

ESTUDO FUNDAMENTAL DA TRANSFERÊNCIA DE
UMIDADE EM MEIOS POROSOS GRANULARES

13/90

JOÃO BORGES LAURINDO
ENGENHEIRO DE ALIMENTOS

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS

ESTUDO FUNDAMENTAL DA TRANSFERÊNCIA DE UMIDADE
EM MEIOS POROSOS GRANULARES

Parecer

Este exemplar corresponde
a redação final da tese
defendida por José Borges
Laurindo e aprovada pela
Comissão Julgadora em
13.07.90.

Campinas, 13 de julho de 1990.



JOÃO BORGES LAURINDO
Engenheiro de Alimentos

Prof. Dr. KIL JIN PARK
Orientador

Prof. Dr. PAULO CÉSAR PHILIPPI
Co-orientador

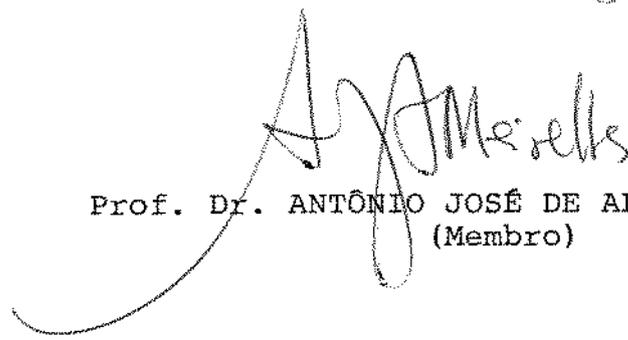
DISSERTAÇÃO APRESENTADA À FACULDADE DE ENGENHARIA
DE ALIMENTOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
MESTRE EM ENGENHARIA DE ALIMENTOS

BANCA EXAMINADORA

~~Prof. Dr. KIL HIN PARK
(Orientador)~~

Prof. Dr. PAULO CÉSAR PHILIPPI
(Co-Orientador)


Prof. Dra. FLORENCIA CECILIA MENEGALLI
(Membro)


Prof. Dr. ANTÔNIO JOSÉ DE ALMEIDA MEIRELLES
(Membro)

CAMPINAS - 1990

*Dedico este trabalho às pessoas
mais importantes de minha vida*

*Aos meus pais, João e Benedita,
pelo amor, apoio e incentivo*

À Gláucia, pelo amor e carinho de todo dia

Todo presente verdadeiro é recíproco

Qualquer caminho é apenas um caminho e não constitui insulto algum -para si mesmo ou para os outros- abandoná-lo quando assim ordena o seu coração. (...) Tente-o tantas vezes quantas julgar necessárias... Então, faça a si mesmo e apenas a si mesmo uma pergunta: possui esse caminho um coração? Em caso afirmativo, o caminho é bom. Caso contrário, esse caminho não possui importância alguma.

CARLOS CASTAÑEDA

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Paulo César Philippi, pela amizade e confiança recebidas, e pelo incentivo e orientação durante toda a realização do trabalho,

Ao Prof. Dr. Kil Jin Park, pelo incentivo e compreensão, considerando-se todas as dificuldades associadas à orientação do trabalho sem um contato contínuo,

Ao Dr. Sílvio Crestana, pela orientação dos experimentos relacionados ao uso das Técnicas da Atenuação de Raios Gama e Tomografia Computadorizada, realizada na EMBRAPA - UAPDIA - São Carlos - S.P.,

Ao Prof. Dr. Sérgio Mascarenhas, pela viabilização dos acordos para a utilização dos equipamentos da EMBRAPA - UAPDIA

Aos colegas do Departamento de Engenharia Química, pelo indispensável apoio,

Aos membros da banca examinadora, Profs. Drs. Antônio José de Almeida Meirelles e Florencia Cecilia Menegalli, pelos importantes comentários sobre o trabalho,

Ao Prof. Ariovaldo Bolzan, pela amizade e pelo auxílio nos estudos iniciais da resolução numérica dos modelos de transferência de massa,

Ao acadêmico Aldomar Pedrini, pela amizade, competência e dedicação com que prestou o seu auxílio durante uma etapa importante dos trabalhos experimentais,

Ao Carlos Luiz Ribeiro do Carmo, pela amizade, desde a chegada a Florianópolis,

À CAPES, pelo apoio financeiro,

À ABIA, pelo custeio das fotocópias e capas do trabalho.

ÍNDICE GERAL

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE TABELAS

SIMBOLOGIA UTILIZADA NO TEXTO

RESUMO

ABSTRACT

	pg
1 INTRODUÇÃO	1
2. FUNDAMENTOS	4
2.1. MEIOS POROSOS - PROPRIEDADES E DEFINIÇÕES BÁSICAS	4
2.1.1. INTRODUÇÃO	4
2.1.2. RELAÇÕES PRINCIPAIS ENTRE OS VOLUMES E AS MASSAS DOS CONSTITUINTES	5
2.1.3. FIXAÇÃO DA UMIDADE NO MEIO POROSO	6
2.2. MODELO FENOMENOLÓGICO PARA TRANSFERÊNCIA SIMULTÂNEA DE CALOR E MASSA EM MEIOS POROSOS NÃO SATURADOS	8
2.2.1. EQUAÇÃO DA CONSERVAÇÃO DA MASSA	8
2.2.2. TRANSFERÊNCIA DE LÍQUIDO EM MEIOS POROSOS	11
2.2.3. TRANSFERÊNCIA DE VAPOR EM MEIOS POROSOS	16
2.2.4. TRANSFERÊNCIA SIMULTÂNEA DE LÍQUIDO E VAPOR	19
2.2.5. EQUAÇÃO DE CONSERVAÇÃO DA ENERGIA	21
2.2.6. OS COEFICIENTES FENOMENOLÓGICOS D E $D\delta$	25
2.2.6.1. INTRODUÇÃO	25
2.2.6.2. DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL	26
2.2.6.3. COMPORTAMENTO DOS COEFICIENTES COM A UMIDADE E	

COM A TEMPERATURA	27
3. MATERIAL E MÉTODOS	31
3.1. DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE ISOTÉRMICO DE DIFUSÃO DE UMIDADE EM MEIOS POROSOS	31
3.2. MONTAGENS EXPERIMENTAIS	31
3.2.1. MONTAGEM EXPERIMENTAL 1	31
3.2.2. MONTAGEM EXPERIMENTAL 2	33
3.3. PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS	34
3.4. PREENCHIMENTO DAS COLUNAS	37
3.4.1. MÉTODO DE PREENCHIMENTO DE COLUNAS COM AMOSTRA SECA (MPS).....	37
3.4.2. MÉTODO DE PREENCHIMENTO DE COLUNAS COM AMOSTRA ÚMIDA (MPU).....	40
3.5. AVALIAÇÃO DOS COEFICIENTES DE DIFUSÃO	42
3.6. DETERMINAÇÃO DA ISOTERMA DE EQUILÍBRIO PARA A MISTURA DE AREIA E CAULIM	46
3.7. TRANSMISSÃO DIRETA DE RAIOS GAMA E TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA.....	48
3.7.1. EQUIPAMENTO EXPERIMENTAL	48
3.7.2. PROPRIEDADES DA MISTURA DE AREIA E CAULIM COM RELAÇÃO À INTERAÇÃO COM A RADIAÇÃO GAMA	51
3.7.2.1. DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ATENUAÇÃO DE MASSA	51
3.7.2.2. CURVAS DE CALIBRAÇÃO	52
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
4.1 EXPERIMENTOS PRELIMINARES UTILIZANDO A TRANSMISSÃO DIRETA DE DE RAIOS GAMA (TDR- γ)	57
4.1.1. EXPERIMENTOS COM A MISTURA DE AREIA E CAULIM	57
4.1.2. EXPERIMENTOS COM UMA AMOSTRA DE FUBÁ	59
4.1.2.1. DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ATENUAÇÃO DE MASSA	59
4.1.2.2. ESTUDO DO PREENCHIMENTO DAS COLUNAS	61

4.2. ESTUDO DOS MÉTODOS DE PREENCHIMENTO DE COLUNAS USANDO O TDR- γ E A TR (MISTURA DE AREIA E CAULIM).	63
4.2.1. MÉTODO DE PREENCHIMENTO DE COLUNAS COM AMOSTRA SECA (MPS). ESTUDO DAS DISTRIBUIÇÕES INICIAIS DE DENSIDADE E UMIDADE. ACOMPANHAMENTO DOS PROCESSOS DE TRANSFERÊNCIA DE UMIDADE	63
4.2.2. MÉTODO DE PREENCHIMENTO DE COLUNAS COM A AMOSTRA ÚMIDA (MPU)	70
4.2.2.1. ESTUDO DA DISTRIBUIÇÕES INICIAIS DE DENSIDADE E UMIDADE	70
4.2.2.2. ACOMPANHAMENTO DA SECAGEM DAS COLUNAS PELO TDR- γ	75
4.2.3. ESTUDO DAS COLUNAS ATRAVÉS DA TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA (TAC)	72
4.3. PERFÍLS TRANSIENTES DE UMIDADE. COMPORTAMENTO DO COEFICIENTE DE DIFUSÃO COM A UMIDADE E A TEMPERATURA.	80
4.3.1. MONTAGEM EXPERIMENTAL 1	80
4.3.2. MONTAGEM EXPERIMENTAL 2	80
4.3.2.1. PERFÍLS TRANSIENTES DE UMIDADE	80
4.3.2.2. COMPORTAMENTO DO COEFICIENTE DE DIFUSÃO COM A UMIDADE E A TEMPERATURA.	87
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES	100
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104
APÊNDICE	113
A.1. MÉTODOS NUCLEARES DE DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE E UMIDADE EM MEIOS POROSOS	113
A.1.1. TÉCNICA DA TRANSMISSÃO DIRETA DE RAIOS GAMA	113
A.1.1.1. INTRODUÇÃO	113
A.1.1.2. ATENUAÇÃO DE RAIOS GAMA - TEORIA	114
A.1.1.2.1. MECANISMOS DE INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO GAMA COM A MATÉRIA	114
A.1.1.2.2. ATENUAÇÃO DE UM FEIXE MONOENERGÉTICO	116
A.1.1.2.3. ANÁLISE PARA UMA AMOSTRA DE MEIO POROSO	119

A.1.2. TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA - PRINCÍPIOS124

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1. REPRESENTAÇÃO SIMBÓLICA DOS CONSTITUINTES DE UM MEIO POROSO INSATURADO	07
FIGURA 2.2. CURVAS EXPERIMENTAIS DE RETENÇÃO DE UMIDADE PARA A MISTURA DE AREIA E CAULIM (QUADRI, 1988)	15
FIGURA 3.1. MONTAGEM EXPERIMENTAL 1	32
FIGURA 3.2. MONTAGEM EXPERIMENTAL 2	35
FIGURA 3.3. FOTOGRAFIAS MOSTRANDO A MONTAGEM EXPERIMENTAL 2	36
FIGURA 3.4. DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA AREIA (QUADRI, 1988).....	38
FIGURA 3.5. ETAPA DE RETIRADA DO CANUDO DE PLÁSTICO CONTENDO O MEIO POROSO	43
FIGURA 3.6. DETALHE DO SECCIONAMENTO DO CANUDO	43
FIGURA 3.7. AVALIAÇÃO DOS COEFICIENTES DE DIFUSÃO	45
FIGURA 3.8. DIAGRAMA DE BLOCOS DO MINI-TOMÓGRAFO DE RAIOS-X OU RAIOS- γ	49
FIGURA 3.9. VISTA GERAL DO MINI-TOMÓGRAFO DE RAIOS-X OU RAIOS- γ	50
FIGURA 3.10. CURVA DE CALIBRAÇÃO DE $\mu \times \rho$	55
FIGURA 3.11. CURVA DE CALIBRAÇÃO DE $\mu \times \theta_{\omega}$	56
FIGURA 4.1. EXPERIMENTO PRELIMINAR DE UMIDIFICAÇÃO	60
FIGURA 4.2. EXPERIMENTO PRELIMINAR DE SECAGEM	60
FIGURA 4.3. DISTRIBUIÇÃO DE DENSIDADES EM UMA COLUNA DE FUBÁ SECO, DETERMINADA ATRAVÉS DA TÉCNICA DA ATENUAÇÃO DE RAIOS- γ	62
FIGURA 4.4. EXPERIMENTO PRELIMINAR DE UMIDIFICAÇÃO DE UMA COLUNA DE FUBÁ, INICIALMENTE SECA, FAZENDO USO DA MONTAGEM EXPERIMENTAL 1 E DO TDR- γ	63
FIGURA 4.5. DISTRIBUIÇÕES DE DENSIDADES EM COLUNAS PREPARADAS	

PELO MPS	65
FIGURA 4.6. DISTRIBUIÇÃO DE DENSIDADES EM UMA COLUNA PREPARADA ALEATORIAMENTE	66
FIGURA 4.7. DISTRIBUIÇÃO DE UMIDADE EM ESTADO DE EQUILÍBRIO PARA AS COLUNAS PREPARADAS PELO MPS E POSTERIORMENTE UMIDIFICADAS (CURVA SUPERIOR). ACOMPANHAMENTO DO PROCESSO DE SECAGEM UTILIZANDO A MONTAGEM EXPERIMENTAL 1 (CURVAS INFERIORES)	68
FIGURA 4.8. DISTRIBUIÇÕES INICIAIS DE UMIDADE EM COLUNAS PREPARADAS PELO MPU	71
FIGURA 4.9. DISTRIBUIÇÃO DE DENSIDADES DETERMINADA ATRAVÉS DA TR PARA A COLUNA PREPARADA ALEATORIAMENTE	74
FIGURA 4.10. DISTRIBUIÇÃO DE DENSIDADES DETERMINADA ATRAVÉS DA TR PARA A COLUNA PREPARADA PELO MPS	74
FIGURA 4.11. DISTRIBUIÇÃO DAS DENSIDADES MÉDIAS ENCONTRADAS PARA O PLANO DE CORTE TOMOGRÁFICO (SECÇÃO LONGITUDINAL MÉDIA) DE UMA COLUNA PREPARADA PELO MPU	75
FIGURA 4.12. DISTRIBUIÇÃO DAS DENSIDADES MÉDIAS ENCONTRADAS PARA OS PLANOS DE CORTE TOMOGRÁFICOS (SECÇÕES LONGITUDINAIS MÉDIAS, FIGURA 4.13) DE UMA COLUNA PREPARADA PELO MPU	77
FIGURA 4.13. ILUSTRAÇÃO DOS PLANOS DE CORTE TOMOGRÁFICOS	77
FIGURA 4.14. IMAGEM DO PLANO DE CORTE L_1	78
FIGURA 4.15. IMAGEM DO PLANO DE CORTE L_2	78
FIGURA 4.16. IMAGEM DO PLANO DE CORTE DE UMA COLUNA CONTENDO GRÃOS DE SOJA	79
FIGURA 4.17. PERFÍS TRANSIENTES DE UMIDADE DURANTE O PROCESSO DE SECAGEM, A 30°C ($\omega_0 = 2,53\%$)	82

