

DINÂMICA DE TÔRRE

DE

ABSORÇÃO

por

João Batista Leonessa

Tese submetida ao Corpo Docente da Coordenação de Programa de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, com parte dos requisitos necessários para a obtenção do Grau Mestre em Ciências. (M. Sc.)

Aprovada por

OUTUBRO

1966

22/10/66



AGRADECIMENTOS

Desejo tornar público os meus agradecimentos ao Prof. Giulio Massarani, que sugeriu e orientou esta tese, e ao CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento do Pessoal do Ensino Superior), cuja concessão de bolsa permitiu a realização deste trabalho. Quero ainda estender meus agradecimentos ao pessoal do Laboratório de Processamento de Dados do Instituto Tecnológico da Aeronáutica, cuja colaboração foi decisiva na elaboração e processamento dos programas utilizados.

ÍNDICE

	pág.
I - INTRODUÇÃO	1
Aplicação ao controle	1
Histórico	2
Estudos em uma só fase	2
Estudos em duas fases	5
Modelos	7
Resposta em frequência	8
II - DESENVOLVIMENTO DO MODELO DIFUSÃO AXIAL	
Difusão nas duas fases	10
Solução para a fase gasosa	16
Condições de Contorno	17
Aplicação das condições de contorno	21
Função Transferência	23
III - RESULTADOS E DISCUSSÃO	
Comparação dos resultados. Discussão	25
Recomendações	38
IV - BIBLIOGRAFIA	39
- APÊNDICES	
A. Programa em computador digital	41
B. Determinação das partes reais e imaginárias dos parâmetros usados durante os cálculos	51
C. Tabelas e Resultados	54
- NOMENCLATURA	65

ÍNDICE DE TABELAS E FIGURAS

<u>FIGURAS</u>	pág.
I.1	Correlação de P_e contra R_e 5
I.2	Modelo Difusão Axial 10a
3	Razão de Amplitude contra a frequência Condições Contorno Grupo I - $Pe_G = cte$ 28
4	Razão de Amplitude contra a frequência Condições Contorno Grupo II - $Pe_G = cte$ 32
5	Razão de Amplitude contra frequência Condições Contorno Grupo I - $Pe_L = cte$ 36
6	Razão de Amplitude contra frequência Condições Contorno Grupo II - $Pe_L = cte$ 37

TABELAS

1	Resultados experimentais de Gray 55
2	Resultados teóricos deste trabalho para as condições contorno Grupo I 56
3	Resultados teóricos deste trabalho para as condições contorno Grupo II 60
4	Resultados teóricos de Andrade 64

SUMÁRIO

Neste estudo é feita uma análise dinâmica teórica de uma torre recheada de absorção, operando em contra-corrente.

É aplicado o Modelo difusão axial que utiliza um termo de difusividade axial turbulenta média para a fase líquida e gasosa. As vazões para ambas as fases são consideradas constantes.

A análise teórica foi feita utilizando-se da técnica de resposta em frequência a um sinal senoidal da concentração do gás a ser absorvido. A função transferência foi obtida, considerando-se o equilíbrio expresso pela lei de Henry.

Para testar o modelo usou-se o sistema gás carbônico-ar-água para os quais existem curvas experimentais de resposta em frequência (7). O estudo foi feito para dois diferentes conjuntos de condições de contorno e os resultados obtidos foram comparados com os resultados experimentais de Gray (7) e resultados teóricos de Massarani (13) e Andrade (14).

As curvas obtidas parecem estar coerentes com os trabalhos anteriores. Neste estudo conclui-se que o modelo adotado permite a previsão da função transferência na faixa de zero a 2 ciclos/min., isto é, igual a faixa de aplicabilidade do modelo usado por Andrade (14).

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Aplicação ao Controle

O rápido progresso no campo de controle de processos tem como resultado a necessidade de um maior conhecimento do comportamento dinâmico dos sistemas. A aplicação de métodos analíticos no projeto de sistemas de controle requer um conhecimento apurado da dinâmica do processo.

No campo da engenharia química, o conhecimento do comportamento dinâmico de colunas de destilação e absorção, reatores e outros equipamentos que operam com leito fixo é de grande importância, pois procura-se sempre regular a pureza do produto em presença de variações da alimentação.

Para um projeto ótimo de equipamento de controle por realimentação é necessário que se conheça o comportamento transiente do processo, uma vez que o ciclo dos sistemas controladores inclui a resposta dos instrumentos, as perdas nas linhas e a resposta do processo em si (11).

Quando um sinal senoidal é aplicado a entrada de um sistema linear, o sinal de saída será um sinal senoidal de mesma frequência, porém no caso mais geral, com diferente amplitude e ângulo de fase, em relação ao sinal de entrada. Atra

vés do estudo dos elementos característicos desses dois sinais, pode-se conhecer o comportamento dinâmico do sistema. Tal técnica é denominada de resposta em frequência.

A técnica de resposta em frequência apresenta a vantagem de possuir uma análise teórica fácil, em relação a técnicas similares, e esse fato faz com que a resposta em frequência seja utilizada para estudo e projeto de controles automáticos.

HISTÓRICO

Estudos em uma só Fase

Os estudos teóricos e experimentais de dispersão axial de massa, são de origem relativamente recente e por esse motivo muito pouco existe publicado sobre o assunto.

Os estudos de difusão radial de massa em colunas recheadas, foram iniciados por Wilhelm et al. (3), que estudaram o escoamento de água traçada através de um leito de esferas de 1, 3, 5 e 8 mm de diâmetro, e em regimes de escoamento cujo número de Reynolds variou entre 5 e 2000.

A dispersão axial de sal em água escoando através de leitos de areia em regime laminar foi estudado por Rafai (15).

Danckwerts (6) estudou a dispersão axial em um leito constituído de anéis de Raschig, para um regime de escoamento com número de Reynolds igual a 40, usando a função salto.

O uso da resposta em frequência foi introduzido por Kramers e Alberta (10), que imaginaram um modelo físico constituído de n-misturadores interligados, que simulavam um leito. Investigaram então, a dispersão de água traçada através de uma coluna de anéis de Raschig em regimes com o Re variando entre 100 e 200. Esses autores calcularam os valores de difusividade partindo de dois gráficos diferentes:

- a) razão de amplitude contra frequência
- b) defasamento angular contra frequência

Os valores de difusividade obtidos foram bastante diferentes apresentando variações de 50 a 100%. A explicação de tal fato foi dada admitindo-se a existência de efeitos capacitivos do leito.

Os primeiros estudos referentes a difusão axial em gases foram relatados por McHenry e Wilhelm (12), que estudaram o escoamento de gases através de leitos de esferas. Nesse trabalho os valores de difusividade foram obtidos a partir da resposta em frequência do sistema. Para regimes de escoamento com Re variando entre 26 e 1000, foi determinado um $Pe=2$.

Aris e Amundson (1), através de um estudo teórico

provaram que os modelos "n-misturadores" e "difusão axial" são iguais, quando a eficiência de mistura é considerada 100%, e observaram que o número de Péclet tende assintoticamente para o valor 2, quando o número de Reynolds é elevado.

Cambery e Breton (4) estudaram e determinaram a dispersão axial de água traçada para leitos de anéis de Raschig e de esferas e observaram que difusividade aumenta linearmente com Re , no intervalo de 0,5 a 100. Observaram ainda, a não concordância dos modelos "n-misturadores" e "difusão axial".

Jacques, Vermeulen e colaboradores (9), através da mudança dos parâmetros de correlação por eles já estipulada, conseguiram apresentar em um só gráfico todos os resultados que dispunham até então. Analisando-se esse gráfico pode-se notar a existência de dois patamares para o número de Péclet do líquido, um no regime laminar e outro no regime turbulento. A mesma coisa porém, não acontece com o gás, onde pode-se observar a existência de um valor praticamente constante para as regiões laminar e turbulenta. O gráfico representado na página seguinte é a correlação estipulada por Jacques, Vermeulen e colaboradores. (Fig.I.1)

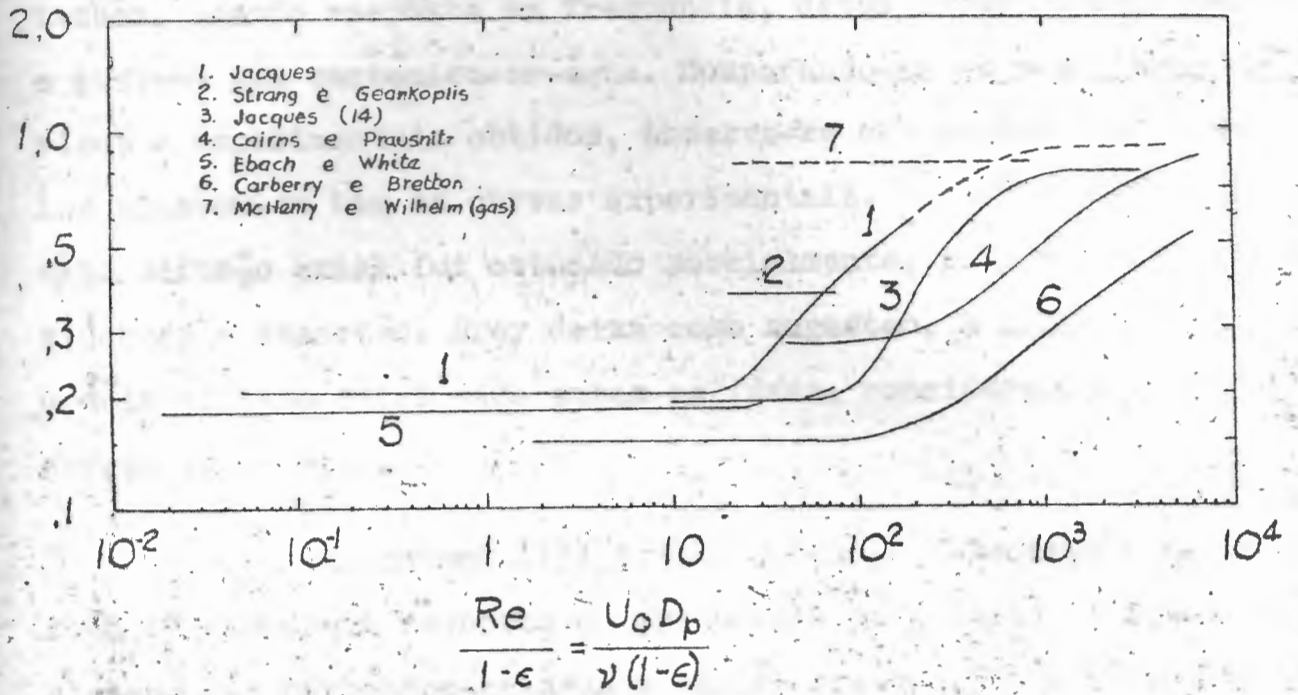


FIG. I.1 Correlação de Jacques et al.

Estudos em duas fases

Poucos são os estudos experimentais quando o escoamento é considerado em duas fases. Como se sabe a eficiência de operações tais como absorção, extração e destilação, são diminuídas pelo fenômeno de difusão axial (8).

O trabalho fundamental para escoamento em duas fases é o de Gray (7), que estudou a dinâmica de uma torre de absorção. Nesse estudo foram utilizados os modelos; "escoamento

empistonado", "n-misturadores" e "difusão axial". Gray obteve também, usando resposta em frequência, dados experimentais para o sistema gás carbônico-ar-água. Comparando-se os resultados teóricos e experimentais obtidos, observa-se que nenhum dos modelos ajustou-se bem às curvas experimentais. Nesse trabalho o modelo difusão axial foi estudado parcialmente, pois não foi considerada a absorção. Gray deixa como sugestão, a aplicação do modelo difusão axial para ambas as fases, considerando-se a absorção entre elas.

Massarani (13) usando o modelo "escoamento empistonado" estudou a resposta em frequência para ambas as fases do sistema gás carbônico-ar-água e amônia-ar-água. As curvas obtidas são quase coincidentes com as de Gray para o modelo empistonado. Os dois trabalhos citados, usam o mesmo modelo, mas condições de contorno diferentes, fato esse que parece não influir muito nos resultados.

Andrade (14) continuou o trabalho de Gray e Massarani usando o modelo "difusão axial", porém considerando a difusão somente na fase gasosa. O estudo foi realizado para o sistema gás carbônico-ar-água, e os resultados obtidos foram comparados com os resultados experimentais de Gray. As curvas obtidas apresentam desvios não explicáveis para frequências superiores a 4 ciclos por minuto, e parecem tender no limite ($E_G=0$), à curva teórica obtida por Massarani. Andrade avaliou a difusi-

vidade axial turbulenta em aproximadamente $40 \text{ ft}^2/\text{hr}$, valor êsse muito próximo ao utilizado por Gray.

MODELOS

Quatro são os modelos matemáticos que têm sido empregados para descrever o escoamento de fluidos em leitos porosos. Êsses modelos são:

- 1) Escoamento Empistonado
- 2) n-Misturadores
- 3) Difusão axial
- 4) Estatístico

O modelo "Escoamento Empistonado" considera o fluido movendo-se como um êmbolo no interior do equipamento. Por ignorar a mistura radial e axial é o mais simples dos modelos.

O modelo n-Misturadores, proposto por Kramers e Alberta (10), é constituído de uma série de estágios de misturas, isolados entre si, onde em qualquer instante o líquido e o gás é considerado completamente misturado.

O modelo "Difusão Axial" utiliza-se da 2ª lei de Fick e portanto, um termo equivalente a uma difusividade. Para o escoamento em uma só fase tem-se:

$$E \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - V \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial C}{\partial t}$$

onde C é a concentração, V é a velocidade média e E é a difusividade longitudinal turbulenta, onde estão envolvidos os efeitos de difusão molecular e de mistura.

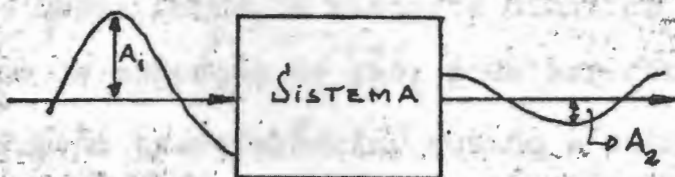
O modelo "Estatístico" é baseado na teoria estatística da turbulência em tubos não recheados; usa o conceito do "random walk" de Einstein em que se determina o livre percurso médio dos pequenos turbilhões dentro da corrente (8).

RESPOSTA EM FREQUÊNCIA

A resposta em frequência de um sistema é obtida através da função transferência do sistema.

Para um sistema linear essa função é definida como "a transformada de Laplace da saída dividida pela transformada de Laplace da entrada", desde que o quociente seja unívoco.

Considere-se o sistema abaixo (Torre de Absorção)



Variando-se a concentração do soluto no gás de entrada senoidalmente, em torno de um valor estabelecido tem-se:

$$y_1 = A_1 \text{ sen } (wt)$$

onde y_1 é o valor instantâneo da variação da concentração em regime estabelecido, A_1 é a amplitude e W a frequência. Se o sistema é descrito por equações lineares, para a saída tem-se:

$$y_2 = A_2 \text{ sen } (wt + \phi)$$

onde ϕ é o defasamento angular entre as duas senoides. Tomando-se a transformada de Laplace de y_1 e y_2 tem-se:

$$\mathcal{L} y_1 = A_1 \frac{w}{s^2 + w^2}$$

$$\mathcal{L} y_2 = A_2 \exp(\phi s/w) \frac{w}{s^2 + w^2}$$

A função transferência será:

$$G(s) = \frac{A_2}{A_1} \exp(\phi s/w)$$

Substituindo-se s por iw

$$G(iw) = \frac{A_2}{A_1} \exp(\phi i) = \underbrace{e^{\phi i}}_{\alpha} \frac{A_2}{A_1} e^{\phi i}$$

onde α é a razão de amplitude, ϕ é o defasamento angular e i é o imaginário puro $\sqrt{-1}$.

Dessa forma, a resposta dinâmica teórica do processo contínuo de absorção de gás, pode ser obtida diretamente a partir da função transferência, quando a entrada do gás é dada por um sinal senoidal.

CAPÍTULO II

DESENVOLVIMENTO MATEMÁTICO

Considere-se o elemento de coluna dado pela figura I.2, onde existe o movimento em contra corrente de duas fases: uma líquida e outra gasosa.

Através de um balanço de massa transiente para o soluto na fase líquida obtem-se (7):

$$\text{ENTRADA: } N_L + \frac{\partial}{\partial z} (N_L) dz + Nadz$$

por fluxo por absorção

$$\text{SAÍDA: } N_L$$

$$\text{ACUMULAÇÃO: } \frac{\partial}{\partial t} (h_L x) dz$$

Sabendo-se que:

$$\text{ENTRADA} - \text{SAÍDA} = \text{ACUMULAÇÃO}$$

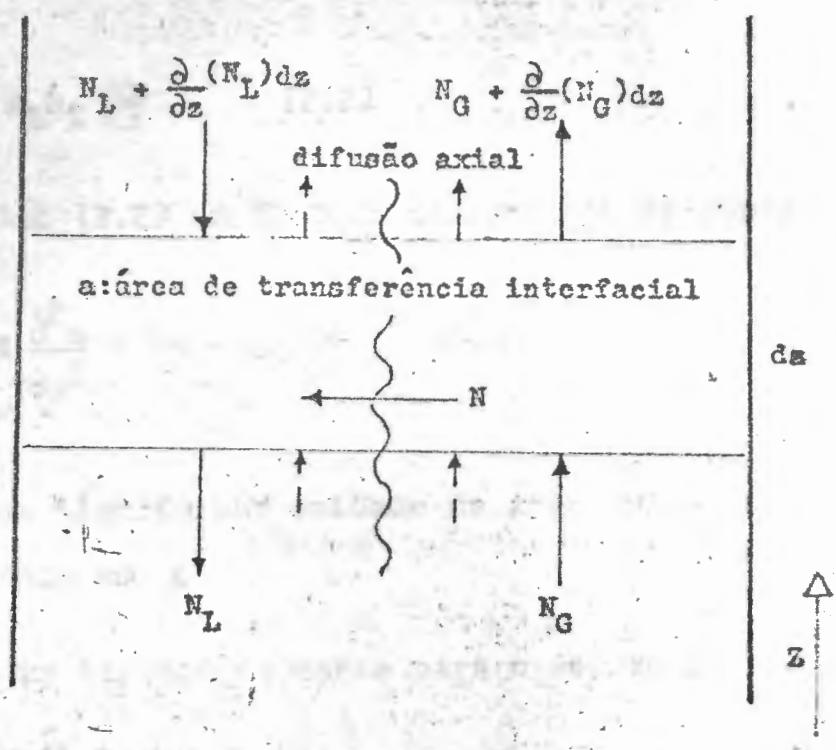
$$N_L + \frac{\partial}{\partial z} (N_L) dz + Nadz - N_L = \frac{\partial}{\partial t} (h_L x) dz$$

$$\frac{\partial}{\partial z} (N_L) dz + Nadz = \frac{\partial}{\partial t} (h_L x) dz \quad (1.2)$$

Considerando-se h_L constante em t e z e sabendo que o fluxo de massa é dado pela 2ª lei de Fick (3)

Onde,

- A : área de transferência interfacial, ft^2/ft^3 de leito
- h_G : retenções totais, $lbmoles/ft^3$
- N_L : vazão molar do líquido, $lbmoles/(ft^2-hr)$
- N_G : vazão molar do gás, $lbmoles/(ft^2-hr)$
- N_A : fluxo de massa por absorção, $lbmoles\ soluto/(ft^2-hr)$



