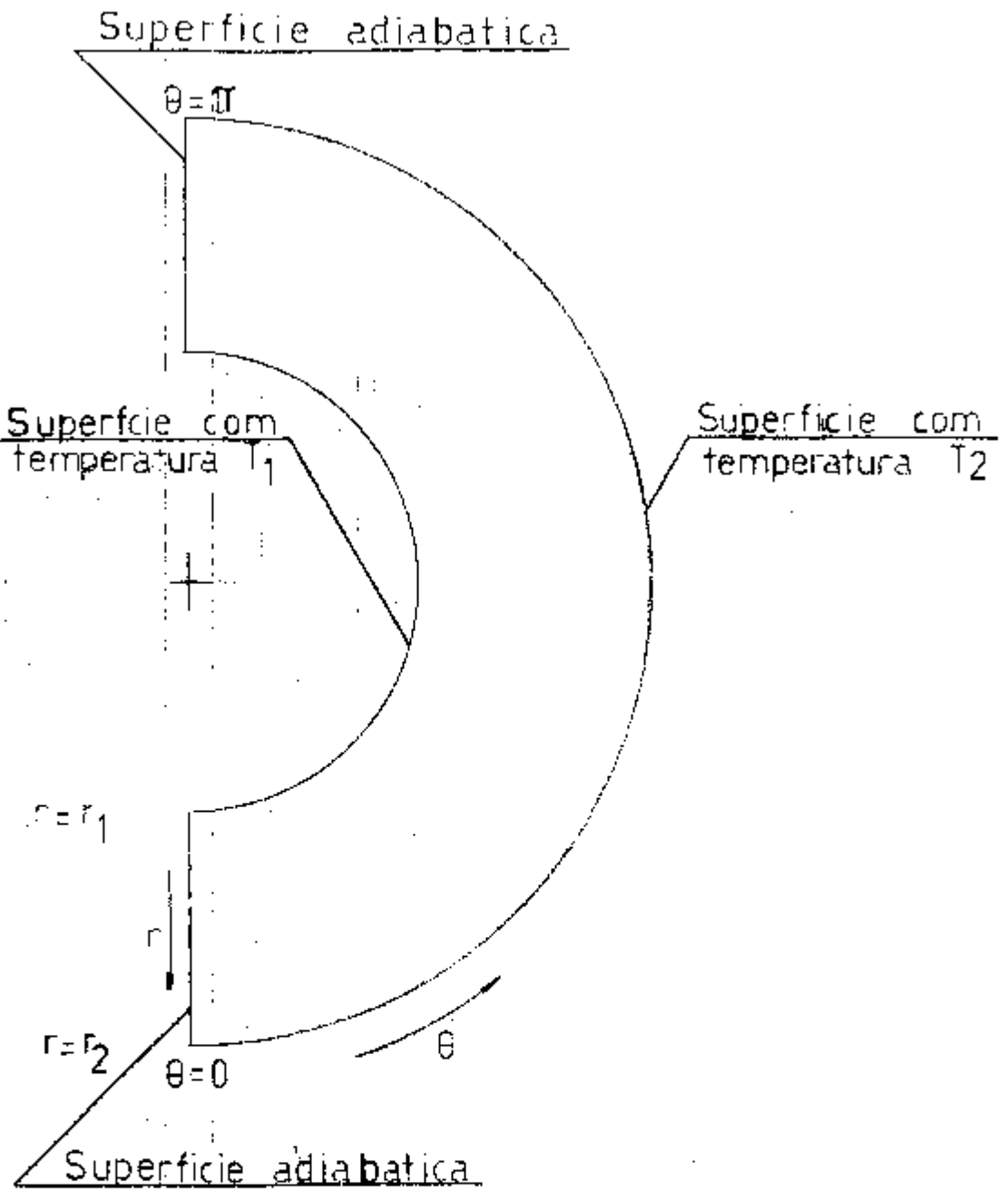


Figura 2 Geometria do cilindro na posição horizontal, considerada no modelo.

$$\frac{\partial}{\partial r}(\rho v_r r) + \frac{\partial}{\partial \theta}(\rho v_\theta) = 0 \quad (1)$$

onde 'v' é a velocidade superficial (a vazão de gás por unidade de área total do gás mais fibra - $v = V/(A_{\text{gás}} + A_{\text{fibra}})$)

2.1.2 Equação de Conservação da Quantidade de Movimento

A equação de conservação da quantidade de movimento para meios porosos, i.é, lei de 'Darcy', é dada, em coordenadas polares, na direção radial por:

$$v_r = \frac{K}{\mu} (\rho g_r - \frac{\partial P}{\partial r}) \quad (2)$$

e na direção angular por:

$$v_\theta = \frac{K}{\mu} (\rho g_\theta - \frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial \theta}) \quad (3)$$

onde K é a permeabilidade das fibras do isolamento (função da densidade de compactação e do diâmetro da fibra), μ a viscosidade dinâmica do gás, P a pressão do gás e g a aceleração da gravidade.

Derivando a equação 2 em relação a θ e a 3 em relação a r, temos:

$$\frac{\partial}{\partial \theta}(v_r) = K \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\rho g_r}{\mu} \right) - \frac{\partial P}{\partial \theta \partial r} \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial r}(v_\theta r) = K \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\rho g_\theta r}{\mu} \right) - \frac{\partial P}{\partial \theta \partial r} \quad (5)$$

As equações (4) e (5), permitem a eliminação de p (pressão), resultando em:

$$\frac{1}{K} \frac{\partial}{\partial \theta}(\mu v_r) - \frac{1}{K}(\mu r v_\theta) = \frac{\partial}{\partial \theta}(\rho g_r) - g_\theta \frac{\partial}{\partial r}(r\rho) \quad (6)$$

Para reduzir as velocidades v_r e v_θ a uma variável e eliminar a equação (1), é definida uma função Ψ (função corrente), de tal modo que ela satisfaça a equação eliminada.

A função corrente, para cilindro horizontal, é dada na direção radial, por:

$$v_r = \frac{1}{r\rho} \frac{\partial \Psi}{\partial \theta} \quad (7)$$

e na direção angular por:

$$v_\theta = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \Psi}{\partial r} \quad (8)$$

Substituindo as equações (7) e (8) na equação (6), e sendo $g_r = g \cos \theta$ e $g_\theta = -g \sin \theta$, a equação final de conservação da quantidade de movimento é dada por:

$$\frac{1}{rK} \frac{\partial}{\partial \theta} (v \frac{\partial \Psi}{\partial \theta}) + \frac{1}{K} \frac{\partial}{\partial r} (rv \frac{\partial \Psi}{\partial r}) = g (\cos \theta \frac{\partial \rho}{\partial \theta} + r \sin \theta \frac{\partial \rho}{\partial r}) \quad (9)$$

onde ν é a viscosidade cinemática do gás em estudo ($\nu = \mu/\rho$)

2.1.3 Equação da Conservação de Energia

A equação da conservação de energia, é dada por:

$$\frac{\partial}{\partial r} (r\rho C_p v_r T) + \frac{\partial}{\partial \theta} (\rho C_p v_\theta T) - \frac{\partial}{\partial r} (r\lambda \frac{\partial T}{\partial r}) - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (\lambda \frac{\partial T}{\partial \theta}) = 0 \quad (10)$$

onde C_p é o calor específico do gás, e λ o seu coeficiente de condutividade térmica.

Substituindo a definição da função corrente, a equação resulta em:

$$\frac{\partial \Psi}{\partial \theta} \frac{\partial}{\partial r} (C_p T) - \frac{\partial \Psi}{\partial r} \frac{\partial}{\partial \theta} (C_p T) - \frac{\partial}{\partial r} (r\lambda \frac{\partial T}{\partial r}) - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (\lambda \frac{\partial T}{\partial \theta}) = 0 \quad (11)$$

O conjunto original de equações de conservação massa, quantidade de movimento e energia, foi reduzido a um sistema de duas equações (9) e (11) com duas incógnitas, ψ e T .

2.1.4 Condições de Contorno

A solução do modelo mostrado na figura. 2, é dado pela resolução das equações (9) e (11), que são equações diferenciais parciais não lineares de 2a. ordem, obedecendo as seguintes condições de contorno.

Para $\theta = 0$ e $\theta = \pi$

$$\psi = 0 \quad (\text{devido a simetria})$$

$$\frac{\partial T}{\partial \theta} = 0 \quad (\text{não há fluxo de calor devido à simetria})$$

Para $r = r_1$

$$\psi = 0 \quad (\text{parede sólida})$$

$$T = T_1 \quad (\text{temperatura da parede quente})$$

2.2 Equacionamento para Cilindro na Posição Vertical

(sem considerar a existência de paredes intermediárias)

As equações de conservação de massa, quantidade de momento, energia e as condições de contorno, são escritas para isolamento térmico tipo fibras entre dois cilindros verticais coaxiais, conforme figura 3.

O equacionamento é feito em coordenadas cilíndricas ' r ' e ' x '. A direção angular é considerada constante e igual a um grau ($\theta = 1^\circ$), pois as distribuições de velocidade e temperatura, não se alteram nesta direção. Os separadores transversais (peças em V), são considerados para o equacionamento, como pla-

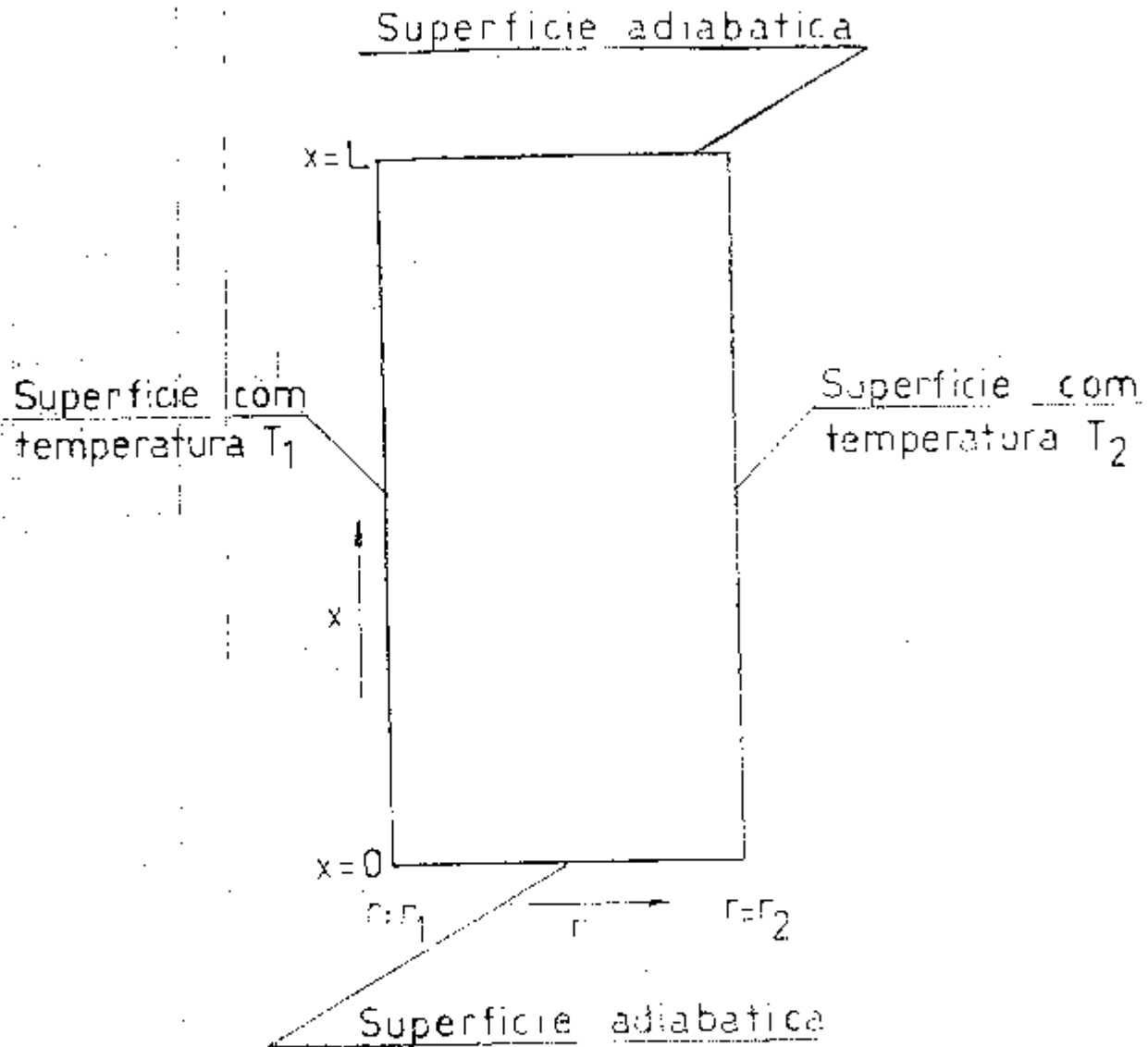


Figura 3 Geometria do cilindro na posição vertical, considerada no modelo

nos (paredes sólidas planas).

As equações de conservação, obtidas a partir de balanços, estão escritas abaixo.

2.2.1 Equação de Conservação de Massa

A equação de conservação de massa é dada por:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho r v_r) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x) = 0 \quad (12)$$

2.2.2 Equação de Conservação da Quantidade de Movimento

A equação de conservação da quantidade de movimento para meios porosos, i.é, lei de 'Darcy', é dada, em coordenadas cilíndricas, na direção radial por:

$$v_r = \frac{K}{\mu}(\rho g_r - \frac{\partial P}{\partial r}) \quad (13)$$

e na direção axial:

$$v_x = \frac{K}{\mu}(\rho g_x - \frac{\partial P}{\partial x}) \quad (14)$$

Analogamente ao cilindro horizontal, a pressão é eliminada, combinando as equações, depois de derivar a (13) em relação a 'x' e a (14) em relação a 'r'. Sendo $g_r = 0$ e $g_x = -g$, a equação é transformada para:

$$\frac{1}{K} \frac{\partial}{\partial x}(\mu v_r) - \frac{1}{K} \frac{\partial}{\partial r}(\mu v_x) = g \frac{\partial P}{\partial r} \quad (15)$$

A função corrente Ψ , em coordenadas cilíndricas, é dada, na direção radial por:

$$v_x = \frac{1}{\rho r} \frac{\partial \Psi}{\partial x} \quad (16)$$

e na direção axial por:

$$v_x = - \frac{1}{\rho r} \frac{\partial \Psi}{\partial r} \quad (17)$$

Substituindo as equações (16) e (17), na equação (14), a equação final de conservação da quantidade de movimento é dada por:

$$\frac{1}{rK} \frac{\partial}{\partial x} (v \frac{\partial \Psi}{\partial x}) + \frac{1}{K} \frac{\partial}{\partial r} (\frac{v}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial r}) = g \frac{\partial \rho}{\partial r} \quad (18)$$

2.2.3 Equação de Conservação de Energia

A equação de conservação de energia, em coordenadas cilíndricas, é dada por:

$$\frac{\partial}{\partial r} (r v_r \rho C_p T) + \frac{\partial}{\partial x} (r v_x \rho C_p T) - \frac{\partial}{\partial r} (r \lambda \frac{\partial T}{\partial r}) - r \frac{\partial}{\partial x} (\lambda \frac{\partial T}{\partial x}) = 0 \quad (19)$$

Substituindo a definição da função corrente, equações (16) e (17), a equação resulta em:

$$\frac{\partial \Psi}{\partial x} \frac{\partial}{\partial r} (C_p T) - \frac{\partial \Psi}{\partial r} \frac{\partial}{\partial x} (C_p T) - \frac{\partial}{\partial r} (r \lambda \frac{\partial T}{\partial r}) - r \frac{\partial}{\partial x} (\lambda \frac{\partial T}{\partial x}) = 0 \quad (20)$$

2.2.4 Condições de Contorno

As condições de contorno, para a geometria em estudo (figura 3) são:

Para $x = 0$

$$\psi = 0 \quad (\text{parede s\u00f3lida})$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (\text{n\u00e3o h\u00e1 fluxo de calor axial})$$

Para $r = r_1$

$$\psi = 0 \quad (\text{parede s\u00f3lida})$$

$$T = T_1 \quad (\text{temperatura da parede quente})$$

Para $r = r_2$

$$\psi = 0 \quad (\text{parede s\u00f3lida})$$

$$T = T_2 \quad (\text{temperatura da parede fria})$$

2.3 Formula\u00e7\u00e3o para Paredes Intermedi\u00e1rias

A exist\u00eancia de paredes intermedi\u00e1rias, altera apenas a equa\u00e7\u00e3o de conserva\u00e7\u00e3o da quantidade de movimento, equa\u00e7\u00e3o (9) para cilindro horizontal e equa\u00e7\u00e3o (18) para cilindro vertical. Sendo a parede n\u00e3o perme\u00e1vel (s\u00f3lida), n\u00e3o h\u00e1 fluxo de g\u00e1s pela mesma, i.e., a velocidade radial \u00e9 nula na parede.

III Método e Solução Numérica

O método e a solução numérica dos modelos propostos (estudo da convecção natural no isolamento térmico interno tipo fibras, em cilindros nas posições horizontal e vertical), estão descritos nos itens seguintes, para cada caso particular.

3.1 Cilindro na Posição Horizontal

As equações (9) e (11) e as condições de contorno, são resolvidas numericamente, utilizando o método das diferenças finitas, no computador, por um programa em fortran-4, denominado ISFICH (Isolamento de Fibras para Cilindro na posição Horizontal).

O método das diferenças finitas, transforma as duas equações diferenciais parciais não lineares, que são interdependentes, pois as propriedades do gás ν e ρ da equação (9) são funções de T (temperatura), e Ψ aparece na equação (11), em dois sistemas de equações algébricas não lineares interdependentes.

Este método, está descrito abaixo, utilizando a rede da figura 4, sendo ii o número de divisões considerados na radial e jj na direção angular.

As derivadas dos termos Ψ e ρ da equação (9), são escritas em diferenças centrais para todos os pontos internos. São obtidas $(ii - 2)$ $(jj - 2)$ equações algébricas. As condições de

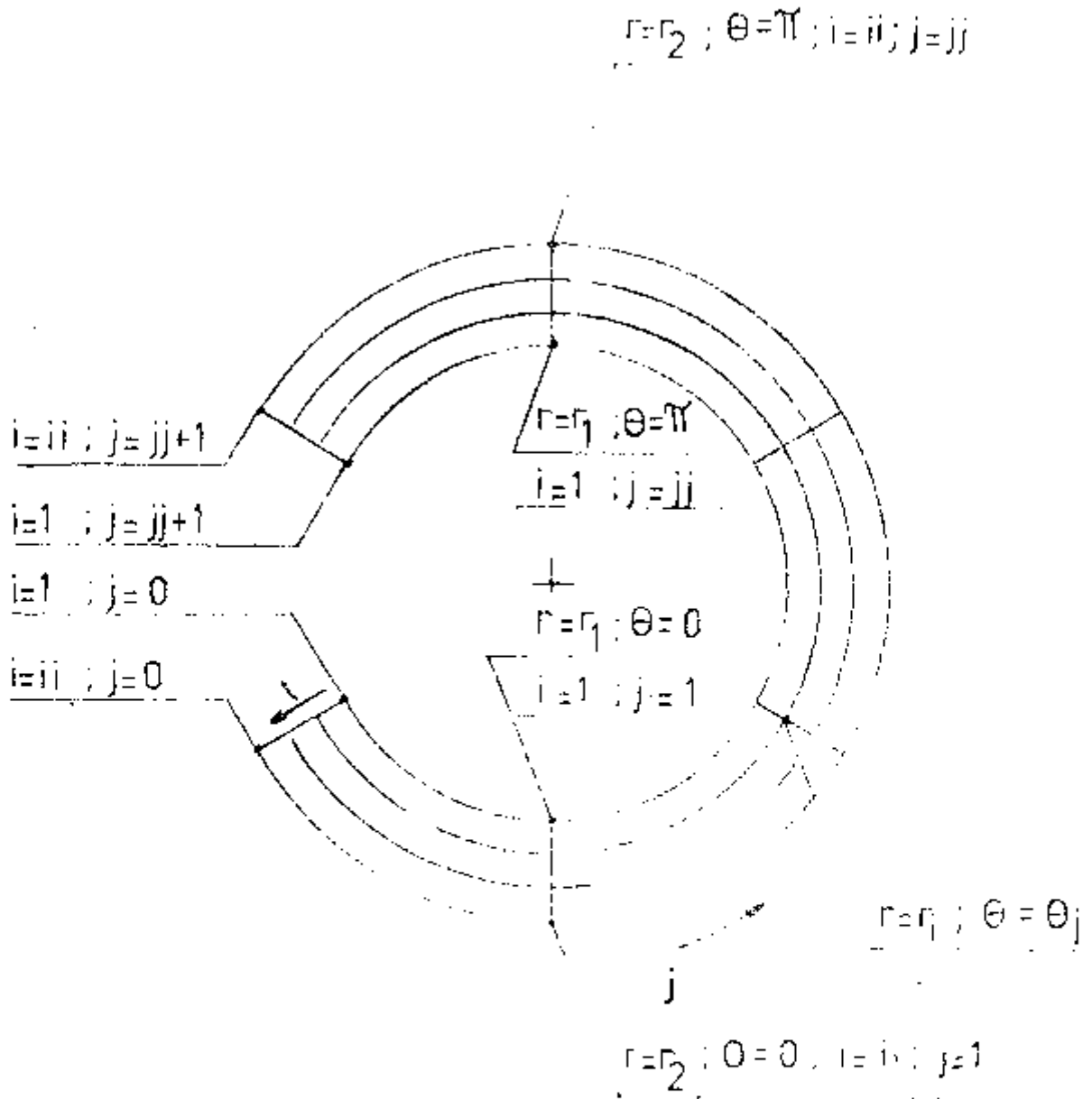


Figura 4 Rede considerada na aplicação das diferenças finitas, no caso de cilindro na posição horizontal.

contorno ($\psi = 0$ na periferia), acrescentam mais $2(ii + jj) - 4$ equações algébricas. Resultam então um total de $ii \times jj$ funções corrente ($\psi_{i,j}$). Caso sejam conhecidas as propriedades do gás, viscosidades $\nu_{i,j}$ e densidades $\rho_{i,j}$ em todos os pontos, a equação (9) (que é originalmente uma equação diferencial parcial não linear) é transformada num sistema de equações algébricas lineares, com $ii \times jj$ equações e $ii \times jj$ funções corrente como incógnitas, sendo então possível resolvê-las numericamente.

Analogamente, a equação (11), que também é, originalmente, uma equação diferencial parcial não linear, é escrita em diferenças finitas centrais para T e ψ , nos pontos internos. A condição de contorno $\partial T / \partial n$ é escrita também em diferenças centrais, valendo-se da simetria.

Conhecendo as propriedades do gás, calor específico ($Cp_{i,j}$), condutividade térmica ($\lambda_{i,j}$) e as funções correntes $\psi_{i,j}$, em todos os pontos, a equação (9) é reduzida a um sistema de $ii \times jj$ equações algébricas lineares com $ii \times jj$ temperaturas como incógnitas.

As equações resultantes, estão escritas nos itens abaixo.

3.1.1 Equação da Quantidade de Movimento

A equação (9), escrita em diferenças finitas centrais é dada por:

$$\begin{aligned}
 & \left[\frac{r_{i-1} v_{i-1,j} + r_i v_{i,j}}{2 K (\Delta r)^2} \right] \psi_{i-1,j} + \left[\frac{v_{i,j-1} + v_{i,j}}{2 K r_i (\Delta \theta)^2} \right] \psi_{i,j-1} \\
 & - \left[\frac{v_{i,j+1} + 2v_{i,j} + v_{i,j-1}}{2 K r_i (\Delta \theta)^2} \right] \\
 & + \left[\frac{r_{i-1} v_{i-1,j} + r_i v_{i,j} + r_{i+1} v_{i+1,j}}{2 K (\Delta r)^2} \right] \psi_{i,j} \\
 & + \left[\frac{v_{i,j} + v_{i,j+1}}{2 K r_i (\Delta \theta)^2} \right] \psi_{i,j+1} + \left[\frac{r_i v_{i,j} + r_{i+1} v_{i+1,j}}{2 K (\Delta r)^2} \right] \psi_{i+1,j} \\
 & = g \left[\frac{\cos \theta_j}{2 \Delta \theta} (\rho_{i,j+1} - \rho_{i,j-1}) + \frac{r_i \sin \theta_j}{2 \Delta r} (\rho_{i+1,j} - \rho_{i-1,j}) \right] \quad (21)
 \end{aligned}$$

válida para $i = 2$ até i_{i-1} e $j = 2$ até j_{j-1}

As condições de contorno são:

$$\psi_{1,j} = 0 \quad (22)$$

$$\psi_{i_{i-1},j} = 0 \quad (23)$$

válidas para $j = 1$ a j_j e

$$\psi_{i,1} = 0 \quad (24)$$

$$\psi_{i,j_j} = 0 \quad (25)$$

válida para $i = 2$ a i_{i-1}

3.1.2. Equação da Energia

A equação (11), escrita em diferenças finitas centrais, é dada por:

$$\begin{aligned}
 & - \left[\frac{(\psi_{i,j+1} - \psi_{i,j-1}) C_p}{4\Delta\theta\Delta r} + \frac{r_i \lambda_{i,j} + r_{i-1} \lambda_{i-1,j}}{2(\Delta r)^2} \right] T_{i-1,j} \\
 & + \left[\frac{(\psi_{i+1,j} - \psi_{i-1,j}) C_p}{4\Delta\theta\Delta r} - \frac{\lambda_{i,j} + \lambda_{i,j-1}}{2r_i (\Delta\theta)^2} \right] T_{i,j-1} \\
 & + \left[\frac{r_{i+1} \lambda_{i+1,j} + 2r_i \lambda_{i,j} + r_{i-1} \lambda_{i-1,j}}{2(\Delta r)} + \frac{\lambda_{i,j+1} + 2\lambda_{i,j} + \lambda_{i,j-1}}{2r_i (\Delta\theta)^2} \right] T_{i,j} \\
 & - \left[\frac{(\psi_{i+1,j} - \psi_{i-1,j}) C_p}{4\Delta\theta\Delta r} + \frac{\lambda_{i,j+1} + \lambda_{i,j}}{2r_i (\Delta\theta)^2} \right] T_{i,j+1} \\
 & + \left[\frac{(\psi_{i,j+1} - \psi_{i,j-1}) C_p}{4\Delta\theta\Delta r} - \frac{r_{i+1} \lambda_{i+1,j} + r_i \lambda_{i,j}}{2(\Delta r)^2} \right] T_{i+1,j} \\
 & = 0
 \end{aligned} \tag{26}$$

válida para $i = 2$ a i_{i-1} e $j = 2$ a j_{j-1}

3.1.3 Condições de Contorno

As condições de contorno são:

$$T_{1,j} = T_1 \quad (\text{temperatura da parede quente}) \tag{27}$$

$$T_{i_i,j} = T_2 \quad (\text{temperatura da parede fria}) \tag{28}$$

Para $j = 1$, $i = 2$ a i_{i-1} , as condições de contorno são obtidas, valendo-se da condição de simetria, ou seja:

$$\begin{aligned}
 & - \left[\frac{C_p \psi_{i,2}}{2\Delta\theta\Delta r} + \frac{r_{i-1} \lambda_{i-1,j} + r_i \lambda_{i,j}}{2(\Delta r)^2} \right] T_{i-1,j} \\
 & + \left[\frac{r_{i+1} \lambda_{i+1,j} + 2r_i \lambda_{i,j} + r_{i-1} \lambda_{i-1,j}}{2(\Delta r)^2} + \frac{\lambda_{i,j+1} + \lambda_{i,j}}{r_i (\Delta\theta)^2} \right] T_{i,j} \\
 & - \left[\frac{\lambda_{i,j+1} + \lambda_{i,j}}{r_i (\Delta\theta)^2} \right] T_{i,j+1} \\
 & + \left[\frac{C_p \psi_{i,2}}{2\Delta\theta\Delta r} - \frac{r_{i+1} \lambda_{i+1,j} + r_i \lambda_{i,j}}{2(\Delta r)^2} \right] T_{i+1,j} = 0
 \end{aligned} \tag{29}$$

Analogamente, para $j=j_j$ e $i=2$ a $i-1$, as equações de contorno são

$$\begin{aligned}
 & - \left[\frac{r_i \lambda_{i,j_j} + r_{i-j} \lambda_{i-1,j_j}}{2(\Delta r)^2} - \frac{C_p \psi_{i,j_j-1}}{2\Delta\theta\Delta r} \right] T_{i-j,j_j} \\
 & - \left[\frac{\lambda_{i,j_j-1} + \lambda_{i,j_j}}{r_i (\Delta\theta)^2} \right] T_{i,j_j-1} \\
 & + \left[\frac{r_{i+1} \lambda_{i+1,j_j} + 2r_i \lambda_{i,j_j} + r_{i-1} \lambda_{i-1,j_j}}{2(\Delta r)^2} + \frac{\lambda_{i,j_j+1} + \lambda_{i,j_j}}{r_i (\Delta\theta)^2} \right] T_{i,j_j} \\
 & - \left[\frac{r_{i+1} \lambda_{i+1,j_j} + r_i \lambda_{i,j_j}}{2(\Delta r)^2} + \frac{C_p \psi_{i,j_j-1}}{2\Delta\theta\Delta r} \right] T_{i+1,j_j} = 0
 \end{aligned} \tag{30}$$

3.1.4 Soluções Interativas das Equações Algébricas

Para a solução das equações (21) e (26), é necessário adotar inicialmente, uma distribuição de temperaturas para linearizar a equação (21). Esta distribuição, é dada neste modelo, pela temperatura média entre a parede quente e fria ($T_{i,j} = (T_1 + T_2)/2$). As propriedades do gás, viscosidades $\nu_{i,j}$ e densidades $\rho_{i,j}$ são calculadas para estas condições (temperatura inicial e pressão do gás), linearizando assim a equação (21).

São resolvidas, um total de $i_i \times j_j$ equações algébricas lineares, em uma matriz do tipo apresentada na figura 5, por uma subrotina denominada MASPI [20], baseada no método de fatorização. São obtidas $i_i \times j_j$ funções corrente, que são nulas para o primeiro caso, pois sendo uniforme a distribuição inicial de temperaturas, não há diferença de densidade no gás para causar circulação ou convecção natural.

A equação (26), é linearizada com as funções corrente iniciais já calculadas na primeira matriz e as propriedades locais do gás, calculadas a partir da distribuição inicial de temperaturas e da pressão do gás, formando assim, um sistema de $i_i \times j_j$ equações algébricas lineares. Na solução deste sistema de equações, é obtida uma nova distribuição de temperaturas, que será utilizada para nova resolução da equação (21).

As soluções sucessivas das equações (21) e (26), são feitas até ocorrer a convergência das temperaturas. Esta convergência é obtida, quando a temperatura calculada e a obtida na resolução anterior, diferirem de um valor menor ou igual a 1°C.

A sequência de cálculo utilizada, quando da elaboração do modelo, é mostrada na figura 6.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	X															
2		X														
3			X													
4				X												
5					X											
6		X			X	X	X			X						
7			X			X	X	X			X					
8								X								
9									X							
10						X			X	X	X			X		
11							X			X	X	X				X
12												X				
13													X			
14														X		
15															X	
16																X

Figura 5 Matriz da equação da quantidade de movimento e condições de contorno, para uma rede de 4 x 4 malhas . Os x's, são os coeficientes não nulos.