FIGURA 4.18. PERFÍS TRANSIENTES DE UMIDADE DURANTE O PROCESSO DE SECAGEM, A 30 ⁰ C ($\omega_0 = 3,15\%$)	82
FIGURA 4.19. PERFÍS TRANSIENTES DE UMIDADE DURANTE O PROCESSO DE SECAGEM, A 30 ⁰ C ($\omega_0 = 5,30\%$)	83
FIGURA 4.20. PERFÍS TRANSIENTES DE UMIDADE DURANTE O PROCESSO DE SECAGEM, A 30 ⁰ C ($\omega_0 = 6,84\%$)	83
FIGURA 4.21. PERFÍS TRANSIENTES DE UMIDADE DURANTE O PROCESSO DE SECAGEM, A 30 ⁰ C ($\omega_0 = 6,95\%$)	84
FIGURA 4.22. PERFÍS TRANSIENTES DE UMIDADE DURANTE O PROCESSO DE SECAGEM, A 30 ⁰ C ($\omega_0 = 7,68\%$)	84
FIGURA 4.23. PERFÍS TRANSIENTES DE UMIDADE DURANTE O PROCESSO DE SECAGEM, A 30 ⁰ C ($\omega_0 = 7,84\%$)	85
FIGURA 4.24. PERFÍS TRANSIENTES DE UMIDADE DURANTE O PROCESSO DE SECAGEM, A 40 ⁰ C ($\omega_0 = 6,00\%$)	85
FIGURA 4.25. PERFÍS TRANSIENTES DE UMIDADE DURANTE O PROCESSO DE SECAGEM, A 60 ⁰ C ($\omega_0 = 6,02\%$)	86
FIGURA 4.26. PERFÍS TRANSIENTES DE UMIDADE DURANTE O PROCESSO DE SECAGEM, A 80 ⁰ C ($\omega_0 = 6,01\%$)	86
FIGURA 4.27. COMPORTAMENTO DO COEFICIENTE DE DIFUSÃO COM A UMIDADE (30 ⁰ C)	88
FIGURA 4.28. COMPORTAMENTO DO COEFICIENTE DE DIFUSÃO COM A TEMPERATURA E COM A UMIDADE	89
FIGURA 4.29. COLUNA DE MEIO POROSO SUBMETIDA A UM PROCESSO DE SECAGEM (ADAPTADO DE BIMBENET & LONCIN, 1971)	91
FIGURA 4.30. MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE UMIDADE EM MEIOS POROSOS	93
FIGURA 4.31. DETALHE DA SITUAÇÃO (c) DA FIGURA 4.30	

(PHILIP & DE VRIES, 1957)	93
FIGURA 4.32. ISOTERMA DE EQUILÍBRIO DE UMIDADE PARA A MISTURA AREIA-CAULIM EM CONDIÇÕES DE DESORSÃO	96
FIGURA 4.33. ESTIMATIVA DA ENERGIA DE ATIVAÇÃO PARA DIFUSÃO	99
FIGURA A.1. IMPORTÂNCIA RELATIVA DOS DIFERENTES EFEITOS NO COEFICIENTE DE ATENUAÇÃO DE MASSA DA ÁGUA	117
FIGURA A.2. ESQUEMA DA ATENUAÇÃO DA RADIAÇÃO GAMA PELA MATÉRIA.....	118
FIGURA A.3. ILUSTRAÇÃO DA TRAJETÓRIA DO FÓTON	120
FIGURA A.4. OBTENÇÃO DE UMA TOMOGRAFIA	126

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 3.1. DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA MISTURA AREIA-CAULIM (QUADRI, 1988)	38
TABELA 3.2. UMIDADES RELATIVAS PROPORCIONADAS POR SOLUÇÕES SALINAS SATURADAS A 30 ^o C	47
TABELA 3.3. PONTOS EXPERIMENTAIS DA CURVA DE CALIBRAÇÃO DE $\mu \times \rho$	55
TABELA 3.4. PONTOS EXPERIMENTAIS DA CURVA DE CALIBRAÇÃO DE $\mu \times \theta$	56

SIMBOLOGIA UTILIZADA NO TEXTO

A = área de secção reta da coluna [L^2]

$c_i = m_i/V_t$ = concentração do componente i [M/L^3]

C = calor específico do meio poroso úmido a pressão constante [$Q/M\theta$]

d = diâmetro do capilar [L]

D_l = coeficiente isotérmico de migração de umidade na fase líquida [L^2/θ]

$D_l \delta_l$ = coeficiente não-isotérmico de migração de umidade na fase líquida [$L^2/\theta T$]

D_v = coeficiente isotérmico de migração de umidade na fase vapor [L^2/θ]

$D_v \delta_v$ = coeficiente não-isotérmico de migração de umidade na fase vapor [$L^2/\theta T$]

$D = D_l + D_v$ = coeficiente isotérmico de transferência de umidade associado aos gradientes de concentração, exclusivamente [L^2/θ]

$D\delta = D_l \delta_l + D_v \delta_v$ = coeficiente não-isotérmico de transferência de umidade, associado aos gradientes de concentração, exclusivamente [$L^2/\theta T$]

D_a = coeficiente de difusão do vapor d'água no ar [L^2/θ]

E = energia de ativação para difusão [Q/MOL]

F = fator de ponderação do coeficiente de difusão do vapor d'água no ar, adimensional

g = aceleração da gravidade [L/θ^2]

I_i = termo de geração do componente i [$M/L^3\theta$]

$I_v = -I_i$ = termo associado à vaporização e à condensação da água [$M/L^3\theta$]

I = intensidade do feixe emergente, número de fótons

I_0 = intensidade do feixe que atinge o detetor na ausência da amostra (recipiente vazio), número de fótons

I_{00} = intensidade do feixe incidente, número de fótons

J = densidade de fluxo de massa global $[M/L^2\theta]$
 $J_{1,c}$ = densidade de fluxo convectivo do componente 1 $[M/L^2\theta]$
 $J_{1,d}$ = densidade de fluxo difusivo do componente 1 $[M/L^2\theta]$
 $J_1 = J_{1,c} + J_{1,d}$ = densidade de fluxo total do componente 1 $[M/L^2\theta]$
 J_l = densidade de fluxo de líquido $[M/L^2\theta]$
 J_v = densidade de fluxo de vapor $[M/L^2\theta]$
 k = condutividade hidráulica $[L/\theta]$
 k = vetor unitário no sentido positivo de y , adimensional
 l = distância percorrida por um volume de fluido entre dois pontos do meio poroso $[L]$
 l_p = distância geométrica entre dois pontos do meio poroso $[L]$
 L = calor latente de vaporização da água $[Q/MOL]$
 l = comprimento da coluna $[L]$
 m_1 = massa do componente 1 $[M]$
 m_a = massa do ar no meio poroso $[M]$
 m_l = massa do líquido no meio poroso $[M]$
 m_s = massa do sólido no meio poroso $[M]$
 $m_t = m_a + m_l + m_s$ = massa total do meio poroso $[M]$
 m_0 = massa inicial de água contida na coluna $[M]$
 M = massa molecular da água $[M/MOL]$
 p = porosidade
 P = pressão total na fase gasosa $[F/L^2]$
 P_v = pressão parcial do vapor d'água no ar $[F/L^2]$
 $P_s(T)$ = pressão de saturação do vapor d'água na temperatura de referência, T $[F/L^2]$
 R = constante universal dos gases perfeitos $[Q/T MOL]$
 $r = m_0/\omega_0 l = \rho_0 A$ = massa de sólido por unidade de comprimento da

coluna $[M/L^3][L^2] = [M/L]$

S = grau de saturação do meio poroso, adimensional

S_e = área específica do meio poroso $[L^2/M]$

t = tempo [θ]

T = temperatura absoluta [T]

UM = unidades do mini-tomógrafo

V_a = volume do ar no meio poroso $[L^3]$

$V_f = V_a + V_l$ = volume total de fluido no meio poroso $[L^3]$

V_l = volume da água no meio poroso $[L^3]$

V_s = volume do sólido no meio poroso $[L^3]$

$V_t = V_a + V_l + V_s$ = volume total do meio poroso $[L^3]$

x_s = espessura do sólido [L]

x_w = espessura da água [L]

x_a = espessura do ar [L]

x_c = espessura da parede do recipiente [L]

$x_{a'}$ e $x_{a''}$ = espessuras das camadas de ar existentes entre a amostra e o detetor [L]

$x = x_s + x_w + x_a$ = espessura da amostra [L]

y = potencial gravitacional [L]

z = direção do fluxo de umidade nas colunas submetidas às condições de secagem [L]

LETRAS GREGAS

α = ângulo de contato do líquido com as paredes do capilar

δ_v = coeficiente de termo-migração na fase vapor [1/T]

$\delta = \delta_l + \delta_v$ = coeficiente global de termo-transferência [1/T]

δ_l = coeficiente de termo-migração na fase líquida [1/T]

ϵ = coeficiente de mudança de fase, adimensional

θ_w = unidade volumétrica na fase líquida = fração volumétrica de líquido, adimensional

$\theta_{w,c}$ = unidade volumétrica do caulim, adimensional

$\theta_{w,a}$ = unidade volumétrica da areia, adimensional

θ_a = fração volumétrica de ar, adimensional

λ = condutividade térmica do meio poroso úmido [Q/θLT]

μ = coeficiente de atenuação linear total [1/L]

μ_f = coeficiente de atenuação para o efeito foto-elétrico [1/L]

μ_c = coeficiente de atenuação para o efeito Compton [1/L]

μ_p = coeficiente de atenuação para a produção de par [1/L]

$\bar{\mu}$ = coeficiente de atenuação de massa [L²/M]

$\bar{\mu}_s$ = coeficiente de atenuação de massa do sólido [L²/M]

$\bar{\mu}_w$ = coeficiente de atenuação de massa do sólido [L²/M]

$\bar{\mu}_a$ = coeficiente de atenuação de massa do ar [L²/M]

$\bar{\mu}_c$ = coeficiente de atenuação de massa do material da parede do recipiente [L²/M]

ν = viscosidade cinemática da água líquida [L²/θ]

ρ_s = densidade da fase sólida [M/L³]

ρ_0 = densidade aparente seca do meio poroso [M/L³]

$\rho_w = \rho_l$ = densidade do líquido [M/L³]

ρ_a = densidade do ar [M/L³]

ρ_c = densidade do material da parede do recipiente [M/L³]

σ_1 = tensão superficial do líquido [F/L]

$\tau = (l/l_p)$ = tortuosidade do meio poroso, adimensional

ϕ = umidade relativa do ar a uma dada temperatura de referência, adimensional

$\Phi = \Psi - y$ = potencial total para transferência de umidade [L]

Ψ = potencial capilar [L]

Ψ_c = potencial capilar do caulim [L]

Ψ_a = potencial capilar da areia [L]

ω = umidade em massa (base seca), adimensional

ω_l = umidade em massa na fase líquida (base seca), adimensional

ω_v = umidade em massa na fase vapor (base seca), adimensional

ω_0 = umidade inicial do meio (base seca), adimensional

RESUMO

A transferência de umidade em meios porosos granulares foi estudada, utilizando-se colunas de uma mistura de areia e caulim, submetidas a condições de secagem.

Foram desenvolvidos dois métodos para a preparação das colunas, partindo-se da amostra seca e da amostra úmida, onde se procurou obter colunas homogêneas quanto às distribuições de densidade e umidade. A medição da densidade e umidade foram realizadas através do uso das técnicas da Transmissão Direta de Raios Gama e da Tomografia Computadorizada.

As colunas de areia e caulim foram submetidas à secagem sob condições constantes, determinando-se perfis transientes de umidade. O conhecimento dos perfis proporcionou a determinação do comportamento do coeficiente de difusão de umidade no meio poroso, com a umidade e com a temperatura.

O Coeficiente de Difusão Efetivo (D) variou em aproximadamente 100 vezes para conteúdos de umidade entre 0,3 e 8,0%. Entretanto, entre estes limites, várias regiões com comportamento diferenciado foram encontradas. Numa primeira região, com conteúdos de umidade entre 0,3 a 3,9%, D variou exponencialmente. Para conteúdos de umidade variando de 3,9 a 5,0%, o coeficiente foi pouco sensível às variações do conteúdo de umidade, embora um máximo tenha sido observado entre 4,2 e 4,6%. Para umidades acima de 5,0%, foi encontrada uma brusca redução no valor de D , atingindo um mínimo em 5,6%. A partir desse ponto o coeficiente volta a apresentar crescimento exponencial.

A variação do Coeficiente de Difusão com a temperatura foi analisada

pelo conceito de energia de ativação para difusão. Encontrou-se um valor de 0,65 Kcal/Mol para temperaturas variando de 30 a 80°C a um conteúdo de umidade de 2,0%.

ABSTRACT

The moisture transfer in granulated porous media was studied using sand and caulim mixture, under constant drying conditions.