N_G : fluxos de massa do soluto nas fases líquida e gás, $lbmoles\ soluto/(ft^2-hr)$, dadas pela 2ª lei de Fick:

$$N_L = - E_L h_L \frac{\partial x}{\partial z} + Lx$$

$$N_G = - E_G h_G \frac{\partial y}{\partial z} + Gy$$

onde,

E_L e E_G : difusividades axiais turbulentas, ft^2/hr

x e y : frações molares do soluto nas fases líquida e gás, adimensional.

z : coordenada de altura da torre, ft

FIGURA 1.2

$$N_L = L_x - E_L h_L \frac{dx}{dz} \quad (2.2)$$

Substituindo-se então (2.2) em (1.2) e manipulando-se convenientemente tem-se:

$$L \frac{dx}{dz} - h_L E_L \frac{\partial^2 x}{\partial z^2} + Na = h_L \frac{\partial x}{\partial t} \quad (3.2)$$

onde

L = vazão molar de líquido por unidade de área foi considerada constante em z

De maneira análoga um balanço de massa para o soluto na fase gasosa fornece:

$$-G \frac{\partial y}{\partial z} + h_G E_G \frac{\partial^2 y}{\partial z^2} - Na = h_G \frac{\partial y}{\partial t} \quad (4.2)$$

onde

h_G é considerado constante em t e z

G é considerado constante em z

A taxa de transferência de massa é assumida ser proporcional ao gradiente de concentração, isto é,

$$N = k_L (x^* - x) \quad (5.2)$$

onde

k_L = coef. de transf. de massa lb moles/hr-ft²-fração molar

x^* = composição de equilíbrio

A interfase líquido-gás será suposta permanentemente em equilíbrio, equilíbrio esse que será quantitativamente descrito pela lei de Henry

$$y = m x^* \quad (6.2)$$

onde

m = inclinação da linha de equilíbrio

Substituindo-se as equações (5.2) e (6.2) em (3.2) e (4.2),

tem-se:

$$L \frac{\partial x}{\partial z} - \frac{h_L E}{L} \frac{\partial^2 x}{\partial z^2} + k_L a (y/m - x) = h_L \frac{\partial x}{\partial t} \quad (7.2)$$

$$-G \frac{\partial y}{\partial z} + \frac{h_G E}{G} \frac{\partial^2 y}{\partial z^2} - k_L a (y/m - x) = h_G \frac{\partial y}{\partial t} \quad (8.2)$$

Seja a seguinte mudança de variável

$$\xi = \frac{z}{l}$$

onde

ξ = altura reduzida

l = comprimento de "leito"

Dessa forma as equações (7.2) e (8.2) podem ser escritas co

mo segue:

$$\frac{\partial x}{\partial \xi} - \frac{h_L E}{L l} \frac{\partial^2 x}{\partial \xi^2} + \frac{k_L a l}{L} (y/m - x) = \frac{h_L l}{L} \frac{\partial x}{\partial t} \quad (9.2)$$

$$- \frac{\partial y}{\partial \xi} + \frac{h_G E}{G l} \frac{\partial^2 y}{\partial \xi^2} + \frac{k_L a l}{G} (y/m - x) = \frac{h_G l}{G} \frac{\partial y}{\partial t} \quad (10.2)$$

Introduzindo-se agora o número de Peclet definido como sendo o produto do número de Reynolds e Schmidt

$$Pe' = Re.Sc = \left(\frac{Dv\rho}{\mu}\right) \cdot \left(\frac{\mu}{\rho D_{AB}}\right) = \frac{DV}{D_{AB}} \quad (11.2)$$

onde:

D é um comprimento característico

D_{AB} é a difusividade de A em B

V é a velocidade intersticial do líquido

Fazendo-se o comprimento do leito ser o comprimento característico e a difusividade ser a axial turbulenta difusividade o número de Peclet será:

$$Pe_L = \frac{V_L l}{E_L} = \frac{L l}{h_L E_L} \quad (12.2)$$

$$Pe_g = \frac{V_G l}{E_G} = \frac{G l}{h_G E_G} \quad (13.2)$$

onde:

$V_L = \frac{L}{h_L}$ é a velocidade intersticial do líquido e

$V_G = \frac{G}{h_G}$ é a velocidade intersticial do vapor

As equações (12.2) e (13.2) representam respectivamente o número de Peclet para a fase líquida e gasosa.

Definindo-se ainda

$$\begin{aligned}
 T_L &= \frac{h_L l}{L} && \text{tempo de residência do líquido na torre, hr} \\
 T_G &= \frac{h_G l}{G} && \text{tempo de residência do gás na torre, hr} \\
 (14.2) \quad N_{oL} &= \frac{k_L a l}{L} && \text{nº de unidades de transf. para fase líquida} \\
 N_{oG} &= \frac{k_G a l}{G} && \text{nº de unidades de transf. para fase gasosa}
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

Substituindo-se as equações (12.2), (13.2) e (14.2) nas equações (9) e (10) obteremos:

$$\frac{\partial^2 x}{\partial s^2} - Pe_L \frac{\partial x}{\partial s} - Pe_L N_{oL} \left(\frac{y}{m} - x \right) = - T_L Pe_L \frac{\partial x}{\partial t} \tag{15.2}$$

$$\frac{\partial^2 y}{\partial s^2} - Pe_G \frac{\partial y}{\partial s} - Pe_G N_{oG} \left(\frac{y}{m} - x \right) = T_G Pe_G \frac{\partial y}{\partial t} \tag{16.2}$$

Considerando-se a coluna operando em regime permanente quando $t = 0$ e definindo-se as novas concentrações Y e X como desvios da condição inicial.

$$x(z, 0) \quad \text{e} \quad y(z, 0)$$

$$X(z, t) = x(z, t) - x(z, 0)$$

$$Y(z, t) = y(z, t) - y(z, 0)$$

Demonstra-se que as equações (15.2) e (16.2) continuam válidas quando substituímos x e y por X e Y .

Tomando-se a transformada de Laplace, em relação ao tempo, das equações (15.2) e (16.2), definida como:

$$\bar{X} = \mathcal{L}X = \int_0^{\infty} e^{-st} X dt$$

$$\bar{Y} = \mathcal{L}Y = \int_0^{\infty} e^{-st} Y dt$$

As equações transformadas serão:

$$\frac{d^2 \bar{X}}{ds^2} - Pe_L \frac{d\bar{X}}{ds} - N_{oL} Pe_L \left(\frac{\bar{Y}}{m} - \bar{X} \right) = - T_L Pe_L s \bar{X}$$

$$\frac{d^2 \bar{Y}}{ds^2} - Pe_G \frac{d\bar{Y}}{ds} - N_{oG} Pe_G \left(\frac{\bar{Y}}{m} - \bar{X} \right) = T_G Pe_G s \bar{Y}$$

pois:

$$\mathcal{L} \left[\frac{dX}{dt} \right] = s\bar{X} - X(s; 0)$$

onde

$$X(s; 0) = 0$$

Rearranjando-se as equações acima e utilizando-se a notação

"linha" tem-se:

$$\frac{1}{Pe_L} \cdot \bar{X}'' - \bar{X}' + (N_{oL} + T_L s) \bar{X} = \frac{N_{oL}}{m} \bar{Y} \quad (17.2)$$

$$\frac{1}{Pe_G} \cdot \bar{Y}'' - \bar{Y}' - \left(\frac{N_{oG}}{m} + T_G s \right) \bar{Y} = - N_{oG} \bar{X} \quad (18.2)$$

Tem-se então um sistema de equações que podem ser resolvidos para a fase gasosa ou para a fase líquida.

SOLUÇÃO PARA A FASE GASOSA

O sistema formado pelas equações (17.2) e (18.2), será resolvido explicitando-se o valor de \bar{X} na equação (18.2) e determinando-se as derivadas 1ª e 2ª de \bar{X} em relação a ξ . Em seguida esses valores são substituídos (17.2) resultando uma equação diferencial ordinária de 4ª ordem.

$$B\bar{Y}^{IV} + F\bar{Y}^{III} + J\bar{Y}^{II} + M\bar{Y}^I + VY = 0 \quad (19.2)$$

onde (14):

$$B = -\frac{1}{N_{OG}} \left(\frac{1}{Pe_L} \frac{1}{Pe_G} \right)$$

$$F = \frac{1}{N_{OG}} \left(\frac{1}{Pe_L} + \frac{1}{Pe_G} \right)$$

$$J = \left(\frac{1}{N_{OG} Pe_L} \right) \left(\frac{N_{OL}}{m} + T_G s \right) - \left(\frac{1}{N_{OL} Pe_G} \right) (N_{OL} + T_L s) - \frac{1}{N_{OG}}$$

$$M = \left(\frac{1}{N_{OG}} \right) \left(N_{OL} - \frac{N_{OG}}{m} + T_L s - T_G s \right)$$

$$V = \left(\frac{1}{N_{OG}} \right) \left(\frac{N_{OG}}{m} + T_G s \right) (N_{OL} + T_L s) - \frac{N_{OL}}{m}$$

A equação (19.2) pode ser escrita como

$$\left[D^4 + \frac{F}{B} D^3 + \frac{J}{B} D^2 + \frac{M}{B} D + \frac{V}{B} \right] \bar{Y} = 0 \quad (20.2)$$

equação cuja solução é

$$\bar{Y} = c_1 e^{r_1 \xi} + c_2 e^{r_2 \xi} + c_3 e^{r_3 \xi} + c_4 e^{r_4 \xi} \quad (21.2)$$

onde

r_1, r_2, r_3 e r_4 são as raízes da equação característica

$$r^4 + \frac{F}{B} r^3 + \frac{J}{B} r^2 + \frac{M}{B} r + \frac{V}{B} = 0$$

cujos coeficientes são funções do parâmetro λ , da Transformada de Laplace.

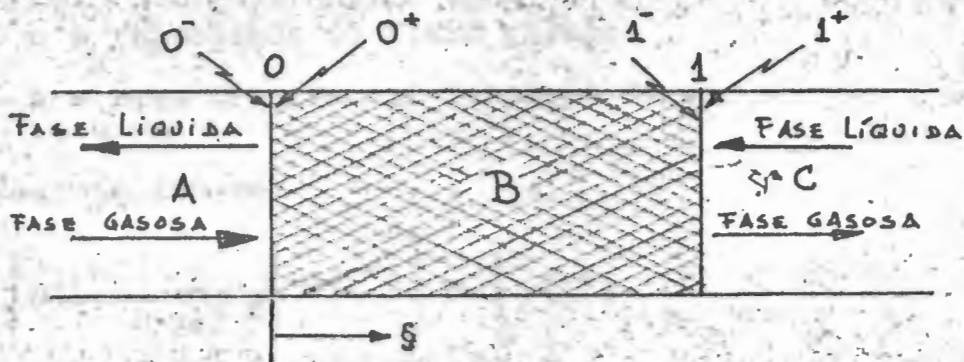
CONDIÇÕES DE CONTÓRNO

A solução da equação (21.2) dependerá da natureza das condições de contorno associadas ao problema.

Muito pouco existe na literatura com relação as condições de contorno para escoamento em duas fases.

O artigo de Wehner e Wilhelm (16) parece fornecer sugestões que conduzem a condições de contorno mais aceitáveis para o problema quando é considerada a difusão axial nas duas fases.

Considere-se que a região que forma o "leito de Recheio" esteja situada entre 0 e 1 na figura da página seguinte.



Seja A a região de antecede o leito;
 B a região correspondente ao leito e
 C a região posterior ao leito.

Inicialmente será admitida a existência de difusão nas três regiões A, B e C.

Um balanço material para a fase gasosa no topo da coluna ($s = 1$) fornece:

$$u_c A_c \left[y(1^+) - \frac{1}{Pe_G^C} \frac{d}{ds} y(1^+) \right] = u_b A_b \left[y(1^-) - \frac{1}{Pe_G^B} \frac{d}{ds} y(1^-) \right]$$

onde

Pe_G^C = nº de Peclet do gás na região C

Pe_G^B = nº de Peclet do gás na região B

mas, pela equação da continuidade têm-se:

$$u_c A_c = u_b A_b = u_a A_a$$

onde

u = velocidade do fluxo gasoso

A = área transversal da seção de escoamento

Portanto tem-se:

$$\left[y(1^+) - \frac{1}{Pe_G^C} \frac{d}{ds} y(1^+) \right] = \left[y(1^-) - \frac{1}{Pe_G^B} \frac{d}{ds} y(1^-) \right]$$

Esta equação continuará válida substituindo-se y por Y , isto é, pelo valor da concentração em torno do regime estabelecido. Considerando-se que na região C não existe difusão ($Pe_G^C \rightarrow \infty$) e tomando a Transformada de Laplace, a expressão acima se transforma em:

$$\bar{Y}(1^+) = \bar{Y}(1^-) - \frac{1}{Pe_G} \frac{d\bar{Y}(1^-)}{ds}$$

Considerando-se ainda que a fase gasosa no topo da coluna não sofre descontinuidade, então

$$\bar{Y}(1^+) = \bar{Y}(1^-)$$

e portanto

$$\frac{d\bar{Y}(1^-)}{ds} = 0 \quad (23.2)$$

Um balanço material para a fase gasosa na base da coluna ($s = 0$) fornece:

$$u_A A_A \left[y(0^-) - \frac{1}{Pe_G^A} \frac{dy(0^-)}{ds} \right] = u_B A_B \left[y(0^+) - \frac{1}{Pe_G^B} \frac{dy(0^+)}{ds} \right]$$

mas

$$u_A A_A = u_B A_B$$

e considerando-se ainda a inexistência de difusão na região A ($Pe_G^A \rightarrow \infty$), então a equação acima pode ser escrita

$$\bar{Y}_1 = \bar{Y}(0^-) = \bar{Y}(0^+) - \frac{1}{Pe_G} \frac{d\bar{Y}(0^+)}{d\bar{s}} \quad (24.2)$$

onde \bar{Y}_1 é a transformada de Laplace de $y(0^-) = A \sin wt$

De maneira análoga, pode-se obter mais duas condições de contorno semelhantes para a fase líquida, ou seja:

$$\frac{d\bar{X}(0^+)}{d\bar{s}} = 0 \quad (25.2)$$

$$\bar{X}(1^+) = 0 = \bar{X}(1^-) - \frac{1}{Pe_L} \frac{d\bar{X}(1^-)}{d\bar{s}} \quad (26.2)$$

As condições de contorno expressas pelas equações (25.2) e (26.2) não podem ser diretamente aplicadas à equação (21.2) pois são condições em \bar{X} , enquanto a equação (21.2) é em \bar{Y} , somente.

Assim sendo, as expressões (25.2) e (26.2) serão colocadas em função de \bar{Y} . Para isso explicita-se o valor de \bar{X} na equação (18.2) e calcula-se $\frac{d\bar{X}}{d\bar{s}}$

Usando-se então (25.2) obtém-se:

$$\frac{1}{Pe_G} \bar{Y}^{III}(0^+) - \bar{Y}^{II}(0^+) - \left[\frac{N_{OG}}{m} + T_{Gs} \right] \bar{Y}^I(0^+) = 0 \quad (27.2)$$

De maneira análoga usando-se a equação (26.2), depois de algumas manipulações algébricas têm-se:

$$\frac{1}{Pe_L \cdot Pe_G} \bar{Y}^{III}(1^-) - \left[\frac{1}{Pe_G} + \frac{1}{Pe_L} \right] \bar{Y}^{II}(1^-) - \frac{N_{oG}}{m} - T_{Gs} \bar{Y}(1^-) = 0 \quad (28.2)$$

Portanto as equações 23.2, 24.2, 27.2 e 28.2 também são condições de contorno para o problema.

Convém observar que se Pe_G e $Pe_L \rightarrow \infty$ as condições de contorno expressas por 24.2 e 26.2 ficam.

$$\bar{Y}_1 = \bar{Y}(0^+) \quad 29.2$$

$$\bar{X}(1^-) = \bar{X}(1^+) = 0 \quad 30.2$$

que foram as condições de contorno usadas por Massarani (13).

Nesse trabalho o problema será resolvido para dois grupos distintos de condições de contorno, a saber:

GRUPO I equações n.ºs. 23.2, 25.2, 29.2 e 30.2

GRUPO II equações n.ºs. 23.2, 24.2, 25.2 e 30.2

APLICAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CONTÓRNO

Derivando-se a equação (21.2) e aplicando-se a condição de contorno (23.2) têm-se:

$$\sum_{i=1}^4 C_i r_i e^{r_i} = 0 \quad (31.2)$$

Aplicando-se a condição de contorno (24.2) têm-se:

$$\sum_{i=1}^4 C_i (1 - r_i / Pe_G) = \bar{Y}_1 \quad (32.2)$$

Para a condição de contorno (29.2) a equação (32.2) fica.

$$\sum_{i=1}^4 C_i = \bar{Y}_1 \quad (32.2a)$$

Aplicando-se agora a condição de contorno expressa por (25.2), e após algumas manipulações algébricas tem-se:

$$\sum_{l=1}^4 C_l r_l \left[r_l (r_l / Pe_G - 1) - (N_{OG}/m - T_{GWl}) \right] = 0 \quad (33.2)$$

Aplicando-se a condição dada por (30.2) tem-se:

$$\sum_{l=1}^4 C_l e^{r_l} \left[(N_{OG}/m - T_{GWl}) - (r_l^2 / Pe_G) \right] = 0 \quad (34.2)$$

Nas equações acima o parâmetro s já foi substituído por $i\omega$.

As equações (31.2), (32.2), (32.2a), (33.2) e (34.2) formam dois sistemas de 4 equações a 4 incógnitas, que nos permite determinar os valores de C_1 , C_2 , C_3 e C_4 , para os.... dois casos distintos em questão.

Os dois sistemas podem ser assim escritos:

Condições de Contorno

GRUPO II

$$\sum_{l=1}^4 \alpha_l C_l = \bar{Y}_1$$

$$\sum_{l=1}^4 \beta_l C_l = 0$$

$$\sum_{l=1}^4 \gamma_l C_l = 0$$

$$\sum_{l=1}^4 \theta_l C_l = 0$$

GRUPO I

$$\sum_{l=1}^4 C_l = \bar{Y}_1$$

$$\sum_{l=1}^4 \beta_l C_l = 0$$

$$\sum_{l=1}^4 \gamma_l C_l = 0$$

$$\sum_{l=1}^4 \theta_l C_l = 0$$

onde:

$$\alpha_i = \left[1 - \frac{r_i}{Pe_G} \right]$$

$$\beta_i = r_i e^{r_i}$$

$$\gamma_i = r_i \left[r_i \left(\frac{r_i}{Pe_G} - 1 \right) - \left(\frac{N_{oG}}{m} + T_G w_1 \right) \right]$$

$$\theta_i = e^{r_i} \left[\left(\frac{N_{oG}}{m} + T_G w_1 \right) - \frac{r_i^2}{Pe_G} \right]$$

Conhecidas as raízes da equação (22.2) os sistemas de equações podem ser resolvidos, obtendo-se assim as 4 constantes C_i para os dois casos em questão: Nesse trabalho os sistemas serão resolvidos por inversão de matriz, através de um programa de computador.