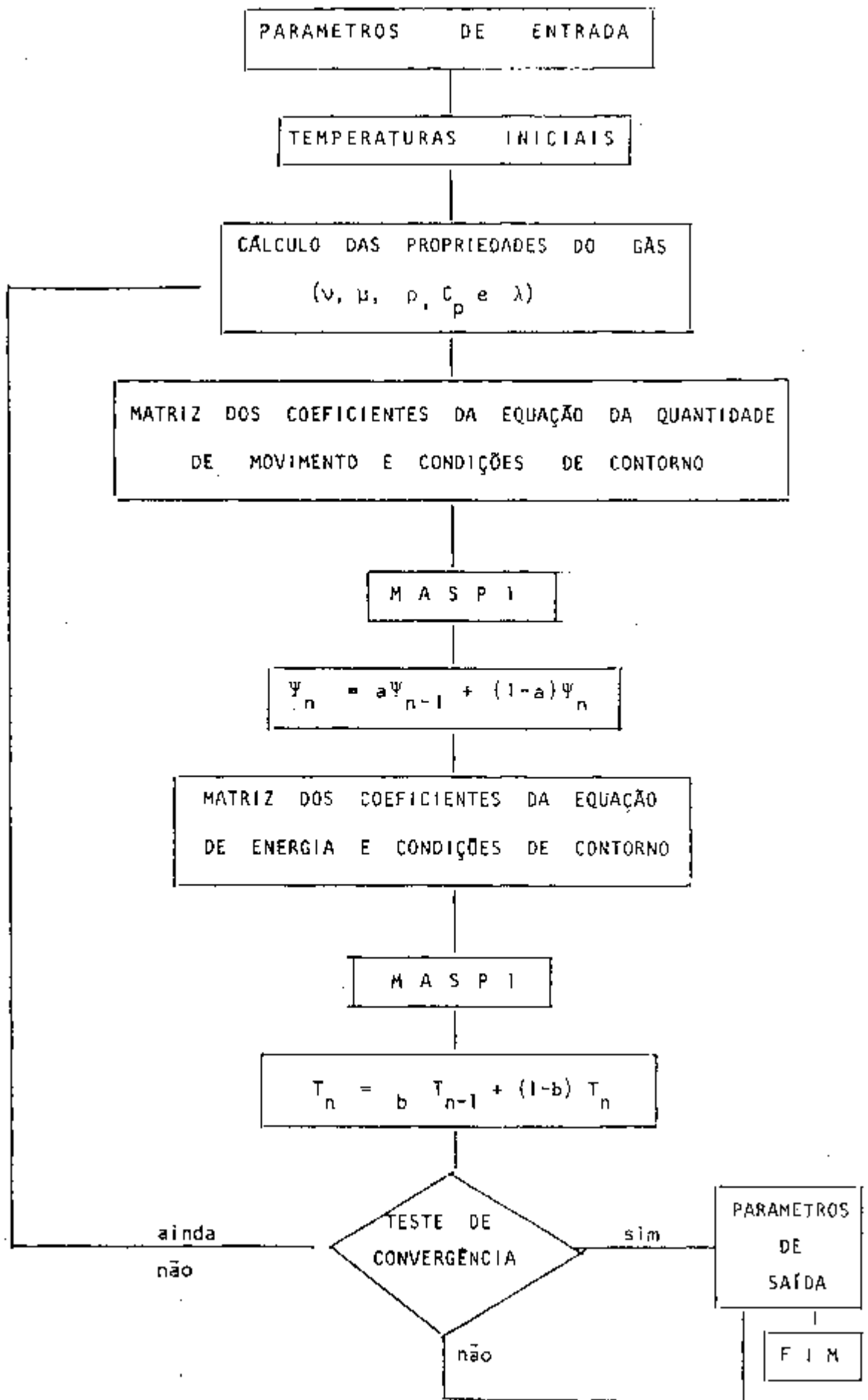


Figura 6 - DIAGRAMA DE BLOCOS PARA O MODELO

Os pesos 'a' e 'b', têm a função de diminuir o número de interações, i.é, fazer com que a convergência seja alcançada com menor número de interações. Seus valores, dependem da condição do gás e da condição geométrica a ser analisada.

3.2 Cilindro Vertical

Desenvolvidas analogamente ao cilindro horizontal, estão escritas abaixo, em diferenças finitas, as equações algébricas não lineares, considerando a rede da figura 7.

3.2.1 Equação da Quantidade de Movimento

$$\begin{aligned}
 & \left[\frac{v_{i,j} + v_{i-1,j}}{r_i r_{i-1}} \right] \psi_{i-1,j} + \left[\frac{v_{i,j} + v_{i,j-1}}{2 K r_i (\Delta x)^2} \right] \psi_{i,j-1} \\
 & - \left[\frac{v_{i,j+1} + 2v_{i,j} + v_{i,j-1}}{2 K r_i (\Delta x)^2} + \frac{v_{i+1,j} + 2 \frac{v_{i,j}}{r_i} + \frac{v_{i-1,j}}{r_{i-1}}}{2 K (\Delta r)^2} \right] \psi_{i,j} \\
 & \left[\frac{v_{i,j+1} + v_{i,j}}{2 K r_i (\Delta x)^2} \right] \psi_{i,j+1} + \left[\frac{v_{i+1,j} + \frac{v_{i,j}}{r_i}}{2 K (\Delta r)^2} \right] \psi_{i+1,j} \\
 & = \frac{g}{2\Delta r} (\rho_{i+1,j} - \rho_{i-1,j}) \tag{31}
 \end{aligned}$$

válida para os pontos internos, i.é, para $i=2$ a $i-1$ e $j=2$ a $j-1$.

As equações para a periferia, são todas de função corrente nula, ou seja:

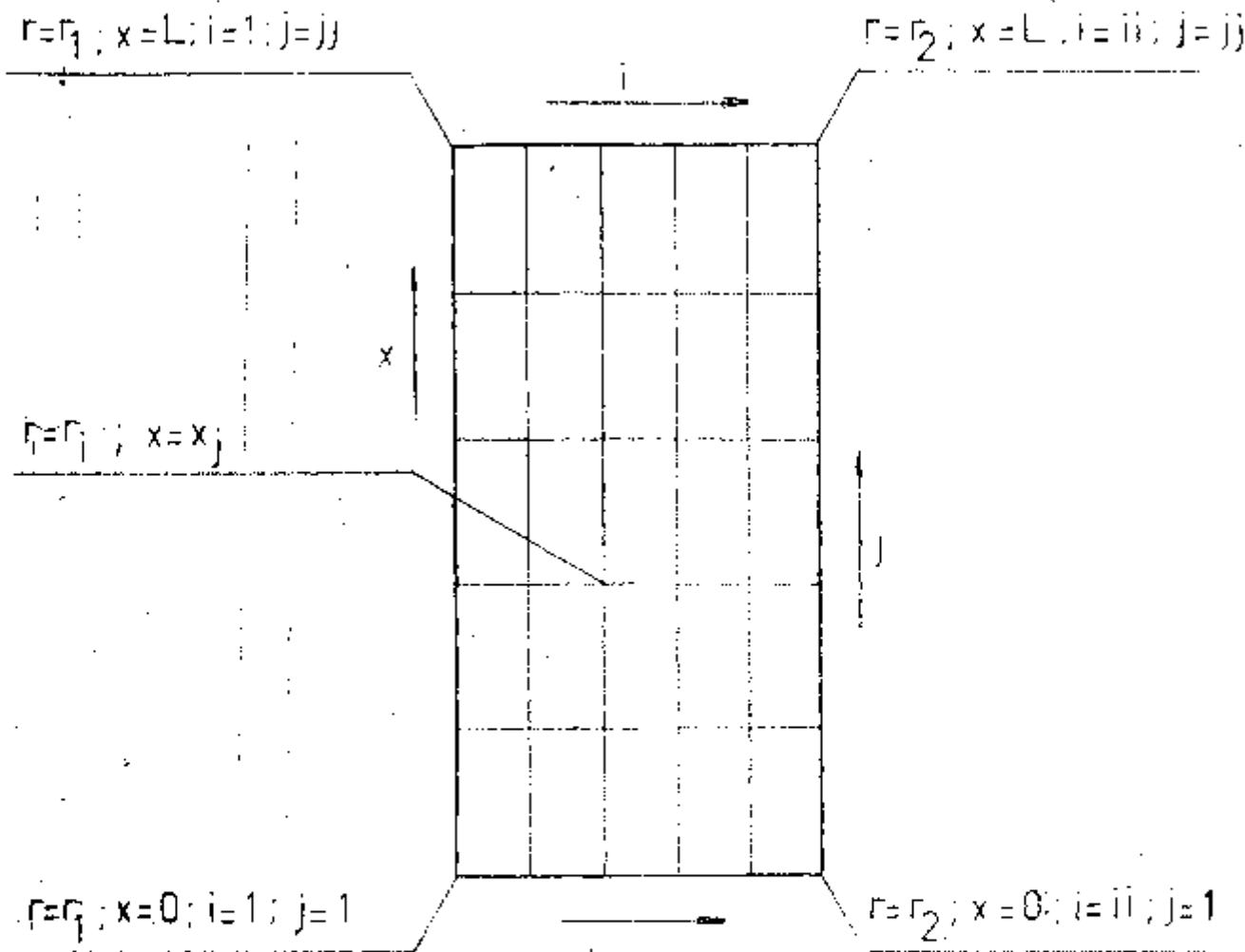


Figura 7 Rede considerada na aplicação das diferenças finitas no caso do cilindro na posição vertical.

$$\Psi_{i,j} = 0 \quad j = 2, jj-1 \quad (32)$$

$$\Psi_{ii,j} = 0 \quad j = 2, jj-1 \quad (33)$$

$$\Psi_{i,1} = 0 \quad i = 1, ii \quad (34)$$

$$\Psi_{i,jj} = 0 \quad i = 1, ii \quad (35)$$

3.2.2 Equação da Energia

$$\begin{aligned} & - \left[\frac{(\Psi_{i,j+1} - \Psi_{i,j-1}) C_p}{4\Delta x \Delta r} + \frac{r_i \lambda_{i,j} + r_{i-1} \lambda_{i-1,j}}{2 (\Delta r)^2} \right] T_{i-1,j} \\ & + \left[\frac{(\Psi_{i+1,j} - \Psi_{i-1,j}) C_p}{4\Delta x \Delta r} - \frac{r_i (\lambda_{i,j} + \lambda_{i,j-1})}{2 (\Delta x)^2} \right] T_{i,j-1} \\ & + \left[\frac{r_{i+1} \lambda_{i+1,j} + 2r_i \lambda_{i,j} + r_{i-1} \lambda_{i-1,j}}{2 (\Delta r)^2} + \right. \\ & \quad \left. + \frac{r_i (\lambda_{i,j+1} + 2\lambda_{i,j} + \lambda_{i,j-1})}{2 (\Delta x)^2} \right] T_{i,j} \\ & - \left[\frac{\Psi_{i+1,j} - \Psi_{i-1,j} C_p}{4\Delta x \Delta r} - \frac{r_i (\lambda_{i,j+1} + \lambda_{i,j})}{2 (\Delta x)^2} \right] T_{i,j+1} \\ & + \left[\frac{(\Psi_{i,j+1} - \Psi_{i,j-1}) C_p}{4\Delta x \Delta r} - \frac{r_{i+1} \lambda_{i+1,j} + r_i \lambda_{i,j}}{2 (\Delta r)^2} \right] T_{i+1,j} \\ & = 0 \end{aligned} \quad (36)$$

válida para $i=2$ a $ii-1$ e $j=2$ a $jj-1$

3.2.3 Condições de Condições

As condições de contorno para a equação da energia são:

$$T_{1,j} = T_1 \quad j=1, jj \quad (37)$$

$$T_{ii,j} = T_2 \quad j=1, jj \quad (38)$$

Para $j=1$ e $i=2$ a $ii-1$, as equações de contorno são obtidas, valendo-se das condições de simetria, ou seja

$$T_{i,j-1} = T_{i,j+1} \quad \text{e ainda,} \quad \psi_{ii,j-1} = -\psi_{1,j+1}$$

Para $j=1$ e $i=2$ a $ii-1$, as equações são dadas por:

$$\begin{aligned} & - \left[\frac{\psi_{i,2} C_p + \frac{r_i \lambda_{i,2} + r_{i-1} \lambda_{i-1,1}}{2 (\Delta r)^2}}{2 \Delta x \Delta r} \right] T_{i-1,1} \\ & + \left[\frac{r_{i+1} \lambda_{i+1,1} + 2r_i \lambda_{i,1} + r_{i-1} \lambda_{i-1,1}}{2 (\Delta r)^2} + \right. \\ & \left. \frac{r_i (\lambda_{i,2} + \lambda_{i,1})}{(\Delta x)^2} \right] T_{i,1} \\ & + \left[\frac{r_{i+1} \lambda_{i+1,1} - r_{i-1} \lambda_{i-1,1}}{2 (\Delta x)^2} \right] T_{i,2} \\ & + \left[\frac{\psi_{i,2} C_p - \frac{r_{i+1} \lambda_{i+1,1} + r_i \lambda_{i,1}}{2 (\Delta r)^2}}{2 \Delta x \Delta r} \right] T_{i+1,j} = 0 \end{aligned} \quad (39)$$

e para $j=jj$ com $i=2$ a $ii-1$, a condição de simetria, também é verificada, sendo a equação dada por:

$$\begin{aligned}
 & - \left[\frac{\psi_{i,jj-1}}{2\Delta x \Delta r} c_p + \frac{r_i \lambda_{i,jj} + r_{i-1} \lambda_{i-1,jj}}{2 (\Delta r)^2} \right] T_{i-1,jj} \\
 & + \left[\frac{r_{i+1} \lambda_{i+1,jj} - r_{i-1} \lambda_{i-1,jj}}{2 (\Delta x)^2} \right] T_{i,jj-1} \\
 & + \left[\frac{r_{i+1} \lambda_{i+1,jj} + 2r_i \lambda_{i,jj} + r_{i-1} \lambda_{i-1,jj}}{2 (\Delta r)^2} \right. \\
 & \quad \left. + \frac{r_i (\lambda_{i,jj-1} + \lambda_{i,jj})}{(\Delta x)^2} \right] T_{i,jj} \\
 & - \left[\frac{\psi_{i,jj-1}}{2\Delta x \Delta r} c_p + \frac{r_{i+1} \lambda_{i+1,jj} + r_i \lambda_{i,jj}}{2 (\Delta r)^2} \right] T_{i+1,jj} = 0
 \end{aligned} \tag{40}$$

A solução das equações é similar ao cilindro horizontal, e é dada pelo programa em fortran-4, denominado ISFICV (Isolamento de Fibras em Cilindro na posição Vertical)

3.3 Paredes Intermediárias

O equacionamento para existência de paredes intermediárias, é feito, supondo o vão para a passagem de gás, entre a parede intermediária e a peça V (que é considerada plana para o cálculo), fechado.

A equação da conservação da quantidade de movimento na parede intermediária é apenas de velocidade radial nula, sendo que a equação de conservação da energia não é alterada, como já mencionado no item 2.3. Ela é dada por:

$$V_{r_a,j} = 0$$

se para $i=a$, existir parede intermediária sólida (não permeável).

Sendo a velocidade radial dada por

$$v_r = \frac{\partial \Psi}{\partial \theta} \quad (\text{cilindro horizontal})$$

$$v_r = \frac{\partial \Psi}{\partial x} \quad (\text{cilindro vertical})$$

considerando $v_r = 0$, obtêm-se que a função corrente Ψ , é constante. Como, para parede externa e para a interna, a função corrente é nula, conclui-se que para a parede intermediária que é também não permeável, a função corrente é nula, dada por:

$$\Psi_{\text{parede intermediária}} = \Psi_{a,j} = 0 \quad (41)$$

A rede apresentada, na figura 4, para cilindro na posição horizontal e na figura 7 para cilindro na posição vertical é feita de maneira a coincidir com as paredes internas.

IV Resultados

Os programas ISFICH e ISFICV, foram executados para 0, 1 e 2 cilindros intermediários equidistantes. Os gases considerados no modelo, foram hélio e ar, variando a sua pressão de 1 a 100 bar, e a sua temperatura, de 50 a 800°C, sendo que a temperatura da parede fria, variou de 25 a 400°C. A permeabilidade das fibras, variou de 10^{-6} a 10^{-12} m². O diâmetro interno do isolamento, variou de 1 a 2 metros, e o externo, de 1,5 a 3 metros. O comprimento entre os separadores transversais, variou para o caso de cilindro na posição vertical, de .5 a 1 metro.

Os cálculos foram feitos, para uma rede de 20 x 20 divisões. Os resultados obtidos para ambos os casos propostos (cilindro na posição horizontal e na vertical), são apresentados para cada caso particular, nos itens abaixo.

4.1 Cilindro Horizontal

Foram obtidas as distribuições do fluxo (função corrente Ψ), de velocidades e de temperaturas, calculados os valores da condutividade térmica efetiva e correlacionados, através do número de Nusselt, com o número de Rayleigh.

4.1.1 Distribuições de Velocidades e Temperaturas

As distribuições de velocidades, da função corrente e das temperaturas, são apresentadas nas figuras 8, 9, 10 e 11

Ψ , FUNÇÃO CORRENTE
($\times 10^{-4}$)

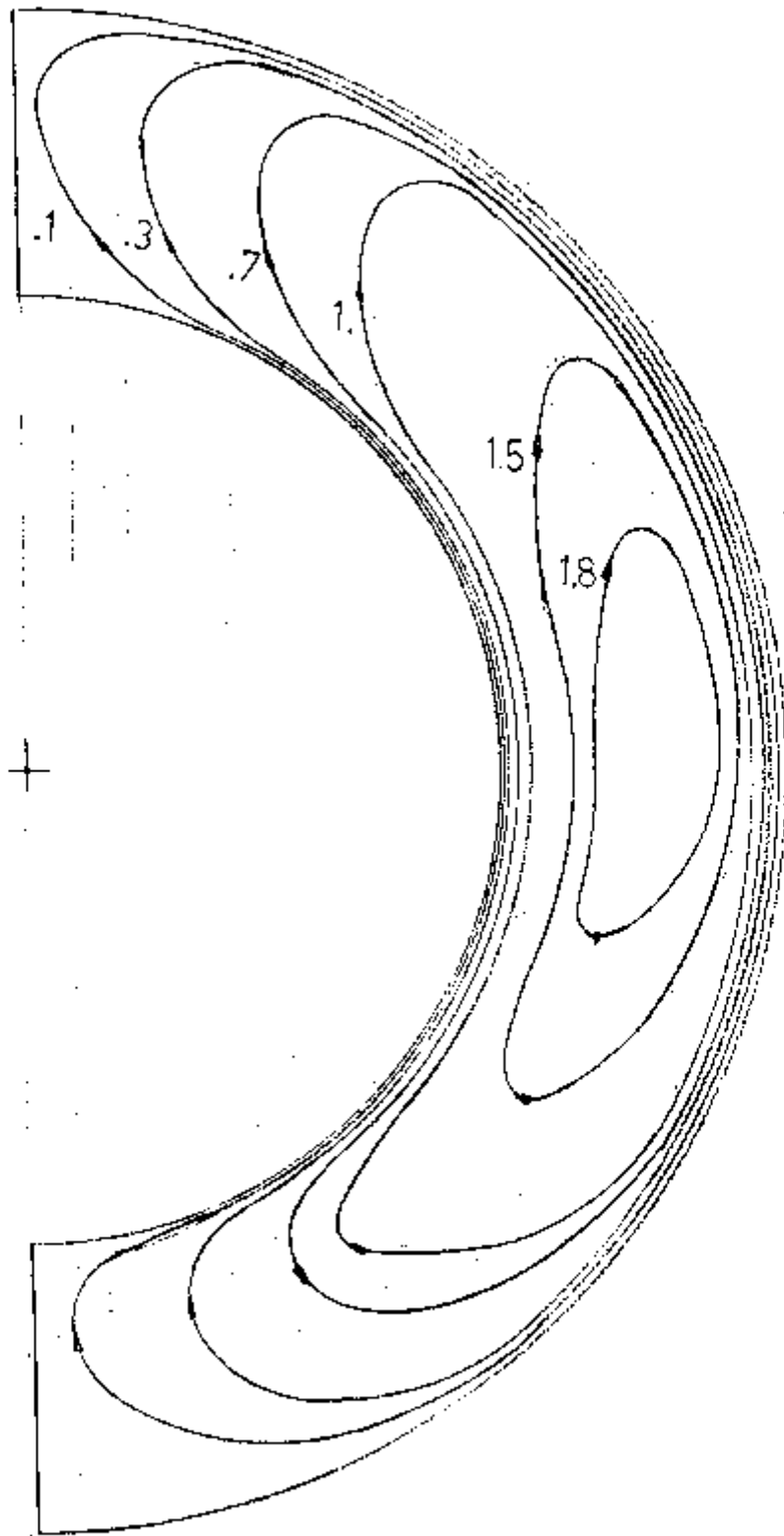


Figura 8-a Linhas de Fluxo para cilindro na posição horizontal, sem considerar cilindros intermediários, $Ra = 495$; $Nu = 3.0$

TEMPERATURAS ADIMENSIONAIS

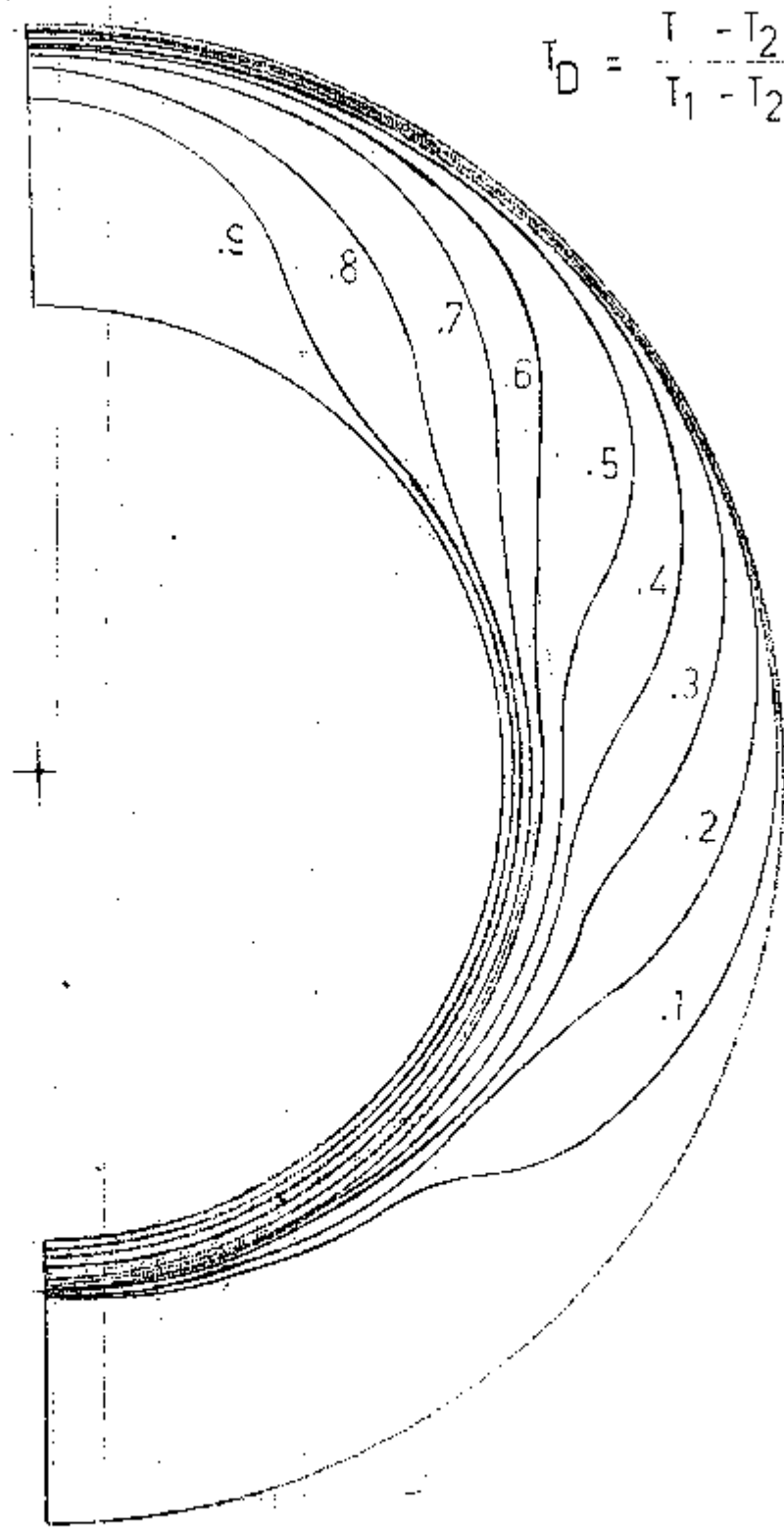


Figura 8-b Temperaturas adimensionais para cilindros na posição horizontal, sem considerar cilindros intermediários, $Ra = 495$; $Nu = 3.0$

Ψ , FUNÇÃO CORRENTE
($\times 10^{-4}$)

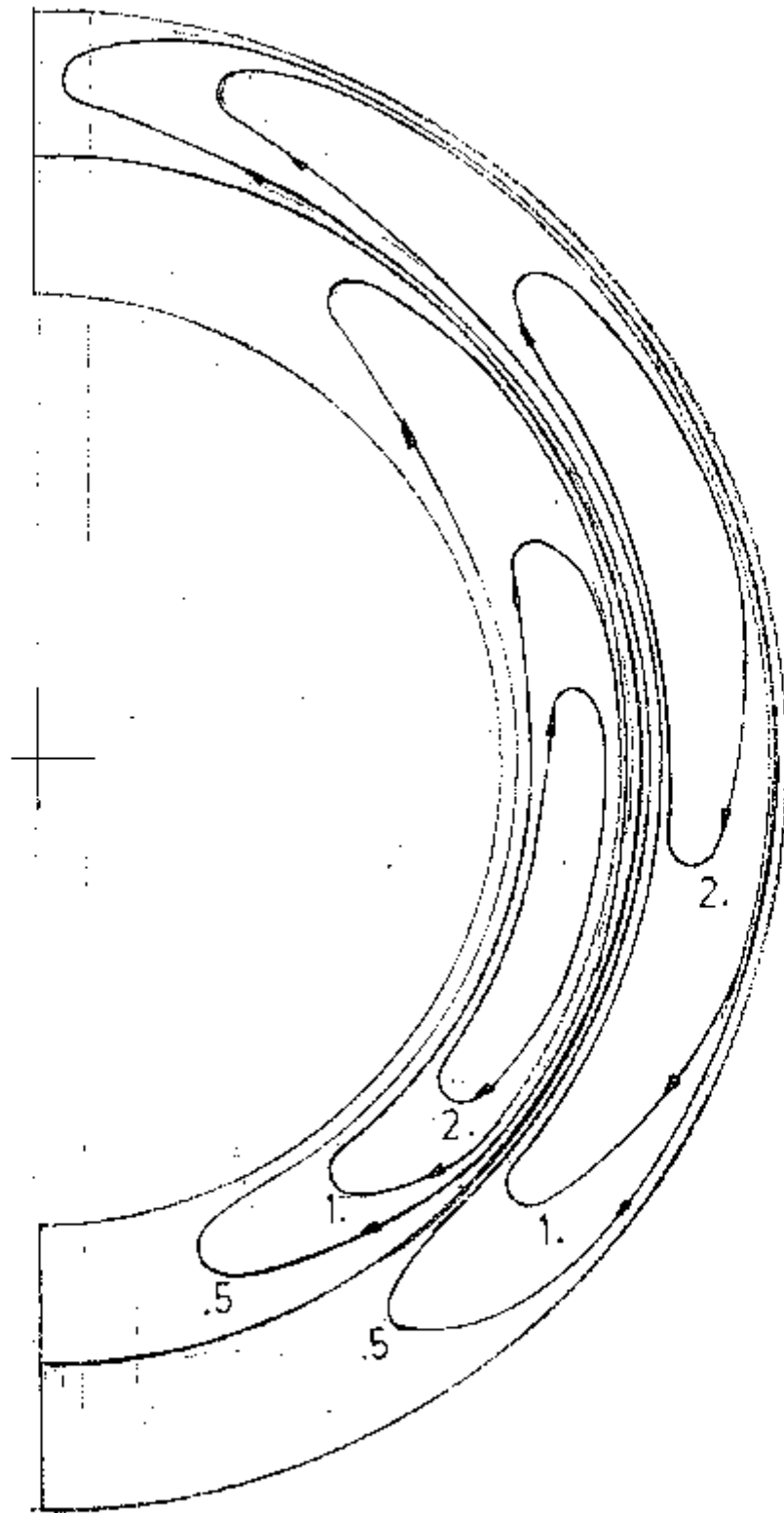


Figura 9-a Linhas de Fluxo para cilindro na posição horizontal, considerando um cilindro intermediário
 $Ra = 498$; $Nu = 2.81$

TEMPERATURAS ADIMENSIONAIS

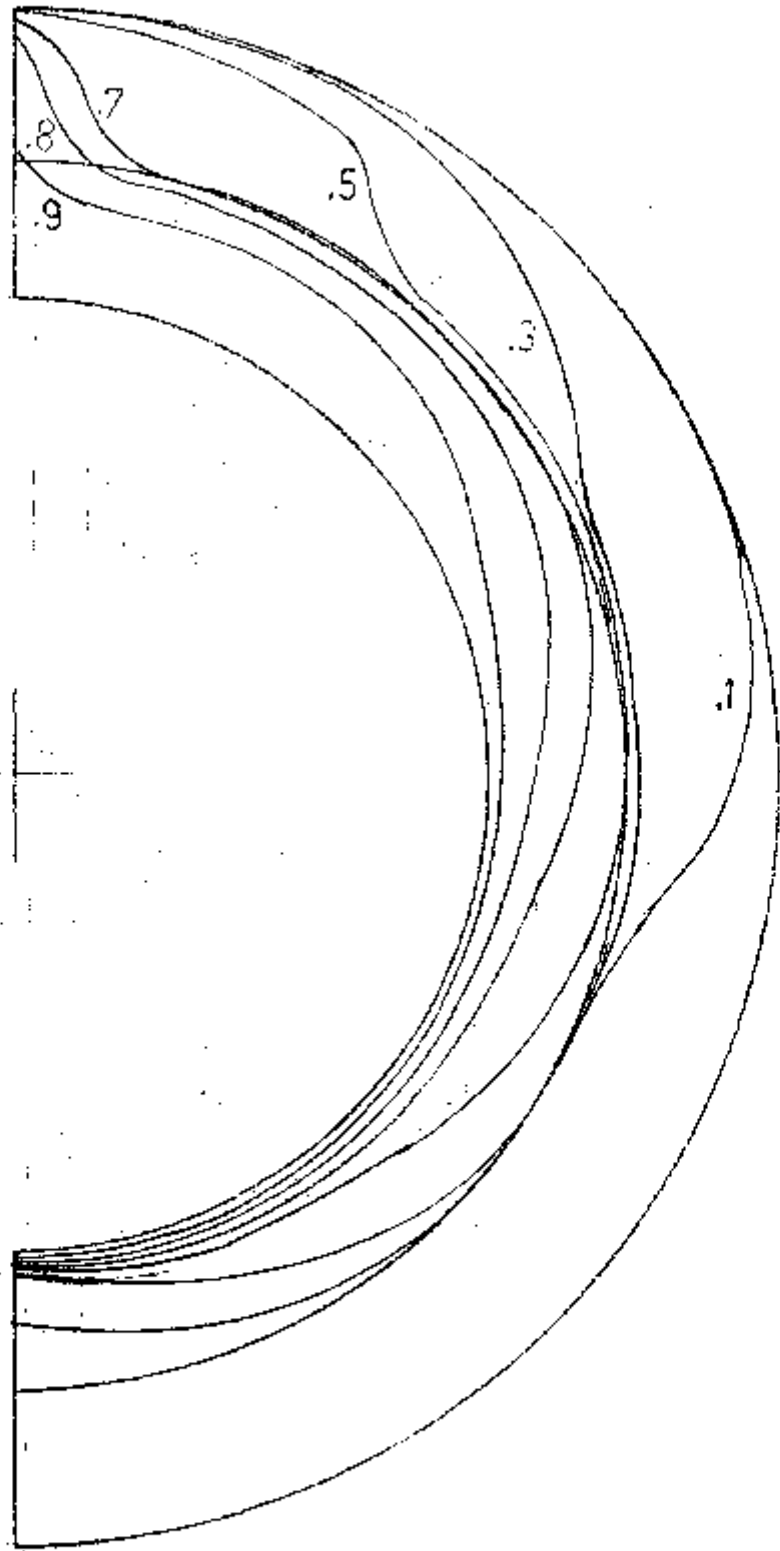


Figura 9-b Temperaturas adimensionais para cilindro na posição horizontal, considerando um cilindro intermediário, $Ra = 498$; $Nu = 2,81$