Two methods for making the sand and caulin columns were developed. One was based on using dry material for filling-up the columns and the other on using wet material. The aim was to obtain homogeneous columns in relation to density and moisture distribution. Techniques as direct gama rays transmission and computerized tomography were used to test homogeneity.

The sand and caulin columns were dried under constant conditions. Transient humidity profiles were determined and used to study the Difusion Coefficient behaviour with moisture and temperature.

The effective Difusion Coefficient (D) has varied about 100 times for a moisture content ranging from 0.3 to 8%. Nevertheless, between these limits, several regions with different behaviour were found. On the first region, moisture content between 0.3 to 3.9%, D were exponentialy. For moisture contents varying from 3.9 to 5.0%, the coefficient was little sensitive to moisture content variations, although a maximum was found between 4.2 and 4.6%. From 5.0% upwards a sudden reduction on D was found, reaching a minimum for a moisture content of 5.6%. For moisture contents above 5.6% an exponential growth of the coefficient was detected.

The variation of the Difusion Coefficient with temperature was analysed by the activation energy concept for difusion. A value of 0.65 Kcal/Mol was found a temperature ranging from 30 to 80⁰C and a moisture content of 2%.

1. INTRODUÇÃO

A transferência de calor e umidade em meios porosos possui grande importância em inúmeros processos que ocorrem na natureza, assim como em processos agrícolas e industriais. A secagem de cereais ou de produtos cerâmicos, a infiltração de umidade no solo ou ainda, a variação das propriedades térmicas de isolamentos devido à penetração de umidade, são processos típicos de grande importância tecnológica envolvendo diferentes espécies de meios porosos.

Uma melhor compreensão dos fenômenos de transferência nos meios porosos pode trazer informações importantes para o desenvolvimento de novas técnicas de secagem, melhoria dos isolamentos térmicos de edificações, uma melhor utilização e estocagem da energia solar, considerando o caráter cíclico da mesma, e resolução de outros problemas de grande importância tecnológica. A elaboração de qualquer projeto relacionado a esses processos se depara com o problema da estimativa da transferência simultânea de calor e massa nas estruturas porosas correspondentes (CRAUSSE, 1983).

As tentativas de análise e modelamento mais acurado desses fenômenos só ocorreram a partir dos trabalhos de LUIKOV, 1954; PHILIP & De VRIES, 1957; De VRIES, 1958 e CARY & TAYLOR, 1960.

Apesar do grande número de trabalhos publicados, é ainda difícil se pronunciar sobre a validade dos modelos de descrição teórica propostos, tendo em vista o caráter muitas vezes contraditório dos resultados obtidos pelos modelos, se comparados aos experimentais. ALVARENGA *et alli*, 1980, apresentam um resumo das principais teorias de predição da transferência simultânea de calor e massa em meios porosos.

Dentro deste contexto, procurou-se realizar um estudo fundamental

sobre a transferência de umidade em meios porosos, mediante condições macroscopicamente isotérmicas. Para isso, utilizou-se técnicas não-destrutivas de medição da densidade e umidade (técnica da atenuação de raios gama e tomografia computadorizada) para desenvolver um método de preparação de colunas que proporcionasse homogeneidade e reprodutibilidade das mesmas. Desenvolveu-se um sistema físico adequado para a determinação do comportamento do coeficiente de difusão de umidade em meios porosos acondicionados em colunas, submetidos a condições de secagem. O trabalho é apresentado da seguinte forma.

No capítulo 2 apresenta-se algumas definições básicas sobre meios porosos e o modelo fenomenológico desenvolvido por LUIKOV, 1954; PHILIP & De VRIES, 1957 e De VRIES, 1958. Faz-se uma breve revisão sobre os métodos de determinação experimental e sobre o comportamento do coeficiente de difusão efetivo com a umidade e com a temperatura.

O terceiro capítulo é destinado à apresentação de todo o procedimento experimental para a determinação do coeficiente fenomenológico de transferência de massa, que envolve a preparação das amostras, preparação das colunas e as montagens experimentais utilizadas. Apresenta-se também toda a instrumentação relativa aos métodos nucleares de medição da densidade e umidade.

No capítulo 4 apresenta-se os resultados obtidos a partir dos métodos de preparação das colunas, até a obtenção do coeficiente fenomenológico de transferência de umidade para a mistura de areia e caulim. Faz-se uma discussão do comportamento desse coeficiente com a umidade e a

temperatura, baseado nos possíveis mecanismos de transferência de umidade em meios porosos.

O último capítulo é destinado às conclusões finais e sugestões para trabalhos complementares.

No Apêndice, apresenta-se o desenvolvimento das equações básicas que descrevem a atenuação de um feixe monoenergético de radiação gama por um meio poroso.

2. FUNDAMENTOS

2.1. MEIOS POROSOS - PROPRIEDADES E DEFINIÇÕES BÁSICAS

2.1.1. INTRODUÇÃO

Os meios porosos em geral são sistemas físicos muito complexos, constituindo-se basicamente por uma matriz sólida, uma fase líquida e uma fase gasosa, formando um meio polifásico. Para os casos de nosso interesse, a fase líquida é a água, contendo sólidos solubilizados e partículas em suspensão. A fase gasosa é uma mistura de ar seco e vapor d'água, em equilíbrio termodinâmico com a fase líquida. Deste modo, pode-se dizer que um meio poroso é constituído por uma matriz porosa, onde existe uma mistura heterogênea das fases homogêneas líquida e gasosa.

O tamanho, a forma e a distribuição espacial do esqueleto sólido limitam o espaço onde a fase líquida (água) e a fase gasosa (mistura de ar + vapor d'água) se movimentam ou permanecem presas. Os efeitos da temperatura sobre cada uma das fases vem modificar suas propriedades físicas, condicionando parte das propriedades do meio poroso.

A análise dos processos de transferência simultânea de calor e massa em meios porosos tem sido objeto de intenso estudo experimental e teórico de um grande número de pesquisadores nas últimas quatro décadas. As considerações mais usuais, são de que a umidade migra num meio poroso pelos mecanismos de difusão molecular nos interstícios do meio poroso, no estado de vapor; por capilaridade, e pelo processo de vaporização - condensação. Essas considerações constituem a sustentação para a aplicação das duas

principais tendências de descrição matemática do fenômeno, ou seja, a aplicação da Termodinâmica dos Processos Irreversíveis e a análise dos fenômenos acoplados de transferência de calor e massa (LUIKOV, 1954; PHILIP & De VRIES, 1957; FORTES & OKOS, 1981).

O desenvolvimento dessa extensa área de conhecimento dos fenômenos de transporte passou por inúmeras etapas. Alguns dos trabalhos mais importantes no desenvolvimento teórico e experimental da transferência de calor e massa em meios porosos são citados no decorrer deste trabalho. CRAUSSE, 1983, fez uma excelente revisão bibliográfica sobre o assunto, apresentando um quadro ilustrativo da ordem cronológica das principais pesquisas realizadas, desde 1915, com o trabalho de BOUYOUCOS, até 1981, com o trabalho de BENET, passando pelos significativos trabalhos de GURR *et alii*, 1952; LUIKOV, 1954, PHILIP & De VRIES, 1957; CARY & TAYLOR, 1960 e PERRIER & PRAKASH, 1977.

2.1.2. RELAÇÕES PRINCIPAIS ENTRE OS VOLUMES E AS MASSA DOS CONSTITUINTES

Algumas grandezas fundamentais e parâmetros específicos são importantes para a caracterização de propriedades físicas dos meios porosos (esquematizado na Figura 2.1). Entre elas, as mais importantes são:

- Porosidade:
$$p = \frac{V_f}{V_t} = \frac{V_a + V_l}{V_t}$$

- Densidade: ρ

- da fase sólida: $\rho_s = \frac{m_s}{V_s}$

- aparente seca: $\rho_0 = \frac{m_s}{V_t}$, sendo $\rho_0 = \rho_s(1-p)$

- Concentração (umidade):

- em massa (base seca): $\omega_l = \frac{m_l}{m_s}$

- volumétrica: $\theta_\omega = \frac{V_l}{V_t}$, $\theta_a = \frac{V_a}{V_t}$

- Grau de saturação: $S = \frac{V_l}{V_f} = \frac{V_l}{V_a + V_l}$

- Relação entre os parâmetros: $\omega_l = \frac{\rho_l S p}{\rho_0} = \frac{\rho_l}{\rho_0} \theta_\omega$

onde:

V_a e m_a são o volume e a massa do ar, respectivamente;

V_l e m_l são o volume e a massa do líquido, respectivamente;

V_s e m_s são o volume e a massa do sólido, respectivamente;

V_t e m_t são o volume e a massa da amostra de meio poroso, respectivamente.

2.1.3. FIXAÇÃO DA UMIDADE NO MEIO POROSO

A aptidão de um meio poroso em fixar umidade depende de suas propriedades estruturais, das quais as mais importantes são a área

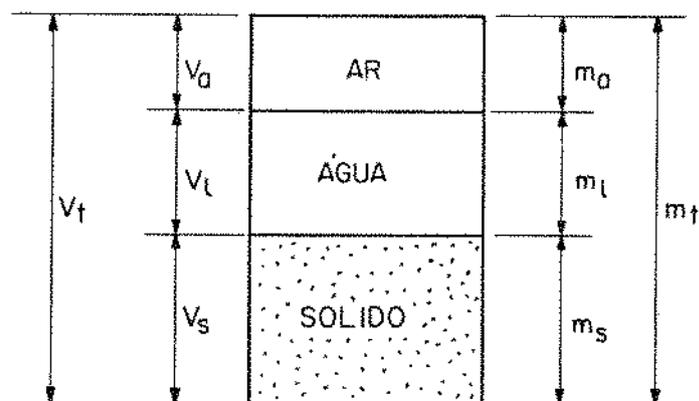


Figura 2.1. REPRESENTAÇÃO SIMBÓLICA DOS CONSTITUINTES DE UM MEIO POROSO INSATURADO

específica (S_e), a função de distribuição dos diâmetros dos poros e a tortuosidade.

A tortuosidade é definida pela relação: $\tau = (l / l_p)$, onde l é a distância percorrida por um volume de fluido entre dois pontos e l_p é a distância geométrica entre esses dois pontos. Essa propriedade estrutural também influencia as propriedades de transferência de umidade no meio poroso, à medida em que modifica o caminho a ser percorrido pelo fluido entre dois pontos do meio poroso, separados por uma distância geométrica l_p . No entanto, é difícil caracterizar um meio pela tortuosidade pois, efetivamente, essa é função do processo.

A área específica (S_e) é definida pela relação entre a área dos poros e a massa total do meio poroso, permitindo que se faça uma estimativa da quantidade de água fixada pelo mecanismo de adsorção física. Em certos casos, pode influenciar as propriedades de transporte do meio, se a difusão superficial de líquido for importante.

A função de distribuição dos diâmetros dos poros condiciona o meio com relação à capacidade de retenção de água pelo mecanismo de capilaridade e, conseqüentemente, as propriedades de transporte do mesmo.

A água se fixa no meio poroso segundo dois mecanismos básicos, que são a adsorção física e a capilaridade (KEEY, 1972). O mecanismo de adsorção química pode estar presente em muitas situações, mas não é importante para o presente estudo.

2.2. MODELO FENOMENOLÓGICO PARA TRANSFERÊNCIA SIMULTÂNEA DE CALOR E MASSA EM MEIOS POROSOS NÃO SATURADOS

O modelo fenomenológico apresentado a seguir foi desenvolvido por LUIKOV, 1966 e PHILIP & De VRIES, 1957. Apresenta-se os aspectos relevantes, assim como as simplificações específicas do modelo, de modo a contemplar os interesses do presente trabalho. Uma revisão mais completa do modelo é apresentada por SOUZA, 1985.

2.2.1. EQUAÇÃO DA CONSERVAÇÃO DA MASSA

A Equação (2.1) expressa a conservação da massa para o componente i ,

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} = -\nabla \cdot \left[J_{i,c} + J_{i,d} \right] + I_i \quad (2.1)$$

onde:

$$c_i = \frac{m_i}{v_t} = \text{concentração do componente } i, \text{ sendo } m_i = \text{massa} \\ \text{do componente } i \text{ (M / L}^3\text{)}$$

$$J_{i,c} = \text{densidade de fluxo convectivo (M / L}^2\theta\text{)}$$

$$J_{i,d} = \text{densidade de fluxo difusivo (M / L}^2\theta\text{)}$$

$$I = \text{termo de geração do componente } i, \text{ associado às mudanças} \\ \text{de fase (M / L}^3\theta\text{)}$$

Definindo-se uma concentração mássica para o componente i , $\omega_i = c_i/\rho_0$, a equação da conservação da massa para o componente i pode ser expressa por:

$$\frac{\partial(\rho_0 \omega_i)}{\partial t} = -\nabla \cdot J_i + I_i \quad (2.2)$$

com

$$J_i = J_{i,c} + J_{i,d}$$

Considerando a Equação (2.2) para a água nas fases líquida e vapor e para o ar seco ($i = l, v, a$) obtém-se a equação da conservação da massa num meio poroso,

$$\frac{\partial(\rho_0 \omega_i)}{\partial t} = -\nabla \cdot \sum_{i=1}^3 J_i + \sum_{i=1}^3 I_i, \quad (i \rightarrow l, v, a) \quad (2.3)$$

onde $\omega = \sum_{i=1}^3 \omega_i$, ($i \rightarrow l, v, a$) é a concentração total do componente i no meio poroso.