Função Transferência

A função transferência é por definição a transformada de Laplace da saída, dividida pela transformada de Laplace da entrada, ou seja:

$$G(i\omega) = \frac{\bar{Y}(s)}{\bar{Y}(0)} = \frac{C_1 e^{r_1} - C_2 e^{r_2} - C_3 e^{r_3} - C_4 e^{r_4}}{Y_1} \quad ?$$

Calculadas as raízes e as constantes a função transferência está determinada. Deve-se notar que tanto as raízes como as constantes são números complexos.

Como é conhecido da teoria de resposta em frequência a razão de amplitude é:

$$\alpha = |G| = \sqrt{R[G]^2 + I[G]^2}$$

e o defazamento angular θ será:

$$\theta = \arctg \frac{I[G]}{R[G]}$$

Para efeito de comparação com os resultados de Gray (7) vamos definir:

$$\alpha' = \frac{\alpha}{\alpha_0} = \frac{\alpha}{\lim_{w \rightarrow 0} \alpha}$$

onde

α' é o valor de α normalizado.

CAPÍTULO III

RESULTADOS e DISCUSSÕES

O programa de computador digital utilizado para obter a resposta em frequência da torre de absorção é apresentado no apêndice A. No apêndice B são apresentadas as tabelas com todos os valores usados e calculados neste trabalho.

Os dados necessários para a solução teórica do problema que devem ser conhecidos são:

- 1) Dimensões da Coluna.
- 2) Especificações do Leito.
- 3) Vazão de líquido e de gás.
- 4) Dados de equilíbrio (m)
- 5) Dados de transferência de massa por absorção.
- 6) Dados de dispersão axial.

Os dados acima referidos foram introduzidos no programa através dos grupos N_{o1} , N_{oG} , T_L , T_G , Pe_L e Pe_G e foram os mesmos que Gray (7) e Andrade (14) usaram em seus estudos teóricos.

Os números de Peclet para a fase líquida e gasosa foram avaliados inicialmente pela correlação de Jacques et al (9) e os valores encontrados foram $Pe_G = 230$ e $Pe_L = 270$

A função transferência para os valores dos números de Peclet acima citados não pode ser determinada, pois os valores que apareciam durante os cálculos ultrapassava a capacidade da máquina utilizada (I.B.M.1620).

Assim sendo os valores dos números de Peclet utilizados foram:

$$Pe_G = 1, 2, 5 \text{ e } 10$$

$$Pe_L = 50, 60, 70, 80, 90, 110 \text{ e } 130$$

A comparação dos resultados teóricos obtidos neste trabalho, com os resultados experimentais de Gray (7) e com os resultados teóricos de Massarani (13) e Andrade (14) são apresentados nas figuras 3, 4, 5 e 6, conforme as condições de contorno utilizadas.

Conforme pode ser observado nas figuras 3 e 4 as curvas da razão de amplitude (α') contra a frequência obtidas neste trabalho, de um modo geral, dão valores de α' maiores quando são usadas as condições de contorno do grupo I.

Essas variações de α' parecem mostrar que a solução do problema fica bastante afetada para pequenas variações nas condições de contorno utilizadas.

Também para ambos os casos (I e II) as curvas para valores de $Pe_G = 1$ e 2 apresentam desvios, que talvez possam ser explicados pelos baixos valores de Pe_G , pois a medida que Pe_G aumenta ($Pe_G = 5$ e 10), pode-se observar que as curvas apresentam andamento normal. Deve-se notar que a medida que aumenta-se o valor de Pe_G e Pe_L as curvas tendem a curva teórica obtida por Massarani (13).

Mantendo-se fixo o valor de Pe_L e variando-se o valor de Pe_G , pode-se observar que as curvas obtidas neste trabalho (Fig. 5 e 6) são semelhantes as obtidas por Andrade (14) embora

os valores de α' para um mesmo Pe_G sejam diferentes, o que, era de se esperar pois, nos dois casos os números de Peclet para a fase líquida são bem diferentes.

O modelo adotado neste trabalho representa melhor os dados experimentais, quando são usadas as condições de contorno do grupo I e para valores do número de Peclet para a fase gasosa maior que 5 e para a fase líquida maior que 70, e para a frequência até 2 ciclos/minuto.

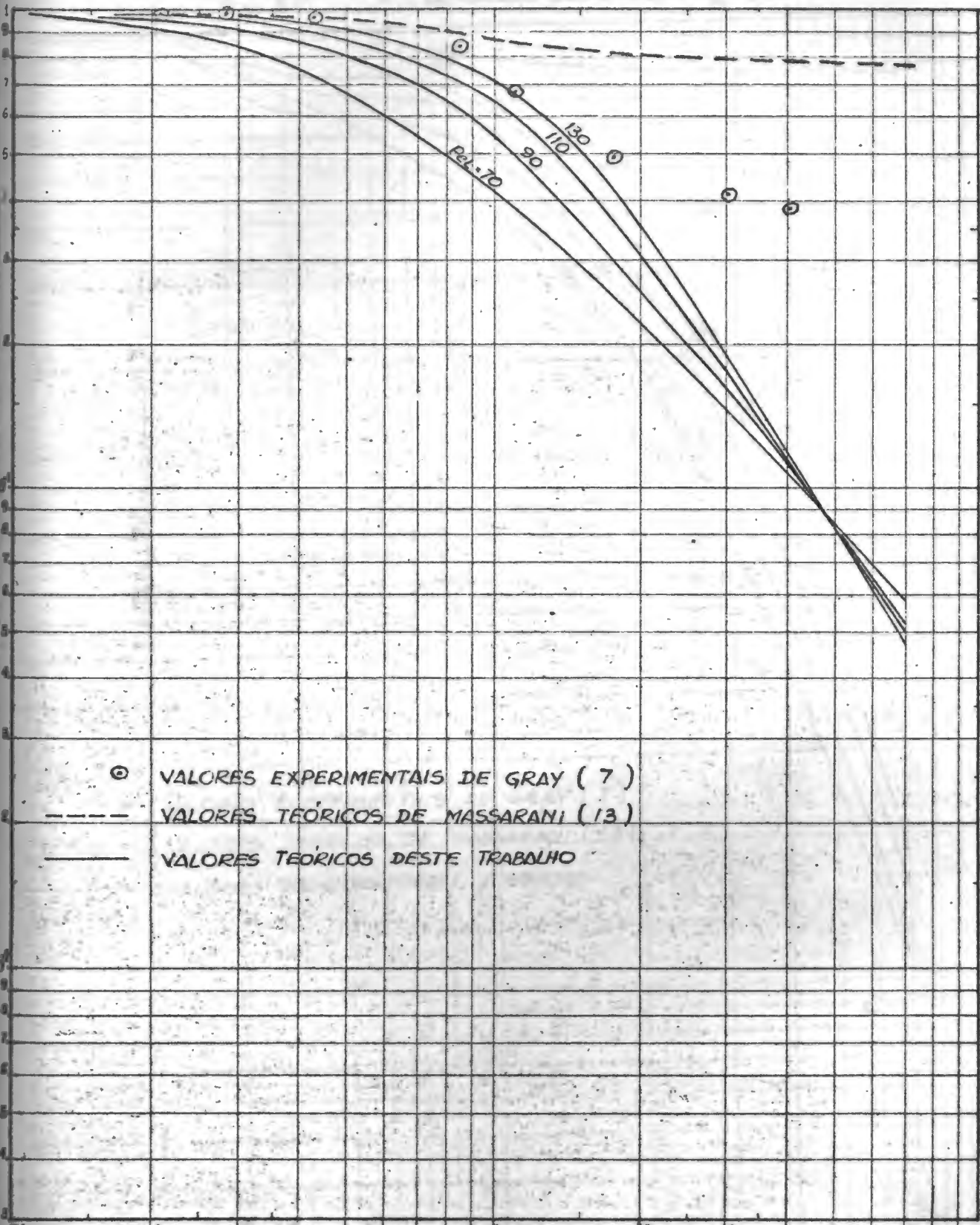
Quanto a utilização do modelo para projetos de controle, observa-se que a faixa de aplicabilidade é igual as dos modelos estudados por Massarani (13) e Andrade (14), isto é, para frequência até 2 ciclos/minuto.

Nesse trabalho não foi calculado o defasamento angular, pois, conforme já ficou evidenciado nos trabalhos de Massarani (13) e Andrade (14) o defasamento angular apresenta-se sempre bem próximos aos valores experimentais de Gray (7).

FIGURA 3a

$Pe_0 = 1.0$

CONDIÇÕES DE CONTÓRNO GRUPO I



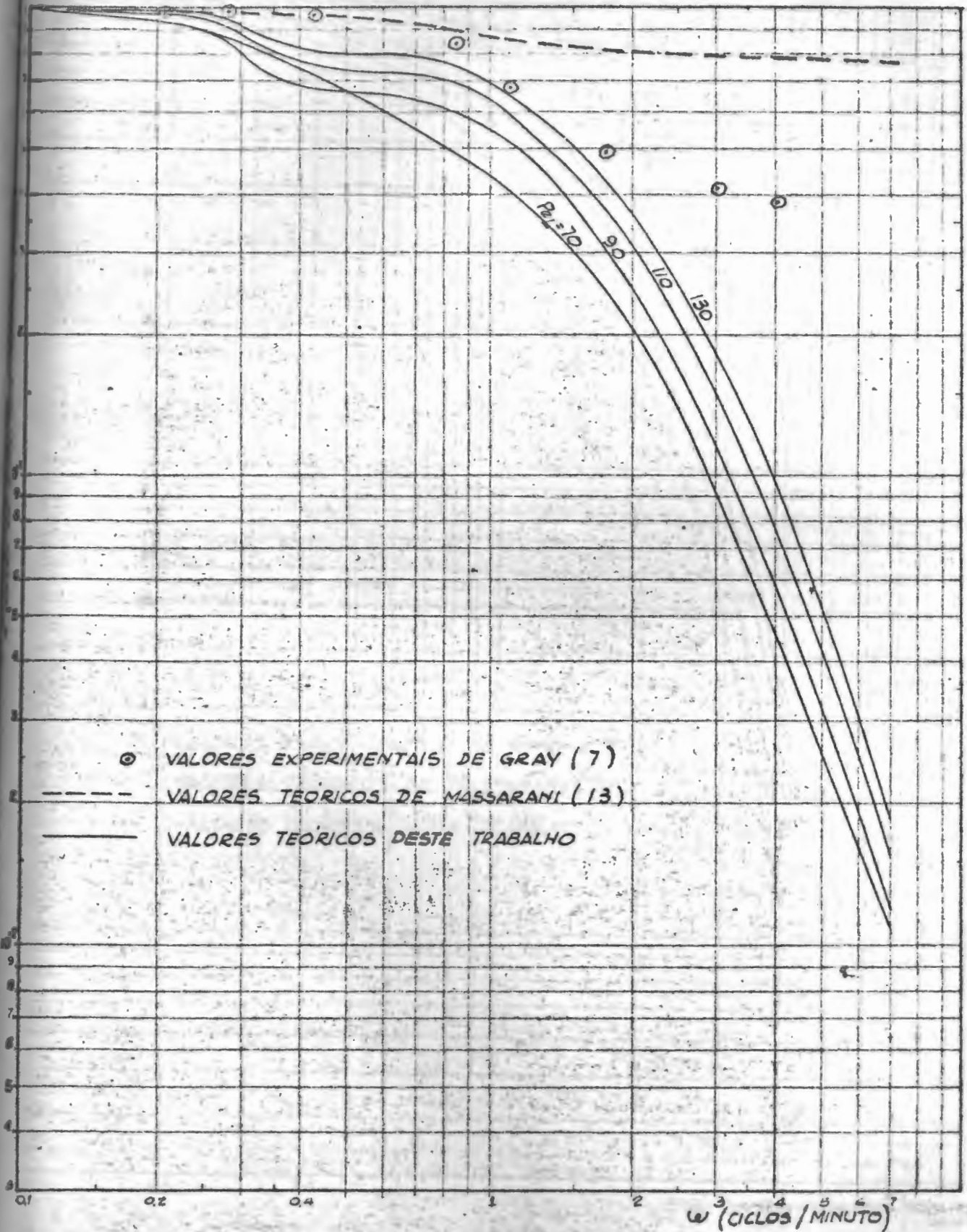
- ⊙ VALORES EXPERIMENTAIS DE GRAY (7)
- VALORES TEÓRICOS DE MASSARANI (13)
- VALORES TEÓRICOS DESTE TRABALHO

ω (CICLOS/MINUTO)

FIGURA 3b

$P_{eq} = 2.0$

CONDIÇÕES DE CONTÓRNO GRUPO I



⊙ VALORES EXPERIMENTAIS DE GRAY (7)

--- VALORES TEÓRICOS DE MASSARANI (13)

— VALORES TEÓRICOS DESTE TRABALHO

FIGURA 3c

$Pe_G = 5.0$

CONDIÇÕES DE CONTÓRNO GRUPO I

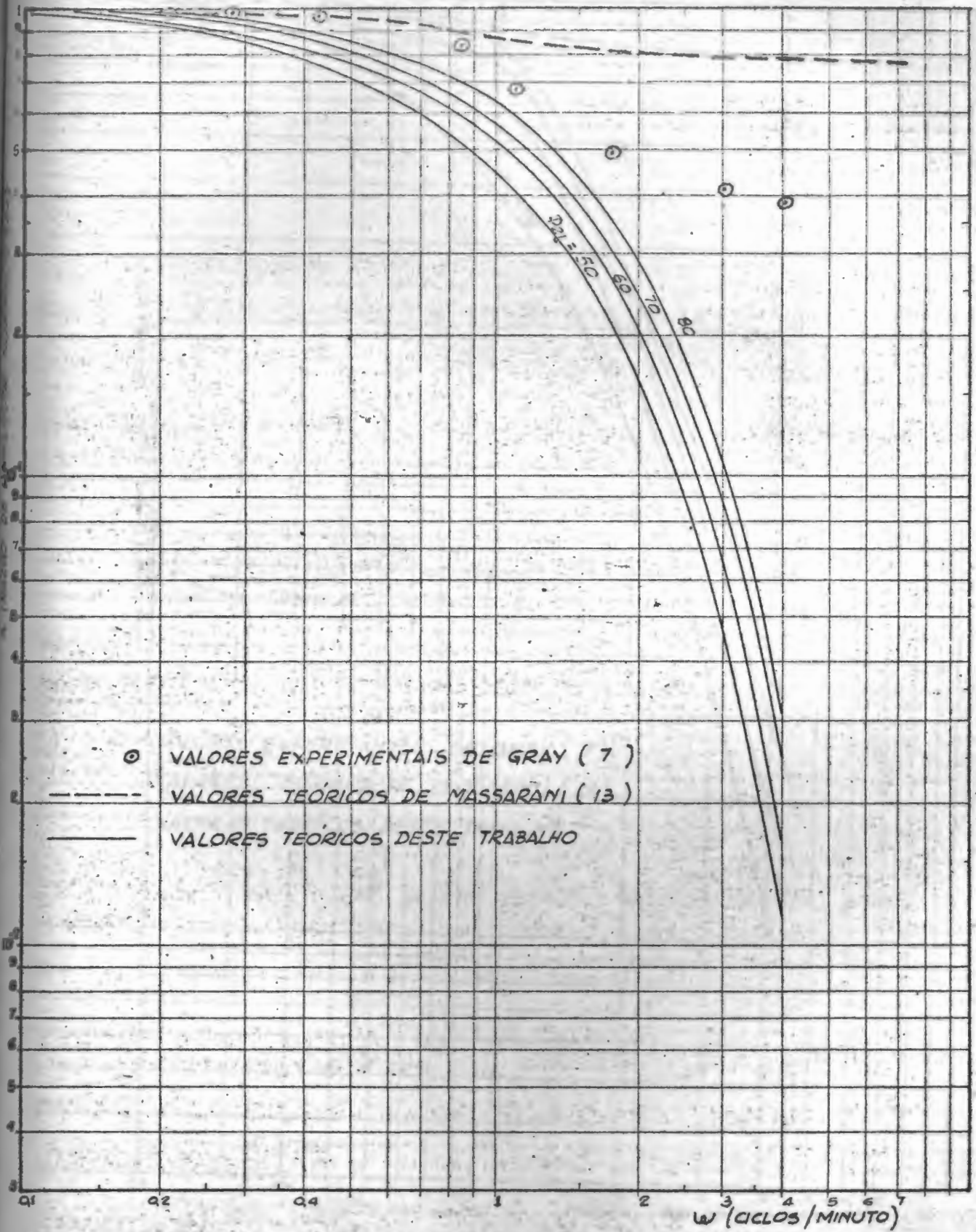
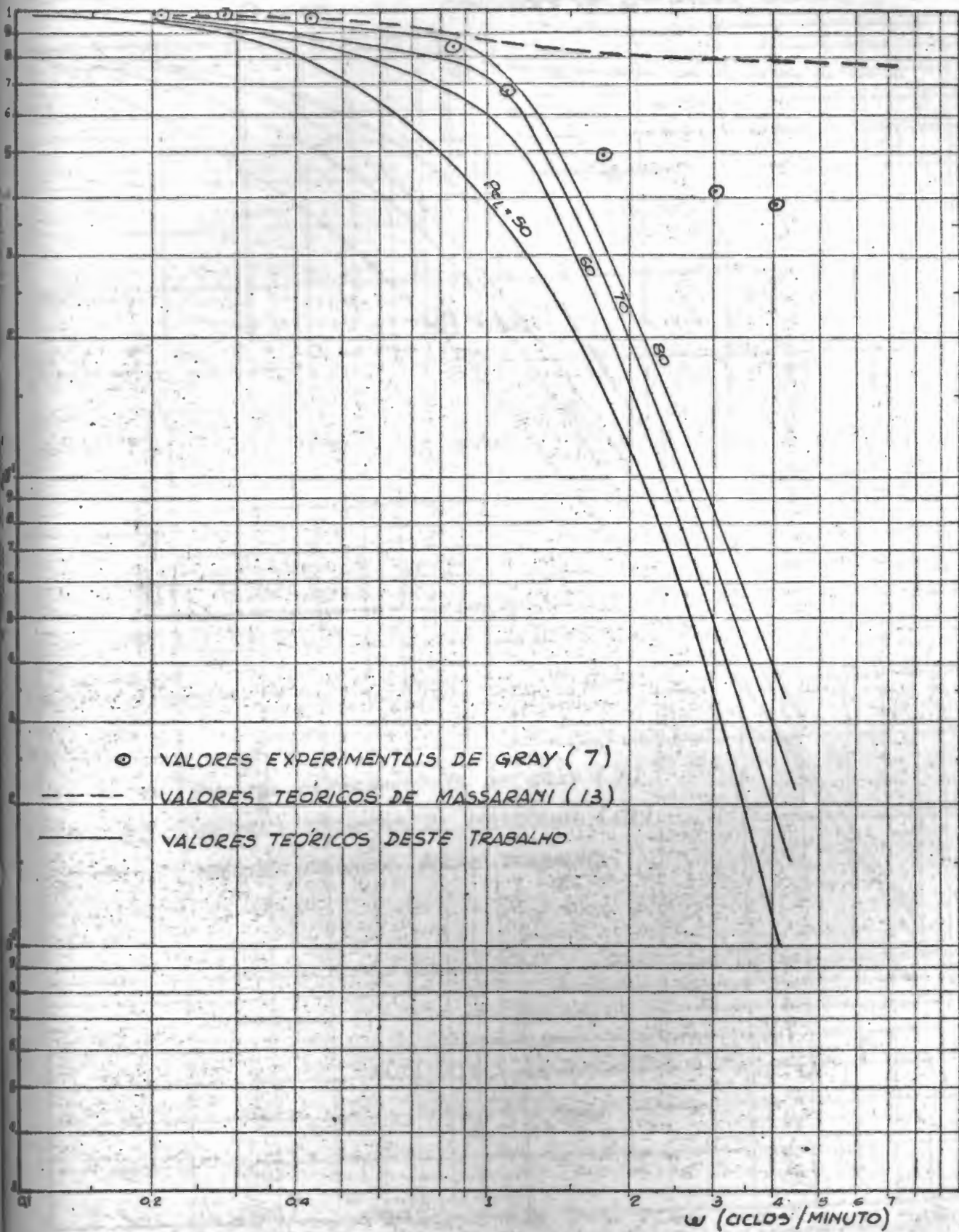