ψ , FUNÇÃO CORRENTE
($\times 10^{-4}$)

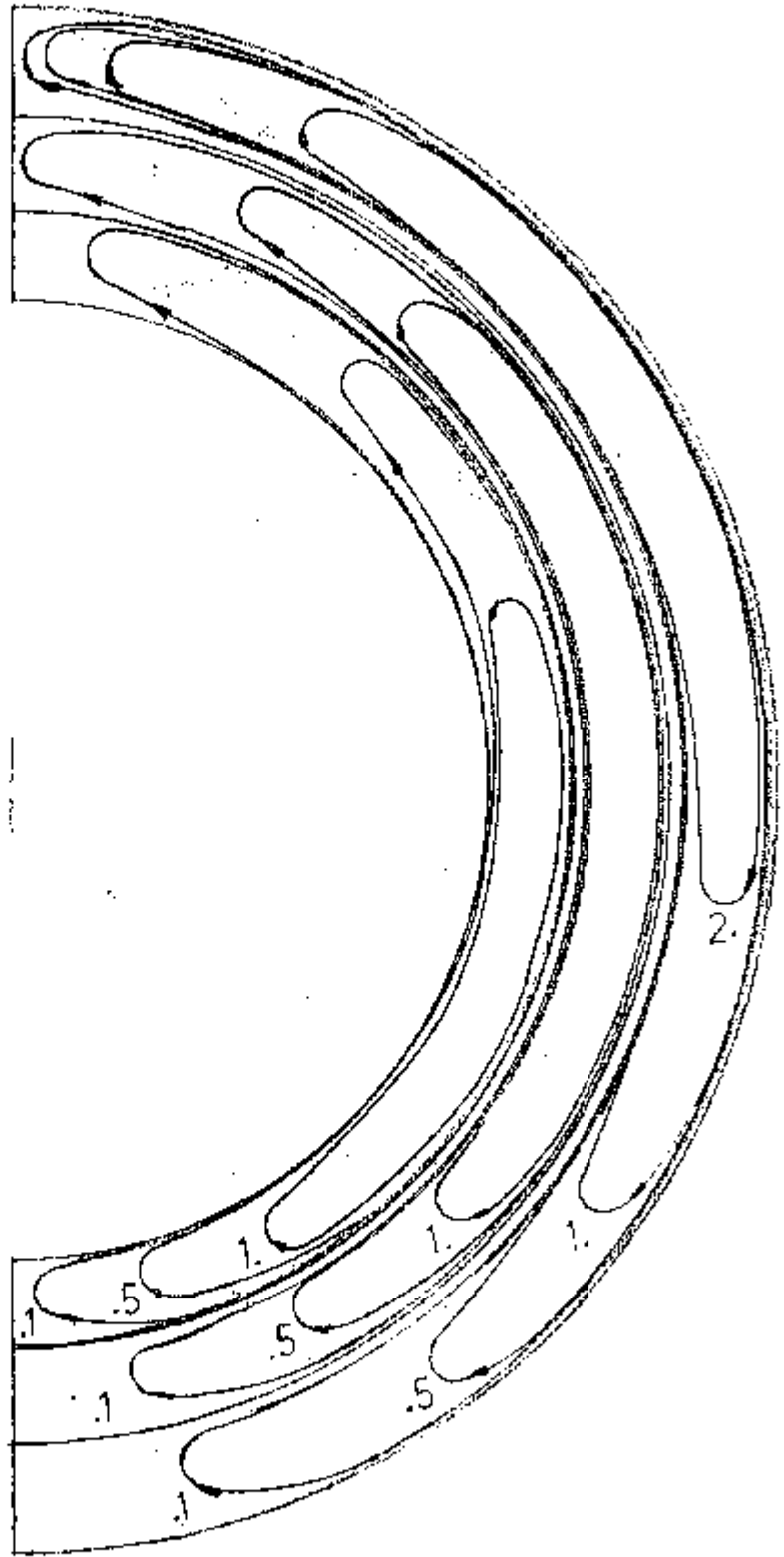


Figura 10-a Linhas de Fluxo para cilindro na posição horizontal, considerando dois cilindros intermediários, $Ra = 449$; $Nu = 2.6$

TEMPERATURAS ADIMENSIONAIS

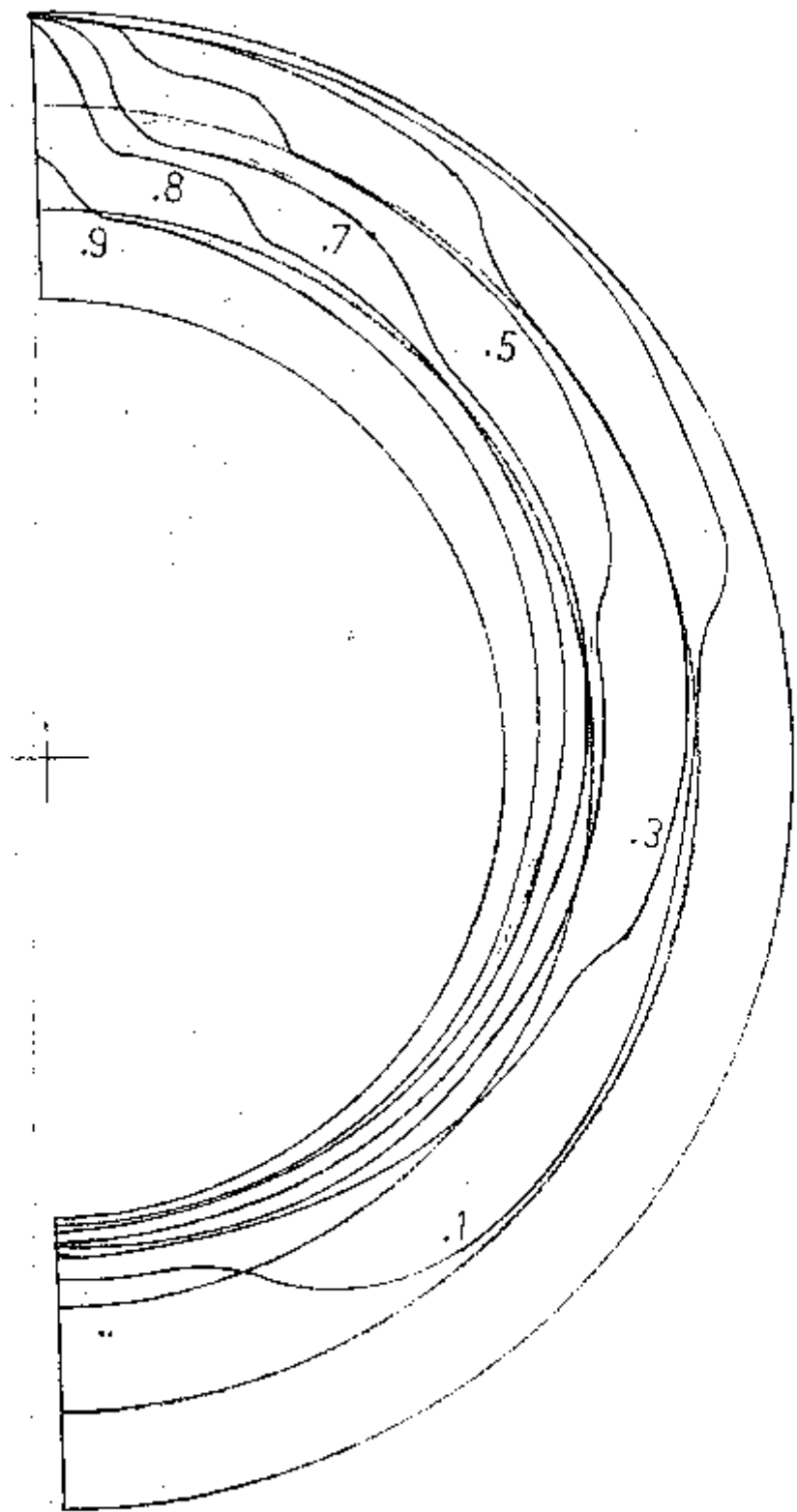


Figura 10-b Temperaturas adimensionais para cilindro na posição horizontal, considerando dois cilindros intermediários, $Ra = 449$; $Nu = 2.6$

m_{θ} , Componente angular da
velocidade de massa
(Kg/m²s)

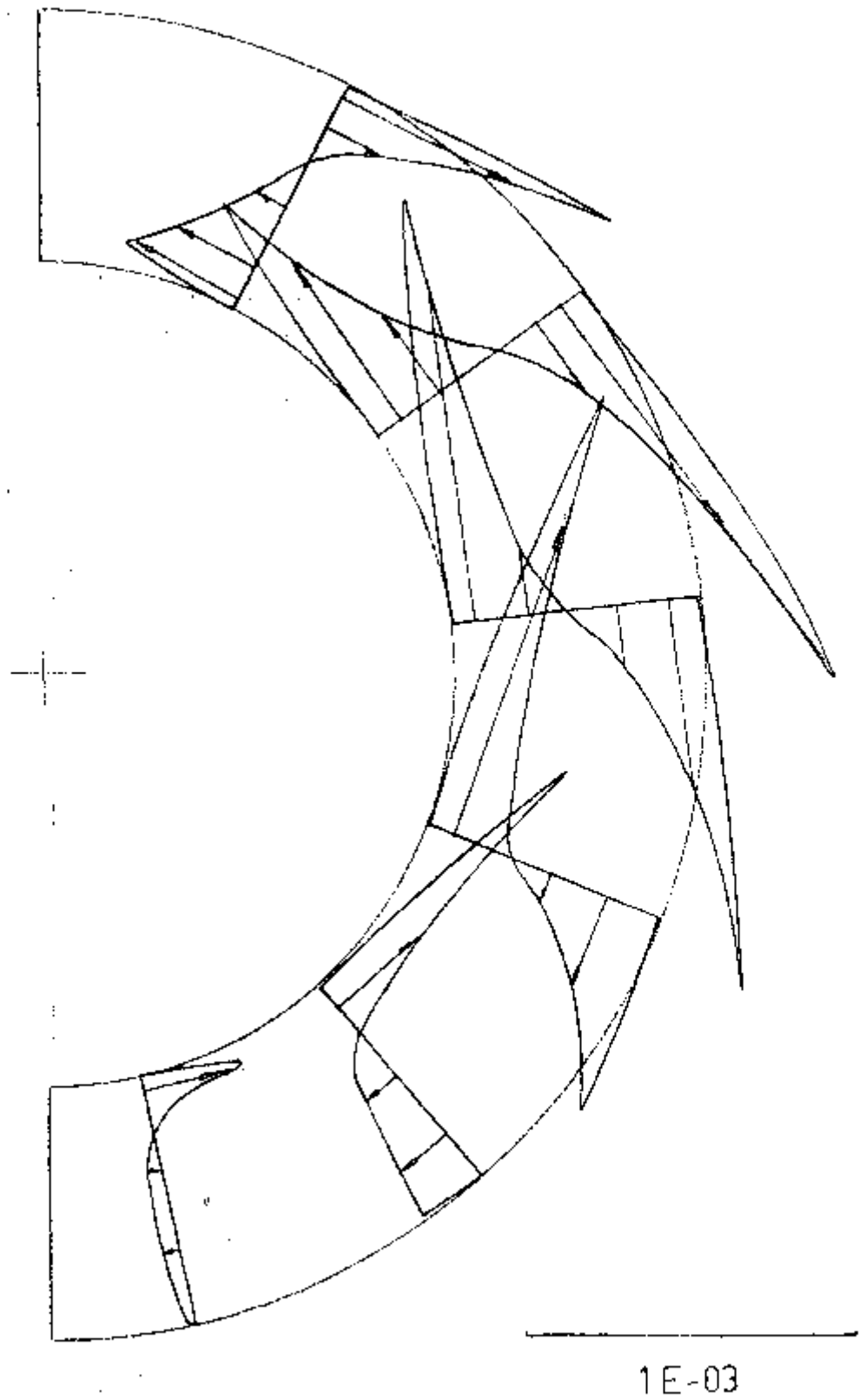


Figura 11-a Componentes angulares das velocidades de massa,
para cilindros na posição horizontal, sem con-
siderar a existência de cilindros intermediários
Ra = 495 ; Nu = 3.0

m_r , Componente radial da
velocidade de massa
(Kg/m²s)

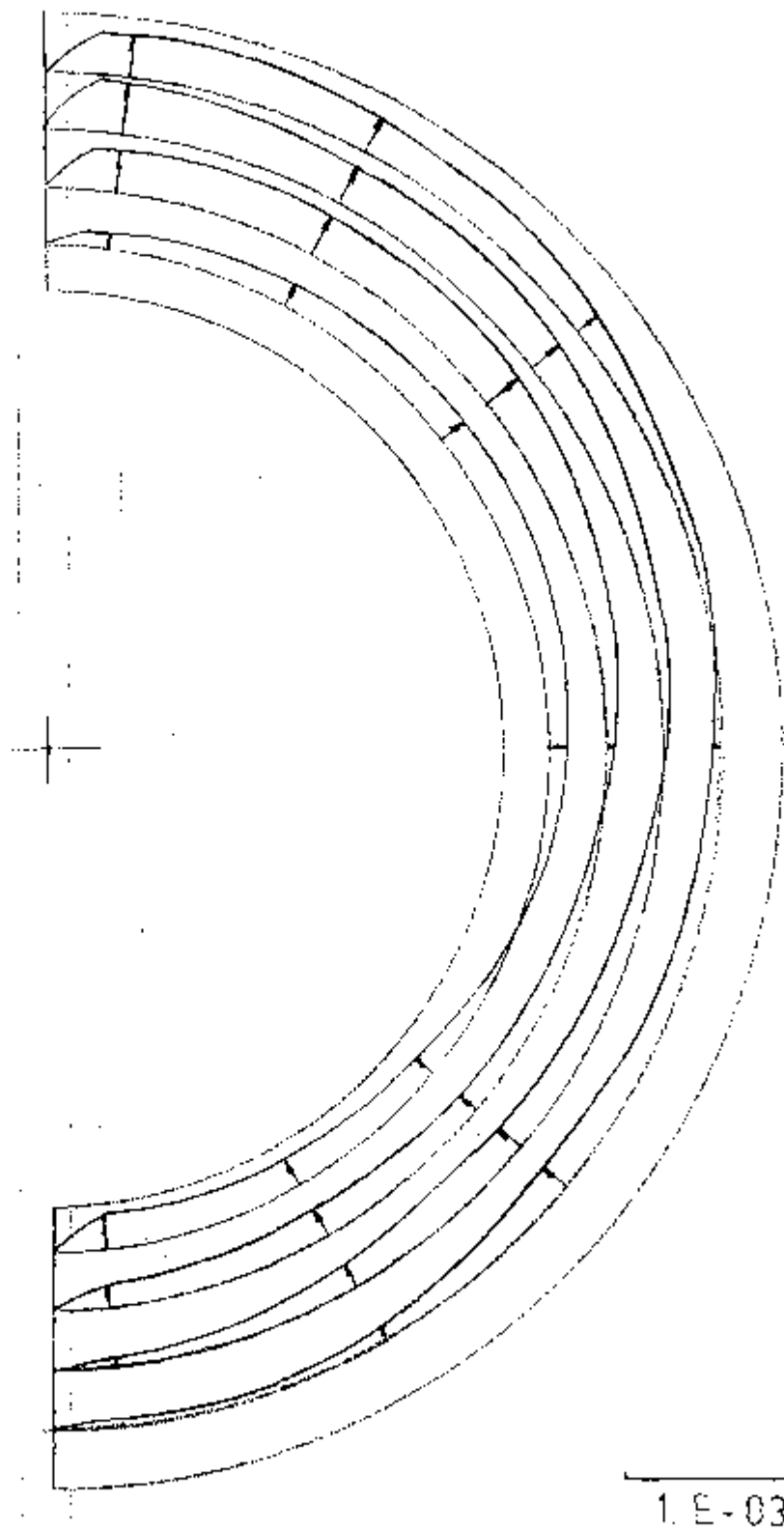


Figura 11-b Componentes radiais das velocidades de massa, pa
ra cilindro na posição horizontal, sem considerar
a existência de cilindros intermediários ,
Ra = 495 ; Nu = 3.0

para casos típicos.

A figura 8-a, representa o fluxo de gás no isolamento (função corrente), sem a presença de paredes intermediárias. A figura 8-b, representa as isotermas (linhas de temperaturas adimensionais constantes) para o mesmo caso acima. Igualmente, as figuras 9-a e 10-a, representam o fluxo de gás, e as figuras 9-b e 10-b, as isotermas para uma e duas paredes intermediárias. A figura 11-a representa as velocidades na direção radial e a figura 11-b, as velocidades na direção angular.

Como pode ser observado nas figuras que representam o fluxo de gás no isolamento (figuras 8-a, 9-a e 10-a), o gás flui para cima ao longo da parede quente, e para baixo ao longo da parede fria, transferindo energia do lado quente para o frio, o que deteriora o efeito isolante. As isotermas, principalmente no caso da não existência de parede intermediária (figura 8-b), são bastante distorcidas em relação à condução*.

A introdução de paredes intermediárias, melhora o efeito isolante, pois a convecção ou circulação natural do gás é confinada conforme mostrado nas figuras 9-a e 10-a. As isotermas, para o caso de uma a duas paredes intermediárias, são menos distorcidas, conforme mostrado nas figuras 9-b e 10-b, aproximando-se do caso de condução simples, com o aumento de número de paredes intermediárias.

4.1.2 Condutividade Térmica Efetiva

A condutividade térmica efetiva k_{ef} , é definida por:

* As isotermas no caso de transferência de calor por condução apenas, são concêntricas

$$\lambda_{ef} = \frac{Q I_n(r_2/r_1)}{(T_1 - T_2)\pi} \quad (42)$$

onde Q é o calor total médio radial por unidade de comprimento, transferido através do isolamento térmico. O calor por posição radial (Q), é calculado pela seguinte equação:

$$Q_i = \sum_{j=1}^{jj-1} 2r_i \Delta\theta(\rho_{i,j} v_{r_{i,j+1/2}} C_p T_{i,j} - \lambda_{i,j} \frac{\partial T_{i,j}}{\partial r}) \quad (43)$$

onde o primeiro termo da somatória $(r_i \Delta\theta \rho_{i,j} v_{r_{i,j+1/2}} C_p T_{i,j})$ é o calor transferido por conversão, e o segundo termo, dado por $(r_i \Delta\theta \lambda_{i,j} \frac{\partial T_{i,j}}{\partial r})$ representa o calor transferido por condução nas fibras e no gás.

O calor total médio, por posição radial, é calculado pela expressão abaixo.

$$Q = \frac{1}{ii} \sum_{i=1}^{ii} Q_i \quad (44)$$

Para o cálculo do calor transferido por condução nas fibras e no gás, é necessário conhecer o termo $\partial T/\partial r$. Este termo, é obtido no interior do isolamento, por diferenças finitas centrais e nas paredes quente e fria, por diferenças forward e backward respectivamente.

Os resultados obtidos nos cálculos de calor por posição radial, apresentaram um desvio médio da ordem de 4% em relação ao calor médio total.

Com o valor da condutividade térmica efetiva (equação 42), o número de Nusselt global foi calculado.

4.1.3 Número de Nusselt Global e Local

O número de Nusselt global (Nu), é definido neste modo

lo, por:

$$Nu = \lambda_{ef} / \lambda \quad (45)$$

onde λ é a condutividade térmica do gás mais fibras, calculado na temperatura média entre a parede quente e a fria do isolamento. (Nos testes feitos, mencionados no item 1, o λ foi definido como sendo apenas a condutividade térmica do gás).

Analogamente ao modelo desenvolvido para parede plana, o número de Nusselt, foi correlacionado com o número de Rayleigh dividido pela relação geométrica entre a dimensão vertical e a horizontal 'A'.

O número de Rayleigh (Ra) foi definido por:

$$Ra = \frac{g \Delta T \Delta r K \beta}{\nu \alpha} \quad (46)$$

sendo Δr e ΔT dados por:

$$\Delta r = \frac{r_2 - r_1}{N + 1} \quad (47)$$

$$\Delta T = \frac{T_1 - T_2}{N + 1} \quad (48)$$

onde N é o número de paredes intermediárias, T_1 a temperatura da parede quente do isolamento, T_2 a temperatura da parede fria do mesmo, e r_1 , r_2 , são os raios interno e externo respectivamente. Os outros parâmetros do número de Rayleigh são: ' β ' que é o coeficiente térmico de expansão volumétrica à pressão constante, dado por:

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_{p_{cte}} = \frac{1}{T} \quad (\text{gás perfeito}) \quad (49)$$

e α a difusividade térmica do gás, dada por:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho C_p} \quad (50)$$

sendo as propriedades do gás, avaliadas na temperatura média entre a parede quente e fria.

A relação 'A' , foi definida para o cilindro na posição horizontal por:

$$A = \frac{\pi(r_2 + r_1)}{2(r_2 - r_1)} \quad (51)$$

A correlação de Nu versus Ra/A, é apresentada na figura 12, para os casos estudados, i.ê, para 0,1 e 2 paredes intermediárias , e para os gases hélio e ar. A correlação obedece a uma equação do tipo apresentado abaixo:

$$Nu = c \left(\frac{Ra}{A} \right)^n \quad (52)$$

onde as constantes 'c' e 'n' foram calculadas pelo método dos mínimos quadrados, para os valores de Nu na faixa de temperaturas e pressões já mencionadas.

As seguintes correlações foram obtidas:

- Sem parede intermediária (N = 0)

$$Nu = .4 \left(\frac{Ra}{A} \right)^{.5} \quad \text{para } 10 < Ra/A < 200 \quad (53)$$

$$Nu = 1 \quad \text{para } Ra/A < 10 \quad (54)$$

- Uma parede intermediária (N = 1)

$$Nu = .5 \left(\frac{Ra}{A} \right)^{.5} \quad \text{para } 7 < Ra/A < 50 \quad (55)$$

$$Nu = 1 \quad \text{para } Ra/A < 7 \quad (56)$$

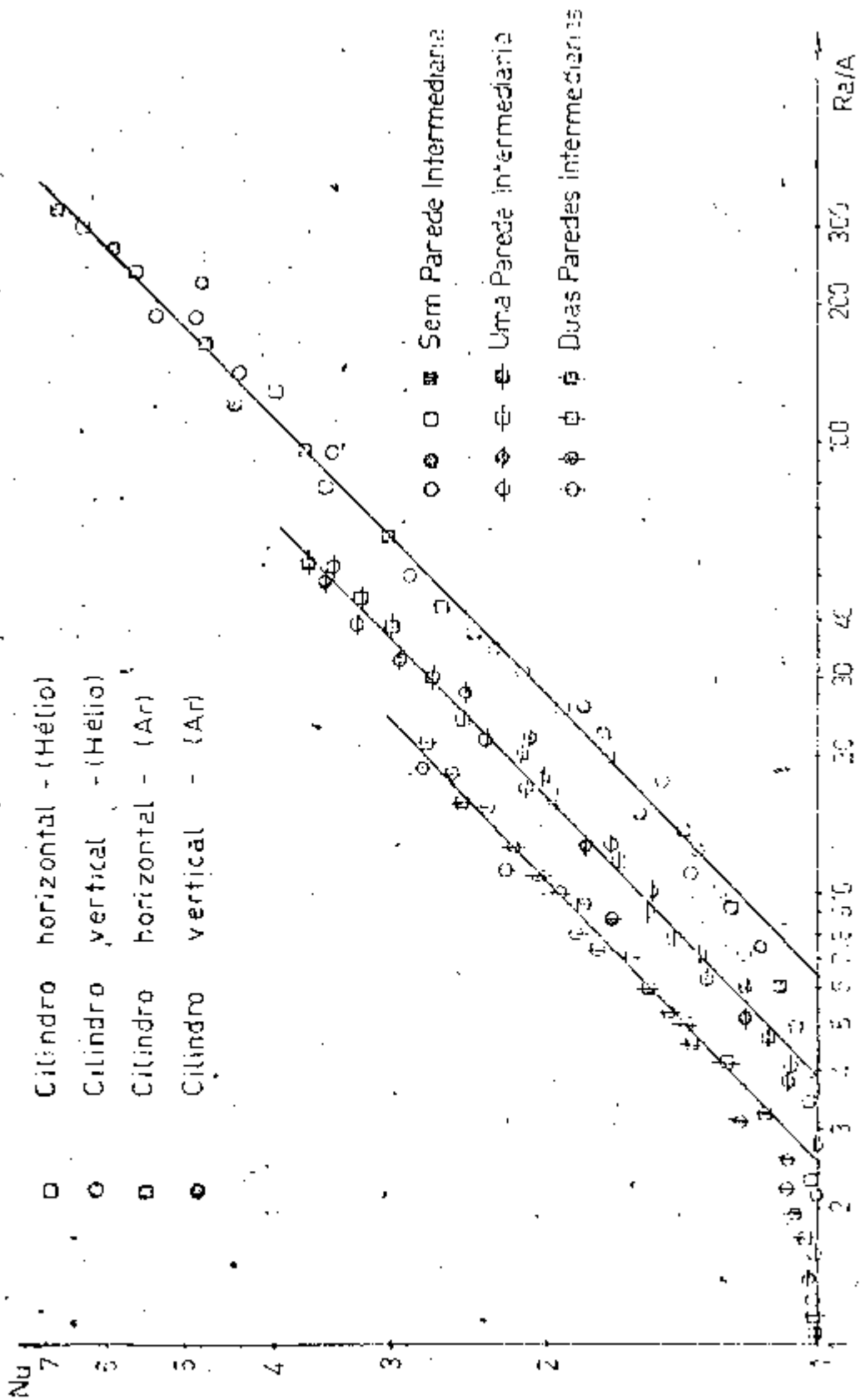


Figura 12 Correlação do número de Nusselt global para cilindro na posição horizontal e para a posição vertical considerando nenhum, um e dois cilindros intermediários.

- Duas paredes intermediárias (N = 2)

$$\text{Nu} = .6 \left(\frac{\text{Ra}}{\text{A}}\right)^{.5} \quad \text{para} \quad 5 < \frac{\text{Ra}}{\text{A}} < 20 \quad (57)$$

$$\text{Nu} = 1 \quad \text{para} \quad \text{Ra}/\text{A} < 5 \quad (58)$$

Para valores de Nu maiores que 1, existe a convecção ou circulação natural. Caso este seja da ordem de 5, o isolamento não é mais viável tecnicamente, devido a baixa eficiência. Para projeto, a faixa ótima é de Nu = 1, onde a convecção natural é desprezível, não afetando a eficiência do isolamento.

Nos testes realizados na KFA e no IPEN, mencionados na introdução deste trabalho, não houve convecção natural no isolamento. Isto é provado, pois não houve variação do número de Nusselt com a pressão, como mostram os diagramas dos resultados obtidos na KFA (figuras 13 e 14).

A existência de convecção natural, implica na variação do número de Nusselt com a pressão, pois este é proporcional ao número de Rayleigh, neste caso. Sendo este adimensional (Ra) proporcional ao quadrado da pressão, fica provado que não houve realmente convecção natural nos testes realizados.

A não existência de convecção natural, é provada também, calculando-se o número de Rayleigh para as condições experimentais, utilizando o valor da permeabilidade obtido em testes preliminares [19]. Entrando com estes valores no diagrama da figura 12, verifica-se que eles estão na faixa de Nu = 1, i.é na faixa onde não há convecção natural.

A inexistência de convecção natural, faz com que a condutividade térmica efetiva, seja igual a condutividade térmica do gás mais fibras, conforme equação abaixo:

$$\lambda_{ef} = \lambda_{g\acute{a}s} + \lambda_{fibra} \quad (59)$$

Os resultados experimentais mostrados nas figuras 13 e 14 são de $Nu = 2$ para o gás h\u00e9lio, e $Nu = 4$ para o ar. Como Nu \u00e9 calculado por $Nu = \lambda_{ef}/\lambda_{g\acute{a}s}$, considerando a equa\u00e7\u00e3o (59), vem:

$$Nu = 1 + \lambda_{fibra}/\lambda_{g\acute{a}s} \quad (60)$$

Calculando-se λ_{fibra} para ambos os casos, sabendo que $\lambda_{ar} = .05$ W/mK, e que $\lambda_{h\u00e9lio} = 2.5$ W/mK, obt\u00eam-se valores muito pr\u00f3ximos, provando que n\u00e3o houve convec\u00e7\u00e3o natural nos testes realizados, e provando tamb\u00e9m a validade do modelo para a faixa onde n\u00e3o ocorre convec\u00e7\u00e3o natural.

A varia\u00e7\u00e3o do N\u00famero de Nusselt local na parede fria \u00e9 mostrado na figura 15, onde Nu_{10c}/Nu \u00e9 dado por:

$$\frac{Nu_{10c}}{Nu} = \frac{q_{10c}}{Q/(r_2\pi)} \quad (61)$$

onde q_{10c} \u00e9 o fluxo de calor local, i. \u00e9, o produto da condutividade t\u00e9rmica local, pelo gradiente de temperatura na parede fria, definido por:

$$q_{10c} = \lambda_{i,j} \frac{\partial T_{i1,j}}{\partial r} \quad (62)$$

e $Q/(r_2\pi)$ o fluxo de calor m\u00e9dio atrav\u00e9s da isola\u00e7\u00e3o.

\u00c9 observado na figura 15, que a varia\u00e7\u00e3o local do n\u00famero de Nusselt, aumenta ao longo da parede fria, i. \u00e9, a maior quantidade de calor, \u00e9 transmitida na parte superior do isolamento.

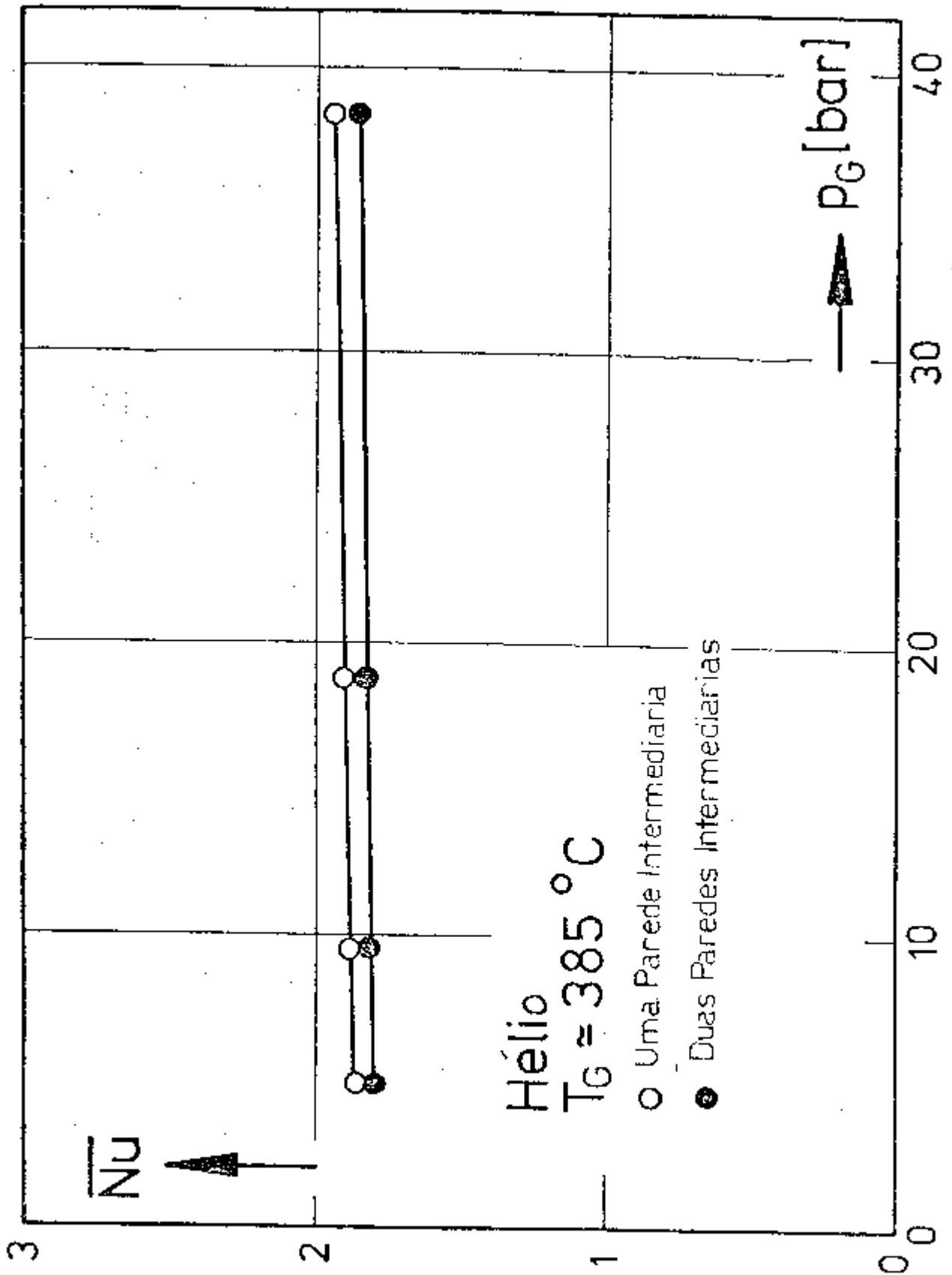


Figura 13 Variação do número de Nusselt com a pressão, obtida na KFA, para o gás hélio.