Com relação aos termos de geração, pode-se realizar simplificações importantes. O ar seco é inerte nas condições analisadas no presente trabalho, podendo-se considerar o termo de geração I_a nulo ($I_a = 0$). As concentrações mássicas do ar e do vapor nos poros do meio são desprezíveis com relação à do líquido, pois a densidade deste é da ordem de 10^3 vezes maior. Assim,

$$\frac{\partial(\rho_0 \omega_v)}{\partial t} = -\nabla \cdot J_v + I_v = 0 \quad (2.4)$$

ou

$$I_v = \nabla \cdot J_v \quad (2.5)$$

Como a umidade na fase sólida (gelo) é nula nas condições do presente trabalho, tem-se que:

$$I_l = -I_v \quad (2.6)$$

e conclui-se que a soma de todos os termos de geração é igual a zero, ou seja

$$\sum_{i=1}^3 I_i = 0 \quad (2.7)$$

Deste modo, a Equação (2.3) pode ser simplificada,

$$\frac{\partial(\rho_0 \omega)}{\partial t} = -\nabla \cdot \sum_{i=1}^3 J_i, \quad (i \rightarrow l, v, a) \quad (2.8)$$

lembrando que a concentração total (ω) é, praticamente, a própria umidade do meio no estado líquido, devido às pequenas densidades do vapor e do ar.

2.2.2. TRANSFERÊNCIA DE LÍQUIDO EM MEIOS POROSOS

O modelo considera que a migração de umidade na fase líquida ocorre, essencialmente, devido à força gravitacional e às forças capilares.

A equação de conservação da massa para a umidade na fase líquida, ω_l , é,

$$\frac{\partial(\rho_0 \omega_l)}{\partial t} = -\nabla \cdot J_l + I_l \quad (2.9)$$

onde o termo I_l representa a condensação ou vaporização da água.

A densidade de fluxo na fase líquida em meios porosos não saturados de umidade é dada pela lei de DARCY-BUCKINGHAM (LUIKOV, 1966 e De VRIES, 1975):

$$J_1 = - \rho_1 K \nabla \cdot \Phi \quad (2.10)$$

onde K é a condutividade hidráulica, função da concentração de umidade na fase líquida (ω_1), da distribuição da mesma no meio poroso e da temperatura, $K = K(\omega_1, T)$. O potencial para a transferência de umidade, Φ , é uma soma do potencial capilar Ψ e do potencial gravitacional y (considerado positivo para baixo), ou seja:

$$\Phi = \Psi - y \quad (2.11)$$

O potencial Ψ é uma consequência das forças que surgem das interações locais entre o líquido e a matriz sólida porosa (MILLER & MILLER, 1956). Este potencial está associado com a capacidade de sucção do meio poroso, dependendo do conteúdo de umidade na fase líquida ω_1 , da distribuição da mesma no meio e da temperatura, $\Psi = \Psi(\omega_1, T)$ (WILKINSON & KLUTE, 1962 e HILLEL, 1980). A Equação (2.12) explicita Ψ , que é proporcional à tensão superficial do líquido e ao cosseno do ângulo de contato entre o líquido e as paredes da matriz sólida e inversamente proporcional ao raio do capilar.

$$\Psi = - \frac{4 \sigma_1 \cos \alpha}{d g \rho_1} \quad (2.12)$$

onde:

σ_1 = tensão superficial do líquido (F/L)

d = diâmetro do capilar (L)

α = ângulo de contato do líquido com as paredes do capilar

g = aceleração da gravidade (L/θ^2)

A Figura (2.2), representa a curva experimental do potencial capilar Ψ em função do conteúdo de umidade para o meio utilizado neste trabalho (mistura de areia e caulim), determinada experimentalmente por QUADRI, 1988, utilizando tensiômetro e placa de pressão.

Considerando ω_1 e T como variáveis independentes, a Equação (2.10) fica:

$$J_1 = -\rho_1 K \left. \frac{\partial \Psi}{\partial \omega_1} \right|_T \nabla \cdot \omega_1 - \rho_1 K \left. \frac{\partial \Psi}{\partial T} \right|_{\omega_1} \nabla \cdot T + \rho_1 K k \quad (2.13)$$

onde k é um vetor unitário na direção positiva de y . Podemos escrever esta equação da seguinte forma:

$$J_1 = -\rho_0 D_1 \nabla \cdot \omega_1 - \rho_0 D_1 \delta_1 \nabla \cdot T + \rho_1 K k \quad (2.14)$$

com

$$D_1 = \left. \frac{\rho_1}{\rho_0} K \frac{\partial \Psi}{\partial \omega_1} \right]_T, \quad (2.15a)$$

$$D_1 \delta_1 = \left. \frac{\rho_1}{\rho_0} K \frac{\partial \Psi}{\partial T} \right]_{\omega_1} \quad e \quad (2.15b)$$

$$\delta_1 = \frac{(\partial \Psi / \partial T)_{\omega_1}}{(\partial \Psi / \partial \omega_1)_T} \quad (2.15c)$$

onde D_1 e $D_1 \delta_1$ são os coeficientes fenomenológicos isotérmico e não isotérmico de difusão de umidade na fase líquida, respectivamente, e o termo δ_1 é denominado coeficiente de termo-migração na fase líquida. Estes coeficientes podem ser determinados, se as relações funcionais $K = K(\omega_1, T)$ e $\Psi = \Psi(\omega_1, T)$ forem conhecidas.

Substituindo-se (2.14) em (2.9), chega-se a uma equação diferencial para a transferência de umidade na fase líquida,

$$\frac{\partial \omega_1}{\partial t} = \nabla \cdot (D_1 \nabla \cdot \omega_1 + D_1 \delta_1 \nabla \cdot T) - \frac{\rho_1}{\rho_0} \frac{dK}{d\omega_1} \frac{d\omega_1}{dy} + I_1 \quad (2.16)$$

lembrando que os três termos do lado direito desta equação representam, respectivamente, a transferência de líquido por capilaridade (associada a gradientes de concentração e temperatura), por gravidade e o termo de geração (associado aos processos de evaporação e condensação).

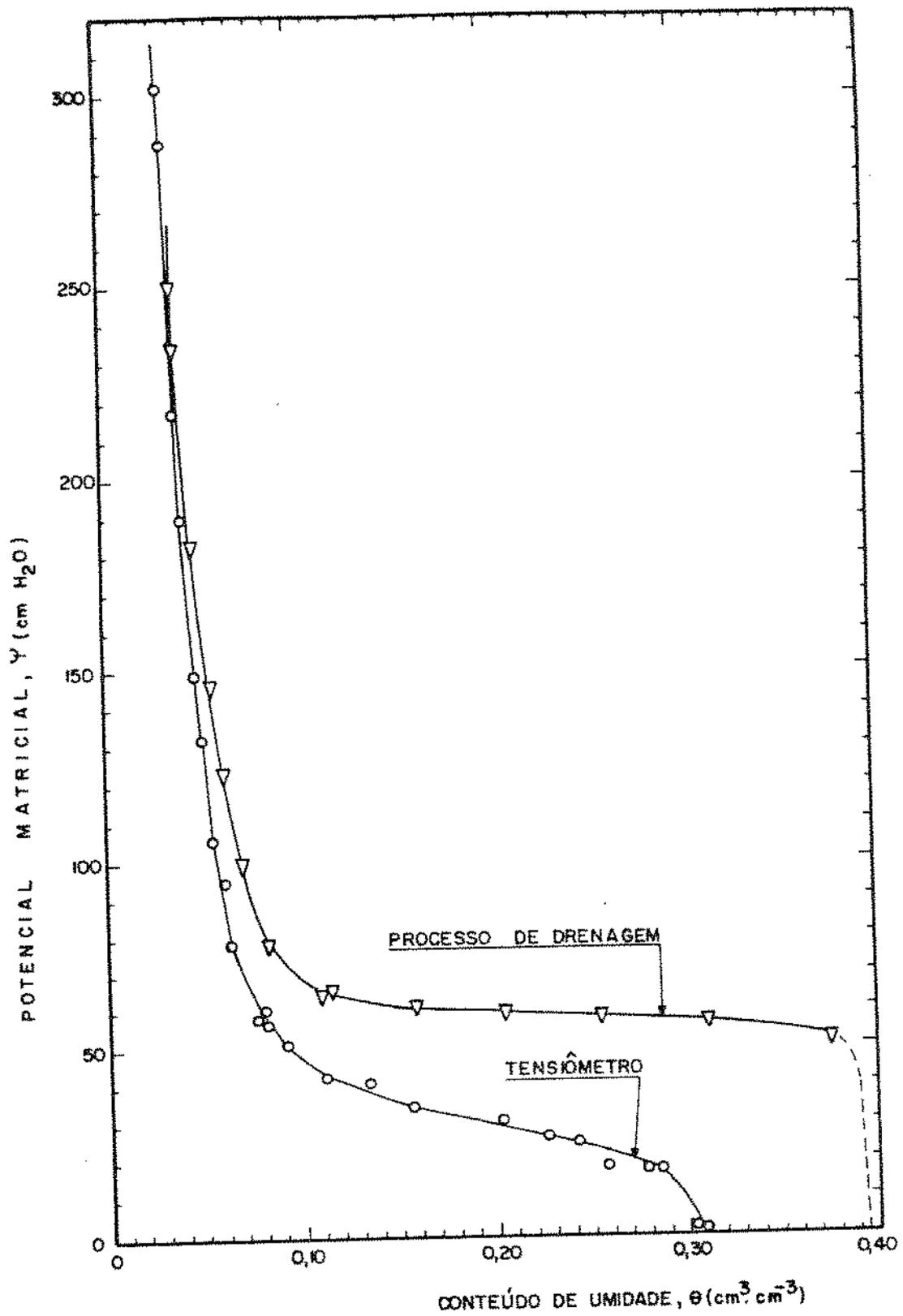


FIGURA 2.2. CURVAS EXPERIMENTAIS DE RETENÇÃO DE UMIDADE PARA A MISTURA AREIA - CAULIM (QUADRI, 1988)

2.2.3. TRANSFERÊNCIA DE VAPOR EM MEIOS POROSOS

A transferência de umidade na fase vapor em meios porosos, sob condições de pressão total (P) constante e uniforme na fase gasosa, ocorre principalmente por difusão molecular. Pode-se escrever a densidade de fluxo de vapor (J_v) por uma modificação na lei de FICK, levando em consideração a redução da secção de passagem do vapor devido à presença de líquido e à tortuosidade da matriz porosa.

$$J_v = - F D_a \frac{P}{P - P_v} \frac{M}{R T} \nabla P_v \quad (2.17)$$

onde:

D_a = coeficiente de difusão do vapor d'água no ar (L^2/θ)

P_v = pressão parcial do vapor d'água no ar (F/L^2)

M = peso molecular da água (M/MOL)

R = constante universal dos gases perfeitos (Q/T mol)

T = temperatura absoluta (θ)

F = fator de ponderação do coeficiente de difusão do vapor d'água no ar, representando a resistência oferecida pelo meio poroso, adimensional.

LUIKOV, 1966 e PHILIP & De VRIES, 1957 sugerem expressões para a previsão de F, baseada na função de distribuição dos poros com relação ao raio dos mesmos.

A transferência de umidade no meio poroso é considerada suficientemente lenta, de tal modo que a temperatura é a mesma para todos os

constituintes do meio. O vapor presente nos poros está em equilíbrio termodinâmico com o líquido, e sua pressão parcial é função de ω_1 e T, para o meio não saturado (LUIKOV, 1966 e ECKERT, 1980).

$$P_v = P_v(\omega_1, T) \quad (2.18)$$

De (2.17) e (2.18), obtém-se:

$$J_v = - F D_a \left. \frac{P}{P-P_v} \frac{M}{RT} \frac{\partial P_v}{\partial T} \right\}_{\omega_1} \nabla \cdot T - F D_a \left. \frac{P}{P-P_v} \frac{M}{RT} \frac{\partial P_v}{\partial \omega_1} \right\}_T \nabla \cdot \omega_1 \quad (2.19)$$

que pode ser expressa da seguinte forma:

$$J_v = - \rho_0 D_v \nabla \cdot \omega_1 - \rho_0 D_v \delta_v \nabla \cdot T \quad (2.20)$$

com

$$D_v = \frac{F}{\rho_0} D_a \left. \frac{P}{P-P_v} \frac{M}{RT} \frac{\partial P_v}{\partial \omega_1} \right\}_T \quad e \quad (2.21a)$$

$$\delta_v = \frac{(\partial P_v / \partial T) \omega_1}{(\partial P_v / \partial \omega_1)_T} \quad (2.21b)$$

onde D_v e $D_v \delta_v$ são os coeficientes isotérmico e não isotérmico de transferência de umidade na fase vapor, respectivamente, e o termo δ_v é denominado coeficiente de termo-migração na fase vapor.

Analogamente ao que ocorre para D_l e $D_l \delta_l$, D_v e $D_v \delta_v$ podem ser determinados, se as relações funcionais $\Psi = \Psi(\omega_1, T)$ e $P_v = P_v(\omega_1, T)$ forem conhecidas (LUIVOV, 1966; PHILIP & De VRIES, 1957 e SHAH, 1984).

Para meios insaturados, P_v pode ser escrito como uma função de ω_1 e T . Para isso, considera-se que há um equilíbrio local entre a água líquida e o vapor d'água presente nos poros, analisando-se a fase gasosa como um gás ideal. Partindo-se dessas considerações e do formalismo da Termodinâmica Clássica, obtém-se

$$P_v = P_s(T) \exp\left[\frac{M g \Psi}{R T}\right] \exp\left[\frac{M P g}{\rho_l R T}\right] \quad (2.22)$$

onde g é a aceleração da gravidade e P_s é a pressão de saturação do vapor d'água na temperatura de referência, T (SOUZA, 1985).