FIGURA 3d

Peq. 10.0

CONDIÇÕES DE CONTÓRNO GRUPO I



- VALORES EXPERIMENTAIS DE GRAY (7)
- VALORES TEÓRICOS DE MASSARANI (13)
- VALORES TEÓRICOS DESTE TRABALHO

FIGURA 4a

$P_{e_0} = 1.0$

CONDIÇÕES DE CONTÓRNO GRUPO II

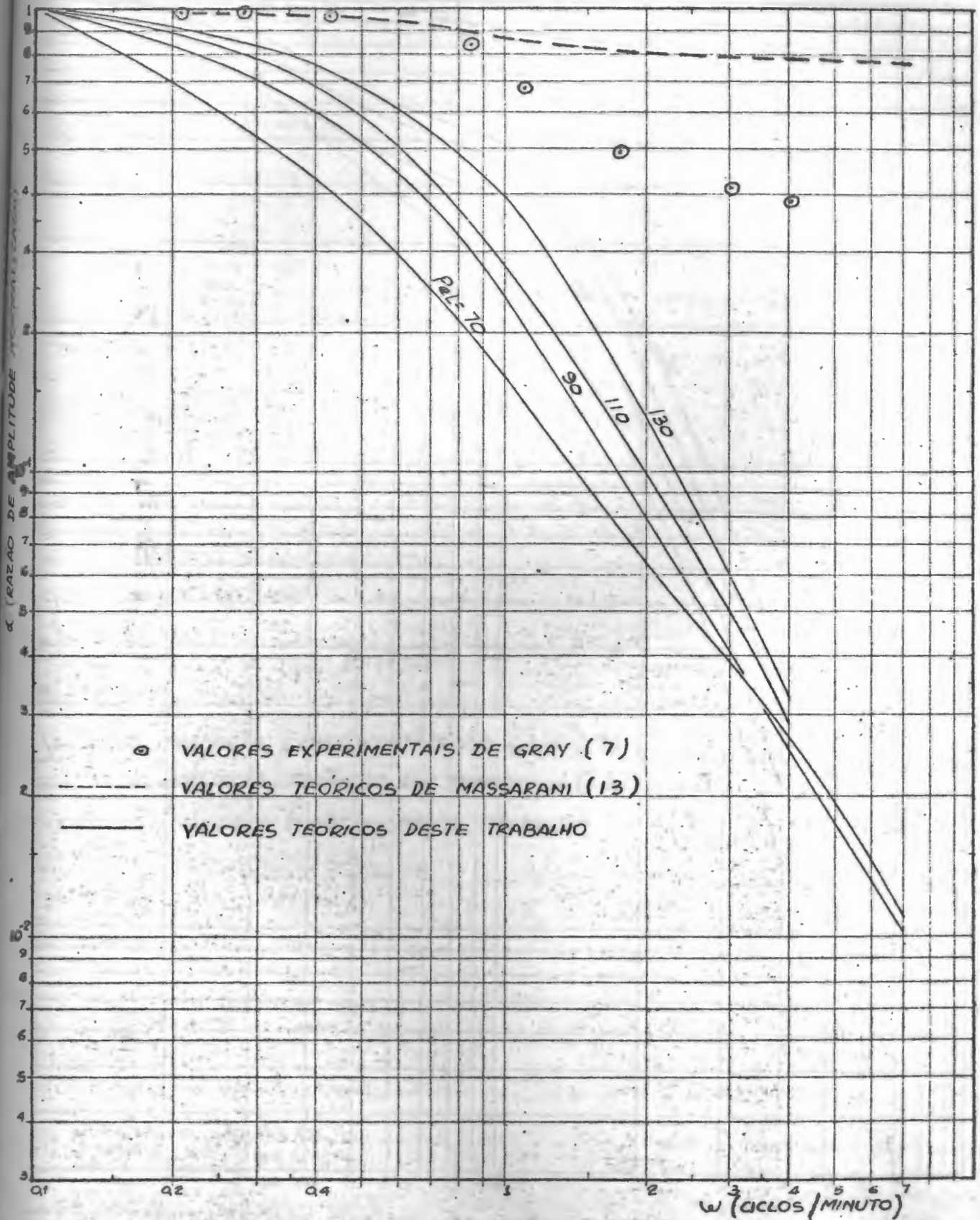


FIGURA 46

$P_{eq} = 2.0$

CONDIÇÕES DE CONTÓRNO GRUPO II

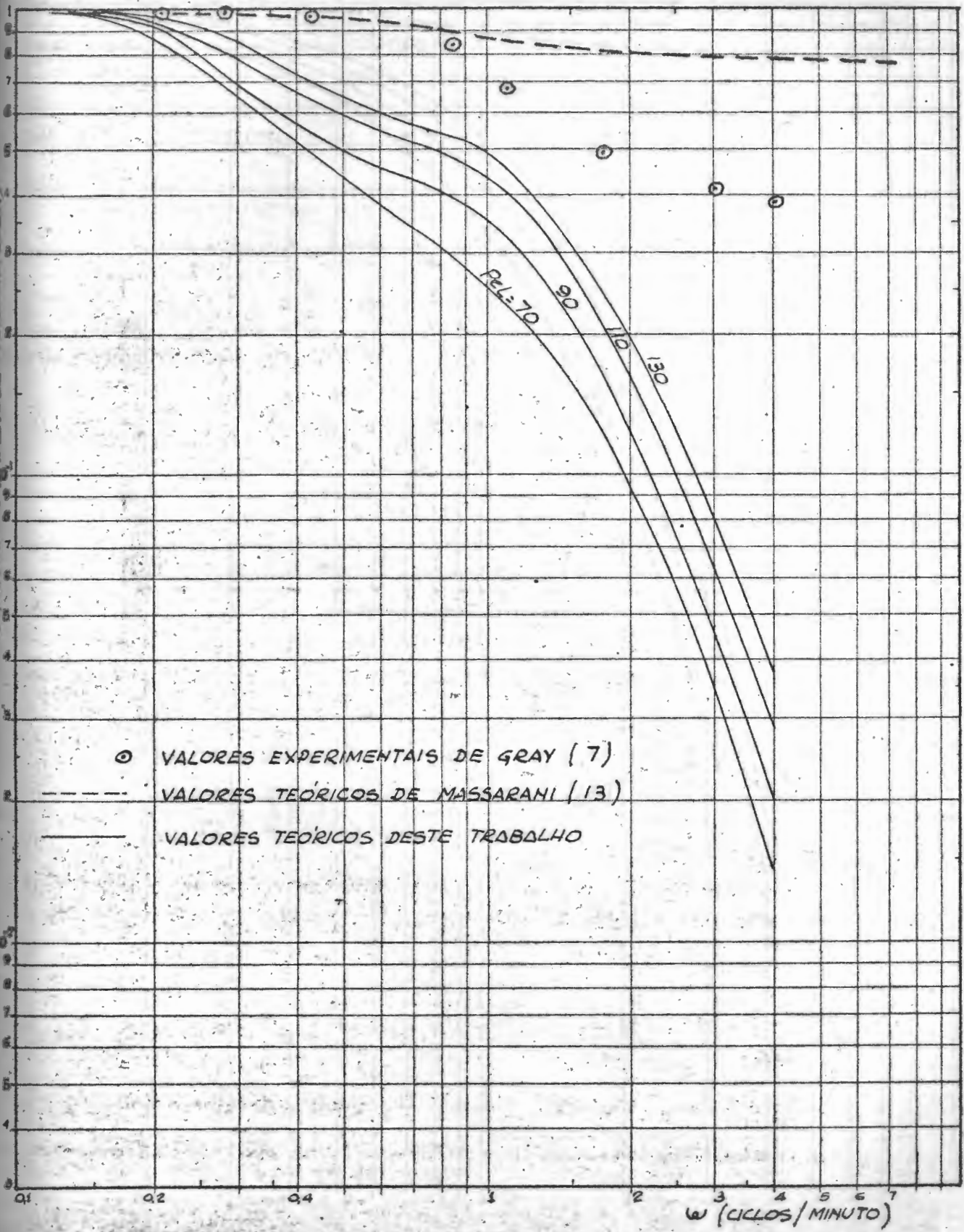


FIGURA 4C

Pesq. 50

CONDIÇÕES DE CONTORNO GRUPO II

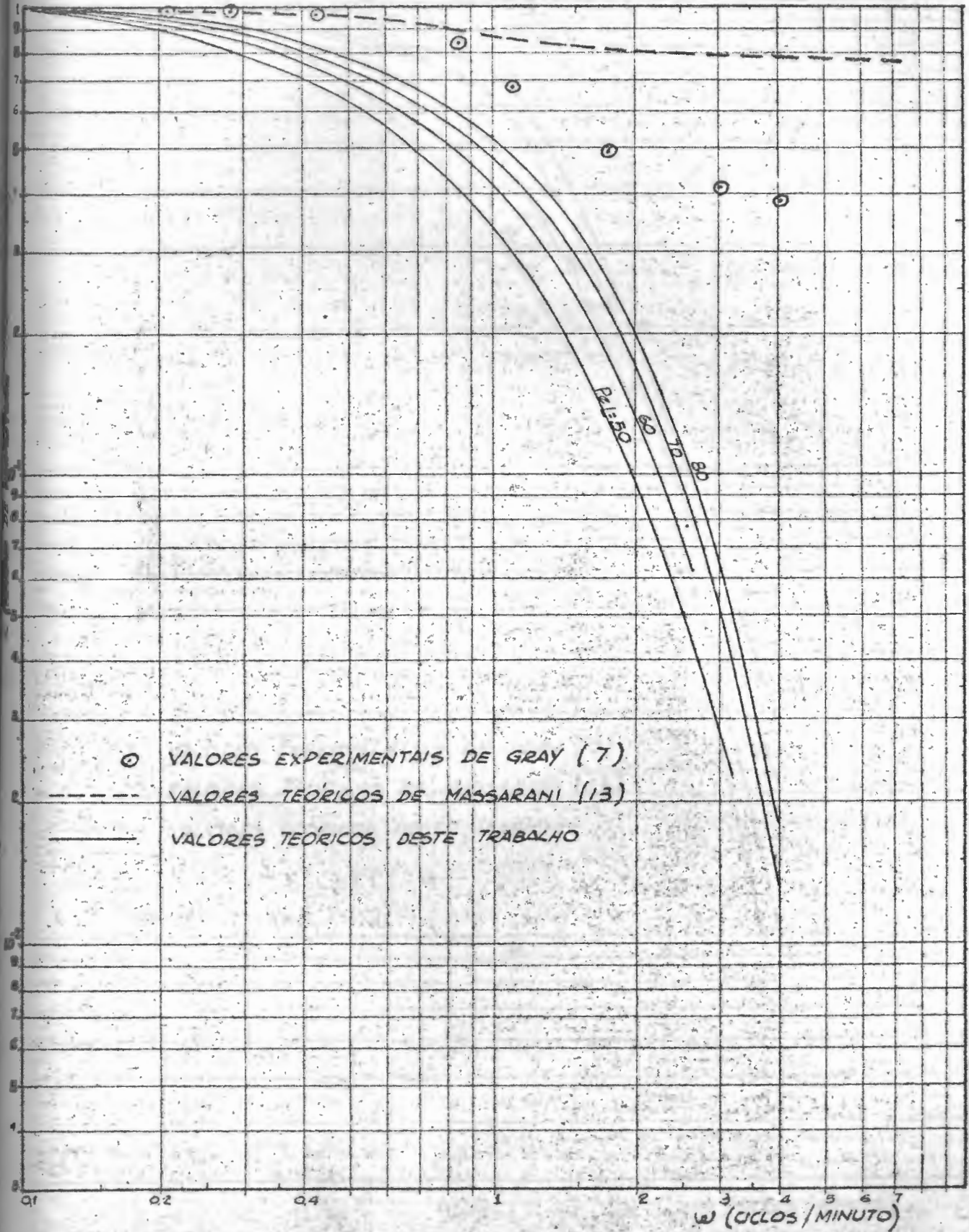


FIGURA 4d

$Pe_0 = 10.0$

CONDIÇÕES DE CONTÓRNO GRUPO II

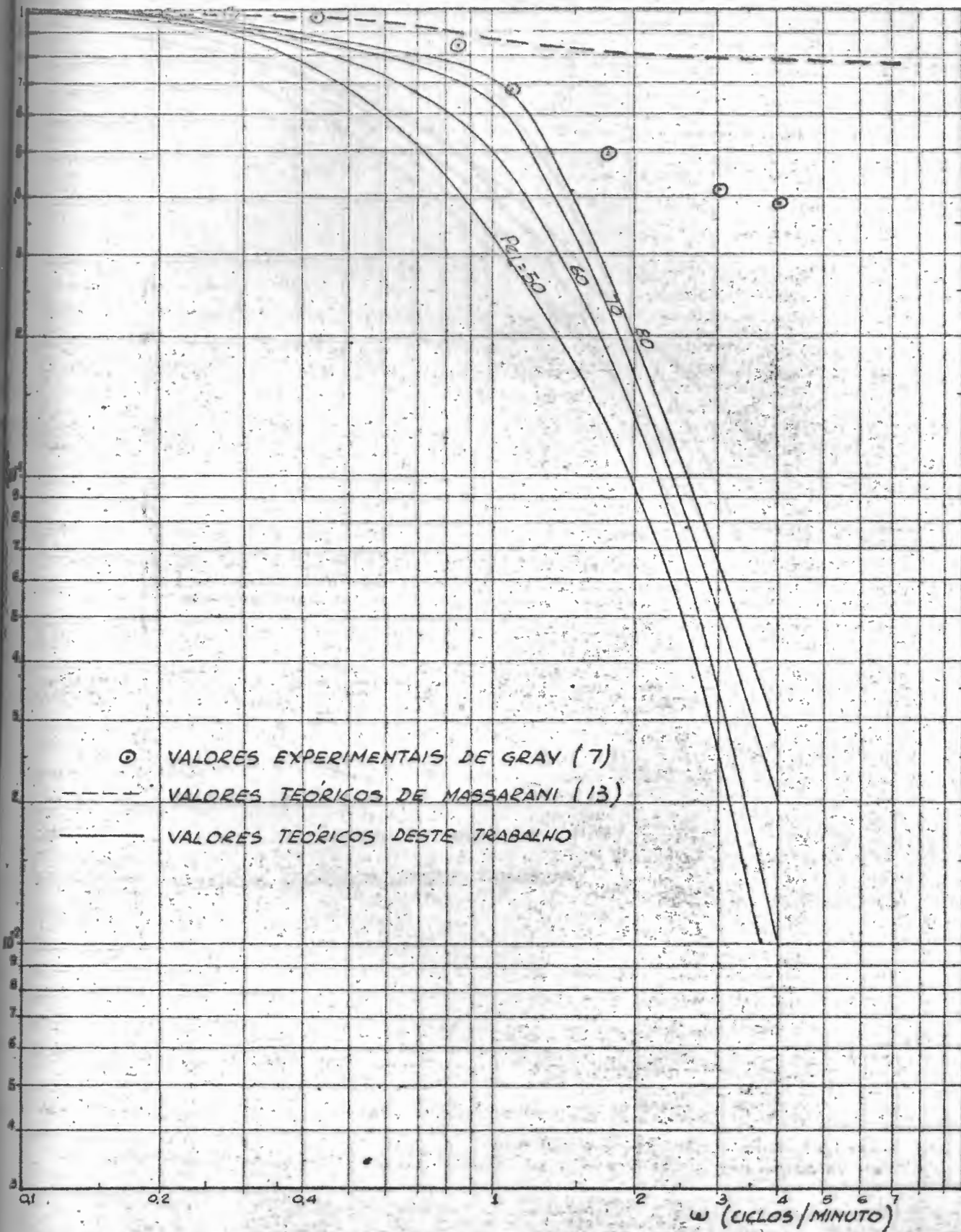


FIGURA 5

$Pe_L = 70.$

CONDIÇÕES DE CONTORNO GRUPO I

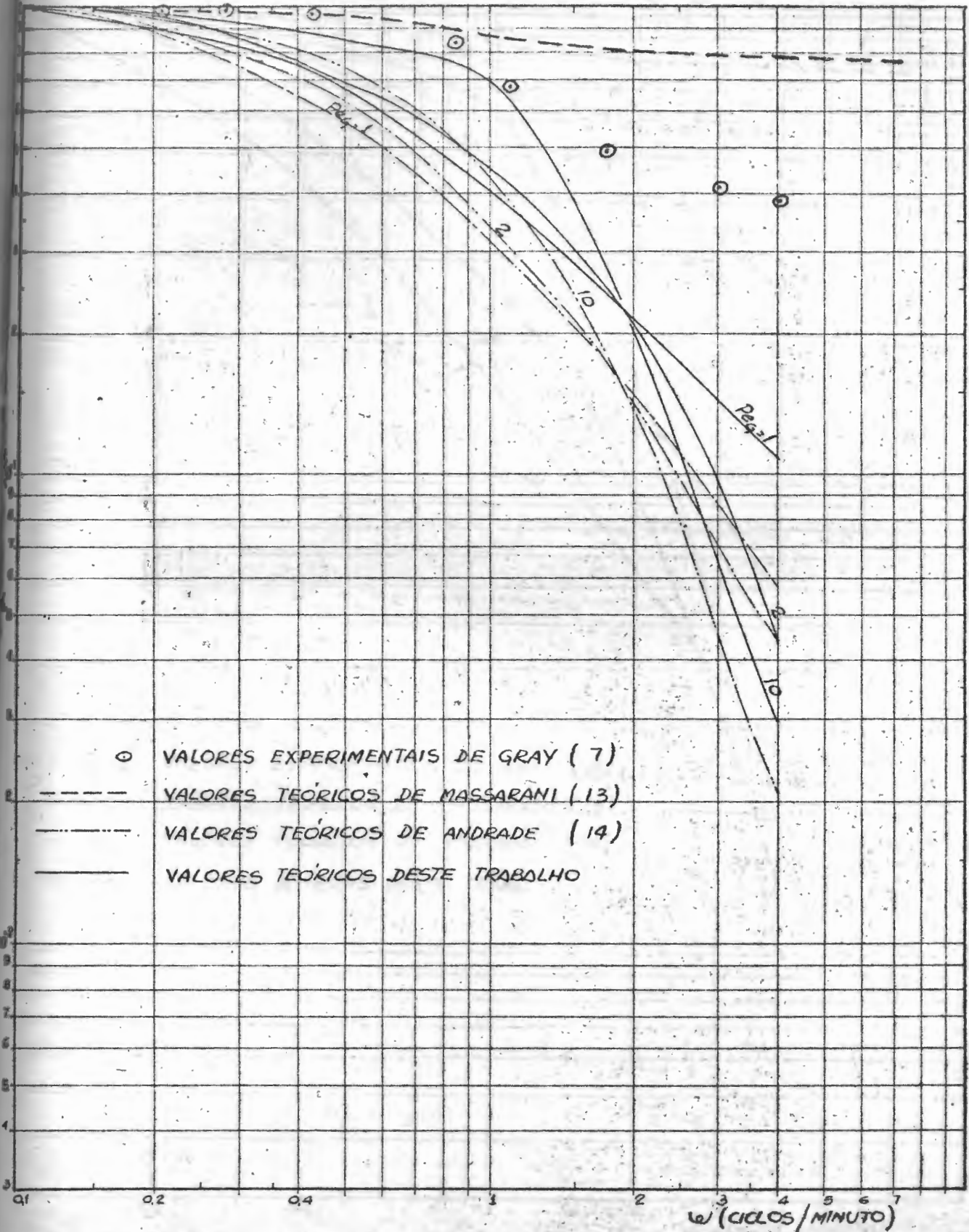
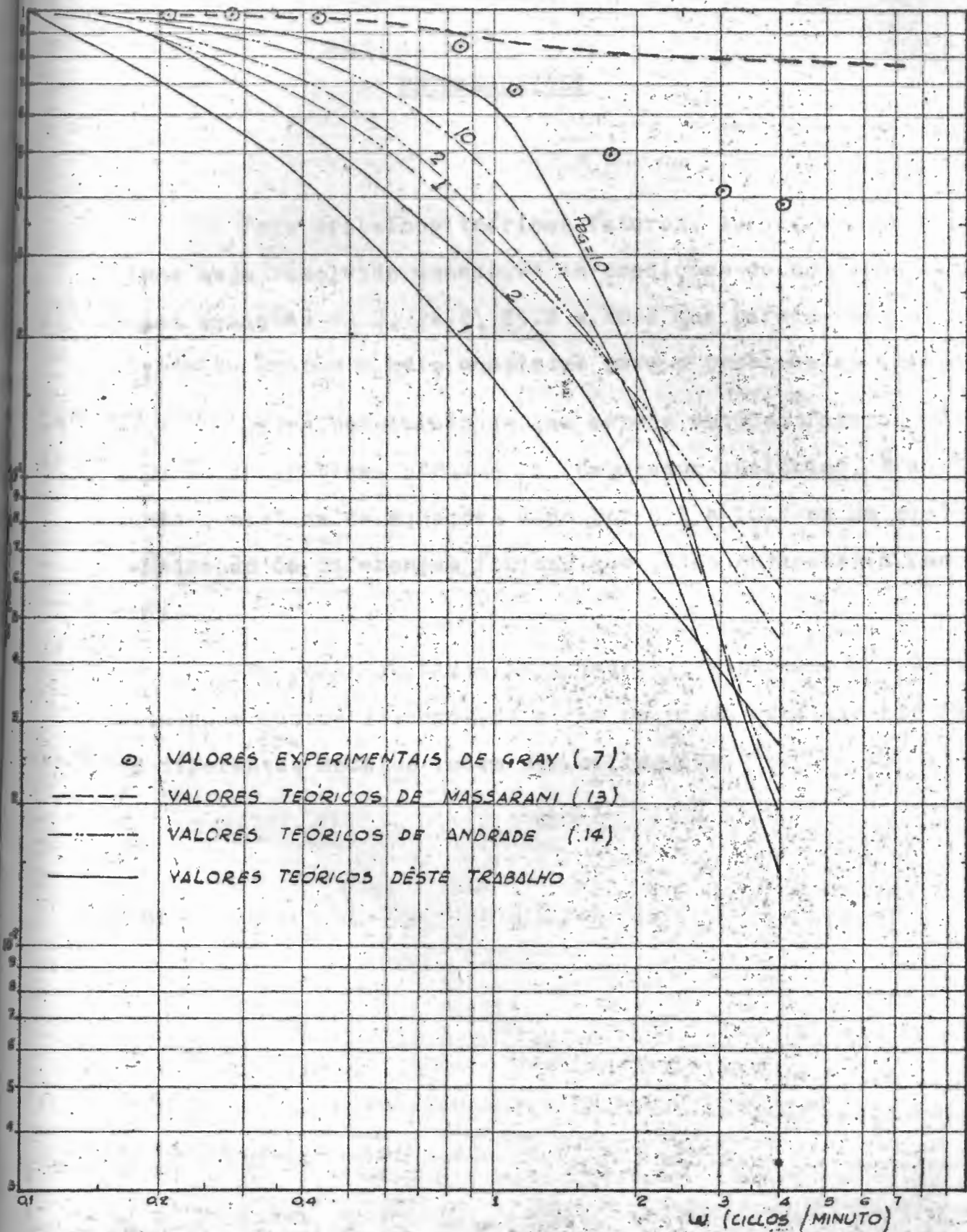


FIGURA 6

PeL: 70.

CONDIÇÕES DE CONTÓRNO GRUPO II



RECOMENDAÇÕES

Para trabalhos teóricos futuros, sugere-se que o problema seja resolvido usando-se as condições de contorno dadas pelas equações 23.2, 24.2, 25.2 e 26.2 que parecem ser as condições de contorno mais completas para o problema em questão.

Outra possibilidade que merece estudos futuros é a solução do problema através do computador analógico, transformando o sistema de equações dado por 9.2 e 10.2 em um sistema de equação de diferenças finitas que podem então serem resolvidas.

Do ponto de vista experimental, sugere-se que sejam estudados outros sistemas para que se possa concluir até onde os diferentes modelos podem ser empregados.

IV - BIBLIOGRAFIA

- (1) Aris, R. e Amundson, N., "Some Remarks on Longitudinal Mixing or Diffusion in Fixed Beds", A. I. Ch. E. Journal, 3, 280 (1957)
- (2) Bernard, R. e Wilhelm, R., Chem. Eng. Prog., 46, nº 5, 233 (1950)
- (3) Bird, B., Stewart, W. e Lightfoot, E., "Transport Phenomena" John Wiley & Sons, N. York (1960)
- (4) Carberry, J. e Bretton, R., "Axial Dispersion of Mass in Flow through Fixed Beds", A. I. Ch. E. Journal, 4, 369 (1958)
- (5) Chilton, T. e Colburn, A., Ind. & Eng. Chem., 27, 255 (1935)
- (6) Danckwerts, P. V., "Continuous Flow Systems - Distribution of Residence Times", Chem. Eng. Science, 2, 1 (1953)
- (7) Gray, R., Ph. D. dissertation, The University of Tennessee, (1961)
- (8) Jacques, G. e Vermeulen, T., University of California Radiation Laboratory, UCRL-8029 (1957)
- (9) Jacques, G., Hennico, A., Moon, J. e Vermeulen, T., UCRL - 10696 (1964)
- (10) Kramers, H. e Alberda, G., Chem. Eng. Science, 2, 173 (1953)

- (11) Lamb, D., Pigford, R. e Rippin, D., Chem. Eng. Prog., Symposium Series, nº 36, 57, 132 (1961)
- (12) McHenry, K. Jr. e Wilhelm, R., "Axial Mixing of Binary Gas Mixtures Flowing in a Random Bed of Spheres", A. I. Ch. E. Journal, 3, 83 (1957)
- (13) Massarani, G., M. Sc. thesis, University of Houston, Texas (1963)
- (14) Andrade, M.V. tese de Mestre, Universidade do Brasil (1965)
- (15) Rifai, Mohamed, Ph. D. dissertation, Univ. California - (1956), citado por ref. (8)
- (16) Wehner, J. e Wilhelm, R., "Boundary Conditions of Flow Reactors", Chem. Eng. Science, 6, 89 (1956)

APÊNDICE A

PROGRAMA DE COMPUTADOR DIGITAL PARA A ANÁLISE DE RESPOSTA EM FREQUÊNCIA

O computador utilizado foi um I.B.M. 1620 de propriedade do Instituto Tecnológico da Aeronáutica, onde é utilizada a linguagem FORTRAN.

Por motivos de ordem técnica, o programa total foi dividido em três partes, a saber:

1ª PARTE: CÁLCULO DAS RAIZES DO POLINÔMIO DE 4ª ORDEM

Nessa fase é feito inicialmente o cálculo dos coeficientes do polinômio complexo de 4ª ordem. Para a determinação das raízes foi usado o programa "IBM 1620 General Program Libray nº 7.0.029". Esse programa utiliza o método iterativo de Newton-Raphson e serve para resolver polinomiais complexos de qualquer grau, desde que seja fornecido o valor aproximado de uma das raízes.

2ª PARTE: CÁLCULO DAS CONSTANTES C_1, C_2, C_3 e C_4

Essa fase resume-se em resolver um sistema de 4 equações a 4 incógnitas. (Coeficientes complexos)

A solução do sistema foi feita por inversão de matrizes.

3ª PARTE: CÁLCULO DE FUNÇÃO TRANSFERÊNCIA

Com os resultados dos dois cálculos anteriores, alimentava-se a 3ª parte onde é efetuado o cálculo da razão de amplitude e da razão de amplitude normalizada.

Para efeito de cálculo, os valores que devem ser fornecidos são:

$k_L, L, G, h_L, m, P_{eL}, P_{eG}$ e W todos em unidades coerentes

No programa que se segue deve ser observada a seguinte nomenclatura, na ordem de seu aparecimento no Programa:

SIMBOLO NO PROGRAMA

SIMBOLO NO TEXTO

DEL 42, DEL 41

Parte imaginária e

real do coef. de D^4 na eq. 20.2

DEL 32, DEL 31

idem D^3 na eq. 20.2

DEL 22, DEL 21

idem D^2 na eq. 20.2

DEL 12, DEL 11

idem D na eq. 20.2

DEL 02, DEL 01