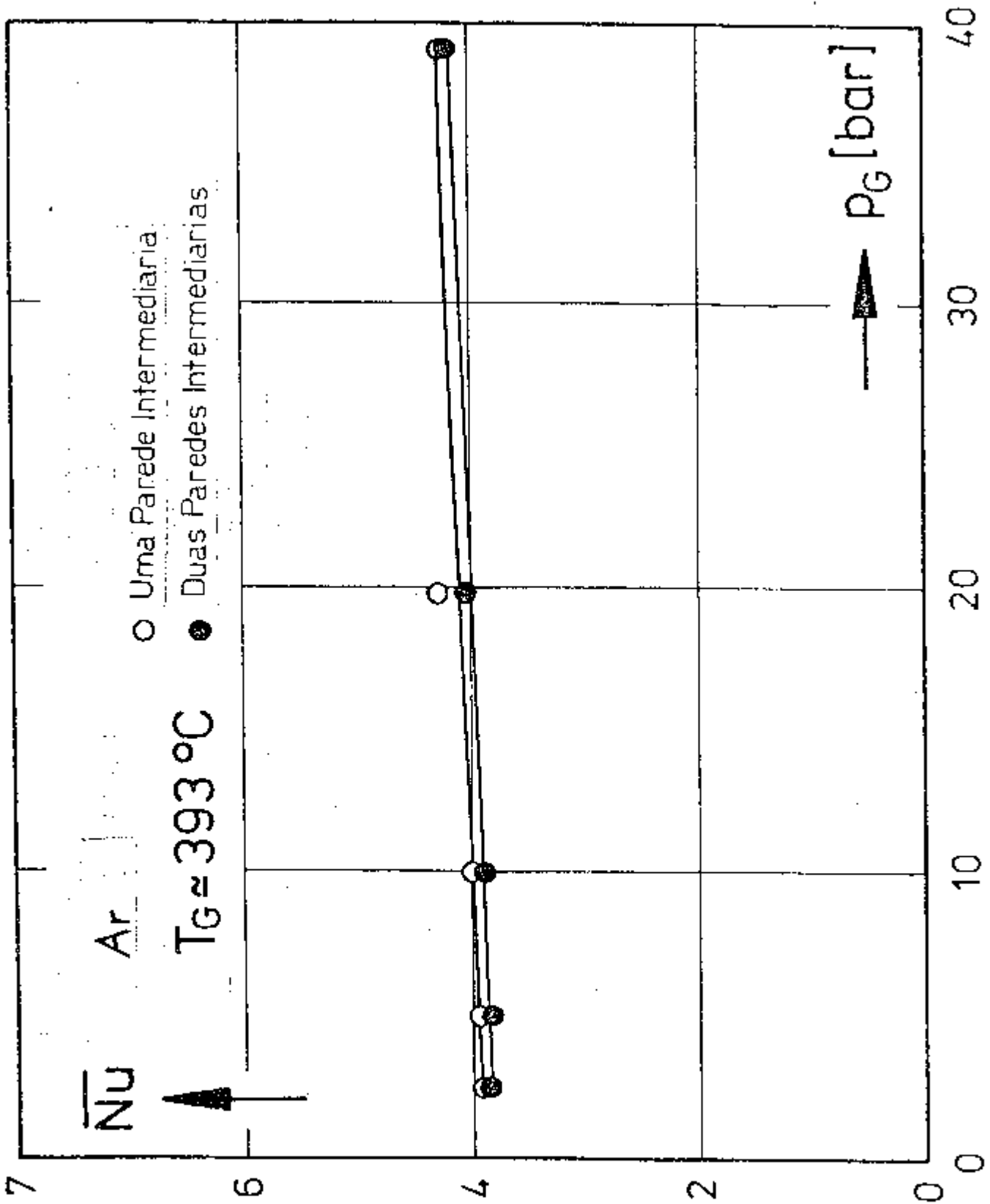


Figura 14 Variação do número de Nusselt local ao longo da parede de fria, para cilindro na posição horizontal.

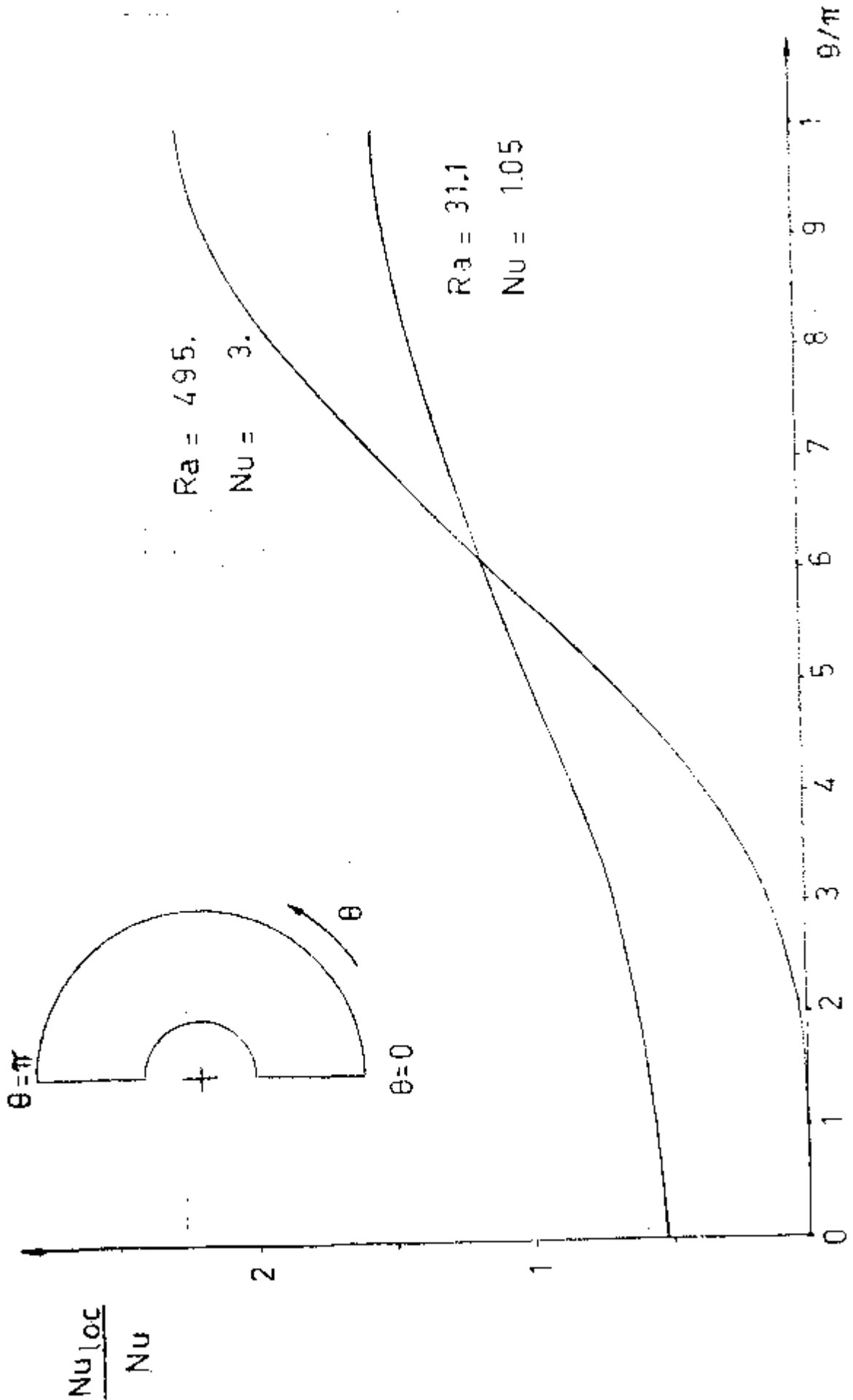


Figura 15 Variação do número de Nusselt local ao longo da parede fria, para cilindro na posição horizontal.

4.2 Cilindro Vertical

Obtidas analogamente ao caso anterior (cilindro horizontal), as distribuições de fluxo, velocidades e temperatura são apresentadas nas figuras 16, 17, 18 e 19, para os mesmos casos de cilindro horizontal (0,1 e 2 cilindros intermediários e para os gases hélio e ar).

A condutividade térmica efetiva, é calculada pela seguinte expressão.

$$\lambda_{ef} = \frac{Q \ln(r_2/r_1)}{2(T_1 - T_2)L\pi} \quad (63)$$

onde L é o comprimento da secção considerada (distância entre as peças V).

O fluxo de calor por posição radial é calculado pela seguinte expressão:

$$Q_i = \sum_{j=1}^{jj-1} 2\pi Ar r_i (\rho_{i,j} v_{r_{i,j+1/2}} C_p T_{i,j} - \lambda_{i,j} \frac{\partial T_{i,j}}{\partial r}) \quad (64)$$

O calor total, médio por posição radial, é dado por:

$$Q = \frac{1}{ii} \sum_{i=1}^{ii} Q_i \quad (65)$$

A correlação Nu versus Ra/A, onde, a relação geométrica 'A', é definida, para a posição vertical por:

$$A = \frac{L}{r_2 - r_1} \quad (66)$$

foi apresentada na figura 12

A variação do número de Nusselt local, é apresentada na figura 20. É observado, que esta variação aumenta ao longo da

Ψ FUNÇÃO CORRENTE $(\times 10^{-4})$

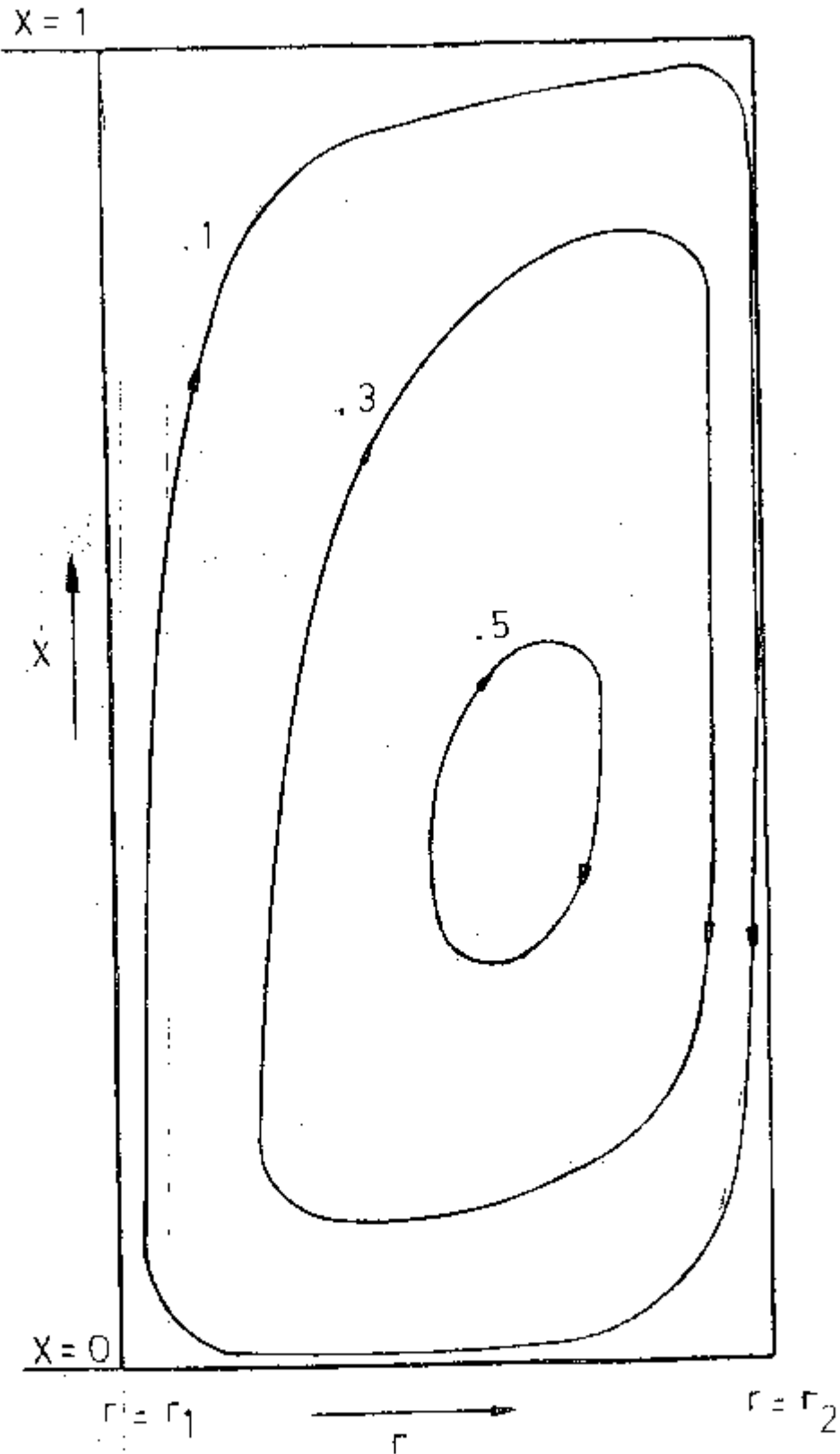


Figura 16-a Linha de fluxo para cilindro na posição vertical, sem considerar cilindros intermediários, $Ra = 512$; $Nu = 3.26$

TEMPERATURAS ADIMENSIONAIS

X = 1

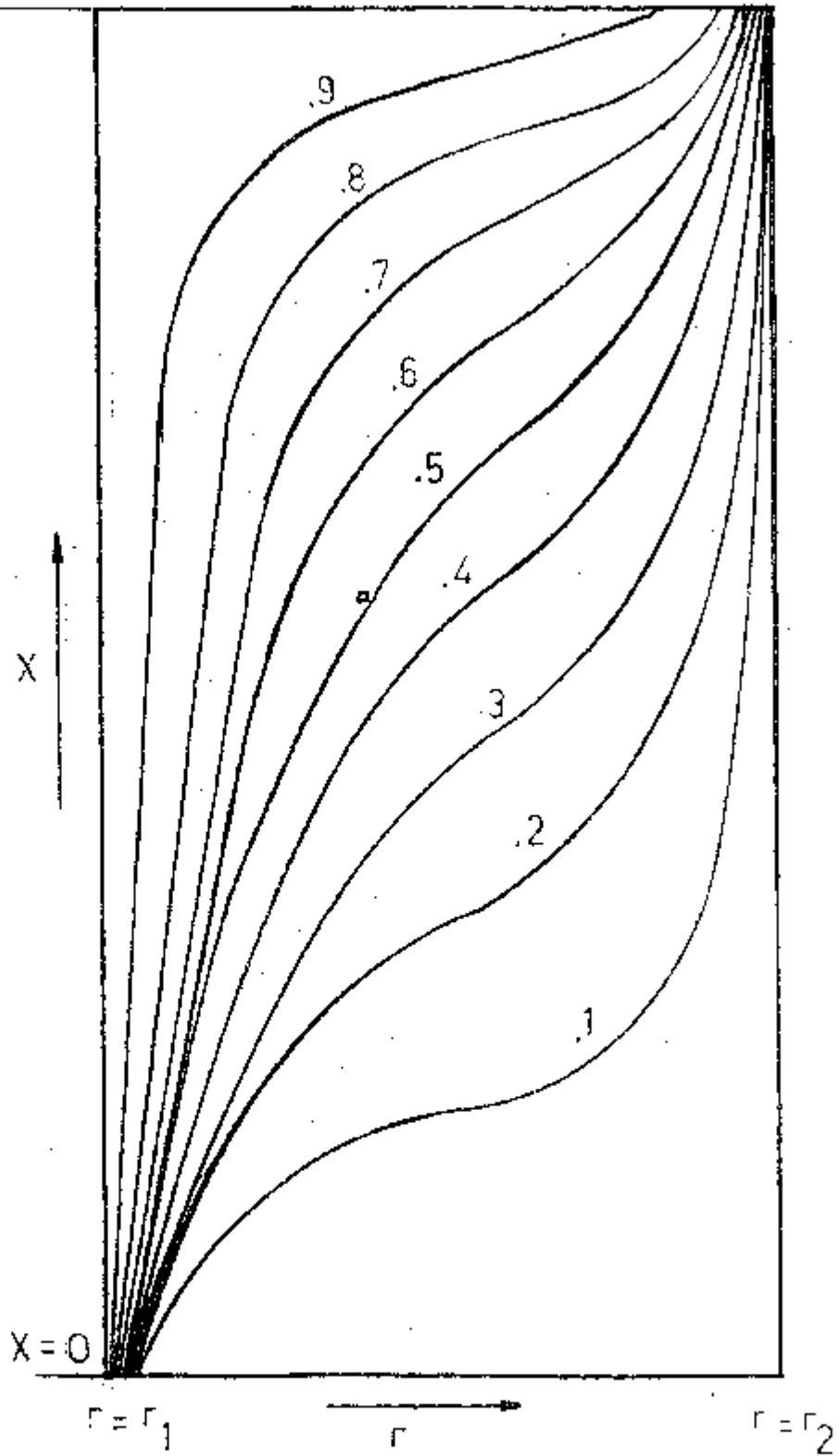


Figura 16-b Temperaturas adimensionais para cilindro na posição vertical, sem considerar cilindros intermediários Ra = 512 ; Nu = 3.26

Ψ , FUNÇÃO CORRENTE

($x(-10^{-4})$)

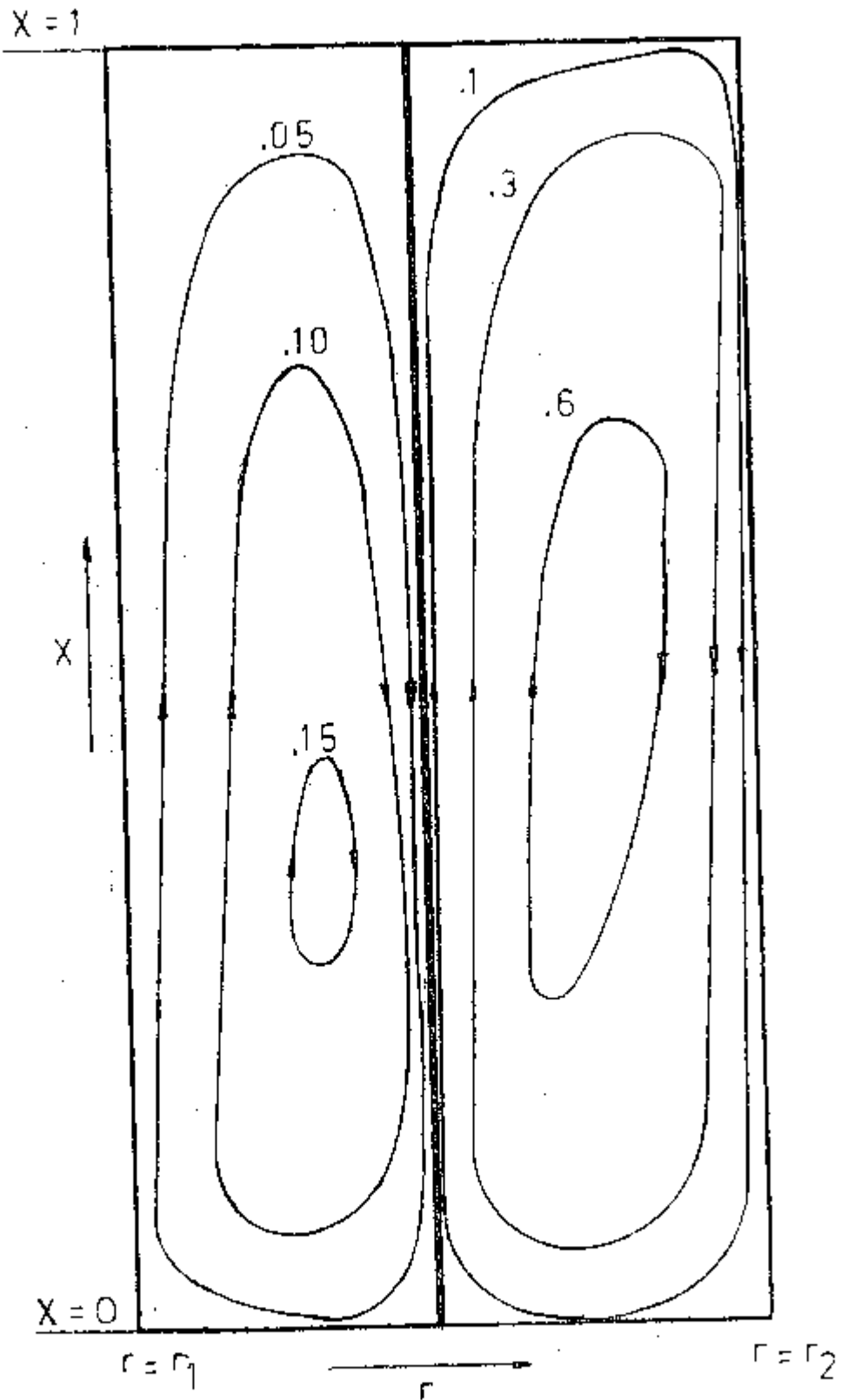


Figura 17-a Linha de fluxo para cilindro na posição vertical, considerando um cilindro intermediário, $Ra = 279$; $Nu = 2.11$

TEMPERATURAS ADIMENSIONAIS

$X=1$

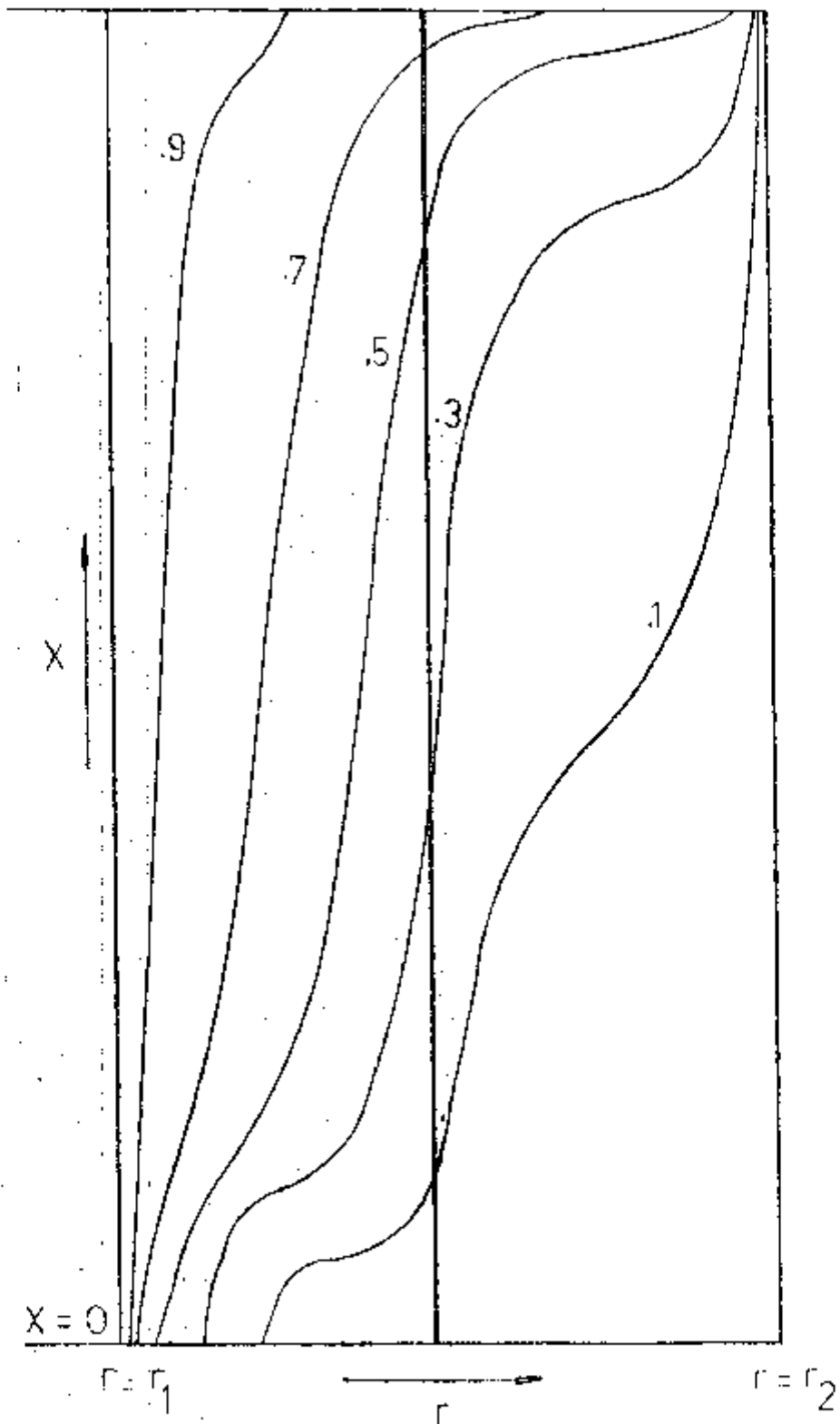


Figura 17-b Temperaturas adimensionais para cilindro na posição vertical, considerando um cilindro intermediário $Ra = 279$; $Nu = 2.11$

Y , FUNÇÃO CORRENTE

$(x \cdot 10^{-4})$

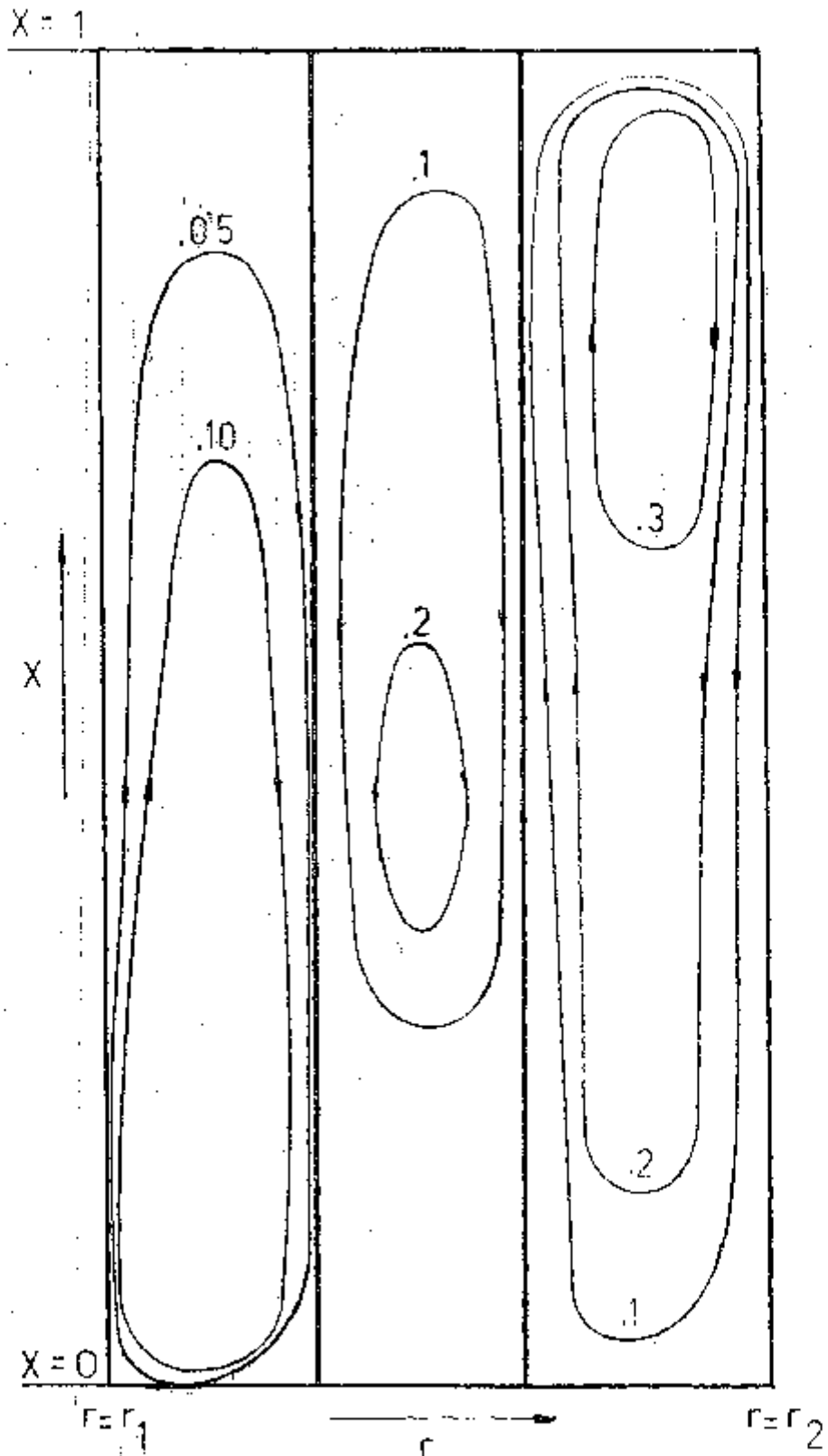


Figura 18-a Linhas de fluxo para cilindro na posição vertical, considerando dois cilindros intermediários, $Ra = 160$; $Nu = 1.83$