Esta equação representa uma relação funcional para a pressão parcial de vapor d'água na mistura gasosa em equilíbrio com o líquido. Uma expressão simplificada, considerando-se somente o vapor em equilíbrio com o líquido é apresentada por De VRIES, 1975,

$$P_v = P_s(T) \exp\left[\frac{M g \Psi}{R T}\right] \quad (2.23)$$

Com estas expressões para P_v em função do potencial capilar Ψ , da temperatura T e da relação funcional $\Psi = \Psi(\omega_1, T)$, pode-se determinar D_v e $D_v \delta_v$. Fazendo-se algumas aproximações, tem-se:

$$D_v = F \frac{D_a M^2 P_s}{\rho_0 R^2 T^2} \frac{P}{P - P_v} g \left[\frac{\partial \Psi}{\partial \omega} \right]_T \varphi, \quad (2.24a)$$

$$\delta_v D_v = F \frac{D_a M^2 P_s}{\rho_0 R^2 T^3} L \frac{P}{P - P_v} \varphi \quad e \quad (2.24b)$$

$$\delta_v = \frac{L}{T g \left[\frac{\partial \Psi}{\partial \omega} \right]_T} \quad (2.24c)$$

onde $\varphi = P_v/P_s$ é a umidade relativa do ar a uma dada temperatura de referência e L é o calor latente de vaporização da água nesta mesma temperatura.

2.2.4. TRANSFERÊNCIA SIMULTÂNEA DE LÍQUIDO E VAPOR

A transferência simultânea de líquido e vapor em meios porosos não saturados de umidade também pode ser escrita como uma função dos gradientes de conteúdo de umidade na fase líquida, $\nabla \omega_1$, e de temperatura, ∇T , combinando-se as Equações (2.14) e (2.20),

$$J = J_1 + J_v = -\rho_0 D \nabla \omega_1 - \rho_0 D \delta \nabla T + \rho_1 K k \quad (2.25)$$

com

$$D = D_l + D_v \quad , \quad D\delta = D_l\delta_l + D_v\delta_v \quad e \quad (2.26)$$

$$\delta = \frac{D_l\delta_l + D_v\delta_v}{D_l + D_v}$$

onde:

J = densidade de fluxo de massa global ($M/L^2\theta$)

D = coeficiente isotérmico de transferência de massa, associado aos gradientes de concentração, exclusivamente (L^2/θ)

$D\delta$ = coeficiente não-isotérmico de transferência de massa, associado aos gradientes térmicos, exclusivamente ($L^2/\theta T$)

δ = coeficiente global de termo-transferência (fases líquida e vapor) ($1/T$)

Substituindo-se a Equação (2.25) na equação de conservação da massa, tem-se:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_0\omega_l + \rho_0\omega_v) = -\nabla \cdot (J_l + J_v) \quad (2.27)$$

e admitindo-se que ω_l é muito maior que ω_v , chega-se a:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_0\omega_l) = \nabla \cdot (\rho_0 D \nabla \omega_l + \rho_0 D\delta \nabla T) - \rho_l \frac{\partial K}{\partial y} \quad (2.28)$$

Como ρ_0 é uma constante,

$$\frac{\partial \omega_1}{\partial t} = \nabla \cdot \left[D \nabla \cdot \omega_1 + D\delta \nabla \cdot T \right] - \frac{\rho_1}{\rho_0} \frac{\partial K}{\partial y} , \quad (2.29)$$

que representa a conservação da massa para a transferência simultânea de líquido e vapor.

2.2.5. EQUAÇÃO DE CONSERVAÇÃO DA ENERGIA

A equação da conservação da energia para a transferência simultânea de líquido e vapor é dada por De VRIES (1975),

$$C \rho_0 \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla \cdot T) - L I_v \quad (2.30)$$

onde:

C = calor específico do meio poroso úmido (Q/MT)

ρ_0 = densidade aparente do meio poroso seco (M/L³)

T = temperatura (T)

t = tempo (θ)

λ = condutividade térmica do meio poroso úmido (Q/θL²T)

L = calor latente de vaporização da água (Q/M)

$I_v = - I_l$ = termo de geração, associado às mudanças de fase (M/L³θ)

A fonte de líquido está associada à condensação de vapor, e a variação total da concentração de umidade na fase líquida, $d(\rho_0 \omega_1)$, ocorre

devido à transferência de líquido por capilaridade $d_c(\rho_0 \omega_1)$, e por mudança de fase $d_i(\rho_0 \omega_1)$ (LUIKOV, 1966).

$$d(\rho_0 \omega_1) = d_c(\rho_0 \omega_1) + d_i(\rho_0 \omega_1) \quad (2.31)$$

Pode-se definir um coeficiente de mudança de fase ϵ ,

$$\epsilon = \frac{d_i(\rho_0 \omega_1)}{d(\rho_0 \omega_1)} \quad (2.32)$$

para representar a relação entre a variação do teor de umidade devido aos processos de mudança de fase e a variação total do teor de umidade, num dado volume do corpo poroso. De (2.32) e (2.31), tem-se:

$$\frac{\partial(\rho_0 \omega_1)}{\partial t} = \frac{\partial_c}{\partial t}(\rho_0 \omega_1) + \frac{\partial_i}{\partial t}(\rho_0 \omega_1) = \quad (2.33)$$

$$= \frac{1}{1-\epsilon} = \frac{\partial_c(\rho_0 \omega_1)}{\partial t} = - \frac{1}{1-\epsilon} \nabla \cdot J_1$$

Das equações de conservação da massa para o líquido e o vapor, e sabendo que a umidade na fase líquida é praticamente a igual a umidade total, tem-se que,

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_0 \omega_v) = - \nabla \cdot J_v + I_v \quad (2.34)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_0 \omega_1) = - \nabla \cdot J_1 - \nabla \cdot J_v$$

De (2.33) e (2.34), obtém-se:

$$\nabla \cdot J_v = - \frac{\partial}{\partial t} (\rho_0 \omega_1) + (1-\epsilon) \frac{\partial}{\partial t} (\rho_0 \omega_1) = -\epsilon \frac{\partial}{\partial t} (\rho_0 \omega_1) \quad (2.35)$$

De (2.5), (2.30) e (2.35) chega-se a:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{\rho_0 C} \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \frac{\epsilon L \rho_0}{\rho_0 C} \frac{\partial \omega}{\partial t} \quad (2.36)$$

que representa a conservação da energia num meio poroso insaturado. A primeira parcela do lado direito da Equação (2.36) representa a transferência de calor por condução, exclusivamente, enquanto a segunda parcela representa a influência da transferência de massa sobre a transferência de calor, associada às mudanças de fase no interior do meio poroso.

O coeficiente de mudança de fase, ϵ , varia de zero à unidade. Quando $\epsilon = 1$ a migração de umidade ocorre exclusivamente pelos mecanismos de

mudança de fase, não havendo transferência de líquido por capilaridade. Por outro lado, quando $\epsilon = 0$ a transferência de líquido por capilaridade é o único mecanismo de transferência de umidade no meio poroso, não ocorrendo mudanças de fase que, neste caso, podem ocorrer apenas nas superfícies externas do corpo.

As Equações (2.29) e (2.36) representam o sistema de equações diferenciais parciais que descreve a transferência de calor, de massa e o acoplamento das mesmas. Cabe ressaltar o caráter altamente não linear das equações, visto que os coeficientes fenomenológicos λ , K , D , δ e ϵ são funções não lineares de T e ω_1 .

Para o presente trabalho, pode-se desprezar o termo referente à transferência de líquido por ação das forças gravitacionais, da Equação (2.29). Assim, pode-se escrever o sistema na forma simplificada:

$$\frac{\partial \omega_1}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla \omega_1 + D\delta \nabla T) \quad (2.37a)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{\rho_0 C} \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \frac{\epsilon L \rho_0}{\partial t} \quad (2.37b)$$

lembrando que

$$D = D_1 + D_v \quad e \quad D\delta = D_1 \delta_1 + D_v \delta_v$$

2.2.6. OS COEFICIENTES FENOMENOLÓGICOS D e Dδ

2.2.6.1. INTRODUÇÃO

A aplicação da Equação (2.37a) requer o conhecimento dos coeficientes fenomenológicos D e Dδ ou, mais precisamente, o conhecimento do comportamento desses parâmetros com a umidade e a temperatura do meio. Cabe lembrar, que D está associado aos gradientes de concentração e Dδ aos gradientes de temperatura, exclusivamente. No entanto, conforme demonstrado por WIEGAND & TAYLOR (1961) e PERRIER & PRAKASH (1977), os processos de transferência de umidade em meios porosos induzem a formação de gradientes de temperatura. Se, durante o processo de transferência de massa, a temperatura do meio é mantida constante ($\nabla T = 0$), a Equação (2.37a) pode ser simplificada e, neste caso, D é o coeficiente isotérmico global de migração de umidade no meio poroso. Em condições em que os gradientes de temperatura podem ser desprezados, KEEY (1972) define D como:

$$D = \frac{J}{\rho_o (\partial w / \partial z)_T} \quad (2.38)$$

LUIKOV (1966) sugere ser o coeficiente isotérmico de migração de umidade, D, o principal coeficiente de transferência de massa, podendo ser dividido em duas parcelas, relativas às contribuições das fases líquida e vapor, conforme explicitado pela Equação (2.26).

ROSE (1963) procura realizar a separação dos componentes do movimento da água em meios porosos, através do estudo da difusão de gás

hidrogênio em meios porosos parcialmente saturados de líquido. Deste modo, trabalhando com diferentes graus de saturação do meio, correlacionou a difusividade do vapor como uma função do conteúdo de líquido do meio. Através de estudos comparativos com a migração de umidade na fase líquida, o autor apresentou um estudo sobre a importância relativa dos fluxos nas fases líquida e vapor em meios porosos.

O coeficiente de migração de umidade associado aos gradientes de temperatura ($D\delta$) pode ser separado em duas parcelas, relativas às transferências nas fases líquida e vapor, conforme explicitado pela Equação (2.26). GURR *et alii* (1952) e KUZMAK & SEREDA (1957) estudaram os mecanismos através dos quais a água migra em meios porosos submetidos a gradientes de temperatura, utilizando sais como traçadores do fluxo de umidade na fase líquida. TAYLOR & CARAZZA (1954), citados por PHILIP & De VRIES (1957), procuraram estudar o fluxo na fase vapor, trabalhando com colunas que possuíam fissuras que impediam o movimento de umidade na fase líquida.

2.2.6.2. DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL

LUIKOV (1966) apresenta uma revisão dos principais métodos experimentais de determinação dos coeficientes D e $D\delta$. Para a determinação de D , o autor divide os métodos em Métodos em Regime Estacionário e Métodos em Regime Transiente.

De modo geral, os métodos em regime estacionário são baseados na equação do fluxo de massa isotérmico (Equação 2.38), onde se avalia o fluxo através da variação do peso da amostra entre dois instantes e os gradientes de concentração a partir do perfil de umidade em regime estacionário.

Os métodos transientes são baseados na determinação de perfis transientes de umidade e na aplicação da Equação (2.38). Alguns métodos são baseados na determinação de perfis transientes de umidade em colunas de meio poroso "semi-infinitas" submetidas a processos de umidificação ou secagem, resolvendo-se a equação diferencial de transferência de massa para e mesma através do uso da transformação de BOLTZMAN (GARDNER, 1959). A grande vantagem dos métodos transientes é o menor tempo experimental dispendido.

Uma discussão detalhada do método transiente utilizado por CRAUSSE (1983) para a determinação do comportamento de D com a umidade do meio, é apresentado no item 3.5.

2.2.6.3. COMPORTAMENTO DOS COEFICIENTES COM A UMIDADE E COM A TEMPERATURA

O coeficiente isotérmico de migração de umidade, D, é o principal coeficiente de transferência de umidade em meios porosos submetidos a gradientes de concentração, conforme enunciado por LUIKOV (1966). Para a maioria dos meios porosos, este coeficiente depende da umidade e da temperatura do meio, apresentando um comportamento que é função dos mecanismos através dos quais a água se liga e se movimenta no interior desses meios.

Na ausência de forças externas, sais ou quaisquer outras substâncias que interajam com o meio poroso, assume-se, comumente, que a água migra através dos mecanismos de capilaridade, difusão de vapor nos interstícios do meio poroso e através do mecanismo de vaporização-condensação (PHILIP & De VRIES, 1957; ROSE, 1963; LUIKOV, 1966; FORTES & OKOS, 1981).

A função de distribuição dos diâmetros dos poros é um fator decisivo na ponderação das importâncias relativas dos diferentes mecanismos de transferência de umidade. A área específica do meio poroso, S_e , definida no item 2.1.3., também influencia o comportamento de D , pois a quantidade de água adsorvida é diretamente proporcional a S_e , o mesmo ocorrendo para o fluxo de umidade por difusão superficial.

Para corpos capilares-porosos onde estão presentes forças osmóticas, o comportamento de D torna-se mais complexo, de difícil análise, pois os resultados experimentais obtidos são resultado de inúmeros efeitos sobrepostos (LUIKOV, 1966).

Uma análise do comportamento de D com a umidade e a temperatura deve passar por uma análise da influência desses parâmetros sobre cada um dos três principais mecanismos de transferência de umidade nos meios porosos.

Para misturas de vapores em gases à pressão normal, de acordo com a teoria de CHAPMAN-ENSKOG (CUSSLER, 1984), o coeficiente de difusão molecular do vapor no gás (D_a , para o vapor d'água no ar, Equação 2.17) aumenta como uma função de $T^{1,5}$, é inversamente proporcional à pressão total da fase gasosa (P) e varia pouco com a concentração de vapor na mistura. Em meios porosos, o coeficiente de difusão efetivo na fase vapor vai depender da resistência oferecida pela matriz porosa à passagem de vapor d'água, representado pelo fator F da Equação (2.17). Esse fator também incorpora a resistência oferecida pela umidade na fase líquida, presente nos poros do meio, que reduz a área de secção para a passagem do vapor d'água que difunde. No entanto, com relação a este fato, PHILIP & De VRIES (1957), corroborado por ROSE (1963), propõe um mecanismo, onde as bolsas de líquido que se formam nas gargantas dos poros, agiriam não como uma barreira à passagem do vapor mas, pelo contrário, estabelecendo um curto-circuito para

o movimento do mesmo (vaporização-condensação).