idem do termo independente da equação

ENOL

N_{OL}

ENOG

N_{OG}

TRG

T_G

TRL

T_L

EM

m

PEG

P_{eG}

SIMBOLO NO PROGRAMASIMBOLO NO TEXTO

PEL	P_{eL}
DPEG	incremento de P_{eG}
DPEL	incremento de P_{eL}
PEGM	P_{eG} máximo
PELM	P_{eL} máximo
WC	w (ciclos/minuto)
WR	w (radianos/h)
E	erro
LP	numero de interações
ALFA	Parte real da raiz aproximada
BATA	Parte imaginária da raiz aproximada
ALPHA ou S(J)	Parte real da raiz
BETA ou RI(J)	Parte imaginária da raiz
R(1,J) X(1,J)	Parte real e imaginária de d_i
R(2,J) X(2,J)	Parte real e imaginária de β_i
R(3,J) X(3,J)	Parte real e imaginária de γ_i
R(4,J) X(4,J)	Parte real e imaginária de θ_i
VH (I)	Parte real de C_1
VI (I)	Parte imaginária de C_1
A	Parte real da função transferência
B	Parte imaginária da função transferência

C UNIVERSIDADE DO BRASIL
C TESE DE MESTRE EM CIENCIAS
C JOAO BATISTA LEONESSA

INSTITUTO DE QUIMICA
DINAMICA DE COLUNA DE ABSORCAO
PRIMEIRA PARTE

C INSTITUTO TECNOLOGICO DE AERONAUTICA
C LABORATORIO DE PROCESSAMENTO DE DADOS
C

C CONSTANTES
DIMENSION C(12),P(12),Q(12)
DEL42=0.
DEL32=0.
ENOL=8.0988
ENOG=512.
TRG=.0082308
TRL=.0186181
EM=1565.
M=1
LD=4
LR=4

C ENTRADA DOS DADOS INICIAIS
C 99 ACCEPT,PEG,DPEG,PEGM,PEL,DPEL,PELM,E,LP,ALFA,BATA
PEG=PEG-DPEG
PELL=PEL-DPEL

C 125 PEG=PEG+DPEG
PEL=PELL
IF(PEG-PEGM)130,130,126

126 PAUSE
GO TO 99

130 PEL=PEL+DPEL
IF(PEL-PELM)135,135,125

C CALCULO DOS COEFICIENTES DO POLINOMIO COMPLEXO

135 L=0
PUNCH20, PEG,PEL
20 FORMAT(E14.8,3X,E14.8)
136 L=L+1
GO TO (141,142,143,144,145,146,147),L

141 WC=0.
GO TO 150

142 WC=.2
GO TO 150

143 WC=.4
GO TO 150

144 WC=1.
GO TO 150

145 WC=WC+1.
GO TO 150

146 WC=4.
GO TO 150

147 WC=7.

150 WR=376.992*WC
DEL41=1./PEL
DEL31=-(1.+(PEG)/PEL)
DEL21=ENOL-(ENOG*PEG)/(EM*PEL)+PEG ←
ENOL


```

DEL22=(TRL-(PEG*TRG)/PEL)*WR ✓
DEL11=PEG*(ENOG)/EM-ENOL ✓
DEL12=(TRG-TRL)*PEG*WR ✓
DELO1=PEG*TRG*TRL*WR*WR ✓
DELO2=-PEG*WR*((ENOG*TRL)/EM+(ENOL*TRG)) ✓
IF(SENSE SWITCH 1)230,260
230 PRINT 250,DEL41,DEL31,DEL21,DEL22
250 FORMAT(E14.8,2X,E14.8,2X,E14.8,2X,E14.8,2X)
PRINT 250,DEL11,DEL12,DELO1,DELO2
GO TO 260

```

C

CALCULO DAS RAIZES COMPLEXAS DO POLINOMIO

```

260 PUNCH2,PEG,PEL,L,WR
2 FORMAT( E14.8,2X,E14.8,2X,I4,2X,E14.8)
300 L2DP2=2*LD+2
C(1)=DEL41
C(2)=DEL42
C(3)=DEL31
C(4)=DEL32
C(5)=DEL21
C(6)=DEL22
C(7)=DEL11
C(8)=DEL12
C(9)=DELO1
C(10)=DELO2
303 J=0-1
J=J+1
ITH=1
ALPHA=ALFA
BETA=BATA
DO 100 I=1,L2DP2
100 P(I)=C(I)
L2D=LD+LD
DO 109 LRCNT=1,LR
Q(1)=P(1)
Q(2)=P(2)
DO 105 NOIT=1,LP
DO 101 J=3,L2DP2,2
Q(J)=ALPHA*Q(J-2)-BETA*Q(J-1)+P(J)
101 Q(J+1)=ALPHA*Q(J-1)+BETA*Q(J-2)+P(J+1)
GAMMA=Q(1)
DELTA=Q(2)
DO 102 J=3,L2D,2
X=ALPHA*GAMMA-BETA*DELTA+Q(J)
DELTA=ALPHA*DELTA+BETA*GAMMA+Q(J+1)
102 GAMMA=X
X=GAMMA**2+DELTA**2
IF(X)113,113,103
113 PRINT7
7 FORMAT(/24HEXISTE UMA DERIVADA NULA./)
GO TO 111
103 SIGMA=(Q(L2D+1)*GAMMA+Q(L2D+2)*DELTA)/X
TAU=(Q(L2D+2)*GAMMA-Q(L2D+1)*DELTA)/X
IF(SQRT(SIGMA**2+TAU**2)-E) 112,104,104
104 ALPHA=ALPHA-SIGMA
105 BETA=BETA-TAU

```

```

PRINT 2000
2000 FORMAT(/35HHA UM NUMERO EXCESSIVO DE ITERACOES)
GO TO 111
111 NOIT=NOIT-1
ITH=2
112 SIGMA=C(1)
TAU=C(2)
DO 106 J=3,L2DP2,2
X=ALPHA*SIGMA-BETA*TAU+C(J)
TAU= ALPHA*TAU+BETA*SIGMA+C(J+1)
106 SIGMA=X
PUNCH 9,ALPHA,BETA
9 FORMAT( E14.8,2X,E14.8)
GO TO (107,110),ITH
107 LDP1=LD+1
DO 108 I=1,LRCNT
J=2*I-1
P(J)=0.
108 P(J+1)=0.
LRCP1=LRCNT+1
DO 109 I=LRCP1,LDP1
J=2*I-1
P(J)=Q(J-2)
109 P(J+1)=Q(J-1)
110 IF(L-7)136,130,130
END

```

C
C
C
C
C
C
C
C
UNIVERSIDADE DO BRASIL
TESE DE MESTRE EM CIENCIAS
JOAO BATISTA LEONESSA

INSTITUTO DE QUIMICA
DINAMICA DE COLUNA DE ABSORCAO
SEGUNDA PARTE

INSTITUTO TECNOLOGICO DE AERONAUTICA
LABORATORIO DE PROCESSAMENTO DE DADOS

CALCULO DOS COEFICIENTES DAS EQUACOES COMPLEXAS

DIMENSION R(4,5),X(4,5),ER(4),EI(4),S(4),RI(4),VR(4),VI(4)
K=4
KX=5

2000 READ,PEGC,PELC,DUN
PUNCH 1,PEGC,PELC
1 FORMAT(E14.8,2X,E14.8)
DO 53 LL=1,7

1000 READ,PEG,PEL,L,WR,DUN
TRG=.0082308
ENOG=512
EM=1565.
B3=PEL*PEG
B=PEL+PEG
C=TRG*WR
B2=ENOG/EM ✓

DO 1100 J=1,4
ER(J)=0.
EI(J)=0.
1100 READ,S(J),RI(J),DUN
ER(1)=1.
PUNCH 254,PEG,PEL,L

DO 1091 J=1,4
1091 PUNCH 1,S(J),RI(J)
254 FORMAT(E14.8,2X,E14.8,2X,I4,2X,E14.8)
DO 1200 J=1,4

A=EXP(S(J)) ✓
A=A*(.1E-15) ✓
A1=COS(RI(J)) ✓
A2=SIN(RI(J)) ✓
C1=(S(J)*S(J)) ✓
C2=(RI(J)*RI(J)) ✓
C4=S(J)*C1

C5=B*(C1-C2)
D=3.*S(J)*S(J)*RI(J)
D1=RI(J)*C2

D2=B*2.*S(J)*RI(J)

R(1,J)=1.-S(J)/PEG ✓
X(1,J)=-RI(J)/PEG ✓

R(2,J)=A*(S(J)*A1-RI(J)*A2) ✓
X(2,J)=A*(S(J)*A2+RI(J)*A1) ✓

R(3,J)=S(J)*((C1-3.*C2)/(PEG)-S(J)-B2)+RI(J)*(RI(J)+TRG*WR) ✓
X(3,J)=RI(J)*((3.*C1-C2)/PEG-2.*S(J)-B2)-TRG*S(J)*WR ✓

R(4,J)=A*(A1*((C4-3.*S(J)*C2-C5)/B3+B2)-A2*((D-D1-D2)/B3+C1)) ✓
X(4,J)=A*(A1*((D-D1-D2)/B3+C1)+A2*((C4-3.*S(J)*C2-C5)/B3+B2)) ✓