TEMPERATURAS ADIMENSIONAIS

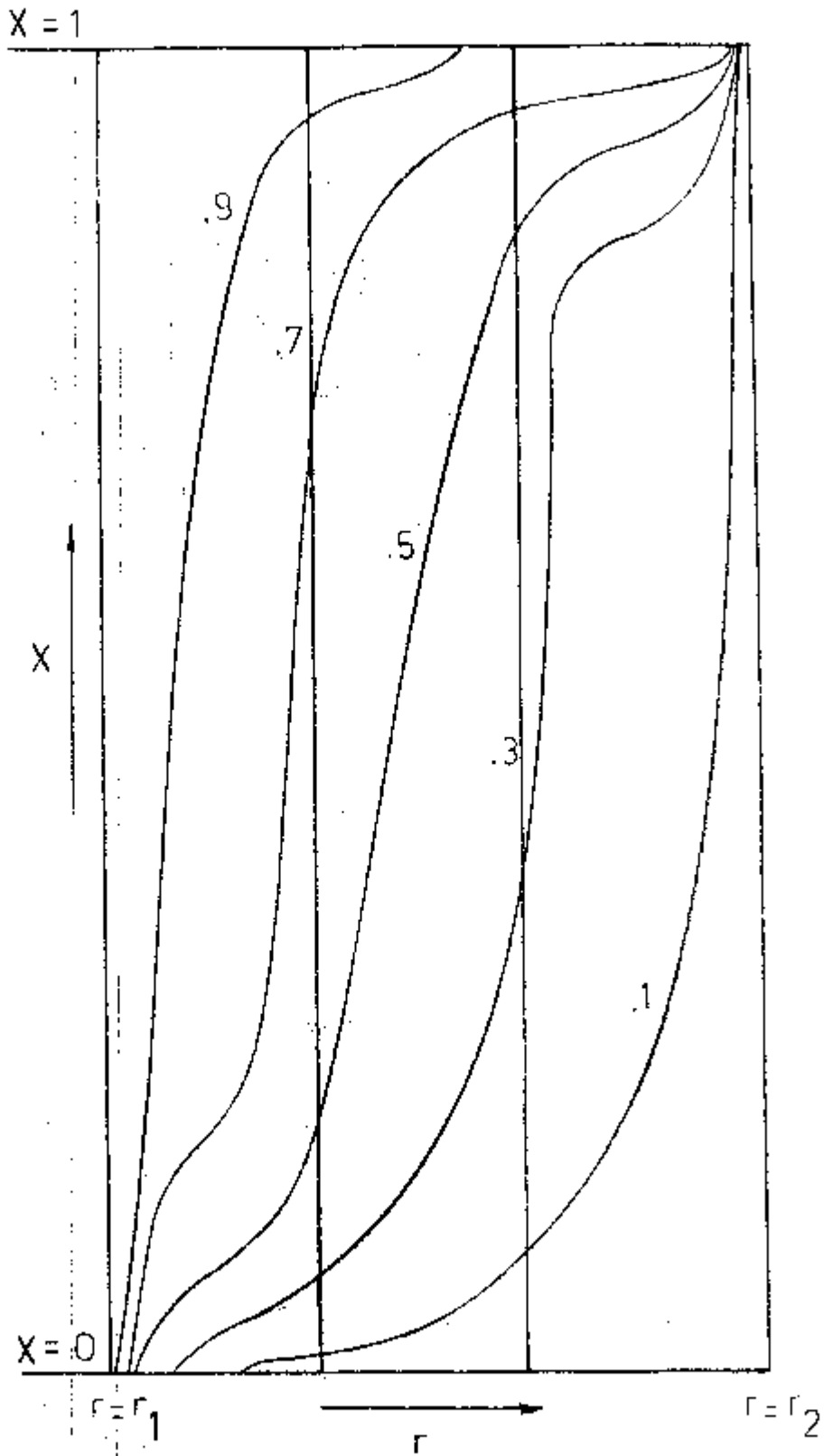
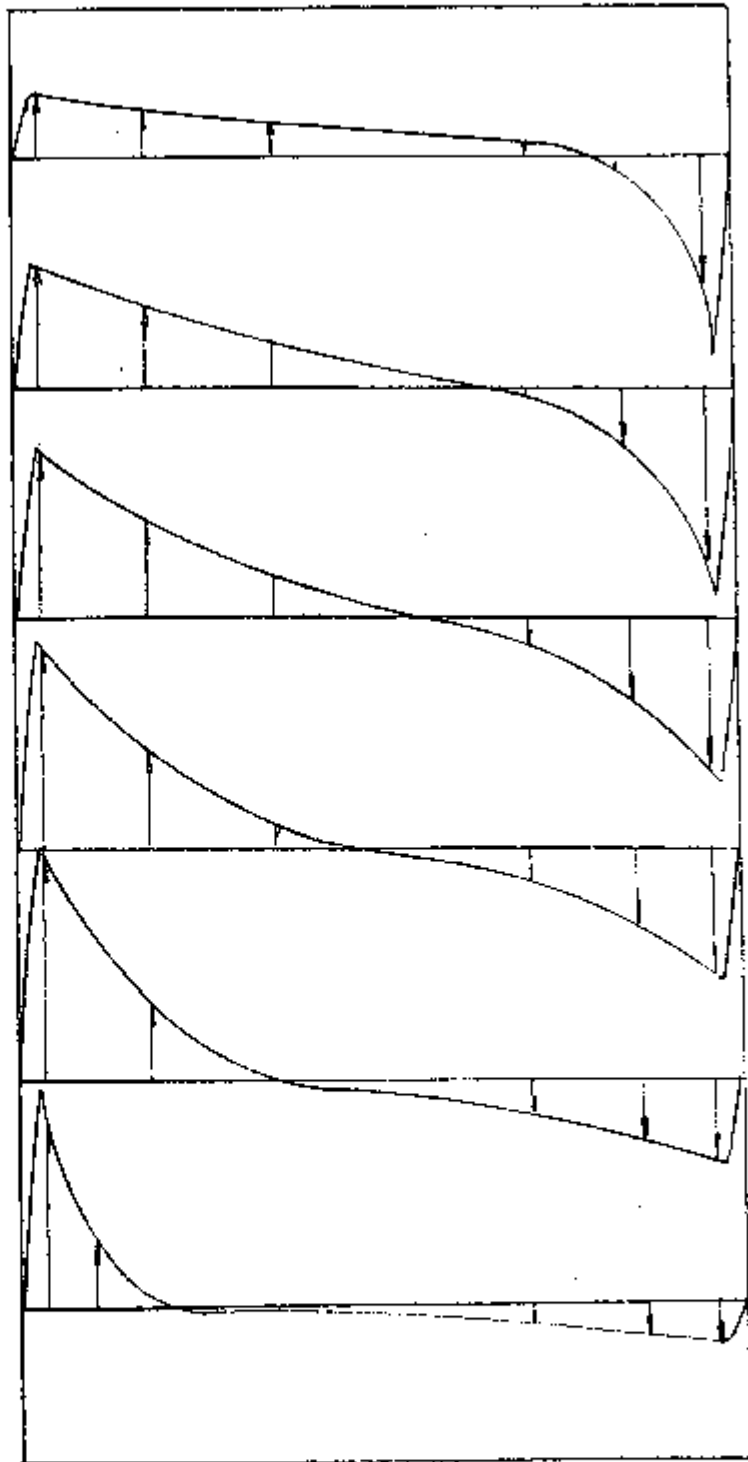


Figura 18-b Temperaturas adimensionais para cilindro na posição vertical, considerando dois cilindros intermediários, $Ra = 160$; $Nu = 1.83$

m_x , Componente axial da
velocidade de massa
(Kg/m².s)



1E-03

Figura 19-a Componentes axiais das velocidades de massa, para cilindro na posição vertical, sem considerar a existência de cilindros intermediários,
Ra = 512 ; Nu = 3.26

m_r , Componente radial da
velocidade de massa
(Kg/m²s)

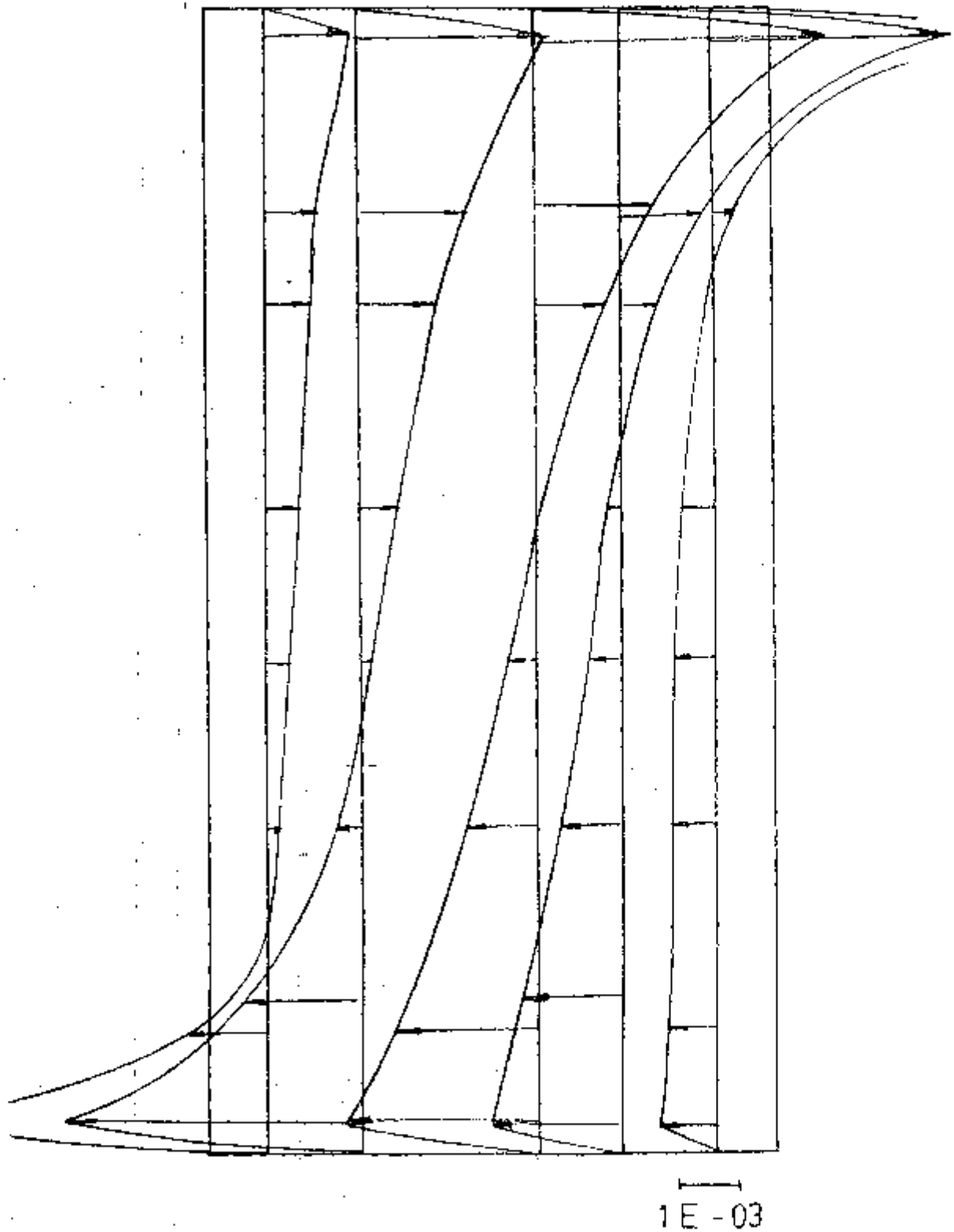


Figura 19-b Componentes radiais das velocidades de massa ,
para cilindro na posição vertical, sem conside-
rar a existência de cilindros intermediários ,
Ra = 512 ; Nu = 3.26

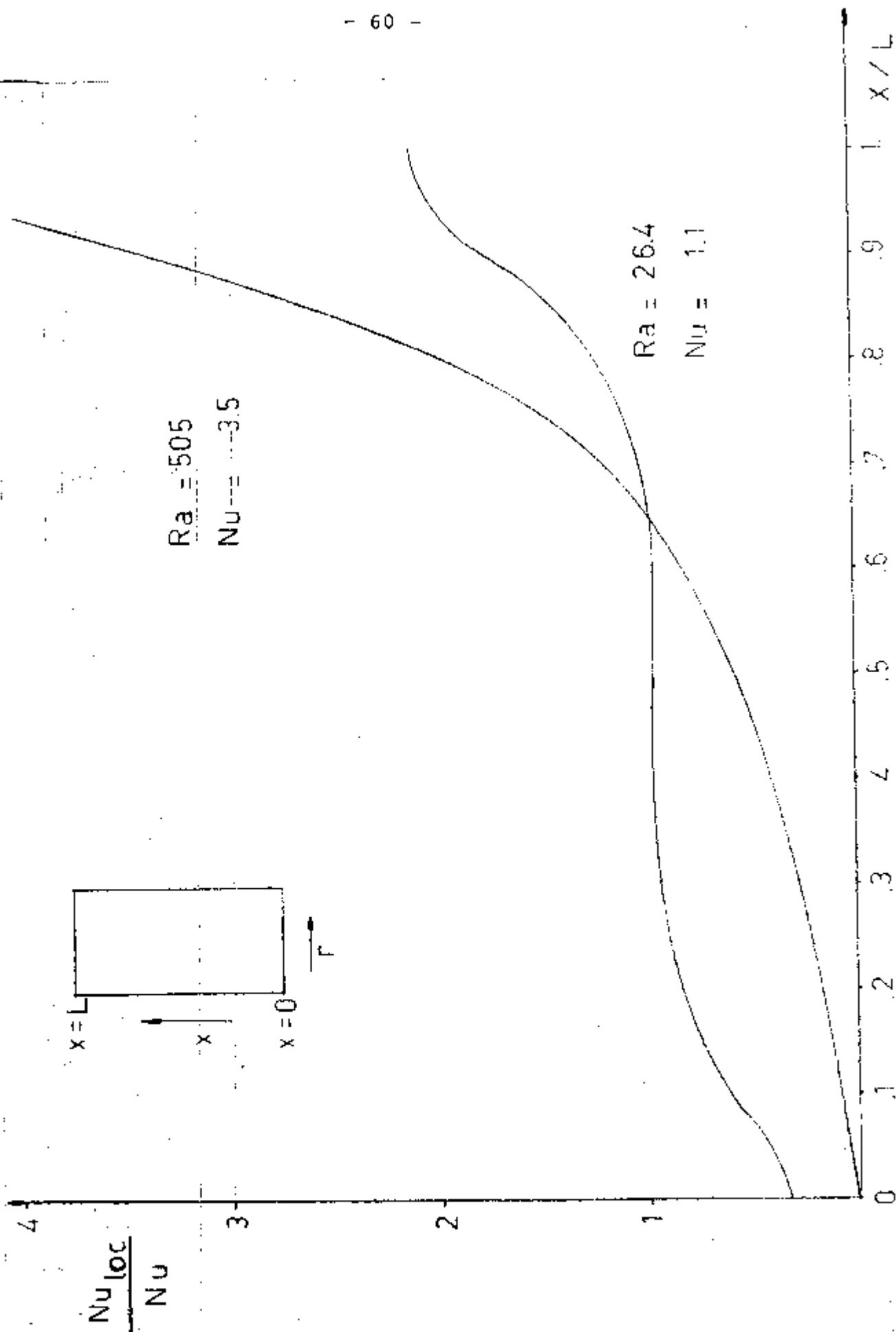


Figura 20 Variação do número de Nusselt local ao longo da parede fria, para cilindro na posição vertical.

parede fria, como no caso do cilindro horizontal, sendo este aumento, mais acentuado.

V. Conclusão

Foi obtido um modelo numérico, que permite o cálculo das distribuições de temperaturas e velocidades, para o estudo da convecção natural em isolamento térmico interno tipo fibras, considerando até duas paredes intermediárias, em dutos cilíndricos, conduzindo gás e alta pressão e temperatura, nas posições horizontal e vertical.

Com os resultados obtidos pelo modelo, foram determinadas as correlações, que permitem avaliar o desempenho de isolamentos térmicos internos tipo fibras, sem necessidade de utilizar o modelo numérico.

A correlação entre o número de Nusselt e o número de Rayleigh, permite uma avaliação imediata da eficiência do isolamento, enquanto que as distribuições de temperaturas e velocidades, bem como a variação do número de Nusselt local obtidas pelo modelo, permitem uma avaliação detalhada do mesmo.

A necessidade de fazer testes experimentais, que, além de terem custo elevado e fornecerem resultados com muita lentidão, não permitem analisar a variação de todos os parâmetros possíveis, é eliminada, utilizando o modelo numérico, ou as correlações obtidas por ele.

É necessário porém, para a utilização exata do modelo, ter conhecimento do valor da permeabilidade (K) e da condutividade térmica do material sólido do isolamento de interesse (λ_{fibra}). Estes valores, podem ser facilmente obtidos por experiências simples, conforme mencionado no anexo 1 deste trabalho.

A validade da formulação utilizada para o caso de geo-

metrias planas (paredes do vaso de pressão do reator HTGR), foi comprovada, comparando-se as isothermas e os diagramas de fluxo (função corrente) calculados, com os obtidos experimentalmente [13]. Para os casos estudados neste trabalho, convecção natural em isolamento térmico internos para cilindros nas posições horizontal e vertical, os resultados obtidos experimentalmente [8,11,12], são apenas do número de Nusselt para casos sem ocorrência de convecção natural, ficando comprovado a validade do modelo apenas nesta faixa.

Nomenclaturas

- A Fator geométrico
- $$A = \frac{L}{r_2 - r_1} \text{ para cilindro na posição vertical}$$
- $$A = \frac{\pi(r_1 + r_2)}{2(r_2 - r_1)} \text{ para cilindro na posição horizontal}$$
- a Peso para diminuir o número de interações (matriz Ψ)
- b Peso para diminuir o número de interações (matriz T)
- c Termo independente das equações de Nu versus Ra/A
- Cp Calor específico do fluido à pressão constante
- g Aceleração da gravidade
- i Posição radial (indicação)
- ii Número de divisões na direção radial
- j Posição angular para cilindro na posição horizontal e posição axial, para cilindro vertical
- jj Número de divisões na direção angular (cilindro horizontal) ou na direção axial (cilindro vertical)
- k Permeabilidade do meio poroso
- L Comprimento entre dois separadores transversais da seção de teste do cilindro vertical.
- n Coeficiente angular da curva de Nu versus Ra/A
- Nu Número de Nusselt, definido por:
- $$Nu = \lambda_{ef} / \lambda_{\text{fibras + gás}}$$
- P Pressão do gás
- Q Calor total transferido

q	Fluxo de calor
r	Raio, coordenada cilíndrica radial
r ₁	Raio interno do isolamento
r ₂	Raio externo do isolante
Ra	Número de Rayleigh, dado por: $Ra = \frac{g \Delta T \Delta r \beta K}{\nu \alpha}$
T	Temperatura
v	Velocidade
x	Coordenada axial
α	Difusividade térmica ($\alpha = \lambda/\rho C_p$)
β	Coefficiente térmico de expansão volumétrica, a pressão constante, dado por: $\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_{P_{cte}}$
θ	Coordenada cilíndrica angular
λ	Condutividade térmica do meio poroso
μ	Viscosidade dinâmica do fluido
ν	Viscosidade cinemática do fluido
ρ	Densidade do fluido
ρ_f	Densidade de compactação
ψ	Função corrente

Anexo I

Determinação experimental da permeabilidade K e da condutividade térmica λ_{fibra} do isolamento tipo fibras.

I. Permeabilidade

As medidas necessárias para a determinação da permeabilidade do isolamento tipo fibras, são feitas em um vaso de pressão, esquematizado na figura 21.

Para obter a permeabilidade K , o vaso de pressão é preenchido de material isolante (fibras), e compactado à uma densidade pré-determinada. Escoando gás (ar, hélio ou outro) através do isolamento em teste, à uma vazão conhecida, mede-se o gradiente de pressão entre os pontos 1 e 2 mostrados na figura 21. Conhecendo-se a viscosidade dinâmica do gás, a permeabilidade é calculada pela equação abaixo:

$$K = \frac{\mu v L}{\Delta P \rho_f g} \quad (67)$$

onde μ é a viscosidade dinâmica do gás, v a sua velocidade, ρ_f a densidade de compactação das fibras, L o comprimento entre os pontos 1 e 2 onde é medido a diferencial de pressão, ΔP o gradiente de pressão e g a aceleração da gravidade.

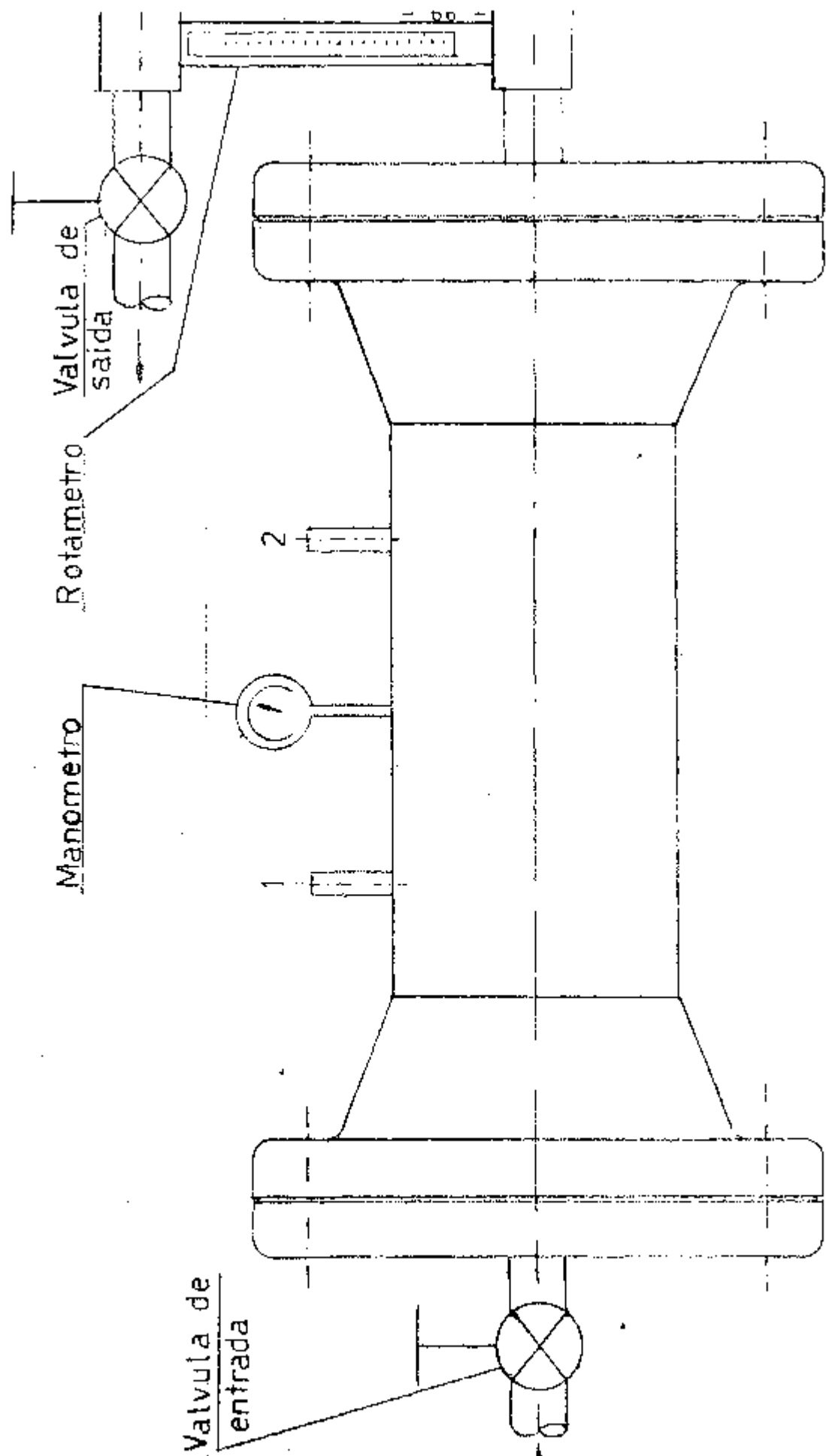


Figura 21

Vaso de pressão, utilizado para determinar a permeabilidade e a condutividade térmica das fibras.

Várias experiências são feitas, para cada material isolante, variando-se a densidade de compactação. São obtidas curvas de permeabilidade versus densidade de compactação.

Atô o presente momento, foram feitos testes para densidades baixas [15, 19] . Em teste preliminar porém, foi medida a permeabilidade para a densidade de compactação utilizada nos dutos de prova da KFA e do IPEN. O resultado obtido é mostrado na figura 22, num diagrama de permeabilidade versus pressão. Pode-se observar, que para baixas pressões a permeabilidade varia, estabilizando-se na pressão de 15 bar. Os testes foram feitos aumentando a pressão lentamente, até o limite de 20 bar, depois foram conferidos os valores, fazendo o mesmo teste, porém partindo da pressão mais alta e diminuindo-a, para certificar-se que a variação de permeabilidade com o aumento da pressão não é devido a um possível aumento de densidade de compactação com a pressão.

II. Condutividade Térmica

A condutividade térmica das fibras, é medida no mesmo vaso de pressão esquematizado na figura 19. Para tanto, é introduzido no centro do vaso de pressão, um aquecedor de potência variável porém conhecida, envolvido com material isolante (fibras). O sistema é mantido em vácuo, e são medidas as temperaturas no aquecedor (parece quente), e na carcaça do vaso de pressão (parede fria). Conhecendo a potência dissipada pelo aquecedor e a diferença de temperatura entre a parede quente e fria, a condutividade térmica das fibras, é calculada para cada densidade de compactação, pela seguinte equação:

$$\lambda_{\text{fibras}} = \frac{.86 \text{ W } \ln(d_2/d_1)}{2 \pi L \Delta T} \quad (68)$$

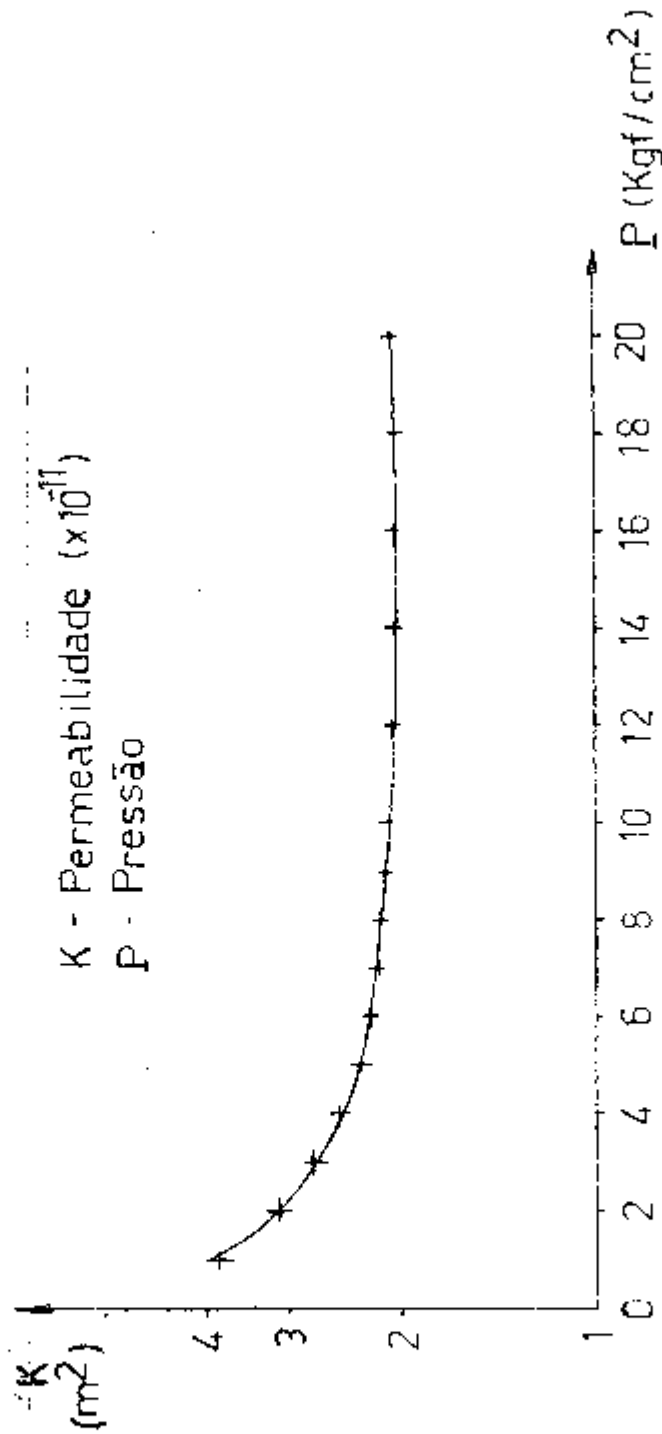


Figura 22

Diagrama da permeabilidade versus pressão, obtido nos testes preliminares no IPEN.

onde W é a potência dissipada pelo aquecedor, d_2 e d_1 os diâmetros, externo e interno da camada isolante, L o comprimento do aquecedor e ΔT a diferença de temperatura entre a parede quente e fria do isolamento.

III. Resultados

Realizando-se vários testes para determinado material isolante, variando-se a densidade de compactação das fibras, são obtidas curvas que relacionam a permeabilidade e a condutividade térmica versus a densidade de compactação [15, 19].

Anexo II

Programas de computador em Fortran-4

Estão listados neste anexo, os programas para cilindro na posição horizontal (ISFICH) e para cilindro na posição vertical (ISFICV).

As funções para o cálculo das propriedades dos gases utilizados neste modelo, estão também listados.