Segundo De VRIES (1958) e CRAUSSE (1983), o coeficiente isotérmico de difusão na fase líquida (D_1 , Equação 2.15a) aumenta continuamente com o aumento do conteúdo de umidade, a partir do ponto em que se estabelece uma continuidade na fase líquida, que proporciona o transporte pelo mecanismo de capilaridade. No entanto, para LUIKOV (1966), este coeficiente pode aumentar ou permanecer constante com a concentração, dependendo da função de distribuição dos poros com relação aos diâmetros dos mesmos. O coeficiente D_1 é uma função da temperatura (T), à medida em que a tensão superficial, σ , e a viscosidade cinemática, ν , variam com T (JACKSON, 1963; CRAUSSE, 1983).

O comportamento do coeficiente de difusão isotérmico global, $D = D_v + D_1$, é uma combinação de todos os fatores discutidos anteriormente. KEEY (1972), adaptando dados de De VRIES (1958), apresenta um gráfico representativo dos comportamentos simultâneos de D , D_1 e D_v com a umidade do meio. Uma análise desse gráfico mostra a presença de faixas de umidade, onde os comportamentos dos coeficientes são bem distintos. Numa primeira faixa, partindo do meio praticamente isento de umidade, D aumenta continuamente com a concentração de umidade, atingindo um ponto de máximo. Nessa faixa, D_1 é bastante pequeno e aumenta lentamente com o aumento da concentração, enquanto D_v praticamente se confunde com o coeficiente isotérmico global, D . Após o ponto de máximo, D_v passa a diminuir com o aumento da umidade do meio poroso, enquanto D_1 continua crescendo, mas não o suficiente para compensar a queda de D_v . Deste modo, o coeficiente global, D , apresenta um ponto de mínimo, situação em que D_1 e D_v possuem a mesma ordem de grandeza. A partir desse ponto, a importância relativa de D_1 passa a ser cada vez maior e, para altos conteúdos, passa a se confundir com o coeficiente global, D .

Um comportamento muito semelhante para D é apresentado por PHILIP (1975), citando PHILIP, (1955) e JURY & MILLER (1974), trabalhando com argila e areia, respectivamente.

CRAUSSE (1983) não encontrou pontos de máximo e mínimo para D em função da umidade (ω), mas um patamar, numa região de transição para o fluxo capilar.

Um estudo sobre o comportamento do coeficiente de difusão associado aos gradientes de temperatura, $D\delta$, é apresentado por LUIKOV (1966, 1973) e CRAUSSE (1983).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE ISOTÉRMICO DE DIFUSÃO DE UMIDADE EM MEIOS POROSOS

Fêz-se uso de um método experimental baseado no trabalho de CRAUSSE (1983), fundamentado na aplicação da equação do fluxo de massa isotérmico ($J = D \rho_0 (\delta\omega \wedge \delta z)_T$). Para a aplicação deste método global de determinação do coeficiente de difusão, montou-se dois experimentos de configurações geométricas distintas, mas visando-se alcançar o mesmo objetivo, ou seja, a secagem isotérmica de colunas de meios porosos, com determinação dos perfis transientes de concentração nas mesmas.

3.2. MONTAGENS EXPERIMENTAIS

3.2.1. MONTAGEM EXPERIMENTAL 1

Na primeira montagem experimental, fêz-se a secagem isotérmica das colunas de material poroso fazendo uso de uma solução higroscópica, para produzir e manter como condição de contorno em uma das extremidades da coluna, uma atmosfera de baixa umidade relativa. Isso se faz necessário para criar um gradiente de pressão parcial de vapor d'água entre a superfície exposta do meio poroso e a atmosfera em equilíbrio termodinâmico com a solução higroscópica.

A montagem experimental apresentada na Figura (3.1) consta de colunas cilíndricas de "pexiglass", vedadas em uma das extremidades e

abertas na outra. As extremidades abertas das colunas são conectadas a erlenmeyers através de cotovelos de PVC ajustados para tal. As colunas possuem geometrias distintas, de acordo com a conveniência do método de determinação de umidade utilizado, quais sejam, o Método da Transmissão Direta de Raios Gama (TDR- γ) e o Método Gravimétrico. No primeiro caso, usa-se colunas de base quadrada de 35 mm de aresta (medida interna) e 150 mm de comprimento. O uso da secção reta quadrada é o mais indicado quando se trabalha com o TDR- γ , pela facilidade e segurança na avaliação da espessura da amostra que é atravessada pelo feixe de radiação. Para o Método Gravimétrico, as colunas utilizadas possuem secções circulares, de dimensões iguais a 45 mm de diâmetro interno e 200 mm de comprimento. A vedação de uma extremidade da coluna é efetuada com uma tampa de PVC e borracha de silicone, de modo que possa ser desconectada quando necessário.

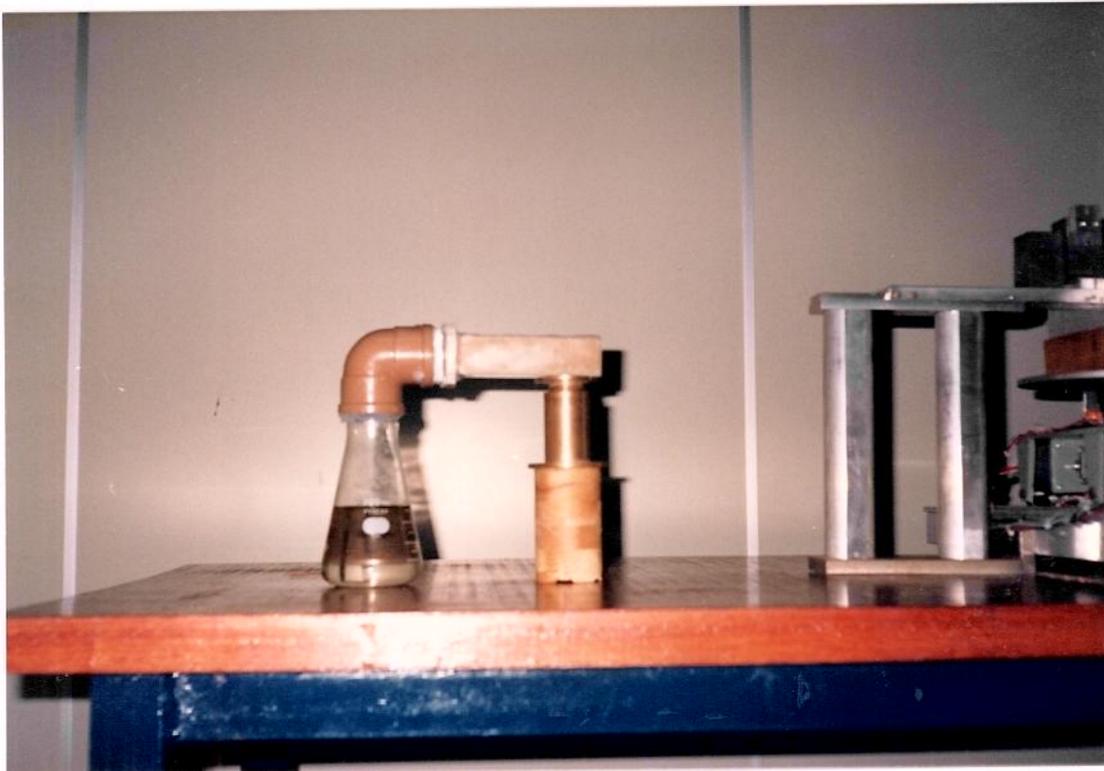


FIGURA 3.1. MONTAGEM EXPERIMENTAL 1

As colunas contendo o meio poroso úmido foram conectadas aos erlenmeyers de 500 ml de capacidade, contendo aproximadamente 250 ml da solução higroscópica. A solução escolhida foi de ácido sulfúrico concentrado (P.A.), que proporciona uma atmosfera com umidade relativa inferior a 0.1%, nas condições de realização dos experimentos, além de entrar em equilíbrio rapidamente com o ar contido nos erlenmeyers (WILSON, 1921 ; GREENEWALT, 1925 ; BRAY, 1970).

3.2.2. MONTAGEM EXPERIMENTAL 2

Na montagem Experimental 2, procurou-se eliminar os gradientes de concentração de vapor d'água no ar de secagem, de modo a garantir as mesmas condições experimentais para todas as colunas. Para isso, efetuou-se a movimentação do volume de ar contido numa caixa hermeticamente fechada, na presença de uma solução saturada de hidróxido de potássio (KOH). Deste modo, procurou-se manter constante e homogênea a umidade relativa deste volume de ar.

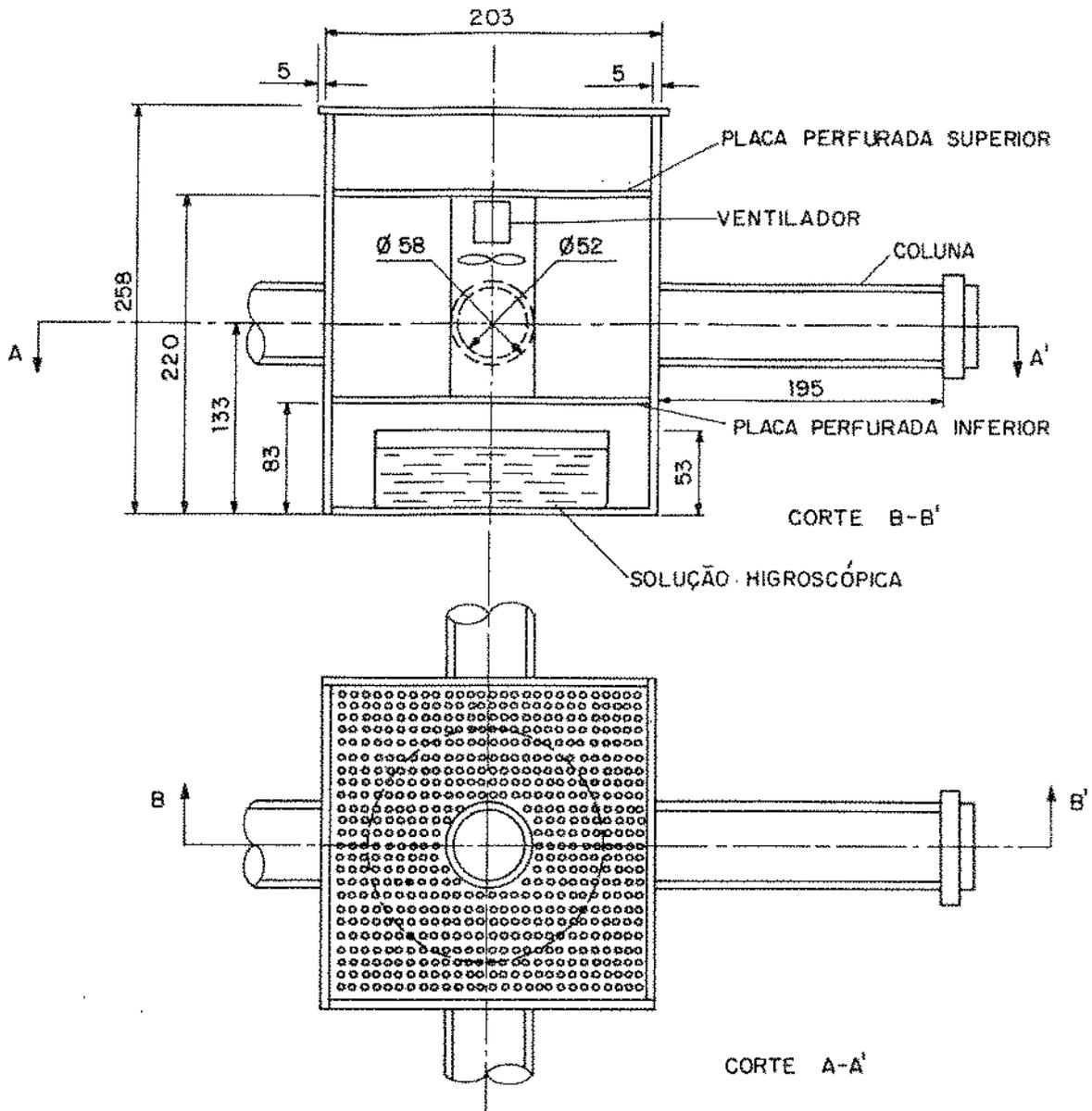
As Figuras (3.2) e (3.3) ilustram a Montagem Experimental 2. A mesma é constituída de uma caixa de dimensões internas de 200x200 mm na base e 250 mm de altura, possuindo furos nas quatro faces laterais, de diâmetros idênticos e iguais a 49 mm, adequados para o encaixe das colunas que contêm o meio poroso. Abaixo e acima desses furos, tem-se duas placas perfuradas (para homogeneizar o fluxo de ar), no centro das quais, unindo uma a outra, tem-se um tubo cilíndrico. No interior deste tubo, foi alojado um micro-ventilador para movimentação do ar presente no sistema. O ar é movimentado do topo para a base da caixa, onde encontra um recipiente

contendo uma solução saturada de Hidróxido de Potássio (KOH), com suficiente massa de corpo de fundo, de modo a garantir as condições de saturação da solução durante toda a realização do experimento de secagem. A solução tem a função de servir como um sorvedouro de umidade, sem variar a sua condição higroscópica com o tempo. A escolha da solução de KOH para se fazer o controle da umidade relativa do ar, deveu-se ao significativo abaixamento da pressão parcial de vapor d'água que a mesma provoca, associado a um baixo coeficiente de temperatura, reduzindo o tempo experimental e permitindo o trabalho numa ampla faixa de temperatura.

Após o contato com a solução higroscópica, o ar atravessa a placa perfurada inferior e sobe pelo espaço intermediário, entrando em contato com a superfície do meio poroso submetido ao processo de secagem. Em seguida, atravessa a placa perfurada superior e é novamente succionado, reiniciando um novo ciclo. Garante-se assim, uma umidade relativa constante para o ar de secagem que, deste modo, carrega a umidade das colunas e perde esta mesma umidade ao entrar em contato com a solução de KOH. A caixa foi construída com a tampa removível, que foi vedada com borracha de silicone comercial. No centro da tampa, fêz-se um orifício para a passagem do fio de ligação do ventilador, alimentado com uma voltagem (DC) igual a 6 Volts, mantida constante durante toda a realização dos experimentos.