1200 X(4,J)=A*(A1*((D-D1-D2)/B3+C1)+A2*((C4-3.*S(J)*C2-C5)/B3+B2)) ✓
IF (SENSE SWITCH 1)300,320

300 PRINT 310,R(1,1),X(1,1),R(1,2),X(1,2)


```

310 FORMAT(E14.8,2X,E14.8,2X,E14.8,2X,E14.8,2X)
PRINT 310, R(1,3),X(1,3),R(1,4),X(1,4)
PRINT 310,R(2,1),X(2,1),R(2,2),X(2,2)
PRINT 310,R(2,3),X(2,3),R(2,4),X(2,4)
PRINT 310, R(3,1),X(3,1),R(3,2),X(3,2)
PRINT 310,R(3,3),X(3,3),R(3,4),X(3,4)
PRINT 310, R(4,1),X(4,1),R(4,2),X(4,2)
PRINT 310,R(4,3),X(4,3),R(4,4),X(4,4)

```

C

CALCULO DAS SOLUCOES DO SISTEMA DE EQUACOES COMPLEXAS

```

320 DO 33 I = 1, K
DO 48 L=1,K
R(L, KX) = 0.0
48 X(L, KX) = 0.0
R(I,KX)=1.
IY = 1
IF (R(I, 1)) 34, 31, 34
31 IF (X(I,1)) 34, 100, 34
34 T1=R(I,1)*R(I,1)+X(I,1)*X(I,1)
T1R=R(I,1)
T1X=X(I,1)
DO 35 J=1,KX
TR=(R(I,J)*T1R+X(I,J)*T1X)/T1
TI=(X(I,J)*T1R-R(I,J)*T1X)/T1
R(I, J) = TR
35 X(I, J) = TI
IX = 0
IY = 2
IF (I - K) 37, 38, 100
38 MX = I - 1
MY=1
GO TO 39
37 MY = I + 1
MX = K
39 DO 40 L = MY, MX
IX = IX + 1
T1 = R(L, 1)
T2 = X(L, 1)
DO 40 J=1,KX
TR = R(I, J)*T1 - X(I, J)*T2
TI = R(I, J)*T2 + X(I, J)*T1
R(L, J) = R(L, J) - TR
40 X(L,J)=X(L,J)-TI
IY = 3
IF (I - 1) 100, 44, 45
45 IF ((K - I) - IX) 100, 44, 38
44 DO 46 L = 1, K
DO 46 J = 1, K
NU = J + 1
R(L, J)=R(L, NU)
46 X(L, J) = X(L, NU)
33 CONTINUE
52 DO 53 I=1,K
TR=0.0
TI=0.0
DO 54 J=1,K
TI=R(I,J)*ER(J)-X(I,J)*EI(J)

```

```
T2=X(I,J)*ER(J)+R(I,J)*EI(J)
TR=TR+T1
54 TI=TI+T2
VR(I)= TR
VI(I)= TI
PUNCH 1 , VR(I), VI(I)
53 CONTINUE
GO TO 2000
100 PRINT 101
101 FORMAT(17H DIVISAO POR ZERO)
GO TO 53
END
```

C UNIVERSIDADE DO BRASIL
C TESE DE MESTRE EM CIENCIAS
C JOAO BATISTA LEONESSA

INSTITUTO DE QUIMICA
DINAMICA DE COLUNA DE ABSORCAO
TERCEIRA PARTE

C INSTITUTO TECNOLOGICO DE AERONAUTICA
C LABORATORIO DE PROCESSAMENTO DE DADOS
C
C

```
DIMENSION S(4), RI(4),TR(4),TI(4), SS(4), WC(7), RR(4)
WC(1)=0.
WC(2)=.2
WC(3)=.4
WC(4)=1.0
WC(5)=2.
WC(6)=4.
WC(7)=7.
```

2000 PUNCH 1

```
1 FORMAT(/5X,36HMODELO DIFUSAO AXIAL NAS DUAS FASES)
PUNCH 2
```

```
2 FORMAT(/10X,27HRESULTADOS TEORICOS OBTIDOS)
```

```
READ, PEG, PEL
```

```
PUNCH 3, PEG, PEL
```

```
3 FORMAT(/5X,4HPEG=,F10.4,7H PEL=,F10.4/)
```

```
PUNCH 4
```

```
4 FORMAT(3H W,10X,4HALFA,11X,5HALPHA,9X,7HTAN PHI,6X,3HPHI,/)
PHIO=0
```

1000 DO 600 L=1,7

C ENTRADA DOS DADOS

```
1001 READ, PEG, PEL, LL, DUN
```

```
IF (L-LL) 50, 51, 50
```

```
50 PRINT 52
```

```
52 FORMAT(/31HA ORDEM DOS CARTOES ESTA ERRADA)
```

```
PAUSE
```

```
GO TO 1001
```

```
51 DO 100 J=1,4
```

```
100 READ, S(J), RI(J), DUN
```

```
DO 101 I=1,4
```

```
101 READ, TR(I), TI(I), DUN
```

C
A=0.

B=0.

```
DO 150 J=1,4
```

```
A=A+EXP(S(J))*(TR(J)*COS(RI(J))-TI(J)*SIN(RI(J)))
```

```
150 B=B+EXP(S(J))*(TR(J)*SIN(RI(J))+TI(J)*COS(RI(J)))
```

```
ALFA=SQRT(A*A+B*B)
```

```
400 IF (L-1) 402, 401, 402
```

```
401 CON = ALFA
```

```
402 ALPHA = ALFA/CON
```

```
600 PUNCH 500, WC (L), ALFA, ALPHA
```

```
500 FORMAT (F4.1, 5X, E12.6, 3X, E12.6)
```

```
GO TO 2.000
```

```
END
```


APÊNDICE B

CÁLCULO DAS PARTES REAIS E IMAGINÁRIAS DOS PARÂMETROS NECESSÁRIOS PARA O CÁLCULO DA RESPO- STA EM FREQUÊNCIA

Por motivos de simplicidade e para tornar esse Apêndice mais sintético, omitiremos o desenvolvimento matemático (operações com números complexos) e apresentaremos apenas os valores finais utilizados. (ver nomenclatura do apêndice A).

1º) Coeficientes da equação 20.2

$$\text{DEL } 41 = 1.0$$

$$\text{DEL } 42 = 0.0$$

$$\text{DEL } 31 = -(P_{eG} + P_{eL})$$

$$\text{DEL } 32 = 0.0$$

$$\text{DEL } 21 = N_{oL} \cdot P_{eG} - (N_{oG} \cdot P_{eG})/m + P_{eL} \cdot P_{eG}$$

$$\text{DEL } 22 = (P_{eL} \cdot T_L - P_{eG} \cdot T_G) \cdot W$$

$$\text{DEL } 11 = P_{eL} \cdot P_{eG} \cdot (N_{oG}/m - N_{oL})$$

$$\text{DEL } 12 = (T_G - T_L) \cdot P_{eL} \cdot P_{eG} \cdot W$$

$$\text{DEL } 01 = P_{eG} \cdot P_{eL} \cdot T_G \cdot T_L \cdot W^2$$

$$\text{DEL } 02 = -P_{eG} \cdot P_{eL} \cdot W (N_{oG} \cdot T_L/m) + N_{oL} \cdot T_G$$

2ª) Coeficientes do sistema de equações

Para as condições de contorno Grupo I, tem-se:

$$R(1,J) = 1 \quad X(1,J) = 0$$

Para as condições do grupo II tem-se:

$$R(1,J) = 1 - (r_{j1}/Pe_G) \quad e \quad X(1,J) = - r_{j2}/Pe_G$$

Os demais valores não variam e são:

$$R(2,J) = \mathcal{O}^{r_{j1}} (r_{j1} \cos r_{j2} - r_{j2} \operatorname{sen} r_{j2})$$

$$X(2,J) = \mathcal{O}^{r_{j1}} (r_{j1} \operatorname{sen} r_{j2} + r_{j2} \cos r_{j2})$$

$$R(3,J) = r_{j1} \left[1/Pe_G (r_{j1}^2 - 3r_{j2}^2) - r_{j1}^{-N_{OG}/m} \right] + r_{j2} (r_{j2} + T_{G^w})$$

$$X(3,J) = r_{j2} \left[1/Pe_G (3r_{j1}^2 - r_{j2}^2) - 2r_{j1}^{-N_{OG}/m} \right] - T_G \cdot r_{j1} \cdot w$$

definindo-se

$$\eta_1 = \frac{N_{OG}}{m} - \frac{1}{Pe_G} (r_{j1}^2 - r_{j2}^2)$$

$$\eta_2 = T_{G^w} - \frac{2r_{j1} r_{j2}}{Pe_G}$$

$$R(4,J) = \mathcal{O}^{r_{j1}} (\cos r_{j2} \eta_1 - \operatorname{sen} r_{j2} \eta_2)$$

$$X(4,J) = \mathcal{O}^{r_{j1}} (\cos r_{j2} \eta_2 + \operatorname{sen} r_{j2} \eta_1)$$

para $J = 1, 2, 3$ e 4

3º) Função transferência

$$A = G_1 = \sum_{j=1}^4 e^{r_{j1}} (C_{j1} \cos r_{j2} - C_{j2} \sin r_{j2})$$

$$B = G_2 = \sum_{j=1}^4 e^{r_{j1}} (C_{j1} \sin r_{j2} + C_{j2} \cos r_{j2})$$

$$\alpha = \sqrt{G_1^2 + G_2^2}$$

APÊNDICE C

TABELAS E RESULTADOS

Os dados físicos para o sistema CO_2 -ar-água, bem como os dados referentes ao equipamento, utilizados nesse trabalho, são os mesmos que os utilizados por GRAY (7) e ANDRADE (14) e são os abaixo apresentados:

1) Leito Fixo

Diâmetro = 6 in

Altura (l) = 5,12 ft

Recheio: anéis de Raschig de Cerâmica

Diâmetro dos anéis (D_p) 5/8 in

Porosidade (ϵ) = 0,604

2) Condições de Operação

Vazão de Líquido (L) = 55 lb moles/hr ft²

Vazão de Gás (G) = 0,87 lb moles/hr ft²

Temperatura do líquido = 74°F

Temperatura do gás = 80°F

3) Sistema CO_2 - Ar-Água

Coefficiente de transferência ($k_L a$) =

= 87 lb moles/hr ft² fração molar

Inclinação da linha de equilíbrio (m) = 1565

$$\text{Retenção do líquido } (h_L) = 0,2 \text{ lb moles/ft}^3$$

$$\text{Retenção do gás } (h_G) = 0,0014 \text{ lb moles/ft}^3$$

Os dados experimentais obtidos por Gray (7) são abaixo apresentados: (Tabela I)

TABELA I

W (ciclos/min)	α'	θ (graus)
0,203	0,990	- 33
0,285	0,975	- 45
0,429	0,966	- 74
0,860	0,835	- 120
1,110	0,673	- 230
1,770	0,494	- 334
3,060	0,413	- 630
4,000	0,383	- 735

A seguir são apresentados os resultados teóricos obtidos nesse trabalho.

Nas tabelas 2a, 2b, 2c e 2d são apresentados os resultados obtidos com as condições de contorno do Grupo I e nas tabelas 3a, 3b, 3c e 3d os resultados obtidos com as condições de contorno do grupo II.

TABELA 2a

MODELO DIFUSÃO AXIAL NAS DUAS FASES

RESULTADOS TEÓRICOS OBTIDOS

(Cond. Cont. - Grupo I)

W	α	α'
	PEG = 1	PEL = 70
.0	0,9947320	1,0000000
.2	0,9050540	0,9098470
.4	0,7614690	0,7655010
1.0	0,4119990	0,4141810
2.0	0,2093980	0,2103070
4.0	0,1137790	0,1143310
7.0	0,0577800	0,0580859
	PEG = 1	PEL = 90
.0	0,9963510	1,0000000
.2	0,9189620	0,9524370
.4	0,8683210	0,8715010
1.0	0,5394510	0,5414260
2.0	0,2452500	0,2461490
4.0	0,1099900	0,1103930
7.0	0,0519095	0,0520996
	PEG = 1	PEL = 110
.0	0,9971800	1,0000000
.2	0,9659540	0,9686850
.4	0,9145570	0,9171420
1.0	0,6390710	0,6408780
2.0	0,2940170	0,2948490
4.0	0,1142520	0,1145750
7.0	0,0487997	0,0489376
	PEG = 1	PEL = 130
.0	0,9976950	1,0000000
.2	0,9747080	0,9769590
.4	0,9387700	0,9409390
1.0	0,7142520	0,7159020
2.0	0,3442970	0,3450930
4.0	0,1240760	0,1243620
7.0	0,0477476	0,0478579

TABELA 2b

MODELO DE DIFUSÃO AXIAL NAS DUAS FASES

RESULTADOS TEÓRICOS OBTIDOS

(Cond. Cont. - Grupo I)

W	α	α'
	PEG = 2	PEL = 70
.0	0,9917570	1,0000000
.2	0,9436820	0,9515250
.4	0,7345970	0,7407020
1.0	0,4430960	0,4467780
2.0	0,2087050	0,2104400
4.0	0,0434493	0,0433105
7.0	0,0118088	0,0119069
	PEG = 2	PEL = 90
.0	0,9940050	1,0000000
.2	0,9632710	0,9690810
.4	0,6907950	0,6949610
1.0	0,5533620	0,5567000
2.0	0,2509000	0,2524140
4.0	0,0575335	0,0576805
7.0	0,0121945	0,0122680
	PEG = 2	PEL = 110
.0	0,9952790	1,0000000
.2	0,9729350	0,9775500
.4	0,7643040	0,7679290
1.0	0,6307020	0,6336940
2.0	0,3085770	0,3100410
4.0	0,0762855	0,0766473
7.0	0,0141366	0,0142037
	PEG = 2	PEL = 130
.0	0,9961030	1,0000000
.2	0,9786340	0,9824620
.4	0,8136240	0,8163070
1.0	0,6868060	0,6894930
2.0	0,3623640	0,3657810
4.0	0,0974700	0,0976513
7.0	0,0173076	0,0173753

TABELA 2c

MODELO DIFUSÃO AXIAL NAS DUAS FASES

RESULTADOS TEÓRICOS OBTIDOS

(Cond. Cont. - Grupo I)

W	α	α'
	PEG = 5	PEL = 50
.0	0,9770040	1,0000000
.2	0,9203630	0,9420250
.4	0,7698380	0,7879570
1.0	0,4421470	0,4525540
2.0	0,1587640	0,1625010
4.0	0,0114013	0,0116696
7.0	0,0007203	0,0007373
	PEG = 5	PEL = 60
.0	0,9818550	1,0000000
.2	0,9399890	0,9573600
.4	0,8183820	0,8335050
1.0	0,5233630	0,5330340
2.0	0,2022480	0,2059860
4.0	0,0174648	0,0177875
7.0	0,0022767	0,0023188
	PEG = 5	PEL = 70
.0	0,9850040	1,0000000
.2	0,9519910	0,9664840
.4	0,8505240	0,8634720
1.0	0,5865050	0,5954340
2.0	0,2436860	0,2473960
4.0	0,0249403	0,0253200
7.0	0,0029439	0,0029887
	PEG = 5	PEL = 80
.0	0,9872160	1,0000000
.2	0,9600490	0,9724800
.4	0,8732310	0,8845380
1.0	0,6363520	0,6445920
2.0	0,2823280	0,2859840
4.0	0,0335276	0,0339618
7.0	0,0038061	0,0038554

TABELA 2d

MODELO DE DIFUSÃO AXIAL NAS DUAS FASES

RESULTADOS TEÓRICOS OBTIDOS

(Cond. Cont. - Grupo I)

W	α	α'
	PEG = 10	PEL = 50
.0	0,9656950	1,0000000
.2	0,9210890	0,9553080
.4	0,8012030	0,8296640
1.0	0,3904130	0,4042820
2.0	0,1220120	0,1263460
4.0	0,0119970	0,0124232
7.0	0,0004979	0,0005156
	PEG = 10	PEL = 60
.0	0,9725780	1,0000000
.2	0,9382810	0,9647350
.4	0,8406260	0,8643270
1.0	0,5920800	0,6087740
2.0	0,1589800	0,1634620
4.0	0,0197502	0,0203070
7.0	0,0009655	0,0008899
	PEG = 10	PEL = 70
.0	0,9771520	1,0000000
.2	0,9493730	0,9715700
.4	0,8672500	0,8875280
1.0	0,7199590	0,7367920
2.0	0,1944830	0,1990300
4.0	0,0287709	0,0294436
7.0	0,0016097	0,0016473
	PEG = 10	PEL = 80
.0	0,9804150	1,0000000
.2	0,9571060	0,9762250
.4	0,8863560	0,9040610
1.0	0,7976470	0,8135800
2.0	0,2281360	0,2326930
4.0	0,0387084	0,0394817
7.0	0,0025420	0,0025928

TABELA 3a

MODELO DIFUSÃO AXIAL NAS DUAS FASES

RESULTADOS TEÓRICOS OBTIDOS

(Cond. Cont. - Grupo II)

W	α	α'
	PEG = 1	PEL = 70
.0	0,9878140	1,0000000
.2	0,6878750	0,6963610
.4	0,4289070	0,4341980
1.0	0,1645620	0,1665920
2.0	0,0643203	0,0651137
4.0	0,0269735	0,0273062
7.0	0,0110214	0,0111573
	PEG = 1	PEL = 90
.0	0,9919510	1,0000000
.2	0,8204870	0,8271450
.4	0,5970990	0,6019440
1.0	0,2471120	0,2491170
2.0	0,0808289	0,0814848
4.0	0,0266019	0,0268178
7.0	0,0099332	0,0100138
	PEG = 1	PEL = 110
.0	0,9939280	1,0000000
.2	0,8806050	0,8859840
.4	0,7039960	0,7082960
1.0	0,3285790	0,3305860
2.0	0,1041920	0,1048280
4.0	0,0284942	0,0286682
7.0	0,0094241	0,0094817
	PEG = 1	PEL = 130
.0	0,9951080	1,0000000
.2	0,9128120	0,9172980
.4	0,7732020	0,7770030
1.0	0,4039030	0,4058680
2.0	0,1304560	0,1310980
4.0	0,0320794	0,0322371
7.0	0,0093529	0,0093989

TABELA 3b

MODELO DIFUSÃO AXIAL NAS DUAS FASES

RESULTADOS TEÓRICOS OBTIDOS

(Cond. Cont. - Grupo II)

W	α	α'
	PEG = 2	PEL = 70
.0	0,9866900	1,0000000
.2	0,8740670	0,8858580
.4	0,5260530	0,5331490
1.0	0,2620450	0,2655800
2.0	0,0954621	0,0967498
4.0	0,0145885	0,0147853
7.0	0,0031025	0,0031443
	PEG = 2	PEL = 90
.0	0,9905110	1,0000000
.2	0,9199060	0,9287180
.4	0,5636750	0,5690750
1.0	0,3595960	0,3630400
2.0	0,1243250	0,1255160
4.0	0,0204767	0,0206729
7.0	0,0032982	0,0033298
	PEG = 2	PEL = 110
.0	0,9926130	1,0000000
.2	0,9423410	0,9493540
.4	0,6551660	0,6600420
1.0	0,4389410	0,4422080
2.0	0,1631830	0,1643970
4.0	0,0286965	0,0289101
7.0	0,0039677	0,0039972
	PEG = 2	PEL = 130
.0	0,9939470	1,0000000
.2	0,9553270	0,9611450
.4	0,7190490	0,7234270
1.0	0,5032850	0,5063500
2.0	0,2021110	0,2033420
4.0	0,0385260	0,0387606
7.0	0,0050396	0,0050703

TABELA 3c

MODELO DIFUSÃO AXIAL NAS DUAS FASES

RESULTADOS TEÓRICOS OBTIDOS

(Cond. Cont. - Grupo II)