A subrotina utilizada para a resolução das matrizes, MASPI, está também neste anexo.


```

C
C
C.....          NUMERO DE DIVISOES          .....
C
C
C...  II          NUMERO DE DIVISOES NA DIRECAO RADIAL
C...  JJ          NUMERO DE DIVISOES NA DIRECAO ANGULAR
ISN 0009          DATA  II , JJ                /
                  20 , 20                      /

C
C
C.....          PROPRIEADES DO GAS E DO ISOLAENTO .....
C
C
C...  BK          PERMEABILIDADE DO ISOLAMENTO          (M**2)
C...  CP          CALOR ESPECIFICO DO GAS A PRESSAO CONSTANTE (J/KG*GC)
C...  AK          FUNCAO DA CONDUTIVIDADE TERMICA TOTAL    (GAS+ISOL)
C...  CKFIB       CONDUTIVIDADE TERMICA DA FIBRA          (W/(M*GK))
C...  CKGAS       FUNCAO DA CONDUTIVIDADE TERMICA DO GAS  (W/(M*GK))
C...  RGF         FUNCAO DA DENSIDADE DO GAS              (KG/M**3)
C...  AMY        FUNCAO DA VISCOSIDADE DINAMICA DO GAS   (N*S/M**2)
C...  CR         CONSTANTE DOS GASES
C...  Z          COMPRESSIBILIDADE DO GAS
C...  POR        POROSIDADE DA FIBRA
ISN 0010          DATA  BK , CR , Z , POR , CKFIB      /
                  1.E-08 , 1.626110 , 1.0 , .84 , 0.030  /

C
C
C.....          OUTROS DADOS          .....
C
C
C...  NTUBO       NUMERO DE CILINDROS INTERMEDIARIOS
C...  NMAX        NUMERO MAXIMO DE INTERACOES EM CADA ANALISE
C...  TOL         DADO PARA MASP1 (SUBROUTINE)
C...  FATPSI      FATOR TRAJERORIA PARA INTERPOLACAO
C...  FATEMP      FATOR TEMPERATURA PARA INTERPOLACAO
C...  JO         FATOR PARA IMPRESSAO DA MATRIZ
C...  NWRITE      FATOR PARA IMPRESSAO DE APENAS RESULTADOS FINAIS
C...  AWRITE      FATOR PARA IMPRESSAO DE TODOS RESULTADOS
C...  APROX       FATOR DE CONVERGENCIA
C...  G          ACELERAÇÃO DA GRAVIDADE          (M/SEG**2)
C...  PII        3.14159
C...  GKELV      FATOR PARA TRANSFORMACAO EM GRAUS KELVIN
C...  CONST      FATOR DE MULTIPLICACAO DAS MATRIZES
C...  INZMAX     NUMERO MAXIMO DE COLUNAS DA MATRIZ
C...  NZM        FATOR PARA SUBROUTINE MASP
ISN 0011          DATA  NTUBO , NMAX , TOL , FATPSI , FATEMP , JO    /
                  0 , 40 , 1.E-20 , 0. , .5 , 0. , 0. /
ISN 0012          DATA  NWRITE , AWRITE , APROX , G , PII , GKELV /
                  0. , 0. , .50 , 9.810 , 3.14159 , 273.16 /
ISN 0013          DATA  CONST , INZMAX , NZM          /

```



```
ISN 0041      AKH=AK(PD,TH)
ISN 0042      AKC=AK(PD,TC)
ISN 0043      AK1=(AKH+AKC)/2.
ISN 0044      DENOM=AM*1*AK1/(AR01*AR01*CP)
ISN 0045      TBARRA=(TH+TC)/2.
ISN 0046      RCMEQ=ROF(PD,TBARRA)
ISN 0047      BETA = 1./TBARRA
ISN 0048      DELTAT=(TH-TC)/NALAST
ISN 0049      UNUM=GRAV*DELTAT*ESPES*BK*BETA

C
C
C      NUMERO DE RAYLEIGH
ISN 0050      RAYLEY=DNUM/DENOM
C
C      RAYLEIGH SOBRE RELACAO GEOMETRICA
ISN 0051      RAZAO=P1/(R1+R2)/(2.*ESPES)
ISN 0052      CM=RAYLEY/RAZAO
C
C
ISN 0053      DO 8 IL= 1 , KK
C
C-----      INICIALIZACAO COM TEMPERATURAS ARBITRARIAS      -----
C
ISN 0054      TCONST(IL) = (THTY + TCOLO) / 2.      (GR)
C
C-----      INICIALIZACAO COM TRAJETORIA NULA      -----
C
ISN 0055      PSICAL(IL) = 0.      (METROS)
C
ISN 0056      8 CONTINUE
C
C-----      CALCULO DOS II RAIOS      -----
C
ISN 0057      DO 6 I=1,II
ISN 0058      6 R1(I)=R1+(I-1)*DR
C
C-----      CALCULO DOS JJ ANGULOS      -----
C
ISN 0059      TETA0=0
ISN 0060      DO 7 J=1,JJ
ISN 0061      7 TETA(J)=TETA0+(J-1)*OTETA
C
C
C-----      LIMITADOR DO NUMERO DE INTERACOES      -----
C
C
ISN 0062      N=0
ISN 0063      99 N=N+1
ISN 0064      IF(N-NMAX)98,98,97
ISN 0065      98 CONTINUE
C
C-----      CALCULO DAS FUNCOES      -----
C
ISN 0066      DO 30 K=1,KK
```

```
C
C.....
C
C
ISN 0067      RGG(K)      =      RDF(PO,TCCNST(K))
C
C
C.....
C
ISN 0068      AMYG(K)     =      AMY(PO,TCCNST(K))
C
C
C.....
C
ISN 0069      AKG(K)      =      AK(PO,TCCNST(K))
C
C
C.....
C
ISN 0070      ANYG(K)     =      AMYG(K) / RGG(K)
C
C
C
ISN 0071      30 CONTINUE
C
C
C.....
C
C.....
C
C.....
C
C.....
C
ISN 0072      30 65 IA=1, KK
ISN 0073      DO 66 IB=1, INZMAX
ISN 0074      A(I,IA,IB)=0.
ISN 0075      IC(IA,IB)=0.
ISN 0076      INZ(IA)=0.
ISN 0077      B(IA)=0.
ISN 0078      X(IA)=0.
ISN 0079      66 CONTINUE
ISN 0080      65 CONTINUE
C
C
ISN 0081      DO 35 IB=1, KK
ISN 0082      35 PSIAN(I,IB)=PSICAL(I,IB)
C
C
C.....
C
C.....
C
ISN 0083      COEFA=1./(OTETA*OTETA*BK)
ISN 0084      COEFD=1./(DR*DR*BK)
```

```
C
C   MATRIZ
C
ISN 0085      NA=1.
ISN 0086      L=0
ISN 0087      DO 1 J=1, JJ
ISN 0088      L=L+1
ISN 0089      A(L,1)=1.
ISN 0090      IC(L,1)=L
ISN 0091      B(L)=0
ISN 0092      1 INZ(L)=1
ISN 0093      DO 2 I=2, III

C
C   SUBSTITUICAO DE VARIAVEIS POR CONSTANTES
C
ISN 0094      SR2=R(II)+R(I-1)
ISN 0095      SR1=R(I)*R(I+1)

C
C   CONTINUACAO DA MATRIZ
C
ISN 0096      L=L+1
ISN 0097      A(L,1)=1.
ISN 0098      IC(L,1)=L
ISN 0099      B(L)=0
ISN 0100      INZ(L)=1

C
C ..... LOCALIZACAO DE PAREDES INTERMEDIARIAS .....
C
ISN 0101      IF(NALAST-NA)54,55,55
ISN 0102      55 NXY=1.+(NA*(III-1.)/NALAST)
ISN 0103      IF(1-NXY)54,51,54
ISN 0104      51 DO 56 J=2, JJJ
ISN 0105      L=L+1
ISN 0106      A(L,1)=1.
ISN 0107      IC(L,1)=L
ISN 0108      B(L)=0
ISN 0109      56 INZ(L)=1
ISN 0110      NA=NA+1
ISN 0111      GO TO 62
ISN 0112      54 DO 3 J=2, JJJ
ISN 0113      L=L+1

C
C   SUBSTITUICAO DE VARIAVEIS POR CONSTANTES
C
ISN 0114      COEFG1=G*COS(TETA(J))/(2.*DTETA)
ISN 0115      COEFG2=G*51N(TETA(J))/(2.*DR)

C
C   CONTINUACAO DA MATRIZ
C
ISN 0116      A(L,1)=COEFD*(R(I)*ANYG(L)+R(I-1)*ANYG(L-1))/2.
ISN 0117      IC(L,1)=L-11
ISN 0118      A(L,2)=COEFA/R(I)*(ANYG(L-1)+ANYG(L))/2.
ISN 0119      IC(L,2)=L-1
ISN 0120      A(L,3)=-COEFA/R(I)*(ANYG(L+1)+2.*ANYG(L)+ANYG(L-1))/2.-COEFD*(R(I+
1)*ANYG(L+1)+2.*R(I)*ANYG(L)+R(I-1)*ANYG(L-1))/2.
ISN 0121      IC(L,3)=L
```

```
ISN 0122      A(L,4)=CDEFA/R(I)*(ANYG(L+1)+ANYG(L))/2.  
ISN 0123      IC(L,4)=L+1  
ISN 0124      A(L,5)=CDEFD*(R(I+1)*ANYG(L+1)+R(I)*ANYG(L))/2.  
ISN 0125      IC(L,5)=L+1  
ISN 0126      B(L)=COEFG1*(ROG(L+1)-ROG(L-1))+COEFG2*(R(I)*(ROG(L+1)-ROG(L-1)))  
ISN 0127      3 INZ(L)=5  
ISN 0128      62 L=L+1  
ISN 0129      A(L,1)=1.  
ISN 0130      IC(L,1)=L  
ISN 0131      B(L)=0  
ISN 0132      2 INZ(L)=1  
ISN 0133      DO 4 J=1,JJ  
ISN 0134      L=L+1  
ISN 0135      A(L,1)=1.  
ISN 0136      IC(L,1)=L  
ISN 0137      B(L)=0  
ISN 0138      4 INZ(L)=1
```

C
C
C
C
C

MONTAGEM DA MATRIZ

```
ISN 0139      IF(N-JO)18,18,19  
ISN 0140      18 DO 787 I1=1,KK  
ISN 0141      WRITE(6,1006)IA(I1,I2),I2=1,5  
ISN 0142      WRITE(6,1007)IC(I1,I2),I2=1,5  
ISN 0143      WRITE(6,1008)IR(I1)  
ISN 0144      787 CONTINUE  
ISN 0145      19 CONTINUE
```

C
C
C
C

MULTIPLICACAO DOS VALORES DA MATRIZ POR UMA CONSTANTE

```
ISN 0146      DO 790 CC1=1,55  
ISN 0147      NZ = INZ(LL1)  
ISN 0148      DO 791 II=1,NZ  
ISN 0149      791 A(LL1,II) = CONST * A(LL1,II)  
ISN 0150      790 B(LL1) = CONST * B(LL1)
```

C
C
C

CHAMADA DA SUBROTINA PARA RESOLUCAO DA MATRIZ

```
ISN 0151      CALL MASPI(KK,TOL,NZM)
```

C

```
ISN 0152      DO 5 I=1,KK  
ISN 0153      5 PS(I)=X(I)  
ISN 0154      IF(A)WRITE(800,801,800  
ISN 0155      800 CONTINUE  
ISN 0156      WRITE(6,100)  
ISN 0157      WRITE(6,503) BK,PD,THOT,TCQLO,RZ,R1  
ISN 0158      WRITE(6,110)RAYLEY  
ISN 0159      WRITE(6,115)CM  
ISN 0160      WRITE(6,120)N  
ISN 0161      WRITE(6,135)  
ISN 0162      WRITE(6,130){PS(I),I=1,KK}  
ISN 0163      801 CONTINUE
```

C
C
C

DETERMINACAO DA TRAJETORIA CALCULADA

```
ISN 0164      DO 36 I4=1, KK
ISN 0165      36 PSICAL(I4)=PSI(I4)
C
C      INTERPOLAÇÃO DA TRAJETORIA
C
ISN 0166      DO 37 I5=1, KK
ISN 0167      37 PSII(I5)=FATPSI*PSIANT(I5)+(1-FATPSI)*PSICAL(I5)
C
C
C-----          MATRIZ DA TEMPERATURA (EQUAÇÃO DE ENERGIA)
C-----
C
C-----          ZERAGEM DA MATRIZ
C-----
C
ISN 0168      DO 47 IA1=1, KK
ISN 0169      DO 69 IO1=1, INZMAX
ISN 0170      A(IA1, IO1)=0
ISN 0171      IC(IA1, IO1)=0
ISN 0172      INZ(IA1)=0
ISN 0173      B(IA1)=0
ISN 0174      X(IA1)=0
ISN 0175      68 CONTINUE
ISN 0176      67 CONTINUE
C
C      CONVERÇÃO DA TEMPERATURA PARA TEMP. ANTERIOR
C
ISN 0177      DO 38 I6=1, KK
ISN 0178      38 TCOANT(I6)=TCONST(I6)
C
C      COEFICIENTES CONSTANTES DA MATRIZ TEMP
C
ISN 0179      COEFH=CP/(4.*OR*DTETA)
ISN 0180      COEF1=1./(OTETA*OTETA)
ISN 0181      COEFJ=1./(2.*OR*OR)
C
C      MATRIZ
C
ISN 0182      L=0
ISN 0183      DO 10 J=1, JJ
ISN 0184      L=L+1
ISN 0185      A(L, 1)=1.
ISN 0186      IC(L, 1)=L
ISN 0187      B(L)=THOT
ISN 0188      10 INZ(L)=1
ISN 0189      DO 11 I=2, III
ISN 0190      L=L+1
ISN 0191      GO TO 611
C
C
C      EQUACOES DAS EXTREMIDADES
C
ISN 0192      611 A(L, 1)=-[AKG(L-I)*R(I-1)+AKG(L)*R(I)]/(2.*OR*OR)-[ 2.*PSI(L+1)
ISN 0193      IC(L, 1)=L-I
          ]*COEFH
```

```
ISN 0194      A(L,2)=COEFJ*(R(I+1)*AKG(L+1))+2.*R(I)*AKG(L)+R(I-1)*AKG(L-1))+
              (AKG(L+1)+AKG(L))/(R(I))*OTETA*OTETA)
ISN 0195      IC(L,2)=L
ISN 0196      A(L,3)=-COEF1/(R(I))*(AKG(L+1)+AKG(L))
ISN 0197      IC(L,3)=L+1
ISN 0198      A(L,4)=-COEFJ*(AKG(L+1))*R(I+1)+AKG(L)*R(I))+ 2.*PSI(L+1)*COEFH
ISN 0199      IC(L,4)=L+1
ISN 0200      B(L)=0.
ISN 0201      INZ(L)=4
C
ISN 0202      DO 12 J=2, JJI
ISN 0203      L=L+1
C
C      SUBSTITUICAO DE VARIAVEIS POR CONSTANTES
C
ISN 0204      PSIR=PSI(L+1)-PSI(L-1)
ISN 0205      PSIJ*PSI(L+1)-PSI(L-1)
ISN 0206      SR1=R(I)+R(I+1)
ISN 0207      SR2=R(I)+R(I-1)
C
C      MATRIZ
C
ISN 0208      A(L,1)=-COEFH*PSIJ-COEFJ*(R(I-1)*AKG(L-1))+R(I)*AKG(L)
ISN 0209      IC(L,1)=L-1
ISN 0210      A(L,2)=COEFH*PSIR-COEF1/(2.*R(I))*(AKG(L)+AKG(L-1))
ISN 0211      IC(L,2)=L-1
ISN 0212      A(L,3)=COEFJ*(R(I+1)*AKG(L+1))+2.*R(I)*AKG(L)+R(I-1)*AKG(L-1))+
              COEF1/(2.*R(I))*(AKG(L+1)+2.*AKG(L)+AKG(L-1))
ISN 0213      IC(L,3)=L
ISN 0214      A(L,4)=-COEFH*PSI(R-COEF1/(2.*R(I)))*(AKG(L+1)+AKG(L))
ISN 0215      IC(L,4)=L+1
ISN 0216      A(L,5)=COEFH*PSIJ-COEFJ*(R(I+1)*AKG(L+1))+R(I)*AKG(L)
ISN 0217      IC(L,5)=L+1
ISN 0218      B(L)=0
ISN 0219      12 INZ(L)=5
ISN 0220      L=L+1
C
C      EQUACOES DAS EXTREMIDADES
C
ISN 0221      A(L,1)=-COEFJ*(R(I)*AKG(L)+R(I-1)*AKG(L-1))+  PSI(L-1)*2.*COEFH
ISN 0222      IC(L,1)=L-1
ISN 0223      A(L,2)=-COEF1*(AKG(L-1)+AKG(L))/R(I)
ISN 0224      IC(L,2)=L-1
ISN 0225      A(L,3)=COEFJ*(R(I+1)*AKG(L+1))+2.*R(I)*AKG(L)+R(I-1)*AKG(L-1))+
              COEF1/R(I)*(AKG(L-1)+AKG(L))
ISN 0226      IC(L,3)=L
ISN 0227      A(L,4)=-COEFJ*(R(I+1)*AKG(L+1)+R(I)*AKG(L))-  PSI(L-1)*2.*COEFH
ISN 0228      IC(L,4)=L+1
ISN 0229      B(L)=0.
ISN 0230      INZ(L)=4
ISN 0231      11 CONTINUE
C
ISN 0232      DO 13 J=1, JJI
ISN 0233      L=L+1
ISN 0234      A(L,1)=1
ISN 0235      IC(L,1)=L
ISN 0236      B(L)=TCOLD
```

```
ISN 0237      13 INZ(L1)=I
C
C.....
C                                MONTAGEM DA MATRIZ
C
ISN 0238      IF(IN-JC)70,70,71
ISN 0239      70 DO 788 IAB=1,KK
ISN 0240      WRITE(6,1006)((A(IAB,IAC),IAC=1,5)
ISN 0241      WRITE(6,1007)((C(IAB,IAC),IAC=1,5)
ISN 0242      WRITE(6,1006)((B(IAB))
ISN 0243      788 CONTINUE
ISN 0244      71 CONTINUE
C
C                                MULTIPLICACAO DOS VALORES DA MATRIZ POR UMA CONSTANTE
C
ISN 0245      DO 792 LL1=1,55
ISN 0246      NZ = INZ(LL1)
ISN 0247      DO 793 LL1=1,NZ
ISN 0248      793 A(LL1,LL1) = CONST * A(LL1,LL1)
ISN 0249      792 B(LL1) = CONST * B(LL1)
C
C                                CHAMADA DA SUBROUTINA PARA RESOLUCAO DA MATRIZ
C
ISN 0250      CALL MASPI(KK,TOL,NZM)
C
ISN 0251      IF(AWRITE)802,803,802
ISN 0252      802 CONTINUE
ISN 0253      WRITE(6,100)
ISN 0254      WRITE(6,503) BK,PO,THOT,TCOLO,R2,R1
ISN 0255      WRITE(6,110)RAYLEY
ISN 0256      WRITE(6,115)CM
ISN 0257      WRITE(6,120)N
ISN 0258      WRITE(6,125)
ISN 0259      WRITE(6,130)((X(I),I=1,KK)
ISN 0260      803 CONTINUE
ISN 0261      DO 9 I=1,KK
ISN 0262      IF(X(I)) 26,26,9
ISN 0263      9 CONTINUE
ISN 0264      GO TO 24
ISN 0265      26 WRITE(6,174)
ISN 0266      WRITE(6,172) PO,THOT,BK
ISN 0267      GO TO 820
ISN 0268      24 CONTINUE
ISN 0269      DO 14 K=1,KK
ISN 0270      DELTA=0ABS(X(K)+273.16-TCNST(X))
ISN 0271      IF(DELTA-APROX)77,77,96
C
C                                INTERPLACAO DA TEMPERATURA
C
ISN 0272      96 DO 15 I=1,KK
ISN 0273      TCOUPL(I)=FATEMP*TCOANT(I)+(1.-FATEMP)*(X(I)+273.16)
ISN 0274      15 TCOANT(I)=TCOUP(I)
ISN 0275      GO TO 99
ISN 0276      14 CONTINUE
ISN 0277      77 CONTINUE
ISN 0278      97 CONTINUE
C
C                                CALCULO DAS TEMPERATURAS ADIMENSIONAIS
C
```

```

-----
ISN 0279      DO 23 K2 = 1, KK
ISN 0280      TAD(K2) = (TCONST(K2) - TCOLD) / (THOT - TCOLD)
ISN 0281      23 CONTINUE
C
C
C.....
C                               VALORES A SEREM IMPRESSOS
C
ISN 0282      WRITE(6,100)
ISN 0283      WRITE(6,503) BK,PO,THOT,TCOLD,R2,R1
ISN 0284      WRITE(6,205) NTUBO
ISN 0285      WRITE(6,110) RAYLEY
ISN 0286      WRITE(6,115) CM
ISN 0287      WRITE(6,120) N
ISN 0288      WRITE(6,135)
ISN 0289      WRITE(6,130)(PS1(I), I=1, KK)
ISN 0290      WRITE(6,100)
ISN 0291      WRITE(6,503) BK,PO,THOT,TCOLD,R2,R1
ISN 0292      WRITE(6,205) NTUBO
ISN 0293      WRITE(6,110) RAYLEY
ISN 0294      WRITE(6,115) CM
ISN 0295      WRITE(6,120) N
ISN 0296      WRITE(6,125)
ISN 0297      WRITE(6,130)(X(I), I=1, KK)
ISN 0298      WRITE(6,204)
ISN 0299      WRITE(6,130)(TAD(I), I=1, KK)
C
C
ISN 0300      DO 16 I=1, KK
ISN 0301      TCODUP(I) = X(I) + 273.16
ISN 0302      TCONST(I) = TCODUP(I)
ISN 0303      TFI = TCONST(I)
ISN 0304      ROD(I) = ROD(PO, TFI)
ISN 0305      16 CONTINUE
ISN 0306      WRITE(6,100)
ISN 0307      WRITE(6,110) RAYLEY
ISN 0308      WRITE(6,115) CM
ISN 0309      WRITE(6,120) N
ISN 0310      WRITE(6,126)
ISN 0311      WRITE(6,130)(ROD(I), I=1, KK)
C
C
ISN 0312      DO 210 I = 1, KK
ISN 0313      AMYY(I) = AMY(PO, TCONST(I))
C
ISN 0314      AKK(I) = AK(PO, TCONST(I))
C
ISN 0315      210 CKGASS(I) = CKGAS(PO, TCONST(I))
ISN 0316      WRITE(6,200)
ISN 0317      WRITE(6,130)(AMYY(K), K=1, KK)
ISN 0318      WRITE(6,201)
ISN 0319      WRITE(6,130)(AKK(K), K=1, KK)
ISN 0320      WRITE(6,202)
ISN 0321      WRITE(6,130)(CKGASS(K), K=1, KK)
C
C.....
C                               CALCULO DAS VELOCIDADES NA DIRECAO RADIAL (VR)
C
C
```

```
ISN 0322      L1=0
ISN 0323      L=0
ISN 0324      DO 20 K1=1,I1
ISN 0325      DO 21 K=1,JJ1
ISN 0326      L=L+1
ISN 0327      L1=L1+1

C
C
C      SUBSTITUICAO DE VARIAVEIS POR CONSTANTES
C
ISN 0328      AB=ROO(L1)+ROO(L+1)
ISN 0329      CD=A(K1)*AB*DTETA/2.
ISN 0330      EF=PSI(L+1)-PSI(L)
ISN 0331      21 VR(L1)=EF/CD
ISN 0332      L=L+1
ISN 0333      20 CONTINUE
ISN 0334      IF(NWRITE)806,807,806
ISN 0335      806 CONTINUE
ISN 0336      WRITE(6,100)
ISN 0337      WRITE(6,110)RAYLEY
ISN 0338      WRITE(6,115)CM
ISN 0339      WRITE(6,120)N
ISN 0340      WRITE(6,140)
ISN 0341      WRITE(6,130)(VR(M),M=1,LL)
ISN 0342      807 CONTINUE

C
C-----      CALCULO DAS VELOCIDADES NA DIRECAO ANGULAR (VTETA)
C
C
C
ISN 0343      L=0
ISN 0344      DO 22 K2=1,LL1
ISN 0345      L=L+1

C
C
C      SUBSTITUICAO DE VARIAVEIS POR CONSTANTES
C
ISN 0346      ABC=(ROO(L)+ROO(L+1))*DR/2.
ISN 0347      DEF=-PSI(L)+PSI(L+1)

C
ISN 0348      22 VTETA(L 1)=-DEF/ABC
ISN 0349      IF(NWRITE)808,809,808
ISN 0350      808 CONTINUE
ISN 0351      WRITE(6,100)
ISN 0352      WRITE(6,110)RAYLEY
ISN 0353      WRITE(6,115)CM
ISN 0354      WRITE(6,120)N
ISN 0355      WRITE(6,145)
ISN 0356      WRITE(6,130)(VTETA(M),M=1,LL)
ISN 0357      809 CONTINUE

C
C-----      CALCULO DO FLUXO DE CALOR NA DIRECAO RADIAL
C
C
C
C
C
C      FORWARD (PARA O DUTO INTERNO)
C
ISN 0358      M1=0
ISN 0359      M1=M1+1
```

```
ISN 0360      FAA=TCNST(M1)
ISN 0361      FCA=TCNST(M1+1)
ISN 0362      QR(M1)=-DTETA*R1*AK(PO,FAA)*(FCA-FAA)/(DR*2.)
ISN 0363      DO 400 J=2, JJ1
ISN 0364      M1=M1+1
ISN 0365      FA=TCNST(M1)
ISN 0366      FC=TCNST(M1+1)
ISN 0367      QR(M1)=-DTETA*R1*AK(PO,FA)*(FC-FA)/DR
ISN 0368      400 CONTINUE
ISN 0369      M1=M1+1
ISN 0370      FAA=TCNST(M1)
ISN 0371      FCA=TCNST(M1+1)
ISN 0372      QR(M1)=-DTETA*R1*AK(PO,FAA)*(FCA-FAA)/(DR*2.)

C
C
C      CENTRAL (PARA OS PONTOS ENTRE OS DUTOS)
C
ISN 0373      DO 410 I=2, I11
ISN 0374      M1=M1+1
ISN 0375      FA1=TCNST(M1)
ISN 0376      FC1=TCNST(M1+1)
ISN 0377      FD1=TCNST(M1-1)
ISN 0378      CR(M1)=CP*FA1*PSI(M1+1)/2.-R(I)*AK(PO,FA1)*DTETA*(FC1-FD1)/(4.*DR)
ISN 0379      DO 420 J=2, JJ1
ISN 0380      M1=M1+1
ISN 0381      FA2=TCNST(M1)
ISN 0382      FC2=TCNST(M1+1)
ISN 0383      FD2=TCNST(M1-1)
ISN 0384      DERTEM=(FC2-FD2)/(2.*DR)
ISN 0385      DERPSI=(PSI(M1+1)-PSI(M1-1))/2.
ISN 0386      QR(M1)=DERPSI*CP*FA2-R(I)*DTETA*AK(PO,FA2)*DERTEM
ISN 0387      420 CONTINUE
ISN 0388      M1=M1+1
ISN 0389      FA3=TCNST(M1)
ISN 0390      DERTEP=(TCNST(M1+1)-TCNST(M1-1))/(2.*DR)
ISN 0391      QR(M1)=-CP*FA3*PSI(M1-1)/2.-R(I)*AK(PO,FA3)*DTETA/2.*DERTEP
ISN 0392      410 CONTINUE

C
C      BACKWARD (PARA O DUTO EXTERNO)
C
ISN 0393      M1=M1+1
ISN 0394      FA4=TCNST(M1)
ISN 0395      DERTER=(TCNST(M1)-TCNST(M1-1))/DR
ISN 0396      QR(M1)=-R2*DTETA*AK(PO,FA4)*DERTER/2.
ISN 0397      DO 430 J=2, JJ1
ISN 0398      M1=M1+1
ISN 0399      FA4=TCNST(M1)
ISN 0400      DERTER=(TCNST(M1)-TCNST(M1-1))/DR
ISN 0401      QR(M1)=-R2*DTETA*AK(PO,FA4)*DERTER
ISN 0402      430 CONTINUE
ISN 0403      M1=M1+1
ISN 0404      FA4=TCNST(M1)
ISN 0405      DERTER=(TCNST(M1)-TCNST(M1-1))/DR
ISN 0406      QR(M1)=-R2*DTETA*AK(PO,FA4)*DERTER/2.
ISN 0407      WRITE(6,100)
ISN 0408      WRITE(6,503) BX,PO,THOT,TCOLO,R2,M1
ISN 0409      WRITE(6,110)RAYLEY
ISN 0410      WRITE(6,115)CM
```

```
ISN 0411      WRITE(6,120)N
ISN 0412      WRITE(6,160)
ISN 0413      WRITE(6,130)(QR(I),I=1,KK)
C
C      SOMATORIA DO FLUXO
C
ISN 0414      M=0
ISN 0415      DO 45 I=1,II
ISN 0416      M=M+1
ISN 0417      SOMA(M)=QR(M)
ISN 0418      DO 46 K=2,JJ
ISN 0419      M=M+1
ISN 0420      SOMA(M)=SOMA(M-1)+QR(M)
ISN 0421      46 CONTINUE
ISN 0422      45 CONTINUE
ISN 0423      WRITE(6,165)
ISN 0424      WRITE(6,166)
ISN 0425      WRITE(6,130)(SOMA(M),M=II,KK,II)
C
C.....          CALCULO DO NUMERO DE NUSSELT          .....
C
ISN 0426      SUMEZ(1) = QR(1)
ISN 0427      DO 50 I = 2,II
ISN 0428      50 SUMEZ(I) = SUMEZ(I-1) * QR(I)
ISN 0429      AQ = SUMEZ(1)
ISN 0430      AKEFF=(AQ*ALOG(R2/R1))/(ITH+TC)*PII)
ISN 0431      IMED=(TH+TC)/2.
C
ISN 0432      ANU=AKEFF/(AK(PC,IMED))
C
ISN 0433      WRITE(6,169)AKEFF
ISN 0434      WRITE(6,168) ANU,RAYLEY
C
C      CALCULO DO NUMERO DE NUSSELT LOCAL NA PAREDE FRIA
C
ISN 0435      WRITE(6,190)
ISN 0436      WRITE(6,505)
ISN 0437      WRITE(6,507)
ISN 0438      J1 = 0
ISN 0439      DO 25 M=II,KK,II
ISN 0440      J1 = J1+1
ISN 0441      ANULOC = SOMA(M)/(AQ/AREA1)
ISN 0442      ANG = TETA(J1)
ISN 0443      WRITE(6,506) ANULOC,ANG
ISN 0444      25 CONTINUE
C
ISN 0445      820 CONTINUE
ISN 0446      GO TO 502
ISN 0447      501 CONTINUE
C
C
C          FORMATOS DE IMPRESSAO
C          -----
C
ISN 0448      100 FORMAT('1',46X,'CALCULO DO FLUXO DE CALOR NUM DUTO HORIZONTAL')
ISN 0449      101 FORMAT('//,65X,'RATOS',//')
ISN 0450      102 FORMAT('/,56X,'COEFICIENTE BETA=',E10.3)
```

```
ISN 0451      110 FORMAT(/,55X,'RAYLEIGH NUMBER=',E10.3)
ISN 0452      115 FORMAT(/,62X,'CM=',E9.3)
ISN 0453      120 FORMAT(/,65X,'N=',I3)
ISN 0454      125 FORMAT(/,52X,'TEMPERATURAS NA FIBRA',//)
ISN 0455      126 FORMAT(/,56X,'DENSIDADES',//)
ISN 0456      130 FORMAT(13X,10E12.3)
ISN 0457      135 FORMAT(/,54X,'TRAJETORIA NA FIBRA',//)
ISN 0458      140 FORMAT(/,50X,'VELOCIDADE NA DIRECAO RADIAL',//)
ISN 0459      145 FORMAT(/,50X,'VELOCIDADE NA DIRECAO ANGULAR',//)
ISN 0460      160 FORMAT(/,50X,'FLUXO DE CALOR NA DIRECAO RADIAL',//)
ISN 0461      165 FORMAT('1',57X,'SOMATORIA DO FLUXO DE CALOR')
ISN 0462      166 FORMAT(/,57X,'***** ** ***)
ISN 0463      168 FORMAT(/,20X,'NUSSELD NUMBER =',F10.3,10X,'RAYLEIGH NUMBER =',
      F10.3,//)
ISN 0464      169 FORMAT(/,46X,'CONUTIVIDADE TERMICA EFETIVA=',F10.3)
ISN 0465      172 FORMAT(////,20X,'***** PROBLEMAS PARA AS CONDICÕES DE',//,20X
      ,'PRESSAO =',F7.3,4X,'BAR',//,20X,'TEMPERATURA DO GAS =',F7.2,
      4X,'G.C.',//,20X,'PERMEABILIDADE =',E10.2,//)
ISN 0466      174 FORMAT('1','INTERROMPIDO DEVIDO A NAO CONVERGENCIA')
ISN 0467      200 FORMAT('1',46X,'VISCOSIDADE DINAMICA DO AR',//)
ISN 0468      201 FORMAT('1',46X,'CONDUTIVIDADE TERMICA',//)
ISN 0469      202 FORMAT('1',46X,'CONDUTIVIDADE TERMICA DO AR',//)
ISN 0470      204 FORMAT(/,50X,'TEMPERATURAS ADIMENSIONAIS',//)
ISN 0471      205 FORMAT(/,50X,12,6X,'CILINDROS INTERMEDIARIOS',//)
ISN 0472      500 FORMAT(3F7.3)
ISN 0473      503 FORMAT(/,40X,'PERMEABILIDADE=',E9.3,3X,'METROS QUADRADOS',//,40X,
      'PRESSAO DO HELIO=',F7.3,3X,'BAR',//,40X,'TEMPERATURAS NA ISOLA',
      'CAG PARTE INTERNA=',F7.3,3X,'PARTE EXTERNA=',F7.3,//,40X,'RAIO',
      ' DO ISOLAMENTO ESPESSURA INTERNO=',F7.3,5X,'EXTERNO=',F7.3)
ISN 0474      505 FORMAT('1',50X,'VARIACAO LOCAL DO NUMERO DE NUSSOLT SOBRE A PARED
      E FRIA ',//)
ISN 0475      506 FORMAT(/,38X,E9.2,46X,F6.2)
ISN 0476      507 FORMAT(/,30X,' NUMERO DE NUSSOLT ',30X,' ANGULO ',//)
ISN 0477      1006 FORMAT(115X,E12.5,'B')
ISN 0478      1007 FORMAT(20X,5(11C,5X),1X,'IC')
ISN 0479      1008 FORMAT(/,20X,5(E12.5,5X),'A')
ISN 0480      STOP
ISN 0481      END
```

LEVEL 21.7 (JAN 73)

05/360 FORTRAN M

COMPILER OPTIONS - NAME= MAIN,OPT=D2,LINECNT=60,SIZE=0000K,
SOURCE,EBCDIC,NCLIST,NOUECK,LOAD,MAP,NOEDIT,ID,XREF

C
C.....
C.....
C..... CILINDRO VERTICAL
C.....
C.....
C.....

ISN 0002 INTEGER*2 IC,INZ,IX
ISN 0003 COMMON A(400,5),B(400),X(400),IC(400,5),INZ(400)
ISN 0004 DOUBLE PRECISION A,B,X,DELTA,TCDDUP ,TAD1
ISN 0005 EQUIVALENCE (GRAV,G)

C
C
C..... AREAS DE MEMORIA
C
C

ISN 0006 DIMENSION TCONST(400) , VCOMP(400) , PSII(400) , ORI(400) ,
PSICAL(400) , QCCNO(400) , RDG(400) , T (400) ,
PSIANT(400) , SUMQ (400) , AKG(400) , R (25) ,
TCOANT(400) , VR40 (400) , ANI(400) ,
TCDDUP(400) , SUMP (400) , ROOI(400) ,
QCONVC(400) , TAD1 (400)

C
C
C
C
C
C
C..... ENTRADAS
C.....
C..... LEITURA DE PRESSAO PQ IBAR;
C..... TEMPERATURA DO GAS THOT (GC)
C..... TEMPERATURA FRIA TCOLD (GC)

ISN 0007 502 REAO(5,499,END=501) PQ,THOT,TCOLD

C
C
C
C..... DADOS GERAIS
C.....
C.....