3.3. PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

O meio poroso, com o qual os experimentos foram realizados, é uma mistura de areia (95% p/p) e caulim (5% p/p). As distribuições



MONTAGEM EXPERIMENTAL

FIGURA 3.2. MONTAGEM EXPERIMENTAL 2

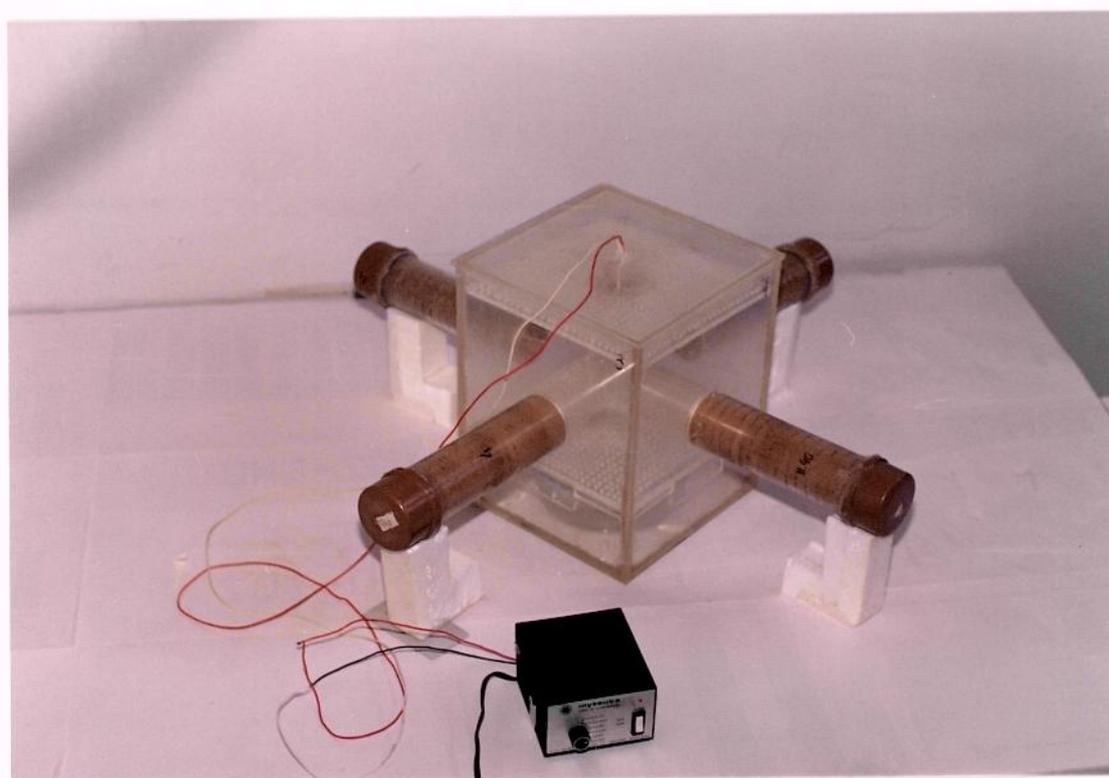
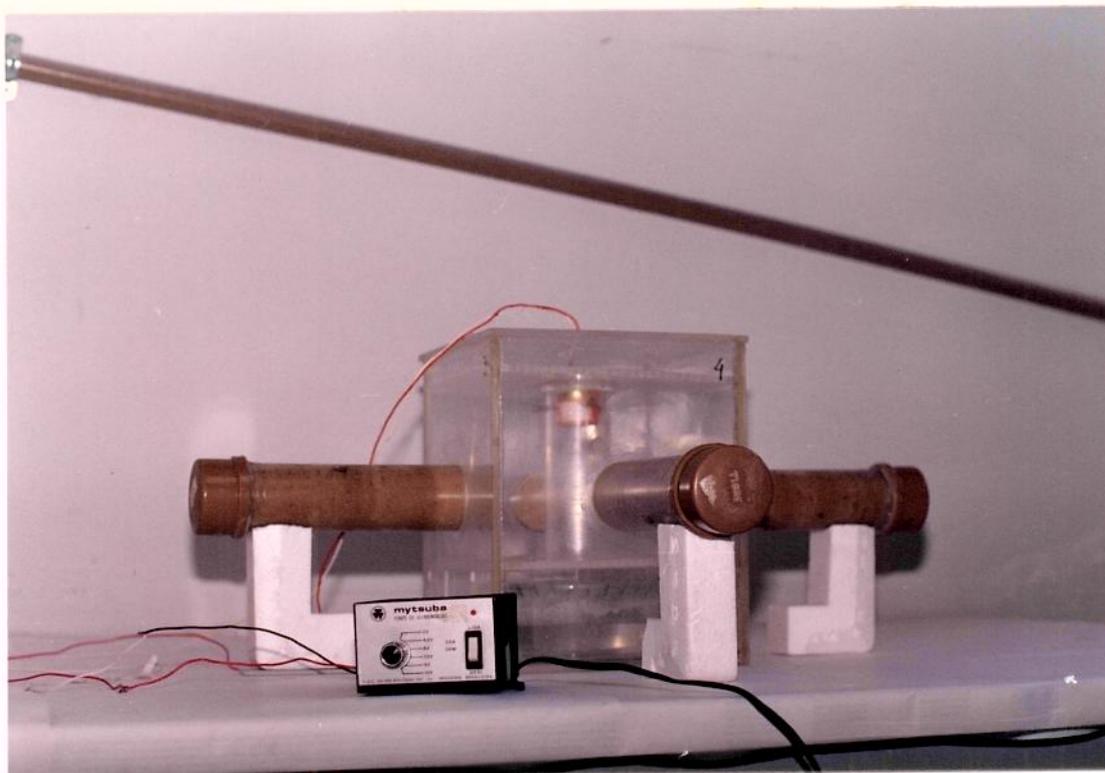


FIGURA 3.3. FOTOGRAFIAS MOSTRANDO A MONTAGEM EXPERIMENTAL 2

granulométricas destes materiais foram determinadas por QUADRI (1988) e estão ilustradas pela Figura (3.4) e pela Tabela (3.1). No caso da areia, as dimensões das partículas foram determinadas por peneiramento. Para o caulim, as determinações foram feitas através de experimentos de sedimentação em proveta, analisados pela Lei de STOKES.

Antes de preparar-se a amostra (mistura), secou-se separadamente a areia e o caulim em estufa a 105°C por 24 horas. Após a secagem, pesou-se as massas dos componentes, de modo a obter uma relação de 19 partes de areia para cada parte de caulim, misturando-se exaustivamente até completa homogeneização. Durante esta etapa, todo cuidado foi tomado para que não ocorresse perdas de caulim, que se separa com grande facilidade, devido à sua baixa granulometria.

3.4. PREENCHIMENTO DAS COLUNAS

3.4.1. MÉTODO DE PREENCHIMENTO DE COLUNAS COM AMOSTRA SECA (MPS)

Um método simples foi testado, com objetivo de preparar colunas com distribuições de densidades homogêneas e com boa reprodutibilidade. O método consiste no preenchimento da coluna por etapas, que se inicia pela introdução de uma porção de amostra através de um funil de cano longo, de modo a encostar a extremidade do mesmo no fundo da coluna. Todo cuidado deve ser tomado para se evitar a separação do caulim da mistura, o que modificaria as propriedades de transporte do meio. Sabe-se que o caulim aumenta a tensão capilar da areia, pela modificação da energia de superfície da matriz porosa (HILLEL, 1980).

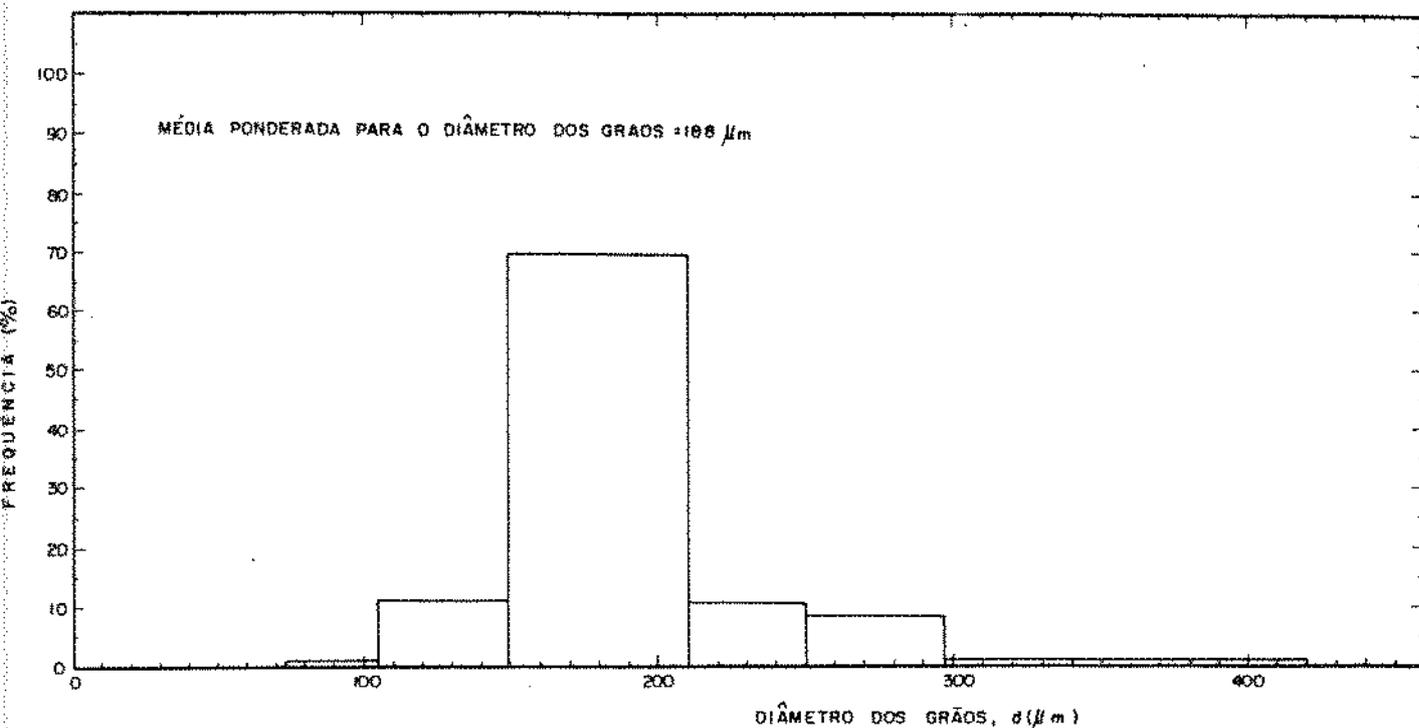


FIGURA 3.4. DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA AREIA (QUADRI, 1988)

TABELA 3.1. DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA MISTURA AREIA-CAULIM (QUADRI, 1988)

Distribuição Granulométrica (%), diâmetros em μm						(%) Total
Areia				Caulim		
297 - 250	250 - 210	210 - 149	149 - 105	> 74	74 - 37	
8,5	9,5	66,5	10,5	0,5	4,5	100,0

Após a introdução de uma pequena porção de meio, buscou-se uma acomodação mais estável deste, visando a maior compactação e diminuição da porosidade. Tal efeito foi obtido batendo-se nas laterais da coluna com um martelo de plástico recoberto com uma espessa camada de papel, colocada para evitar danificação da coluna de "pexiglass". Procurou-se sempre alcançar a compactação máxima, com o fim de facilitar a reprodutibilidade. Adicionou-se novas porções de amostra, repetindo-se o procedimento até o completo enchimento da coluna.

Terminada esta etapa, vedou-se a extremidade da coluna com uma tampa de PVC e efetuou-se a varredura da mesma com o feixe colimado de raios γ , para a determinação da distribuição de densidades. Para esta determinação, utilizou-se a equação de BEER e a curva de calibração de $\mu \times \rho$, que relaciona os coeficientes de atenuação lineares com a densidade do meio. Entre as colunas preparadas, escolheu-se aquelas que apresentaram as distribuições de densidades mais homogêneas, descartando-se as demais. Através de um bom uso do método de preparação, não foi necessário eliminar muitas colunas.

As colunas escolhidas foram umidificadas pela adição de um volume determinado de água, buscando-se conseguir a umidade volumétrica desejada. Desde que não ocorram variações no volume total da amostra, não existe nenhum problema inerente ao fato de se trabalhar com umidade volumétrica (cm^3 de água/ cm^3 de amostra), pois esta pode ser facilmente convertida em umidade mássica (gramas de água/gramas de amostra seca), conforme apresentado no item 2.1.2.

A adição da água, realizada com uma pipeta, foi lenta e gradativa, evitando-se assim rupturas da coluna porosa, provocadas por bolhas de ar que são deslocadas dos poros da matriz e se movimentam no sentido de escaparem

para o ambiente externo. Esse problema pode ser amenizado furando-se uma das faces da coluna em vários pontos, facilitando-se a eliminação do ar inicialmente presente. Na sequência, vedou-se a extremidade da coluna e acompanhou-se o processo de umidificação através do TDR- γ , fazendo-se varreduras com o feixe colimado de radiação ao longo de toda a coluna em tempos distintos. Com os dados das varreduras determinou-se os coeficientes de atenuação lineares e as respectivas umidades, a partir da curva de calibração de $\mu \times \theta$.

3.4.2. MÉTODO DE PREENCHIMENTO DE COLUNAS COM AMOSTRA ÚMIDA (MPU)

A etapa de preenchimento deve ter como objetivo final a obtenção de colunas homogêneas com relação às distribuições de densidade e umidade. Do mesmo modo, deve haver reprodutibilidade com relação a essas grandezas, sem o que, a aplicação do método experimental ficaria prejudicada.