W	α	α'
	PEG = 5	PEL = 50
.0	0,9711010	1,0000000
.2	0,8835300	0,9098220
.4	0,6881350	0,7086130
1.0	0,3322500	0,3421370
2.0	0,1010640	0,1040720
4.0	0,0055997	0,0057663
7.0	0,0004047	0,0004167
	PEG = 5	PEL = 60
.0	0,9774010	1,0000000
.2	0,9133560	0,9344730
.4	0,7516540	0,7690330
1.0	0,4097210	0,4191940
2.0	0,1341090	0,1372090
4.0	0,0090738	0,0092836
7.0	0,0013548	0,0013861
	PEG = 5	PEL = 70
.0	0,9814360	1,0000000
.2	0,9314450	0,9490630
.4	0,7948880	0,8099220
1.0	0,4740980	0,4830650
2.0	0,1670040	0,1701620
4.0	0,0134761	0,0137310
7.0	0,0014086	0,0014353
	PEG = 5	PEL = 80
.0	0,9842430	1,0000000
.2	0,9434670	0,9585700
.4	0,8258800	0,8391010
1.0	0,5276960	0,5361440
2.0	0,1988520	0,2020350
4.0	0,0186652	0,0189640
7.0	0,0016044	0,0016300

TABELA 3d

MODELO DIFUSÃO AXIAL NAS DUAS FASES

RESULTADOS TEÓRICOS OBTIDOS

(Cond. Cont. - Grupo II)

W	α	α'
	PEG = 10	PEL = 50
.0	0,9614090	1,0000000
.2	0,9050210	0,9413480
.4	0,7631030	0,7937330
1.0	0,3233770	0,3363570
2.0	0,0952718	0,0990960
4.0	0,0079350	0,0082535
7.0	0,0016804	0,0017478
	PEG = 10	PEL = 60
.0	0,9692790	1,0000000
.2	0,9262330	0,9555890
.4	0,8099000	0,8355690
1.0	0,5012810	0,5171690
2.0	0,1271350	0,1311640
4.0	0,0134985	0,0139264
7.0	0,0003510	0,0003621
	PEG = 10	PEL = 70
.0	0,9744770	1,0000000
.2	0,9398140	0,9644290
.4	0,8417280	0,8637740
1.0	0,6259160	0,6423100
2.0	0,1584590	0,1626090
4.0	0,0201708	0,0206991
7.0	0,0006694	0,0006870
	PEG = 10	PEL = 80
.0	0,9781670	1,0000000
.2	0,9492210	0,9704080
.4	0,8646340	0,8839320
1.0	0,7099270	0,7257720
2.0	0,1887230	0,1929350
4.0	0,0277212	0,0283399
7.0	0,0015365	0,0015708

TABELA 4

RESULTADOS TEÓRICOS OBTIDOS POR ANDRADE (14)

W	α	α'
$Pe_G = 1$		
0.2	0,83298	0,87986
0.4	0,63134	0,65785
1.0	0,31373	0,32691
2.0	0,15231	0,15870
4.0	0,05907	0,06155
7.0	0,10359	0,10794
$Pe_G = 2$		
0.2	0,85188	0,88766
0.4	0,66333	0,69119
1.0	0,32632	0,34002
2.0	0,14069	0,14660
4.0	0,04242	0,04420
7.0	0,06902	0,07192
$Pe_G = 10$		
.2	0,90908	0,94726
.4	0,79111	0,82434
1.0	0,43024	0,44831
2.0	0,14459	0,15067
4.0	0,02030	0,02115
7.0	0,01707	0,01779

NOIENCLATURA

- a = área de transferência de massa por absorção, ft^2/ft^3
- A = amplitude da oscilação harmônica
- B = coeficiente da equação (19.2)
- C = constantes da equação (21.2)
- D = comprimento característico; operador
- D_p = Diâmetro do anel de Raschig, in
- E = difusividade axial turbulenta, ft^2/ft^3
- F = coeficiente da equação 19.2
- G = Vazão molar da fase gasosa lb moles/hr ft^2 ou
função transferência
- h = retenção total, lb moles/ ft^3
- i = $\sqrt{-1}$ = imaginário puro
- J = coeficiente da equação (19.2)
- k_L = coeficiente de transferência de massa, lb moles/hr ft^2
- l = altura da torre, ft
- L = vazão molar da fase líquida lb moles/hr ft^2
- m = inclinação da linha de equilíbrio
- M = coeficiente da equação (19.2)
- N_{OG} = número de unidades de transferência para a fase gasosa
- N_{OL} = número de unidades de transferência para a fase líquida
- n = número de misturadores
- N = fluxo de transferência de massa, lb moles/hr ft^2

- $Pe =$ número de Peclet $= \frac{V}{E}$
 $r =$ raízes da equação característica (22.2)
 $s =$ parâmetro da transformada de Laplace
 $t =$ tempo em hr
 $T = \frac{h^0}{L} =$ tempo de residência, hr
 $U_0 = VE =$ velocidade superficial ft/hr
 $v =$ Velocidade intersticial - G/h_G ou L/h_L , ft/hr
 $V =$ coeficiente da equação (19.2)
 $w =$ frequência, rad/hr
 $x =$ fração molar do soluto na fase líquida
 $y =$ fração molar do soluto na fase gasosa
 $z =$ coordenada longitudinal, ft

Símbolos Especiais

- $\alpha =$ razão de amplitude ou coeficiente da (35.2)
 $\alpha' =$ razão de amplitude normalizada
 $\beta =$ coeficiente da equação (35.2)
 $\gamma =$ coeficiente da equação (35.2)
 $\theta =$ coeficiente da equação (35.2)
 $\epsilon =$ porosidade do leito, vol.vazio/vol.total
 $\phi =$ defasamento angular
 $\xi =$ coordenada longitudinal normalizada

COND COND GRUPO II

α (NÃO NORMALIZADO)

R[G]

I[G]

$$t_g = \frac{I[G]}{R[G]}$$

ϕ

REG#	10.0000	PEU#	50.0000			
0.0	0.961410E 00	0.961410E 00	0.000000E 00	0.000000E 00	0.000000E 00	- 0
0.2	0.905021E 00	0.890103E 00	0.163647E 00	0.183852E 00	0.183852E 00	- 349
0.4	0.763103E 00	0.727034E 00	0.231836E 00	0.318879E 00	0.318879E 00	- 702
1.0	0.323378E 00	-0.107856E 00	0.304861E 00	-0.282656E 01	-0.282656E 01	- 970
2.0	0.952718E-01	0.924243E-01	0.231186E-01	0.250136E 00	0.250136E 00	- 1065
4.0	0.793509E-02	0.723337E-02	-0.326241E-02	-0.451022E 00	-0.451022E 00	- 1104
7.0	0.168044E-02	-0.589190E-03	-0.157376E-02	0.267106E 01	0.267106E 01	- 1190

REG#	10.0000	PEU#	60.0000			
0.0	0.969279E 00	0.969279E 00	0.000000E 00	0.000000E 00	0.000000E 00	- 0
0.2	0.926233E 00	0.916429E 00	0.134412E 00	0.146670E 00	0.146670E 00	- 351
0.4	0.809900E 00	0.783812E 00	0.203903E 00	0.260142E 00	0.260142E 00	- 765
1.0	0.501282E 00	0.289297E-01	0.500469E 00	0.175421E 02	0.175421E 02	- 993
2.0	0.127139E 00	0.122262E 00	0.348619E-01	0.285141E 00	0.285141E 00	- 1025
4.0	0.134986E-01	0.130839E-01	-0.332037E-02	-0.253776E 00	-0.253776E 00	- 1094
7.0	0.351066E-03	-0.131789E-03	-0.325390E-03	0.246903E 01	0.246903E 01	- 1492

REG#	10.0000	PEU#	70.0000			
0.0	0.974477E 00	0.974477E 00	0.000000E 00	0.000000E 00	0.000000E 00	- 0
0.2	0.939815E 00	0.932903E 00	0.113772E 00	0.121955E 00	0.121955E 00	- 353
0.4	0.841728E 00	0.822144E 00	0.180516E 00	0.219568E 00	0.219568E 00	- 707
1.0	0.625917E 00	0.204077E 00	0.591713E 00	0.289946E 01	0.289946E 01	- 1009
2.0	0.158460E 00	0.151693E 00	0.458121E-01	0.302006E 00	0.302006E 00	- 1063
4.0	0.201789E-01	0.199659E-01	-0.286816E-02	-0.143653E 00	-0.143653E 00	- 1082
7.0	0.669474E-03	0.240608E-03	-0.624743E-03	-0.259652E 01	-0.259652E 01	

REG#	10.0000	PEU#	80.0000			
0.0	0.978168E 00	0.978168E 00	0.000000E 00	0.000000E 00	0.000000E 00	- 0
0.2	0.949222E 00	0.944096E 00	0.985151E-01	0.104349E 00	0.104349E 00	- 353
0.4	0.864635E 00	0.849495E 00	0.161302E 00	0.189889E 00	0.189889E 00	- 707
1.0	0.709927E 00	0.357954E 00	0.613079E 00	0.171273E 01	0.171273E 01	- 1009
2.0	0.188723E 00	0.180325E 00	0.556721E-01	0.308732E 00	0.308732E 00	- 1063
4.0	0.277213E-01	0.276438E-01	-0.207117E-02	-0.749236E-01	-0.749236E-01	- 1082
7.0	0.153658E-02	0.109934E-02	-0.107356E-02	-0.976549E 00	-0.976549E 00	

REG#	2.0000	PEU#	70.0000			
0.0	0.986690E 00	0.986690E 00	0.000000E 00	0.000000E 00	0.000000E 00	- 0
0.2	0.874068E 00	0.833878E 00	0.261976E 00	0.314190E 00	0.314190E 00	- 342
0.4	0.526053E 00	0.201095E 00	-0.486100E 00	-0.241727E 01	-0.241727E 01	- 27
1.0	0.262046E 00	0.231706E 00	0.122395E 00	0.528236E 00	0.528236E 00	- 692
2.0	0.954622E-01	0.892730E-01	-0.338136E-01	-0.378767E 00	-0.378767E 00	- 740
4.0	0.145886E-01	0.302793E-02	-0.142709E-01	-0.471308E 01	-0.471308E 01	- 798
7.0	0.310251E-02	-0.310237E-02	-0.292137E-04	0.941657E-02	0.941657E-02	- 899

REG#	2.0000	PEU#	90.0000			
0.0	0.990512E 00	0.990512E 00	0.000000E 00	0.000000E 00	0.000000E 00	- 0
0.2	0.919906E 00	0.897689E 00	0.200968E 00	0.223874E 00	0.223874E 00	- 347
0.4	0.563976E 00	0.548319E 00	-0.130680E 00	-0.238328E 00	-0.238328E 00	- 373
1.0	0.359596E 00	0.319436E 00	0.165137E 00	0.516964E 00	0.516964E 00	- 692
2.0	0.124329E 00	0.124267E 00	-0.379673E-02	-0.305530E-01	-0.305530E-01	- 721
4.0	0.204768E-01	0.136336E-01	-0.152782E-01	-0.112063E 01	-0.112063E 01	- 768
7.0	0.329828E-02	-0.265877E-02	-0.195181E-02	0.734103E 00	0.734103E 00	- 863

VALORES CALCULADOS AGORA

VERIFIQUE que os valores de α conferem com os calculados anteriormente

REG#	2.0000	PEU#	110.0000			
0.0	0.992613E 00	0.992613E 00	0.000000E 00	0.000000E 00	0.000000E 00	- 0
0.2	0.942342E 00	0.928435E 00	0.161298E 00	0.173731E 00	0.173731E 00	- 350
0.4	0.655166E 00	0.654869E 00	-0.197239E-01	-0.301188E-01	-0.301188E-01	- 361
1.0	0.438942E 00	0.396037E 00	0.189274E 00	0.477919E 00	0.477919E 00	- 694
2.0	0.163183E 00	0.162152E 00	0.183165E-01	0.112959E 00	0.112959E 00	- 713
4.0	0.286966E-01	0.248561E-01	-0.143411E-01	-0.576964E 00	-0.576964E 00	- 749
7.0	0.396774E-02	-0.159743E-02	-0.363199E-02	0.227364E 01	0.227364E 01	- 833

REG#	2.0000	PEU#	130.0000			
0.0	0.993947E 00	0.993947E 00	0.000000E 00	0.000000E 00	0.000000E 00	- 0
0.2	0.955328E 00	0.942833E 00	0.134215E 00	0.141898E 00	0.141898E 00	- 350
0.4	0.719049E 00	0.718635E 00	0.244046E-01	0.339597E-01	0.339597E-01	- 361
1.0	0.503285E 00	0.461238E 00	0.201385E 00	0.436620E 00	0.436620E 00	- 694
2.0	0.202112E 00	0.198815E 00	0.363554E-01	0.182860E 00	0.182860E 00	- 713
4.0	0.385261E-01	0.363509E-01	-0.121774E-01	-0.333162E 00	-0.333162E 00	- 749
7.0	0.503967E-02	-0.484970E-04	-0.503944E-02	0.103912E 03	0.103912E 03	- 833

PEG#	10.0000	PEL#	50.0000			
0.0	0.965696E 00	0.965696E 00	0.000000E 00	0.000000E 00	0.000000E 00	0
0.2	0.921089E 00	0.911257E 00	0.134223E 00	0.147294E 00	0.147294E 00	-351
0.4	0.801204E 00	0.775619E 00	0.200853E 00	0.258958E 00	0.258958E 00	-305
1.0	0.390414E 00	-0.111278E 00	0.374219E 00	-0.336291E 01	-0.336291E 01	-473
2.0	0.122012E 00	0.119007E 00	0.269109E-01	0.226128E 00	0.226128E 00	-1067
4.0	0.119971E-01	0.110534E-01	-0.466400E-02	-0.421953E 00	-0.421953E 00	-1102
7.0	0.497946E-03	0.211479E-03	-0.450806E-03	-0.213168E 01	-0.213168E 01	-

PEG#	10.0000	PEL#	60.0000			
0.0	0.972578E 00	0.972578E 00	0.000000E 00	0.000000E 00	0.000000E 00	0
0.2	0.938281E 00	0.931868E 00	0.109516E 00	0.117523E 00	0.117523E 00	-353
0.4	0.840626E 00	0.822586E 00	0.173218E 00	0.210577E 00	0.210577E 00	-708
1.0	0.592081E 00	0.768719E-01	0.587069E 00	0.763699E 01	0.763699E 01	-397
2.0	0.156980E 00	0.154000E 00	0.394818E-01	0.256376E 00	0.256376E 00	-1005
4.0	0.197502E-01	0.192110E-01	-0.458351E-02	-0.238587E 00	-0.238587E 00	-1093
7.0	0.865594E-03	0.226621E-03	-0.835402E-03	-0.368634E 01	-0.368634E 01	-

PEG#	10.0000	PEL#	70.0000			
0.0	0.977153E 00	0.977153E 00	0.000000E 00	0.000000E 00	0.000000E 00	0
0.2	0.949373E 00	0.944071E 00	0.923508E-01	0.977391E-01	0.977391E-01	-354
0.4	0.867251E 00	0.853924E 00	0.151455E 00	0.177363E 00	0.177363E 00	-709
1.0	0.719960E 00	0.291391E 00	0.658356E 00	0.225936E 01	0.225936E 01	-1013
2.0	0.194483E 00	0.187736E 00	0.507847E-01	0.270512E 00	0.270512E 00	-1004
4.0	0.287710E-01	0.285037E-01	-0.391239E-02	-0.137259E 00	-0.137259E 00	-707
7.0	0.160972E-02	0.940536E-03	-0.130636E-02	-0.138895E 01	-0.138895E 01	-

PEG#	2.0000	PEL#	70.0000			
0.0	0.991757E 00	0.991757E 00	0.000000E 00	0.000000E 00	0.000000E 00	0
0.2	0.943682E 00	0.932887E 00	0.142330E 00	0.152569E 00	0.152569E 00	-351
0.4	0.734597E 00	0.404362E 00	-0.613290E 00	-0.151668E 01	-0.151668E 01	-473
1.0	0.443096E 00	0.415627E 00	0.153584E 00	0.369523E 00	0.369523E 00	-305
2.0	0.208706E 00	0.197143E 00	-0.685047E-01	-0.347488E 00	-0.347488E 00	-734
4.0	0.434494E-01	0.176700E-01	-0.396941E-01	-0.224641E 01	-0.224641E 01	-726
7.0	0.118088E-01	-0.109799E-01	-0.434615E-02	0.395827E 00	0.395827E 00	-27

PEG#	2.0000	PEL#	90.0000			
0.0	0.994005E 00	0.994005E 00	0.000000E 00	0.000000E 00	0.000000E 00	0
0.2	0.963272E 00	0.957657E 00	0.103856E 00	0.108448E 00	0.108448E 00	-373
0.4	0.690795E 00	0.671990E 00	-0.160085E 00	-0.238226E 00	-0.238226E 00	-30
1.0	0.553363E 00	0.524450E 00	0.176529E 00	0.336599E 00	0.336599E 00	-709
2.0	0.250901E 00	0.250602E 00	-0.122379E-01	-0.488338E-01	-0.488338E-01	-700
4.0	0.575336E-01	0.440365E-01	-0.370257E-01	-0.840795E 00	-0.840795E 00	-700
7.0	0.121945E-01	-0.723337E-02	-0.981757E-02	0.135726E 01	0.135726E 01	-20

PEG#	2.0000	PEL#	110.0000			
0.0	0.995279E 00	0.995279E 00	0.000000E 00	0.000000E 00	0.000000E 00	0
0.2	0.972936E 00	0.969511E 00	0.815591E-01	0.841239E-01	0.841239E-01	-355
0.4	0.764304E 00	0.762413E 00	-0.537316E-01	-0.704758E-01	-0.704758E-01	-300
1.0	0.630703E 00	0.604588E 00	0.179607E 00	0.297073E 00	0.297073E 00	-703
2.0	0.308578E 00	0.307865E 00	0.209638E-01	0.680942E-01	0.680942E-01	-700
4.0	0.762855E-01	0.695101E-01	-0.314297E-01	-0.452161E 00	-0.452161E 00	-700
7.0	0.141367E-01	-0.231625E-02	-0.139456E-01	0.602078E 01	0.602078E 01	-27

VALORES CALCULADOS

Verifique que o valor de α confere com os calculados anteriormente

PEG#	2.0000	PEL#	130.0000			
0.0	0.996103E 00	0.996103E 00	0.000000E 00	0.000000E 00	0.000000E 00	0
0.2	0.978634E 00	0.976332E 00	0.670888E-01	0.687151E-01	0.687151E-01	-356
0.4	0.813624E 00	0.813502E 00	-0.140769E-01	-0.173041E-01	-0.173041E-01	-361
1.0	0.686807E 00	0.664272E 00	0.174488E 00	0.262676E 00	0.262676E 00	-705
2.0	0.362364E 00	0.359759E 00	0.433745E-01	0.120565E 00	0.120565E 00	-713
4.0	0.974700E-01	0.943498E-01	-0.244645E-01	-0.259295E 00	-0.259295E 00	-734
7.0	0.173077E-01	0.339172E-02	-0.169721E-01	-0.500398E 01	-0.500398E 01	-748

STMT

FORTRAN STATEMENT

C

J.B. LEONESSA
 DIMENSION SX4, RI4, TR4, TI4, WC27
 WC1#0.
 WC2#2
 WC3#4
 WC4#1.
 WC5#2.
 WC6#4.
 WC7#7.