C
C
C..... DIMENSÕES DO DUTO
C.....
C.....
C..... DOUT DIAMETRO EXTERNO DO DUTO (METROS)
C..... DIN DIAMETRO INTERNO DO DUTO (METROS)
C..... COMPR COMPRIMENTO DA SEÇÃO EM ESTUDO (METROS)

ISN 0008 DATA DIN , DOUT , COMPR /
.63 , .927 , 0.8 /

C
C
C..... NUMERO DE DIVISÕES
C

```

C
C... II          DIVISÕES NA DIRECÃO RADIAL
C... JJ          DIVISÕES NA DIRECÃO AXIAL
C
ISN 0009      DATA  II , JJ
                20. , 20

```

```

C
C
C
C
C-----
C          PROPRIEDADES DO GAS E DO ISOLAMENTO
C
C
C

```

```

C... CKGAS      FUNCAO DA CONDUTIVIDADE TERMICA DO GAS      (W/(M*GK)
C... CKFIB      CONDUTIVIDADE TERMICA DA FIBRA              (W/(M*GK)
C... CP         CALOR ESPECIFICO DO GAS A PRESSAO CONSTANTE (J/KG*GC)
C... ROF        DENSIDADE DO GAS (FUNCAO)                  (KG/M**3)
C... AMY        VISCOSIDADE DINAMICA DO GAS (FUNCAO)       (N*S/(M**2))
C... ANI        VISCOSIDADE CINEMATICA DO GAS (FUNCAO)     (AMY/ROF)
C... Z          COMPRESSIVIDADE DO GAS
C... CR         CONSTANTE DO GAS
C... BK         PERMEABILIDADE DO ISOLAMENTO                (M**2)
C... POR        POROSIDADE DO ISOLAMENTO

```

```

ISN 0010      DATA  CP , Z , CR , BK , CKFIB , POR
                6093. , 1. , 1.62611 , 1.E-09 , 0.030 , .80

```

```

C
C
C-----
C          OUTROS DADOS
C

```

```

C... NTUBO      NUMERO DE CILINDROS INTERMEDIARIOS
C... FATPSI     FATOR CORRENTE PARA INTERPOLACAO
C... FATEMP     FATOR TEMPERATURA PARA INTERPOLACAO
C... AWRITE     RESTRICAO DE IMPRESSAO
C... BWRITE     RESTRICAO DE IMPRESSAO
C... APROX      FATOR DE CONVERGENCIA
C... GKELV      FATOR DE TRANSFORMACAO PARA GRAUS KELVIN    (273.16)
C... NMAX       NUMEROMAXIMO DE INTERACOES
C... GRAV       ACELERAÇÃO DA GRAVIDADE                      (M/SEG**2)
C... INZMAX     NUMERO MAXIMO DE COLUNAS DA MATRIZ
C... CONST      CONSTANTE DE MULTIPLICACAO DAS MATRIZES
C... PII        3.14159
C... TOL        DADO PARA SUBROUTINE MASPI
C... IS         DADO PARA SUBROUTINE MASPI

```

```

ISN 0011      DATA  NTUBO , FATPSI , FATEMP , AWRITE , BWRITE
                1 , .0 , .5 , .0 , .0

```

```

ISN 0012      DATA  APROX , GKELV , NMAX , GRAV , INZMAX , CONST
                1. , 273.16 , 50 , 9.81 , 5. , 1.E+30

```

```

ISN 0013      DATA  PII , TOL , IS
                3.14159 , 1.E-20 , 2.

```

```

C
C
C
C

```

SAIDAS

C				
C	AKEFF		CONDUTIVIDADE TERMICA EFETIVA DO ISOLAMENTO	W/(M*GK)
C	ANU		NUMERO DE NUSSELT GLOBAL	
C	ANULOC		NUMERO DE NUSSELT LOCAL AO LONGO DA PAREDE FRIA	
C	CM		CORRELAÇÃO DO NUMERO DE RAYLEIGH COM A RELACAO GEOMETRICA	
C	N		NUMERO DE INTERACOES PARA A CONVERGENCIA	
C	PSI		FUNCAO CORRENTE	(M)
C	QR		CALOR TRANFERIDO NO ISOLAMENTO	(W)
C	RAYLEY		NUMERO DE RAYLEIGH	
C	SOMA		CALOR POR POSICAO RADIAL	(W)
C	TAGJ		TEMPERATURAS ADIMENSIONAIS	

----- CALCULOS PRELIMINARES -----

ISN 0014	KK	=	II*JJ
ISN 0015	III	=	II-1
ISN 0016	JJ1	=	JJ-1
ISN 0017	KK1	=	KK-1
ISN 0018	R1	=	DIIN/2.
ISN 0019	R2	=	DOOT/2.
ISN 0020	DX	=	COMPR/JJ1
ISN 0021	DR	=	(R2-R1)/III
ISN 0022	ALR	=	(R2-R1)
ISN 0023	TH	=	THOT + GKELV
ISN 0024	TC	=	TCOLD + GKELV
ISN 0025	NALAST	=	NTUBO + 1

----- CALCULO DO NUMERO DE RAYLEIGH -----

ISN 0026	FUNCOES NECESSARIAS		
ISN 0027	ESPES	=	ALR/NALAST
ISN 0028	AROH	=	ROF(PO,TH)
ISN 0029	AROC	=	POF(PO,TC)
ISN 0030	ARQ1	=	(AROH+AROC)/2.
ISN 0031	AMYH	=	VISC(PO,TH)
ISN 0032	AMYC	=	VISC(PO,TC)
ISN 0033	AMY1	=	(AMYH+AMYC)/2.
ISN 0034	AKH	=	AK(PO,TH)
ISN 0035	AKC	=	AK(PO,TC)
ISN 0036	AK1	=	(AKH+AKC)/2.
ISN 0037	DENOM	=	AMY1*AK1/(ARQ1+ARQ1*CP)
ISN 0038	TBARRA	=	(TH+TC)/2.
ISN 0039	RCMEC	=	ROF(PO,TBARRA)
ISN 0040	BETA	=	1./TBARRA
ISN 0041	DELTA	=	(TH-TC)/NALAST
ISN 0042	DENUM	=	GRAV*DELTA*ESPES*BK*BETA

NUMERO DE RAYLEIGH

ISN 0042 RA=DENUM/DENOM

```
C
C
C      RAYLEIGH SOBRE RELAÇÃO GEOMÉTRICA
C
ISN 0043      CM=COMPR/ESPES
ISN 0044      RAG=RA/CM
C
C
ISN 0045      DO 100 M=1, KK
C
C-----
C              INICIALIZAÇÃO COM TEMPERATURAS ARBITRARIAS
C-----
ISN 0046      TCONST(M) = ( THOT + TCOLD ) / 2. + GKELV
C
C-----
C              INICIALIZAÇÃO COM TRAJETORIA NULA
C-----
ISN 0047      PSICAL(M) = 0. (METROS)
ISN 0048      PSEANT(M) = PSICAL(M) (METROS)
C
C
C
ISN 0049      100 CONTINUE
C
C
C-----
C              CALCULO DOS II RAIOS
C-----
ISN 0050      DO 6 IKL=1, II
ISN 0051      6 R(IKL)=R1+(IKL-1)*OR
C
C
C-----
C              LIMITADDA DO NUMERO DE INTERACOES
C-----
ISN 0052      N=0
ISN 0053      90 N=N+1
ISN 0054      IF(N-NMAX)80,80,81
ISN 0055      80 CONTINUE
C
C
C-----
C              CALCULO DAS FUNÇÕES NECESSARIAS
C-----
C
ISN 0056      DO 50 I=1, KK
C
ISN 0057      T(I) = TCONST(I)
C
C
C-----
C              FUNÇÃO DENSIDADE DO GAS
C-----
ISN 0058      ROG(I) = ROF(PO, T(I))
C
```



```

1SN 0093      38 INZ(L) = 1
1SN 0094      NA = NA+1
1SN 0095      GO TO 39
1SN 0096      35 DO 12 J=2,JJ1
1SN 0097      L=L+1
1SN 0098      A(L,1)=(ANI(L)/R(I)+ANI(L-JJ)/R(I-1))/(2.*BK*DR*DR)
1SN 0099      IC(L,1)=L-JJ
1SN 0100      A(L,2)=(ANI(L)+ANI(L-1))/(2.*BK*R(I)*DX*DX)
1SN 0101      IC(L,2)=L-1
1SN 0102      A(L,3)=-((ANI(L+1)+2.*ANI(L)+ANI(L-1))/(2.*BK*R(I)*DX*DX) +ANI(L+
                JJ)/R(I+1)+2.*ANI(L)/R(I)+ANI(L-JJ)/R(I-1))/(2.*BK*DR*DR)
1SN 0103      IC(L,3)=L
1SN 0104      A(L,4)=(ANI(L+1)+ANI(L))/(2.*BK*R(I)*DX*DX)
1SN 0105      IC(L,4)=L+1
1SN 0106      A(L,5)=(ANI(L+JJ)/R(I+1)+ANI(L)/R(I))/(2.*BK*DR*DR)
1SN 0107      IC(L,5)=L+JJ
1SN 0108      B(L)=GRAV/(2.*DR)*(ROG(L+JJ)-ROG(L-JJ))
1SN 0109      12 INZ(L)*5
1SN 0110      39 L = L+1
1SN 0111      A(L,1)=1.
1SN 0112      IC(L,1)=L
1SN 0113      B(L)=0.
1SN 0114      11 INZ(L)=1
1SN 0115      DO 13 J=1,JJ
1SN 0116      L=L+1
1SN 0117      A(L,1)=1.
1SN 0118      IC(L,1)=L
1SN 0119      B(L)=0.
1SN 0120      13 INZ(L)=1
C
C      MULTIPLICACAO DOS VALORES DA MATRIZ POR UM FATOR (CONST)
C
1SN 0121      DO 46 LL1 = 1, KK
1SN 0122      NZ = INZ(LL1)
1SN 0123      DO 47 IL1=1,NZ
1SN 0124      47 A(LL1, IL1) = CONST*A(LL1, IL1)
1SN 0125      46 B(LL1) = CONST * B(LL1)
C
C      CHAMADA DA SUBROTINE PARA RESOLUCAO DA MATRIZ
C
1SN 0126      CALL MASPI(KK, TCL, NZM)
C
1SN 0127      DO 14 LI=1, KK
1SN 0128      14 PSI(LI)=X(LI)
1SN 0129      IF(AWR(IE) BC2, BC3, B02
1SN 0130      B02 CONTINUE
1SN 0131      WRITE(6, 200)
1SN 0132      WRITE(6, 215) PD, THOT, ICOLD
1SN 0133      WRITE(6, 201) RA
1SN 0134      WRITE(6, 202) IRAG
1SN 0135      WRITE(6, 203) N
1SN 0136      WRITE(6, 204)
1SN 0137      KK2 = KK
1SN 0138      INVER = JJ
1SN 0139      DO 15 KAL=1, JJ
1SN 0140      WRITE(6, 220) !PSI(LI), LI=INVER, KK2, JJ)
1SN 0141      KK2 = KK2 - 1.
1SN 0142      15 INVER = INVER - 1

```

```

-----
ISN 0143      803 CONTINUE
C
C      CALCULO PARA INTERPOLACAO DA TRAJETORIA
C
ISN 0144      DO 30 I1=1, KK
ISN 0145      30 PSICAL(I1)=PSI(I1)
ISN 0146      DO 31 I2=1, KK
ISN 0147      31 PSI(I2)=FATPSI*PSIANT(I2)+I1-FATPSI)*PSICAL(I2)
C
C
C
C-----
C      MATRIZ DA TEMPERATURA (EQUACAO DE ENERGIA)
C-----
C
C
C-----
C      ZERAGEM DA MATRIZ
C-----
C
ISN 0148      DO 55 IA=1, KK
ISN 0149      DO 56 IB=1, INZMAX
ISN 0150      A(IA, IB)=0.
ISN 0151      IC(IA, IB)=0
ISN 0152      INZ(A)=0
ISN 0153      B(IA)=0.
ISN 0154      X(IA)=0.
ISN 0155      56 CONTINUE
ISN 0156      55 CONTINUE
ISN 0157      L=0
ISN 0158      DO 20 J=1, JJ
ISN 0159      L=L+1
ISN 0160      A(L, 1)=1.
ISN 0161      IC(L, 1)=L
ISN 0162      B(L)=T*DT
ISN 0163      20 INZ(L)=1
ISN 0164      DO 21 I=2, I11
ISN 0165      L=L+1
ISN 0166      A(L, I)=- (PSI(L+1)*CP/(2.*DX*DR)+I*(I)*AKG(L)+R(I-1)*AKG(L-JJ))/
          (2.*DR*DR)
ISN 0167      IC(L, I)=L-JJ
ISN 0168      A(L, 2)=I*(I+1)*AKG(L+JJ)+2.*R(I)*AKG(L)+R(I-1)*AKG(L-JJ)/(2.*DR*
          DR)+R(I)*(AKG(L+1)+AKG(L))/(DX*DX)
ISN 0169      IC(L, 2)=L
ISN 0170      A(L, 3)=-R(I)*(AKG(L)+AKG(L+1))/(DX*DX)
ISN 0171      IC(L, 3)=L+1
ISN 0172      A(L, 4)=PSI(L+1)*CP/(2.*DX*DR)-(R(I+1)*AKG(L+JJ)+R(I)*AKG(L))/(2.*
          DR*DR)
ISN 0173      IC(L, 4)=L+JJ
ISN 0174      B(L)=0.
ISN 0175      INZ(L)=4
ISN 0176      DO 22 J=2, JJ1
ISN 0177      L=L+1
ISN 0178      A(L, 1)=- ((PSI(L+1)-PSI(L-1))*CP/(4.*DX*DR)+I*(I)*AKG(L)+R(I-1)*
          AKG(L-JJ))/(2.*DR*DR)
ISN 0179      IC(L, 1)=L-JJ
ISN 0180      A(L, 2)=(PSI(L+JJ)-PSI(L-JJ))*CP/(4.*DX*DR)-I*(I)*(
          AKG(L)+AKG(L-1))/(2.*DX*DX)
ISN 0181      IC(L, 2)=L-1

```

```
ISN 0182      A(L,3)=(R(I)+1)*AKG(L+JJ)+2.*R(I)*AKG(L)+R(I-1)*AKG(L-JJ))/(2.*
              DR*DR)+R(I)*(AKG(L+1)+2.*AKG(L)+AKG(L-1))/(2.*DX*DX)
ISN 0183      IC(L,3)=L
ISN 0184      A(L,4)=-[(PSI(L+JJ)-PSI(L-JJ))*CP/(4.*DX*DR)
              *(R(I)*(AKG(L+1)+AKG(L)))/(2.*DX*DX)]
ISN 0185      IC(L,4)=L+1
ISN 0186      A(L,5)=(PSI(L+1)-PSI(L-1))*CP/(4.*DX*DR)-(R(I+1)*AKG(L+JJ)+R(I)*
              AKG(L))/(2.*DR*DR)
ISN 0187      IC(L,5)=L+JJ
ISN 0188      B(L)=0.
ISN 0189      22 INZ(L)=5
ISN 0190      L=L+1
ISN 0191      A(L,1)=(PSI(L-1)*CP/(2.*DX*DR)-(R(I)*AKG(L)+R(I-1)*AKG(L-JJ)))/(
              2.*DR*DR)
ISN 0192      IC(L,1)=L-JJ
ISN 0193      A(L,2)=-R(I)*(AKG(L-1)+AKG(L))/(DX*DX)
ISN 0194      IC(L,2)=L-1
ISN 0195      A(L,3)=(R(I+1)*AKG(L+JJ)+2.*R(I)*AKG(L)+R(I-1)*AKG(L-JJ))/(2.*
              DR*DR)+R(I)*(AKG(L-1)+AKG(L))/(DX*DX)
ISN 0196      IC(L,3)=L
ISN 0197      A(L,4)=-[PSI(L-1)*CP/(2.*DX*DR)+R(I+1)*AKG(L+JJ)+R(I)*AKG(L)]/(
              2.*DR*DR)
ISN 0198      IC(L,4)=L+JJ
ISN 0199      B(L)=0.
ISN 0200      21 INZ(L)=4
ISN 0201      DO 23 J=1, JJ
ISN 0202      L=L+1
ISN 0203      A(L,1)=1.
ISN 0204      IC(L,1)=L
ISN 0205      B(L)=TCOLD
ISN 0206      23 INZ(L)=1
C
C      MULTIPLICACAO DOS VALORES DA MATRIZ POR UM FATOR (CONST)
C
ISN 0207      DO 32 LL1 = 1, KK
ISN 0208      NZ = INZ(LL1)
ISN 0209      DO 33 IL1 = 1, NZ
ISN 0210      33 A(LL1, IL1) = CONST*A(LL1, IL1)
ISN 0211      32 B(LL1) = CONST*B(LL1)
C
C      CHAMADA DA SUBROUTINE PARA RESOLUCAO DA MATRIZ
C
ISN 0212      CALL MASPI(KK, TOL, NZM)
C
ISN 0213      IF(AWRITE) 600, 801, 802
ISN 0214      600 CONTINUE
ISN 0215      WRITE(6, 200)
ISN 0216      WRITE(6, 215) PO, THDT, TCOLD
ISN 0217      WRITE(6, 201) RA
ISN 0218      WRITE(6, 202) RAG
ISN 0219      WRITE(6, 203) N
ISN 0220      WRITE(6, 205)
ISN 0221      KK1 = KK
ISN 0222      INVER = JJ
ISN 0223      DO 8 KAL=1, JJ
ISN 0224      WRITE(6, 222) (X(I), I= INVER, KK1, JJ)
ISN 0225      KK1 = KK1 - 1
ISN 0226      8 INVER = INVER - 1
```

```
ISN 0227      BD1 CONTINUE
C
C      VERIFICACAO DE DIVERGENCIA
C
ISN 0228      DO 9 IC=1, KK
ISN 0229      IF (X1(1)) 24, 24, 9
ISN 0230      9 CONTINUE
ISN 0231      GO TO 26
ISN 0232      24 WRITE(6, 174)
ISN 0233      WRITE(6, 225) PC, THOT, BK
ISN 0234      IF (RA - .6 ) 900, 900, 488
ISN 0235      24 CONTINUE
C
C**** CONVERCAO DA TEMPERATURA EM TEMPERATURA DO TEMPO ANTERIOR
C
ISN 0236      DO 69 IA1=1, KK
ISN 0237      69 TCOANT(IA1)=TCOANT(IA1)
C
C
C      VERIFICACAO DA CONVERGIA DA TEMPERATURA (ERRO DE UM GRAU)
C
ISN 0238      DO 70 K=1, KK
ISN 0239      DELTA=DABS(X1(K)+273.15-TCOANT(K))
ISN 0240      IF (DELTA-APROX) 82, 82, 83
C
C
ISN 0241      B3 DO 71 I=1, KK
ISN 0242      TCOUP(I)=FATEMP*TCOANT(I)+(1.-FATEMP)*(X1(I)+273.15)
ISN 0243      71 TCOANT(I)=TCOUP(I)
ISN 0244      GO TO 80
ISN 0245      82 CONTINUE
ISN 0246      70 CONTINUE
ISN 0247      B1 CONTINUE
ISN 0248      BWRITE * C.
ISN 0249      WRITE(6, 200)
ISN 0250      WRITE(6, 215) PC, THOT, YCOLD
ISN 0251      WRITE(6, 228) NTUBO
ISN 0252      WRITE(6, 216) BK
ISN 0253      WRITE(6, 201) RA
ISN 0254      WRITE(6, 202) RAG
ISN 0255      WRITE(6, 203) IN
ISN 0256      WRITE(6, 204)
ISN 0257      KK2 = KK
ISN 0258      INVER = JJ
ISN 0259      DO 95 KAL=1, JJ
ISN 0260      WRITE(6, 220) (PS(I1), I1=INVER, KK2, JJ)
ISN 0261      KK2 = KK2 - 1.
ISN 0262      95 INVER = INVER - 1
ISN 0263      WRITE(6, 200)
ISN 0264      WRITE(6, 215) PC, THOT, YCOLD
ISN 0265      WRITE(6, 228) NTUBO
ISN 0266      WRITE(6, 216) BK
ISN 0267      WRITE(6, 201) RA
ISN 0268      WRITE(6, 202) RAG
ISN 0269      WRITE(6, 203) IN
ISN 0270      WRITE(6, 205)
ISN 0271      KK1 = KK
ISN 0272      INVER = JJ
```

```
ISN 0273      DO 7 KAL=1,JJ
ISN 0274      WRITE(6,222)(X(I),I= INVER,KK1,JJ )
ISN 0275      KK1 = KK1 - 1
ISN 0276      7 INVER = INVER - 1
```

C
C
C
C
C

TEMPERATURAS ADIMENSIONAIS

```
ISN 0277      DO 27 IAI = 1,KK
ISN 0278      TADI (IAI) = (X(IAI) - TCOLD ) / (THOT - TCOLD )
ISN 0279      27 CONTINUE
ISN 0280      WRITE(6,213)
ISN 0281      INVER = JJ
ISN 0282      KK1 = KK
ISN 0283      DO 19 KAL = 1,JJ
ISN 0284      WRITE (6,222)(TADI(I),I= INVER,KK1,JJ)
ISN 0285      KK1 = KK1 - 1
ISN 0286      INVER = INVER - 1
ISN 0287      19 CONTINUE
```

C

```
ISN 0288      DO 1 I=1,KK
ISN 0289      TCOUP(I)=X(I)+273.16
ISN 0290      TCONST(I)=TCOUP(I)
ISN 0291      TFIX=TCONST(I)
ISN 0292      ROD(I)=ROF(PC,TFIX)
ISN 0293      1 CONTINUE
```

C
C
C
C
C

----- CALCULO DAS VELOCIDADES DO GAS DENTRO DO ISOLAMENTO -----

C
C
C
C
C

VELOCIDADE NA DIRECAO RADIAL

```
ISN 0294      L1=0
ISN 0295      L=0
ISN 0296      DO 2 K1=1,I1
ISN 0297      DO 3 K=1,JJ1
ISN 0298      L=L+1
ISN 0299      L1=L1+1
ISN 0300      TRAD=(TCONST(L)+TCONST(L1))/2.
ISN 0301      PSIRAD=-PSI(L)+PSI(L1)
ISN 0302      3 VRAD(L1)=PSIRAD/(ROF(PC,TRAD)*R(K1)*DX)
ISN 0303      L=L+1
ISN 0304      2 CONTINUE
```

C
C
C
C
C

VELOCIDADE NA DIRECAO AXIAL

```
ISN 0305      L=0
ISN 0306      L1=0
ISN 0307      BWRITE =0
ISN 0308      DO 5 K=1,I11
ISN 0309      DO 4 K1=1,JJ
ISN 0310      L=L+1
```

```
ISN 0311      L1=L1+1
ISN 0312      TCOMP=(TCNST(L1)+TCNST(L+JJ))/2.
ISN 0313      PSI=(PSI(L+JJ)-PSI(L))
ISN 0314      4 VCOMP(L1)=-PSI/IRCF(PG,TCOMP)*(R(K)+R(K+1))/2.*DR)
ISN 0315      5 CONTINUE
ISN 0316      IF(8*WRITE) 807,807,806
ISN 0317      806 CONTINUE
ISN 0318      WRITE(6,200)
ISN 0319      WRITE(6,215)PG,THOT,TCOLD
ISN 0320      WRITE(6,216) BK
ISN 0321      WRITE(6,201)RA
ISN 0322      WRITE(6,202)RAG
ISN 0323      WRITE(6,203)N
ISN 0324      WRITE(6,206)
ISN 0325      KK3 = KK1
ISN 0326      INVER = JJ1
ISN 0327      DO 16 KAL=1,JJ1
ISN 0328      WRITE(6,220)(VRAD(L3),L3=INVER,KK3,JJ1)
ISN 0329      KK3 = KK3 - 1.
ISN 0330      16 INVER = INVER - 1
ISN 0331      WRITE(6,200)
ISN 0332      WRITE(6,215)PG,THOT,TCOLD
ISN 0333      WRITE(6,216) BK
ISN 0334      WRITE(6,201)RA
ISN 0335      WRITE(6,202)RAG
ISN 0336      WRITE(6,203)N
ISN 0337      WRITE(6,212)
ISN 0338      KK4 = KK1
ISN 0339      INVER = JJ
ISN 0340      DO 17 KAL = 1,JJ
ISN 0341      WRITE(6,220)(VCOMP(L5),L5=INVER,KK4,JJ)
ISN 0342      KK4 = KK4 - 1
ISN 0343      17 INVER = INVER - 1
ISN 0344      807 CONTINUE
C
C
C.....          CALCULO DO FLUXO DE CALOR
C
C
C
C *   CALCULO DAS CONSTANTES
C
ISN 0345      COEF1=PII*DX/DR
C
C **  CALOR NA PAREDE INTERNA
ISN 0346      L=0
ISN 0347      DO 40 J=1,JJ
ISN 0348      L=L+1
ISN 0349      40 QR(L)=-2.*R(1)*AKG(L)*COEF1*(TCNST(L+JJ)-TCNST(L))
C
C **  CALOR NO INTERIOR DO ISOLAMENTO
C
ISN 0350      DO 41 I=2,I11
ISN 0351      L=L+1
ISN 0352      QCONV(L) = 2.*PSI(L+1)*PII*GP*TCNST(L)
ISN 0353      CCOND(L) = -COEF1*R(1)*AKG(L)*(TCNST(L+JJ) - TCNST(L-JJ))
ISN 0354      QR(L) = (QCONV(L) + CCOND(L))/2.
ISN 0355      DO 42 J=2,JJ1
```

```
ISN 0356      L=L+1
ISN 0357      QCOND(L) = -COEF1*R(I)*AKG(L)*(TCNST(L+JJ) - TCNST(L-JJ))
ISN 0358      QCONVC(L) = (PS[(L+1)] - PS[(L-1)])*PII*CP*TCNST(L)
ISN 0359      QR(L) = (QCONVC(L) + QCOND(L))
ISN 0360      42 CONTINUE
ISN 0361      L=L+1
ISN 0362      QCOND(L) = -COEF1*R(I)*AKG(L)*(TCNST(L+JJ) - TCNST(L-JJ))
ISN 0363      QCONVC(L) = -2.*PS[(L-1)]*PII*CP*TCNST(L)
ISN 0364      QR(L) = (QCONVC(L) + QCOND(L))/2.
ISN 0365      41 CONTINUE
C
C ** CALOR NA PAREDE EXTERNA
C
ISN 0366      DO 43 J=1, JJ
ISN 0367      L=L+1
ISN 0368      43 QR(L)=-COEF1*Z.*R(I)*AKG(L)*(TCNST(L)-TCNST(L-JJ) )
C
C
C
C**** CALCULO DA SOMATORIA DO FLUXO DE CALOR
C
ISN 0369      SUMQ(1)=QR(1)
ISN 0370      DO 45 K = 2, JJ
ISN 0371      45 SUMQ(K)=SUMQ(K-1)+QR(K)
ISN 0372      QTOTAL = SUMQ(JJ)
C
C**** CALCULO DO COEFICIENTE DE TRANSMISSAO DE CALOR EFETIVO
C
ISN 0373      AKEFF=QTOTAL*ALOG(R(I))/R(L)/(2.*(THOT-TCOLD)*COMPR*PII)
C
C
C
C----- CALCULO DO NUMERO DE NUSSELY -----
C
ISN 0374      TMEDIO=(TH+TC)/2.
ISN 0375      ANU= AKEFF/AKIPD, TMEDIO)
ISN 0376      WRITE(6,200)
ISN 0377      WRITE(6,215)PD, THOT, TCOLD
ISN 0378      WRITE (6,228) NTUAD
ISN 0379      WRITE(6,216) BK
ISN 0380      WRITE(6,201)RA
ISN 0381      WRITE(6,202)RAG
ISN 0382      WRITE(6,203)N
ISN 0383      WRITE(6,207)
ISN 0384      KKS = KK
ISN 0385      INVER = JJ
ISN 0386      DO 18 KAL=L, JJ
ISN 0387      WRITE(6,220)(QR(L4), L4=INVER, KKS, JJ)
ISN 0388      KKS = KKS-1
ISN 0389      18 INVER = INVER - 1
ISN 0390      L = G
ISN 0391      DO 91 I=1, II
ISN 0392      L=L+1
ISN 0393      SUMP(I) = QR(L)
ISN 0394      DO 92 J = 2, JJ
ISN 0395      L = L+1
```

```

ISN 0396      72 SUMP(L) = SUMP(L-1) + QR(L)
ISN 0397      91 CONTINUE
ISN 0398      WRITE(6,224)
ISN 0399      WRITE(6,220) (SUMP(L) , L = JJ,KK,II)
ISN 0400      WRITE(6,208)QTOTAL
ISN 0401      WRITE(6,209)
ISN 0402      WRITE(6,210)AXEFF
ISN 0403      WRITE(6,211)ANU
ISN 0404      488 CONTINUE
ISN 0405      900 CONTINUE
ISN 0406      GO TO 502
ISN 0407      501 CONTINUE

```

C
C
C
C
C

FORMATOS DE IMPRESSAO

```

ISN 0408      174 FORMAT('1','*INTERROMPIDO DEVIDO A NAO CONVERGENCIA*')
ISN 0409      200 FORMAT('1',26X,'*CONVECCAO NATURAL EM UM DUTO VERTICAL COM ISOLA
                $MENTO INTERNO DO TIPO FIBRAS',/)
ISN 0410      201 FORMAT('1',55X,'*NUMERO DE RAYLEIGH =',E10.3,/)
ISN 0411      202 FORMAT('1',48X,'*RAZAO ENTRE RAYLEIGH E RELACAO GEOMETRICA =',E10.3,
                $/)
ISN 0412      203 FORMAT('1',56X,'*INTERACAO DE NUMERC',I7,/)
ISN 0413      204 FORMAT('1',54X,'*TRAJETORIA NA FIBRA',////)
ISN 0414      205 FORMAT('1',52X,'*TEMPERATURAS NA FIBRA',////)
ISN 0415      206 FORMAT('1',50X,'*VELOCIDADES NA DIRECAO RADIAL',////)
ISN 0416      207 FORMAT('1',48X,'*FLUXO DE CALOR NA DIRECAO RADIAL',////)
ISN 0417      208 FORMAT('1',57X,'*SCMATORIA DO FLUXO =',E9.3,/)
ISN 0418      209 FORMAT('1',57X,'*****',/)
ISN 0419      210 FORMAT('1',46X,'*CONDUTIVIDADE TERMICA EFETIVA =',E10.3,/)
ISN 0420      211 FORMAT('1',54X,'*NUMERO DE NUSSELT =',E10.3,/)
ISN 0421      212 FORMAT('1',50X,'*VELOCIDADE NA DIRECAO AXIAL',////)
ISN 0422      213 FORMAT('1',50X,'*TEMPERATURAS ADIMENSIONAIS',////)
ISN 0423      215 FORMAT('1',46X,'*CALCULOS REFERENTES PARA AS SEQUENTES CONDICIONES',
                $//,11X,'*PRESSAO =',F7.3 ,11X,'*TEMPERATURA DA PAREDE QUENTE =',
                $F7.3 ,11X,'*TEMPERATURA DA PAREDE FRIA =',F7.3,/)
ISN 0424      216 FORMAT('1',54X,'* PERMEABILIDADE = ',4X,E9.3,4X,'*M**2',/)
ISN 0425      220 FORMAT('1',10E12.3)
ISN 0426      222 FORMAT('1',10E12.3)
ISN 0427      224 FORMAT('1',46X,'*SCMATORIA DO FLUXO DE CALOR',/)
ISN 0428      225 FORMAT('1',20X,'***** PROBLEMAS PARA AS CONDICIONES DE',//,20X
                $,'*PRESSAO =',F7.3,4X,'*BAR',//,20X,'*TEMPERATURA DO GAS =',F7.2,
                $4X,'*G.C.',//,20X,'*PERMEABILIDADE =',E10.2,/)
ISN 0429      226 FORMAT('1',50X,'*VARIACAO DO NUMERO DE NUSSELT LOCAL NA PAREDE FRIA
                $',//,30X,'*NUMERO DE NUSSELT',30X,'*POSICAO',////)
ISN 0430      227 FORMAT('1',30X,F5.2,46X,F6.2)
ISN 0431      228 FORMAT('1',48X,I2,'*CILINDROS INTERMEDIARIOS',/)
ISN 0432      499 FORMAT('1',3F7.3)
ISN 0433      STOP
ISN 0434      END