2000 READ 10, PEG, PEL
 10 FORMAT(E14.8, 2X, E14.8)
 PRINT 3, PEG, PEL
 3 FORMAT(/5X, 4HPEG#, F10.4, 7H PEL#, F10.4/
 DO 600 L#1, 7
 1001 READ 1002, PEG, PEL, LL
 1002 FORMAT(E14.8, 2X, E14.8, 2X, I4
 IFXU-LL#50, 51, 50
 50 PRINT 52
 52 FORMAT(/31HA ORDEN DOS CARTOES ESTA ERRADA
 PAUSE
 GO TO 1001
 51 DO 100 J#1, 4
 100 READ 102, SXJ, RIJ
 102 FORMAT(E14.8, 2X, E14.8)
 DO 101 I#1, 4
 101 READ 103, TRIJ, TIJ
 103 FORMAT(E14.8, 2X, E14.8)

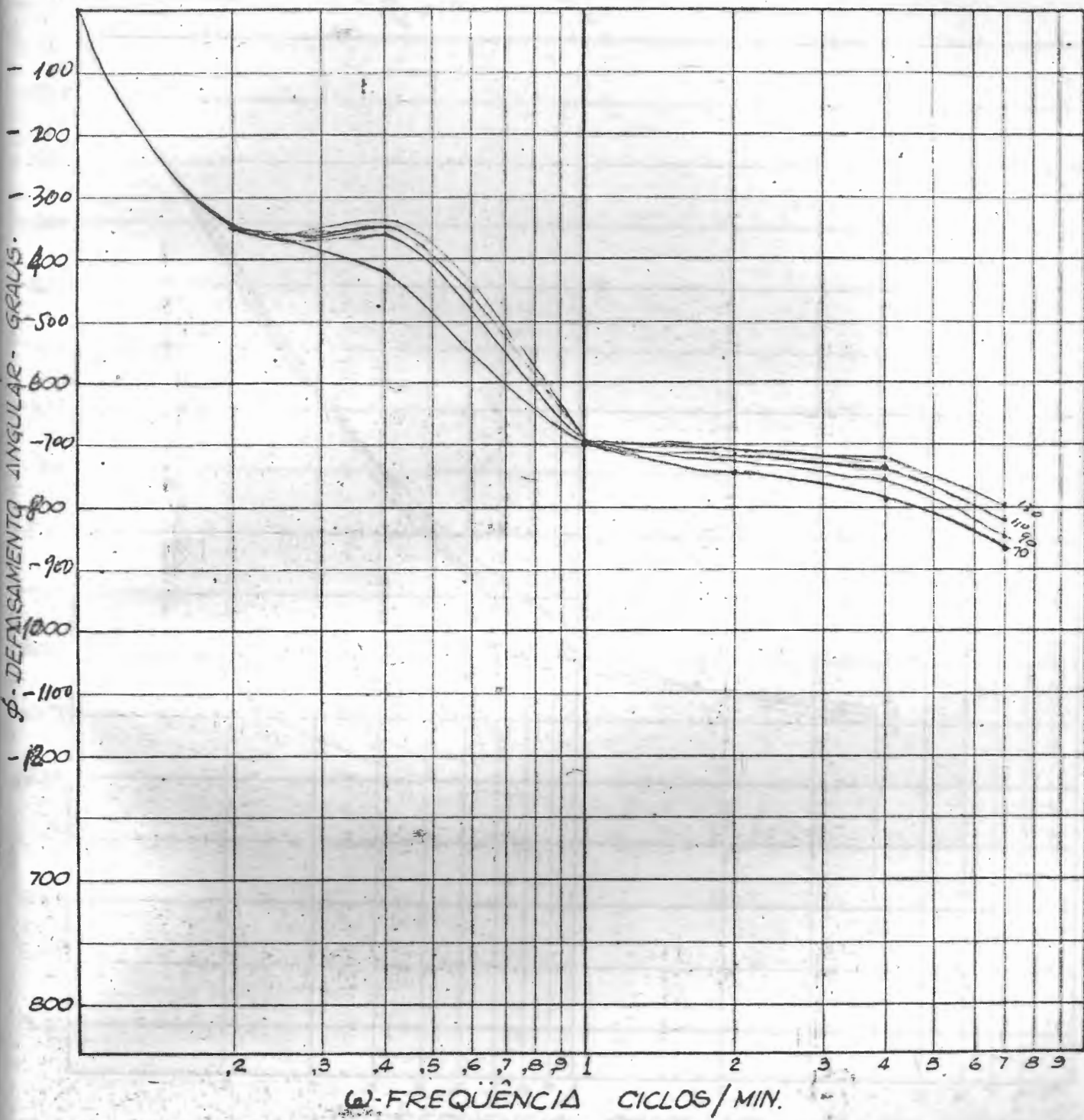
C

A#0.
 B#0.
 DO 150 J#1, 4
 150 A#ACEXPFXSJ#*TRJ#*COSFXRIJ#-TIJ#*SINFXRIJ##
 B#BEXPFXSJ#*TRJ#*SINFXRIJ#&TIJ#*COSFXRIJ##
 ALFA#SQRTFA#AEB#8
 TG#B/A
 600 PRINT 500, WCXL, ALFA, A, B, TG
 500 FORMAT(F4.1, 5X, E13.6, 3X, E13.6, 3X, E13.6, 3X, E13.6)
 GO TO 2000
 END

η - ()
 □)
 # =
 ε +

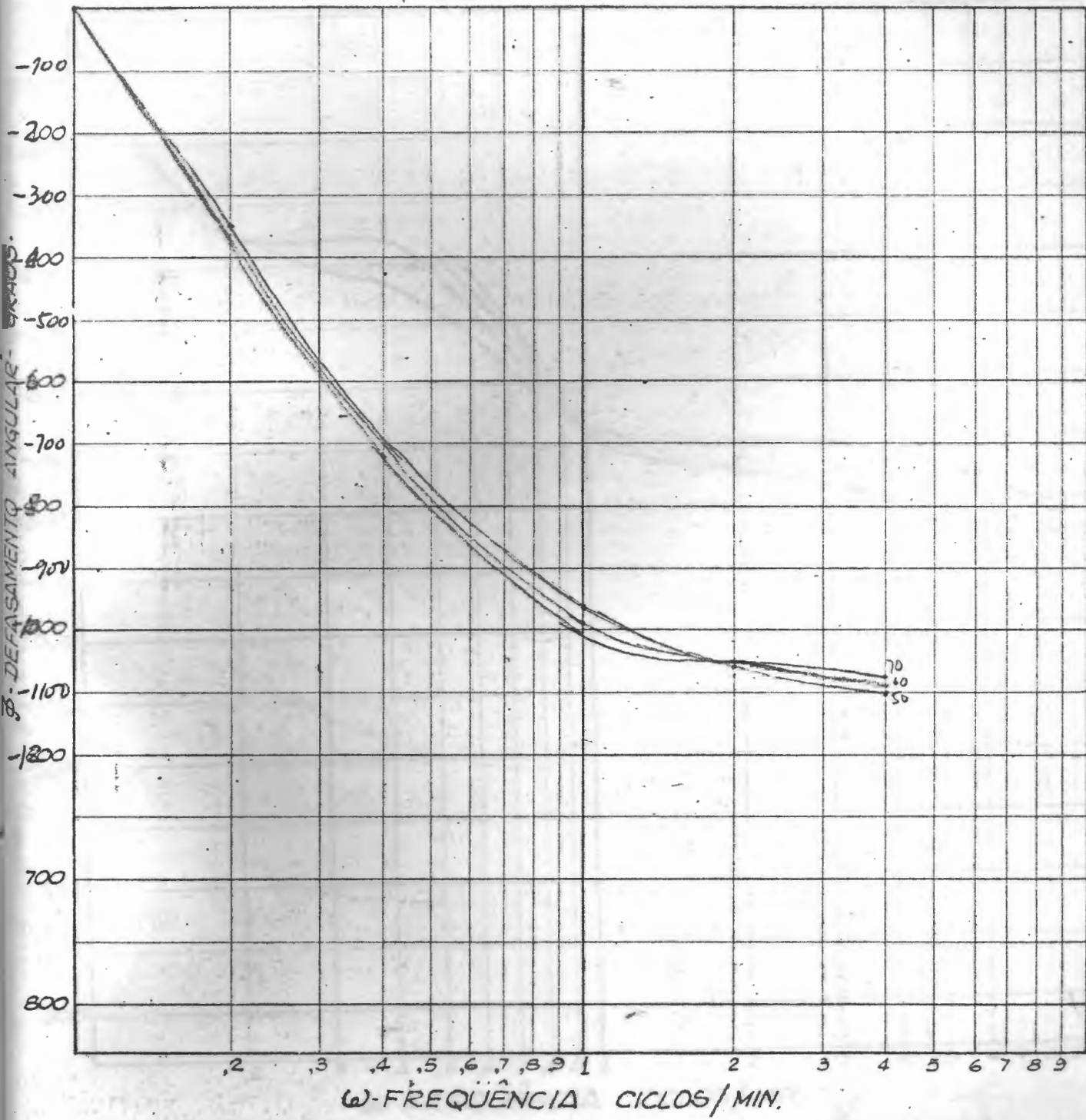
C.C. grupo I

$P_{eq} = 2.0$



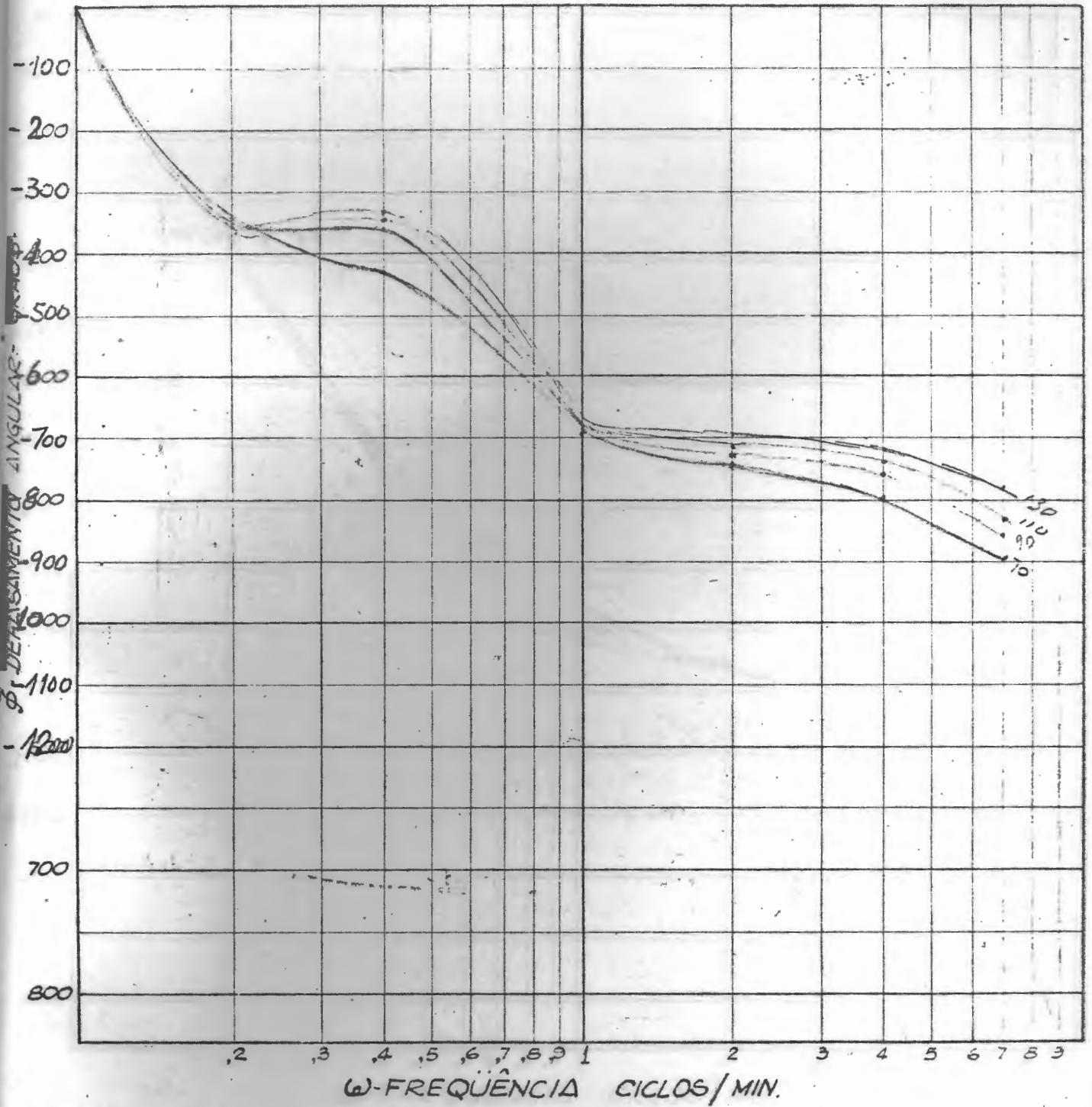
C.C. Grupo I

$P_{eq} = 10$



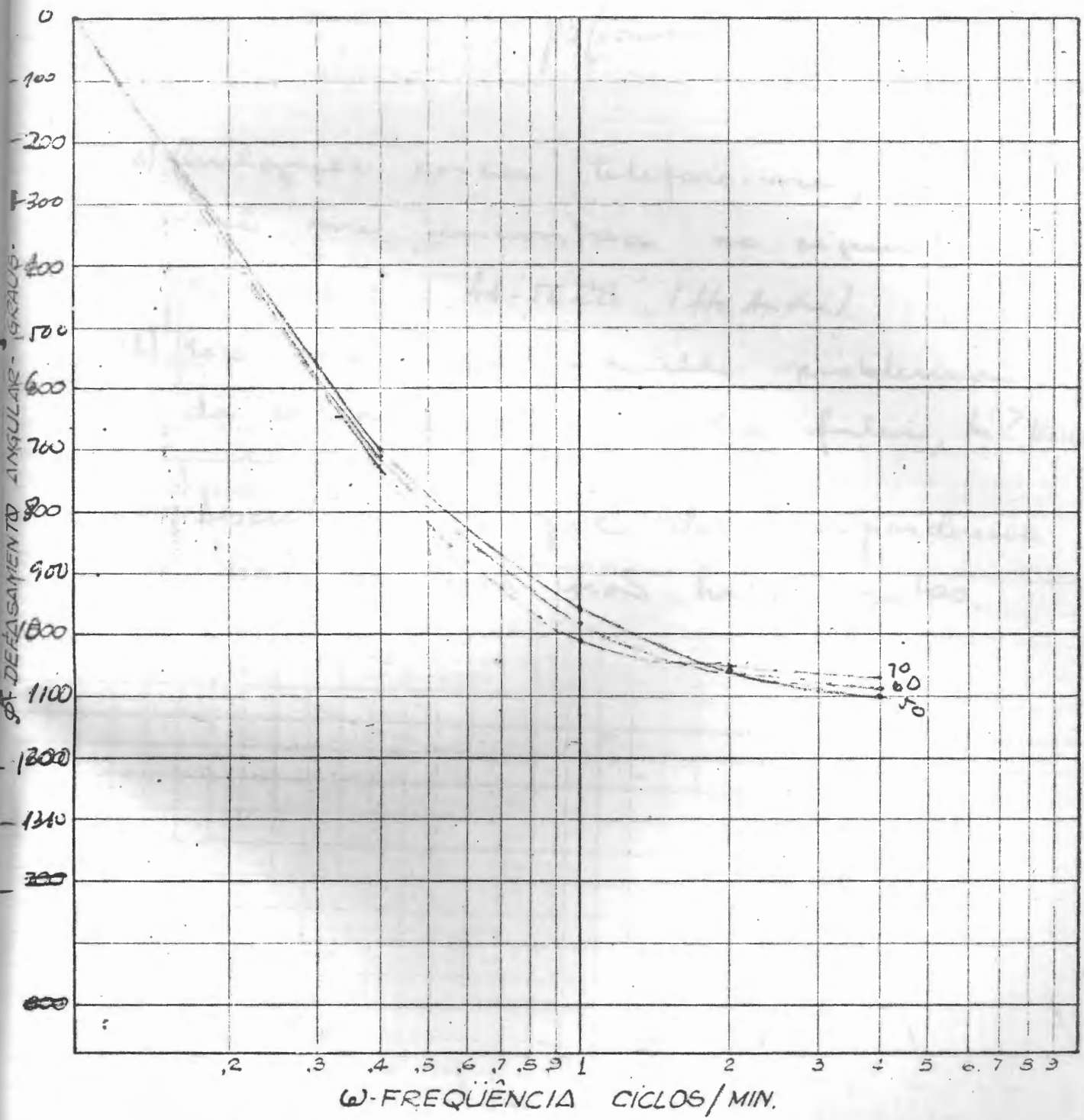
C.C Grupo II

Paq = 2



C.C. Grupo II

$P_{eq} = 10.$



Giulio, dê um "check mate" no problema
quer as conclusões sejam boas ou más.

Bloussa.

P.S.

- a) Qualquer coisa telefone-me; a noite
você me encontra no seguinte
número: 44-5628 (Sto. André).
- b) Vaza para mim a quili problema
da bolsa que eu lhe falei, tá? (vazado)
- c) Desculpe o papel da correspondência
mas, na hora não havia outro.

Não calculei para $P_{25} = 1 \text{ a } 5$ pois os cartões absorverão unidade e são rejeitados pela máquina leitora. Eles deveriam ser refeitos o que é praticamente impossível pois são quase 3.000 cartões e esse serviço ^{agora} foi todo pago de meu bolso, em máquina alugada da IBM.

Estive pensando e tocando ideias com o pessoal por aqui, e segundo me parece o problema parecer ser mesmo os baixos valores de Pedet ou então o modelo realmente não é bom.

Quanto a essas considerações fico esperando as ~~proposições~~ sugestões de vocês. Se que junto uma cópia da Tese (ainda não corrigido) para você poder se localizar. Espero uma resposta rápida sua para refazer as conclusões e dar o assunto por encerrado. Junto a sua resposta o máximo possível de informações quanto as conclusões.

Massarani

Aqui estão os valores calculados para o desfasamento angular. Esses resultados foram obtidos através de um IBM 1401, aqui em São Paulo. (Qualquer dúvida o programa está pronto).

Calculei ϕ para $P_{eq} = 2.0$ e 10.0 e para as cond. de cont. Supos I e II. Seguem os curvos que eu tracei. Dê uma olhada e veja se você vê qualquer coisa melhor, pois eu não vi. Observe que nos dois casos de $P_{eq} = 2.0$, o desfasamento angular também apresenta uma "lombada" para frequências de 0.4 c/m, como acontece com α' . Nesse particular os resultados estão como o Tavora estava prevendo (Ele falou "se o α' deu uma "lombada", o ϕ também deverá dar". Isso mostra (segundo o Tavora) que não há erro de propagação. Note que eu calculei novamente o valor de α , e este está perfeitamente de acordo com os valores calculados anteriormente, (veja Tise) e esse cálculo foi feito em outra máquina, apagando assim qualquer dúvida quanto "erro" do computador (Pergunte ao Pacote se isso é possível ele vai rir).