```

LEVEL 21.7 (JAN 73)

OS/360 FORTRAN H

COMPILER OPTIONS = NAME= MAIN,OPT=02,LINECNT=60,SIZE=0000K,
SOURCE,EBCDIC,NOLIST,NODECK,LOAD,MAP,NOEDIT,IO,XREF

```
C
C
C
C..... FUNCAO PARA O CALCULO DA VISCOSIDADE DINAMICA DO AR
C
C      VISC      (N*SEG/M**2)
C
ISN 0002      FUNCTION VISC(P,T)
C
ISN 0003      A=145.8
ISN 0004      B=110.4
ISN 0005      AMY= (A*(T*(3./2.))/(T+B))*1.E-07
ISN 0006      VISC = AMY
ISN 0007      RETURN
ISN 0008      END
```

LEVEL 21.7 (JAN 73)

OS/360 FORTRAN H

COMPILER OPTIONS = NAME= MAIN,OPT=02,LINECNT=60,SIZE=0000K,
SOURCE,EBCDIC,NOLIST,NODECK,LOAD,MAP,NOEDIT,IO,XREF

```
C
C
C..... FUNCAO PARA O CALCULO DA DENSIDADE DO AR
C
C      RHO      (KG/M**3)
C
ISN 0002      FUNCTION RHO(P,T)
C
C      CR      CONSTANTE DO GAS
C
ISN 0003      CR = 2.92699*1.E-03
ISN 0004      RHO=P/(CR*T)
ISN 0005      RETURN
ISN 0006      END
```

LEVEL 21.7 (JAN 73)

OS/360 FORTRAN H

COMPILER OPTIONS = NAME= MAIN,OPT=02,LINECNT=60,SIZE=0000K,
SOURCE,EBCDIC,NOLIST,NODECK,LOAD,MAP,NOEDIT,IO,XREF

```
C
C
C..... FUNCAO PARA O CALCULO DA CONDUTIVIDADE TERMICA DO AR
C
C      CKGAS      (W/(M*GK))
C
ISN 0002      FUNCTION CKGAS(P,T)
ISN 0003      A = .6325E-05
ISN 0004      B=245.4
ISN 0005      C=12
ISN 0006      CKGAS = (A*SQRT(T)/(1.+B*10.**(-C/T))/T) /5.77E-05 * 2.414E-02
ISN 0007      RETURN
ISN 0008      END
```

```
LEVEL 21.7 ( JAN 73 )                                OS/360  FORTRAN H

COMPILER OPTIONS - NAME= MAIN,OPT=02,LINECNT=60,SIZE=0000K,
SOURCE,EBCDIC,NOLIST,NODECK,LOAD,MAP,NOEDIT,IO,XREF

C
C
C.....          FUNCAO PARA O CALCULO DA CONDUTIVIDADE TERMICA          .....
C
C.....          DO GAS HELIO                                          .....
C
C      CKGAS      (W/(M*GK))
C
1SN 0002      FUNCTION CKGAS(P,T)
C
C      T          TEMPERATURA DO GAS                                  (K)
C      P          PRESSAO DO GAS                                     (BAR)
C      RHO        DENSIDADE DO GAS                                 (KG/M**3)
C      CKGAS      CONDUTIVIDADE TERMICA DO GAS                    (W/(M*K))
C
1SN 0003      CKGASO=2.97E-03*T**0.69+9.23E+09*(T-273.16)/((T-273.16)**5.
&+4.29E+14)
1SN 0004      CKGAS=CKGASO+2.33E-04*RHO(P,T)+2.39E-06*RHO(P,T)*RHO(P,T)
1SN 0005      RETURN
1SN 0006      END
```

```
LEVEL 21.7 ( JAN 73 )                                OS/360  FORTRAN H

COMPILER OPTIONS - NAME= MAIN,OPT=02,LINECNT=60,SIZE=0000K,
SOURCE,EBCDIC,NOLIST,NODECK,LOAD,MAP,NOEDIT,IO,XREF

C
C
C.....          FUNCAO PARA O CALCULO DA VISCOSIDADE DINAMICA          .....
C
C.....          DO GAS HELIO                                          .....
C
C
C      AMY        (N*SEG/M**2)
C
1SN 0002      FUNCTION AMY(P,T)
C
C      P          PRESSAO DO GAS                                     (BAR)
C      T          TEMPERATURA DO GAS
C      RHO        DENSIDADE DO GAS
C      AMY        VISCOSIDADE DINAMICA DO GAS
C      T          TEMPERATURA DO GAS                                  (K)
C      RHO        DENSIDADE DO GAS                                 (N*S/M**2)
C      AMY        VISCOSIDADE DINAMICA DO GAS
C
1SN 0003      AMY0=3.78E-07*T**0.69+5.E-07/(.52*T/569.6)
1SN 0004      AMY=AMY0+2.67E-10*RHO(P,T)*RHO(P,T)
1SN 0005      RETURN
1SN 0006      END
```


LEVEL 21.7 (JAN 73)

OS/360 FORTRAN H

COMPILER OPTIONS - NAME= MAIN,DPY=02,LINECNT=60,SIZE=0000K,
SOURCE,EBCDIC,NOLIST,NOOECK,LOAD,MAP,NOEDIT,LD,XREF

```
C
C
C
C..... FUNCAO PARA O CALCULO DA CONDUTIVIDADE TERMICA TOTAL .....
C
C..... (GAS + FIBRAS) .....
C
C      AK      (W/(M*K))
C
ISN 0002      FUNCTION AK(P,T)
C
C
C      T      TEMPERATURA DO GAS      (K)
C      P      PRESSAO DO GAS      (BAR)
C      POR      POROSIDADE DAS FIBRAS
C      CKFIB      CONDUTIVIDADE TERMICA DAS FIBRAS      (W/(M*K))
C      AK      CONDUTIVIDADE TERMICA TOTAL      (W/(M*K))
C      CKGAS      CONDUTIVIDADE TERMICA DO GAS      (W/(M*K))
C
ISN 0003      POR=.84
ISN 0004      CKFIB=.03
ISN 0005      AK=POR*CKGAS(P,T)+(1-POR)*CKFIB
ISN 0006      RETURN
ISN 0007      END
```

```
C
C SUBROTINA MASPI
C OBJETIVO
C SOLUCAO DE UM SISTEMA DE EQ. ALGEBRICAS AX=B, ATRA-
C VES DO METODO DA FATORIZACAO, APLICANDO TECNICAS
C PARA MATRIZES ESPARSAS
C
C USO
C CALL MASPI(N, EPS, IS, NZM)
C
C DIMENSIONAMENTO
C INTEGER*2 IC, ICX, INZ, IRZ, IX, IY, IZ
C COMMON /G1/A(N,K), B(N), X(N), IC(N,K), INZ(N), IX(N),
C IY(N), IZ(N)
C DIMENSION X(N,NZM), XL(N), ICX(N,NZM), IRZ(N)
C
C DESCRICAO DOS PARAMETROS
C N - NUM DE EQUACOES DO SISTEMA
C EPS - CONST. DE ENTRADA USADA NO CALC. DA TOLERANCIA
C RELATIVA(TOL) P/ TESTE DE PERDA DE SIGNIFICANCIA
C IS - OPCOES DE USO DA SUBROTINA. SEM ORDENAMENTO INI-
C CIAL DE LINHAS P/ IS=1, E COM ORDENAMENTO P/ IS=2.
C A SAIDA IS=-1 SIGNIFICA TER SIDO UTILIZADO UM PIVO
C CUJO VALOR E MENOR QUE TOL
C NZM - NUM MAX DE ELEMENTOS FORMADOS EM LINHAS DE XU,
C E ICX, USADO PARA DEFINIR A SEGUNDA DIMENSAO DESSES
C ARRANJOS. INICIALMENTE DEVE SER ASSUMIDO UM VALOR
C PARA ESSA DIMENSAO
C NZM=0 COMO VALOR DE ENTRADA, ACARRETA NO ORDENAMENTO
C CRESCENTE POR COLUNA DOS ELEMENTOS DE A
C
C ARRANJOS UTILIZADOS
C A(N,K) - ARMAZENA OS VALORES NAO NULOS DE A, C/ K
C (IGUAL AO NUM MAX DE ELEM NUMA LINHA DESSA MATRIZ
C B(N) - ARMAZENA O LADO DIREITO DO SISTEMA
C X(N) - SAIDA COM A SOLUCAO DAS EQUACOES
C IC(N,K) - ARMAZENA AS COLUNAS DOS ELEMENTOS NAO NULOS
C DE A
C INZ(N) - DA O NUM DE ELEM EM CADA LINHA DE A(N,K)
C X(N,NZM) - ARMAZENA LINHA APOS LINHA OS VALORES NAO
C NULOS DE U, DA EXPRESSAO A=LU
C XL(N) - ARMAZENA PROVISORIAMENTE CADA LINHA DE L, DA
C EXPRESSAO A=LU
C ICX(N,NZM) - ARMAZENA AS COLUNAS QUE PERTENCEM CA-
C DA ELEMENTO DE XU EM U
C IRZ(N) - DA O NUM DE ELEM EM CADA LINHA DE XU
C IX(N), IY(N), IZ(N) - VECTORES AUXILIARES
C
C SUBROTINAS REQUERIDAS
C CALL ORDEM(N) - QUANDO SE DESEJA UM ARRANJO INICI-
C AL DAS LINHAS E COLUNAS DE A P/ DIMINUIR A MEM. -
C REQUERIDA. SEU USO E OPCIONAL. DEVE SER DEFINIDO -
C COMO ENTRADA NZM=0
C
C USO EM DUPLA PRECISAO
C DOUBLE PRECISION A,B,X,XU,XL,AUX,TOL,AM,SM
C
C *****
C SUBROUTINE MASPI(N, EPS, IS, NZM)
C INTEGER*2 IC, ICX, INZ, IRZ, IX, IY, IZ
C COMMON /G1/A(100,5), B(100), X(100), IC(100,5), INZ(100),
C IX(100), IY(100), IZ(100)
C DIMENSION XU(100,44), XL(100), ICX(100,44), IRZ(100)
C DO 600 I=1, N
C IY(I)=1
C 600 IZ(I)=1
C CALL ORDEM(N)
C IF(NZM.EQ.1)GO TO 205
C ARRANJO DE ELEM. DE A EM ORDEM CRESCENTE
```

```
      DO 200 I=1,N
      J1=1
      IK=1
      NZ=INZ(I)
      IF(NZ.EQ.1)GO TO 200
204  DO 201 J=J1,N
      DO 202 K1=IK,NZ
      IF(1C(I,K1).EQ.J)GO TO 203
202  CONTINUE
201  CONTINUE
203  AUX=1C(I,IK)
      1C(I,IK)=1C(I,K1)
      1C(I,K1)=AUX
      AUX=A(I,IK)
      A(I,IK)=A(I,K1)
      A(I,K1)=AUX
      IK=IK+1
      IF(IK.GE.NZ)GO TO 200
      J1=J+1
      GO TO 204
200  CONTINUE
      NZM=1
205  DO 51 I=1,N
51  IRZ(I)=0
C  DETERMINACAO DA TOLERANCIA DO SISTEMA
      AM=A(1,1)
      DO 206 I=1,N
      NZ=INZ(I)
      DO 206 K=1,NZ
      IF(ABS(AM).GE.ABS(A(I,K)))GO TO 206
      AM=A(I,K)
206  CONTINUE
      TOL=EPS*ABS(AM)
C  ORDENAMENTO DA MATRIZ A
      DO 10 I=1,N
10  IX(I)=IZ(I)
      IF(IZ.EQ.1)GO TO 7
      J=1
      IAUX=1
      I=N+1
1  I=I-1
      K=IX(I)
      NZ1=INZ(IAUX)
      NZ=INZ(K)
      IF(NZ.GE.NZ1)GO TO 6
      DO 2 K1=1,NZ
      IF(1C(K,K1).EQ.J)GO TO 3
2  CONTINUE
      GO TO 6
3  DO 4 K1=1,NZ1
      I(1C(IAUX,K1).EQ.1)GO TO 5
4  CONTINUE
      GO TO 6
5  IX(I)=IAUX
      IX(J)=K
      IF(J.GE.(N-1))GO TO 7
      J=J+1
      I=N+1
      IAUX=IX(J)
      GO TO 1
6  IF(I.GT.J)GO TO 1
      IF(J.GE.(N-1))GO TO 7
      J=J+1
```

```
      I=N+1
      I AUX=IX(I)
      GO TO 1
7     DO 8 I=1,N
      K=IX(I)
8     X(I)=B(K)
      DO 9 I=1,N
9     B(I)=X(I)
C
C   OBTENCAO DA PRIM.COL. DE U E PRIM.LINHA DE L
15    I=IX(I)
      NZ=INZ(I)
      KM=IC(I,NZ)
      B(I)=B(I)/A(I,I)
      IF(NZ.EQ.1)GO TO 20
      DO 14 K=2,NZ
      I=IC(I,K)
      XU(I,I)=A(I,K)/A(I,I)
      IRZ(I)=1
      ICX(I,I)=1
14    CONTINUE
C
C   OBTENCAO DAS MATRIZES U E L
20    DO 100 I=2,N
      II=IX(I)
      K1=IC(II,1)
      NZ=INZ(II)
      K2=IC(II,NZ)
      IF(K2.GT.KM)KM=K2
      DO 21 J=K1,KM
21    X(I,J)=0.
      DO 22 J=1,I
22    XL(I,J)=D.
      NZ=INZ(II)
      DO 23 K=1,NZ
      KI=IC(II,K)
23    X(KI)=A(II,K)
C   OBTENCAO DE UMA LINHA DE L
      K2=IC(II,1)
      XL(K2)=X(K2)
      IF(K2.EQ.1)GO TO 34
      J=K2+1
      DO 26 II=J,I
      NZ=IRZ(II)
      SOM=0.
      IF(NZ.EQ.0)GO TO 25
      DO 24 K=1,NZ
      KI=IC(II,K)
      IF(XL(KI).EQ.D.)GO TO 24
      SOM=XL(KI)*XU(II,K)+SOM
24    CONTINUE
25    XL(II)=X(II)-SOM
25    CONTINUE
C   OBTENCAO DE UMA COLUNA DE U
34    IF(I.EQ.N)GO TO 30
      I2=I+1
      IF(I2.GT.KM)GO TO 30
      DO 29 II=I2,KM
      SOM=0.
      NZ=IRZ(II)
      IF(NZ.EQ.0)GO TO 28
      DO 27 K=1,NZ
      KI=IC(II,K)
```

```
IF(X(I,K)).EQ.0.)GO TO 27
SDM=X(I,K)*XU(I,K)+SDM
27 CONTINUE
28 AUX=X(I)-SDM
AUX=AUX/XL(I)
IF(AUX.EQ.0)GO TO 29
IRZ(I)=IRZ(I)+1
K=IRZ(I)
XU(I,K)=AUX
ICX(I,K)=I
29 CONTINUE
NZ=IRZ(I)
IF(NZ.GT.NZM)NZM=NZ
C MODIFICACAO DE UM ELEMENTO DO VETOR B
30 I=I-1
AUX=0.
K2=IC(I,1)
IF(K2.EQ.1)GO TO 35
DO 31 J=K2,I
IF(X(I,J).EQ.0.)GO TO 31
AUX=X(I,J)*B(J)+AUX
31 CONTINUE
35 IF(ABS(XL(I)).LE.TOL)IS=-1
B(I)=(B(I)-AUX)/XL(I)
100 CONTINUE
C
C DETERMINACAO DA MATRIZ TRANSPOSTA DE U
DO 32 I=2,N
NZ=IRZ(I)
IF(NZ.EQ.0)GO TO 32
IRZ(I)=0
DO 32 K=1,NZ
J=IC(I,K)
IRZ(J)=IRZ(J)+1
K1=IRZ(J)
ICX(J,K1)=I
XU(J,K1)=XU(I,K)
32 CONTINUE
DO 33 I=2,N
NZ=IRZ(I)
IF(NZ.GT.NZM)NZM=NZ
33 CONTINUE
C
C BACK SUBSTITUTION
DO 40 J=2,N
I=N-J+1
NZ=IRZ(I)
IF(NZ.EQ.0)GO TO 40
DO 40 K=1,NZ
K1=IC(I,K)
B(I)=B(I)-XU(I,K)*B(K1)
40 CONTINUE
DO 41 I=1,N
J=IX(I)
K=Y(J)
41 X(I)=B(K)
RETURN
END
```

```
C
C SUBROTINA MASP1
C OBJETIVO
C SOLUCAO DE UM SISTEMA DE EQ. ALGEBRICAS AX=B, ATRA-
C VES DO METODO DA FATORIZACAO, APLICANDO TECNICAS
C PARA MATRIZES ESPARSAS
C
C USO
C CALL MASP1(N, EPS, IS, NZM)
C
C DIMENSIONAMENTO
C INTEGER*2 IC, ICX, INZ, IRZ, IX, IY, IZ
C COMMON /S1/A(N,K), B(N), X(N), IC(N,K), INZ(N), IX(N),
C IY(N), IZ(N)
C DIMENSION XU(N, NZM), XL(N), ICX(N, NZM), IRZ(N)
C
C DESCRICAO DOS PARAMETROS
C N - NUM DE EQUACOES DO SISTEMA
C EPS - CONST. DE ENTRADA USADA NO CALC. DA TOLERANCIA
C RELATIVA(TOL) P/ TESTE DE PERDA DE SIGNIFICANCIA
C IS - OPCOES DE USO DA SUBROTINA, SEM ORDENAMENTO INI-
C CIAL DE LINHAS P/ IS=1, E COM ORDENAMENTO P/ IS=2.
C A SAIDA IS=-1 SIGNIFICA TER SIDO UTILIZADO UM PIVO
C CUJO VALOR E MENOR QUE TOL
C NZM - NUM MAX DE ELEMENTOS FORMADOS EM LINHAS DE XU,
C E ICX, USADO PARA DEFINIR A SEGUNDA DIMENSAO DESSES
C ARRANJOS. INICIALMENTE DEVE SER ASSUMIDO UM VALOR
C PARA ESSA DIMENSAO
C NZM=0 COMO VALOR DE ENTRADA, ACARRETA NO ORDENAMENTO
C CRESCENTE POR COLUNA DOS ELEMENTOS DE A
C
C ARRANJOS UTILIZADOS
C A(N,K) - ARMAZENA OS VALORES NAO NULOS DE A, C/ K
C IGUAL AO NUM MAX DE ELEM NUMA LINHA DESSA MATRIZ
C B(N) - ARMAZENA O LADO DIREITO DO SISTEMA
C X(N) - SAIDA COM A SOLUCAO DAS EQUACOES
C IC(N,K) - ARMAZENA AS COLUNAS DOS ELEMENTOS NAO NULOS
C DE A
C INZ(N) - DA O NUM DE ELEM EM CADA LINHA DE A(N,K)
C XU(N, NZM) - ARMAZENA LINHA APDS LINHA OS VALORES NAO
C NULOS DE U, DA EXPRESSAO A=LU
C XL(N) - ARMAZENA PROVISORIAMENTE CADA LINHA DE L, DA
C EXPRESSAO A=LU
C ICX(N, NZM) - ARMAZENA AS COLUNAS QUE PERTENCEM CA-
C DA ELEMENTO DE XU EM U
C IRZ(N) - DA O NUM DE ELEM EM CADA LINHA DE XU
C IX(N), IY(N), IZ(N) - VETORES AUXILIARES
C
C SUBROTINAS REQUERIDAS
C CALL ORDER(N) - QUANDO SE DESEJA UM ARRANJO INICI-
C AL DAS LINHAS E COLUNAS DE A P/ DIMINUIR A MEM. -
C REQUERIDA, SEU USO E OPCIONAL, DEVE SER DEFINIDO -
C COMO ENTRADA NZM=0
C
C USO EM DUPLA PRECISAO
C DOUBLE PRECISION A, B, X, XU, XL, AUX, TOL, AM, SOM
C
C *****
C SUBROUTINE MASP1(N, EPS, IS, NZM)
C INTEGER*2 IC, ICX, INZ, IRZ, IX, IY, IZ
C COMMON /S1/A(100, 5), B(100), X(100), IC(100, 5), INZ(100),
C *IX(100), IY(100), IZ(100)
C DIMENSION XU(100, 44), XL(100), ICX(100, 44), IRZ(100)
C DO 600 I=1, N
C IY(I)=1
C 600 IZ(I)=1
C CALL ORDER(N)
C IF(NZM.EQ.1)GO TO 205
C ARRANJO DOS ELEM. DE A EM ORDEM CRESCENTE
```

```
      GO 203 I=1,N
      J1=1
      IK=1
      NZ=INZ(1)
      IF(NZ.EQ.1)GO TO 200
204   GO 201 J=J1,N
      GO 202 K1=IK,NZ
      IF(1C(I,K1).EQ.J1)GO TO 203
202   CONTINUE
201   CONTINUE
203   IAUX=1C(I,IK)
      1C(I,IK)=1C(I,K1)
      1C(I,K1)=IAUX
      AUX=A(I,IK)
      A(I,IK)=A(I,K1)
      A(I,K1)=AUX
      IK=IK+1
      IF(IK.GE.NZ)GO TO 200
      J1=J+1
      GO TO 204
200   CONTINUE
      NIM=1
205   DO 51 I=1,N
      51   IRZ(I)=0
C   DETERMINAÇÃO DA TOLERANCIA DO SISTEMA
      AM=A(1,1)
      DO 206 I=1,N
      NZ=INZ(I)
      DO 206 K=1,NZ
      IF(ABS(AM).GE.ABS(A(I,K)))GO TO 206
      AM=A(I,K)
206   CONTINUE
      TOL=EPS*ABS(AM)
C   UNDEENAMENTO DA MATRIZ A
      GO TO 1 I=1,N
10   IX(I)=1Z(I)
      IF(1S.EQ.1)GO TO 7
      J=1
      IAUX=1
      I=N+1
1   I=I-1
      A=IX(I)
      NZ1=INZ(IAUX)
      NZ=INZ(K)
      IF(NZ.GE.NZ1)GO TO 6
      DO 2 K1=1,NZ
      IF(1C(K,K1).EQ.J)GO TO 3
2   CONTINUE
      GO TO 6
3   DO 4 K1=1,NZ1
      IF(1C(IAUX,K1).EQ.1)GO TO 5
4   CONTINUE
      GO TO 6
5   IX(I)=IAUX
      IX(J)=K
      IF(J.GE.(N-1))GO TO 7
      J=J+1
      I=N+1
      1AUX=IX(J)
      GO TO 1
6   IF(1.GE.J)GO TO 1
      IF(J.GE.(N-1))GO TO 7
      J=J+1
```

```
      I=N+1
      IAUX=X(I,J)
      GO TO 1
7     DO 8 I=1,N
      K=IX(I)
8     X(I)=B(K)
      DO 9 I=1,N
9     B(I)=X(I)
C
C   OBTENÇÃO DA PRIM. COL. DE U E PRIM. LINHA DE L
15    I1=IX(I)
      NZ=INZ(I1)
      KM=IC(I1,NZ)
      B(I1)=B(I1)/A(I1,I)
      IF(NZ.EQ.1)GO TO 20
      DO 14 K=2,NZ
      I=IC(I1,K)
      XU(I,I)=A(I1,K)/A(I1,I)
      IRZ(I1)=1
      ICX(I1,I)=1
14    CONTINUE
C
C   OBTENÇÃO DAS MATRIZES U E L
20    DO 100 I=2,N
      I1=IX(I1)
      K1=IC(I1,I)
      NZ=INZ(I1)
      K2=IC(I1,NZ)
      IF(K2.GT.KM)KM=K2
      DO 21 J=K1,KM
21    Y(I,J)=0.
      DO 22 J=I,I
22    XL(I,J)=0.
      NZ=INZ(I1)
      DO 23 K=1,NZ
      K1=IC(I1,K)
23    X(K1)=A(I1,K)
C   OBTENÇÃO DE UMA LINHA DE L
      K2=IC(I1,I)
      XL(K2)=X(K2)
      IF(K2.EQ.1)GO TO 34
      J=K2+1
      DO 26 I1=J,I
      NZ=IRZ(I1)
      SOM=0.
      IF(NZ.EQ.0)GO TO 25
      DO 24 K=1,NZ
      K1=IC(I1,K)
      IF(XL(K1).EQ.0.)GO TO 24
      SOM=XL(K1)*XU(I1,K1)+SOM
24    CONTINUE
25    XL(I1)=X(I1)-SOM
26    CONTINUE
C   OBTENÇÃO DE UMA COLUNA DE U
34    IF(I1.EQ.N)GO TO 30
      I2=I+1
      IF(I2.GT.KM)GO TO 30
      DO 29 I1=I2,KM
      SOM=0.
      NZ=IRZ(I1)
      IF(NZ.EQ.0)GO TO 28
      DO 27 K=1,NZ
      K1=IC(I1,K)
```

```
IF(XL(K)).EQ.0.)GO TO 27
SOM=XL(K)*XU(I1,K)+SOM
27 CONTINUE
28 AUX=X(I1)-SOM
AUX=AUX/XL(I1)
IF(AUX.EQ.0)GO TO 29
IRZ(I1)=IRZ(I1)+1
K=IRZ(I1)
XU(I1,K)=AUX
ICX(I1,K)=I
29 CONTINUE
NZ=IRZ(I1)
IF(NZ.GT.NZM)NZM=NZ
C MODIFICACAO DE UM ELEMENTO DO VETOR B
30 I1=I-1
AUX=0.
K2=IC(I1,I)
IF(K2.EQ.0)GO TO 35
DO 31 J=K2,I
IF(XL(J).EQ.0.)GO TO 31
AUX=XL(J)*B(J)+AUX
31 CONTINUE
35 IF(ABS(XL(I)).LE.TOL)IS=-1
B(I)=(B(I)-AUX)/XL(I)
100 CONTINUE
C
C DETERMINACAO DA MATRIZ TRANSPOSTA DE U
DO 32 I=2,N
NZ=IRZ(I)
IF(NZ.EQ.0)GO TO 32
IP(I)=0
DO 32 K=1,NZ
J=IC(I,K)
IRZ(J)=IRZ(J)+1
K1=IRZ(J)
ICX(J,K1)=I
XU(J,K1)=XU(I,K)
32 CONTINUE
DO 33 I=2,N
NZ=IRZ(I)
IF(NZ.GT.NZM)NZM=NZ
33 CONTINUE
C
C BACK SUBSTITUTION
DO 40 J=2,N
I1=N-J+1
NZ=IRZ(I1)
IF(NZ.EQ.0)GO TO 40
DO 40 K=1,NZ
K1=ICX(I1,K)
B(I1)=B(I1)-XU(I1,K)*B(K1)
40 CONTINUE
DO 41 I=1,N
J=IX(I)
K=IY(I)
41 X(I)=B(K)
RETURN
END
```

REFERENCIAS

- [1] BROCKERHOFF, P. Insulation systems for the hot gas ducts of high temperature reactor and their behavior at high pressures and temperatures IN: J. Non-equilibrium thermodynamic, New York, V-3, 22/8/1977, p. 231-44.
- [2] BROCKERHOFF, P. A description of a Kohlestein-insulation and first results. Jülich, Kernforschungsanlage, Institut für Reactorbauelemente, 1978. (palestra apresentada no I.E.A., em maio de 1978).
- [3] SCHULTEN, R. ; KUGELER, K. ; KUGELER, M. ; NISSEN, H. ; HORN, H. ; WOIKE, O. ; GERMER, J. H. The pebble bed high temperature reactor as source of Nuclear Process heat. Jülich, Kernforschungsanlage, Institut für Reactorbauelemente, V-1 Conceptual Design, okt. 1974
(JÜL - 1113 - RG)
- [4] BROCKERHOFF, P. ; SCHOLZ, F. Untersuchungen an einer Foli_{en}isolierung in einem horizontalen Druckrohr. Jülich, Kernforschungsanlage, Institut für Reactorbauelemente, sep. 1974. (JUL - 1109 - RB)
- [5] HUGHES, J. W. ; O'TALLAMHAIN, C. Metallic foil insulation in high pressure gas. Paper 13. Symposium on high pressure gas as a heat transport medium. I. Mech. E., V-181, March 1967.

- [6] DAVIDSON, J. Heat transfer behaviour of metallic foil insulation in high pressure gas. Paper 13. Symposium on high pressure gas as a heat transport medium, I. Mech.E. V-181, March 1967.
- [7] HUGHES, J. W. Insulation design and development for the oldbury vessels. Conference on prestressed concrete pressure vessels. I.C.E., Paper 60, March 1967 (also authors' replies p. 748)
- [8] BROCKERHOFF, P. ; SCHOLZ, F. Untersuchungen an zwei gestopften Faseisolierungen in einem horizontalen Druckrohr. Jülich, Kernforschungsanlage, Institut für Reactorbaulemente, okt. 1975. (JÜL - 1241)
- [9] BROCKERHOFF, P. Experiments on ceramic fibrous and rigid material. Jülich, Kernforschungsanlage, Institut für Reactorbaulemente, May 1978. (Palestra apresentada no IEA em maio de 1978)
- [10] BROCKERHOFF, P. Untersuchungen an der konstruktiv verbesserten Kohlesteinisolierung. Jülich, Kernforschungsanlage, Institut für Reactorbaulemente, sep. 1977. (JÜL - 1458)
- [11] INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES. Relatórios internos do Centro de Engenharia Nuclear, São Paulo.
- [12] BROCKERHOFF, P. Eine Versuchsstrecke für den Heliumversuchskreislauf (HUR) in São Paulo, Brasilien. Jülich, Kernforschungsanlage, Institut für Reactorbaulemente, 912/78.

- [13] BAXI, C. B. Permeation flow and heat transfer in the HTGR thermal barrier. Philadelphia, Pa. American Society of Mechanical Engineers, New York 1974. (ASME paper 74-WA/HT-9)
- [14] GROSSIN, R. ; JANNOT, M. ; MICHEAU, P. ; PIROVAND, A. ; Exchanges de chaleur par convection naturelle en milieu poreux. IN: Second information meeting on prestressed concrete reactor pressure vessels and their thermal insulation. Brussels, Commission of European Communities, Luxembourg. 18-20/11/1969. p. 821-39. (EUR 4531, d/f/i/n/e)
- [15] FURBER, B. N. ; DAVIDSON, S. The thermal performance of solid insulants in high pressure gas environment. In : Second information meeting on prestressed concrete pressure vessels and their thermal insulation. Brussels Commission of European Communities, Luxembourg, 1970 , p. 841-81. (EUR 4531 d/f/i/n/e)
- [16] JANNOT, M. ; NAUDIN, P. ; VIANNAY, S. Convection en Milieu poreux, Int. J. Heat Mass Transfer. Oxford V-16, p.395 - 410, 1973.
- [17] HILSENATH, J. ; HOGE, H. J. ; BECHETT, C. W. MASI, J. F. ; BENEDICT, W. S. ; NUTTALL, R. L. ; FANO, L. ; TOULOUKIAN, Y. S. Tables of thermodynamic and transport properties , Oxford, Pergamonpress, 1960.
- [18.] HARTH, R. ; HAMMEKE, K. Thermodynamische Stoffwert von helium in Beriech von 0 bis 3000°C und 0.2 bis 200 bar

Jülich, Kernforschungsanlage, Institut für Reactorbauelemente, juni 1970. (JUL - 666 - RB)

- |19| SKODA, S. Estudos experimentais da permeabilidade e da condutividade térmica, para isolamento térmico interno tipo fibras (tese a ser publicada no IPEN)

- |20| RODRIGUEZ, F. A. Subrotinas em fortran-IV, para solução de sistemas algébricos lineares. (tese a ser apresentada no IPEN).