O método de preenchimento das colunas com a amostra seca trouxe problemas com relação à distribuição inicial de umidade, como pode ser observado no capítulo (4). Deste modo, um método de preparação de colunas onde a amostra é previamente umidificada até um teor desejado, foi desenvolvido e testado. Este método de preenchimento inicia-se pela preparação da amostra, seguida de sua umidificação. Definida a umidade que se pretende obter, adicionou-se a massa de água destilada necessária e misturou-se a amostra exaustivamente. Em seguida, cobriu-se o recipiente que continha a amostra com um pano úmido, para minimizar a evaporação da água para a atmosfera. Imediatamente, iniciou-se o preenchimento das colunas.

Realizou-se o preenchimento, colocando-se uma pequena porção de amostra úmida dentro da coluna e compactando-se a mesma com o auxílio de um soquete de madeira. Essa compactação é feita pressionando-se a amostra com o soquete, de forma que não provoque a separação do caulim. Antes de adicionar uma segunda porção da amostra, deve-se desfazer a superfície lisa formada, para evitar uma descontinuidade no meio poroso. Assim, a coluna vai sendo preenchida camada por camada, até que fique completamente cheia.

À medida em que as colunas vão sendo preenchidas, deve-se conectá-las imediatamente aos sistemas de secagem (Montagem Experimental 1 ou Montagem Experimental 2). Após a conexão, faz-se a vedação do sistema com borracha de silicone e coloca-se o mesmo em uma estufa com temperatura controlada.

Para se testar a eficiência da vedação, fez-se um experimento com uma coluna parcialmente cheia de água, vedada nas duas extremidades com tampas de PVC e borracha de silicone. Esta montagem foi pesada e colocada em estufa a 30°C. Anotou-se o peso do sistema em dias diferentes e observou-se as perdas de peso ocorridas. Os resultados mostraram que, nas condições experimentais, o coeficiente global de transferência de massa entre a coluna e o ar da estufa foi igual a $1,14 \times 10^{-4}$ g/h m²mmHg a 30°C, que pode ser considerado pequeno dentro do contexto dos experimentos, comprovando a eficiência da vedação.

A determinação dos perfis transientes de umidade foi realizada pela interrupção brusca do processo para cada coluna, em tempos distintos, desconectando-as do sistema e seccionando-as em fatias de 1,0 cm de espessura. O seccionamento das colunas foi possível através da colocação de canudos de plástico de diâmetros iguais aos diâmetros internos das colunas, dentro dos quais se realiza o preenchimento das mesmas. Após a desconexão,

puxa-se a extremidade do canudo de plástico, que desliza pelo interior do tubo de "pexiglass", trazendo o meio poroso sem danificá-lo, conforme proposto por QUADRI (1988). Durante o seccionamento, cada fatia foi acondicionada em papel alumínio previamente pesado e enumerado, indicando a posição daquela secção. A Figura (3.5) ilustra a etapa de retirada do canudo de plástico contendo o meio poroso submetido ao processo de secagem. Um detalhe do seccionamento deste canudo é apresentado na Figura (3.6).

Como se trabalhou com colunas de 20 cm de comprimento, obteve-se 20 fatias para cada coluna, que foram pesadas em balança analítica e levadas à estufa para secagem a 105°C por 24 horas. Após a secagem, as amostras foram colocadas em dessecadores contendo CaCl_2 (dessecante) para esfriamento e posterior pesagem. Para averiguar se as colunas preparadas possuíam distribuições de umidade homogêneas, seccionava-se uma delas no seu estado inicial (antes de ser conectada ao sistema) e fazia-se a determinação da distribuição inicial de umidade.

3.5. AVALIAÇÃO DOS COEFICIENTES DE DIFUSÃO

Com estas montagens experimentais, determinou-se os perfis hídricos transientes, contados a partir das conexões das colunas aos sistemas de secagem. O conhecimento dos fluxos de massa globais e dos perfis transientes de umidade permitiu determinar os coeficientes de difusão isotérmicos, correspondentes às diferentes umidades, a uma dada temperatura. Estes coeficientes representam as contribuições das transferências nas fases líquida e vapor (Equação 2.26).

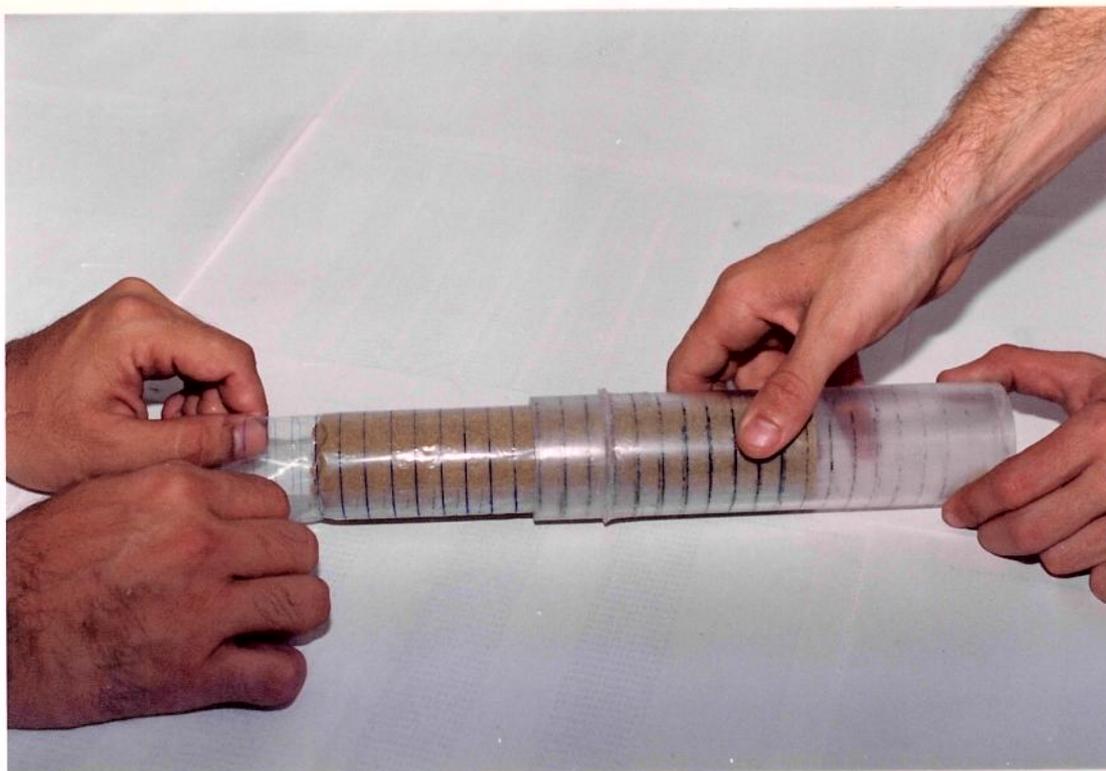


FIGURA 3.5. ETAPA DE RETIRADA DO CANUDO DE PLÁSTICO
CONTENDO O MEIO POROSO



FIGURA 3.6. DETALHE DO SECCIONAMENTO DO CANUDO

A Figura (3.7) mostra, esquematicamente, como os coeficientes de difusão são avaliados. A avaliação das densidades de fluxo mássico em intervalos de tempo definidos pode ser realizada a partir de integrações dos perfis hidricos transientes, tendo como limites de integração inferior e superior z_1 e z_1 , respectivamente. As derivadas são obtidas na posição $z=z_1$ e assume-se que o gradiente efetivo de umidade nesta secção pode ser representado pela média aritmética das derivadas, calculadas a partir das duas curvas relativas a t_1 e t_2 . As integrações são realizadas numericamente pelo Método dos Trapézios e as derivações são feitas a partir de um método de aproximação geométrica (Le DUY & ZAJIC, 1973).

O termo \bar{J} é a densidade de fluxo mássico de umidade que atravessa a secção $z=z_1$ entre os instantes t_1 e t_2 .

$$J = \frac{r}{A \Delta t} \left[\int_{z=z_1}^{z=z_1} [\omega(z, t_1) - \omega(z, t_2)] dz \right] \quad (3.1)$$

onde,

$$r = \frac{m_0}{\omega_0 l} = \rho_0 A \quad \text{e } m_0 \text{ é a massa inicial de água contida}$$

na coluna e l é o comprimento da coluna. Deste modo, r vem a representar a massa de meio poroso contida em uma unidade de comprimento de coluna, com dimensões (M/L).

O termo $\left[\frac{\partial \omega}{\partial z} \right]_{\text{médio}}_{z=z_1}$ é o gradiente médio de umidade na secção de

cota $z=z_1$, ou seja:

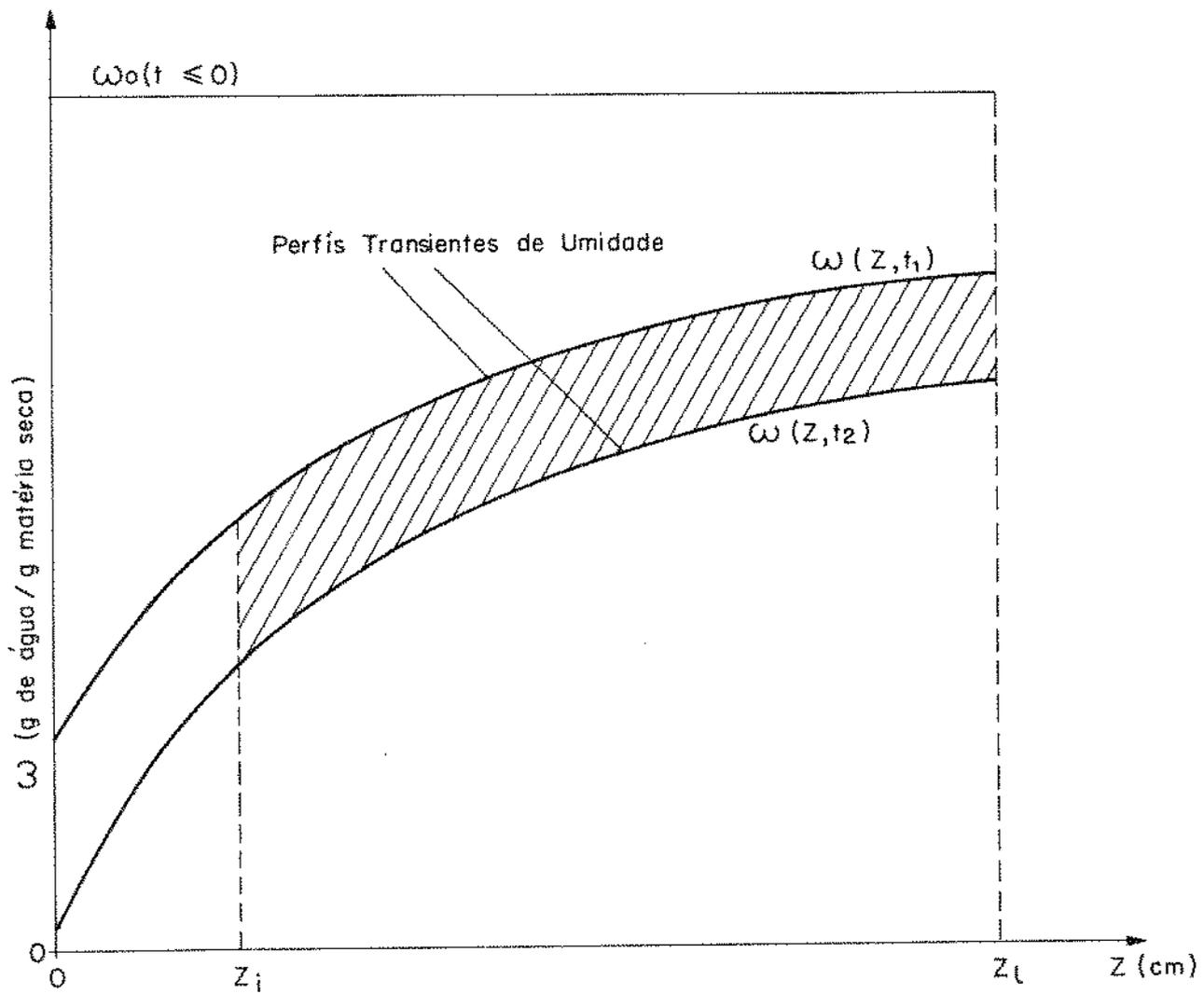


FIGURA 3.7. AVALIAÇÃO DOS COEFICIENTES DE DIFUSÃO EFETIVOS

$$\left[\frac{\partial \omega}{\partial z} \right]_{z=z_1}^{\text{médio}} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial \omega}{\partial z}(t_1, z_1) + \frac{\partial \omega}{\partial z}(t_2, z_1) \right] \quad (3.2)$$

A consideração deste gradiente médio de umidade só tem sentido se os gradientes forem da mesma ordem de grandeza. Este cuidado deve-se ao fato de que pequenos erros na avaliação de $\left[\frac{\partial \omega}{\partial z} \right]_{z=z_1}^{\text{médio}}$ podem levar a uma grande propagação de erros na avaliação dos coeficientes de difusão.

Pode-se então, reescrever a equação do fluxo de massa isotérmico em uma forma mais fácil de ser utilizada:

$$D(\omega) = \frac{\left[\int_{z=z_1}^{z=z_1} [\omega(z, t_1) - \omega(z, t_2)] dz \right]}{(t_2 - t_1) \left[\frac{\partial \omega}{\partial z} \right]_{z=z_1}^{\text{médio}}} \quad (3.3)$$

Deste modo, variando a posição da secção $z = z_1$, obtém-se um valor médio do coeficiente isotérmico de difusão de umidade, para cada valor do conteúdo de umidade, a uma dada posição z_1 , entre dois instantes t_1 e t_2 .

3.6. DETERMINAÇÃO DA ISOTERMA DE EQUILÍBRIO PARA A MISTURA DE AREIA E CAULIM

Determinou-se a isoterma de equilíbrio de umidade para a mistura de areia e caulim, em condições de desorção. As umidades de equilíbrio foram determinadas utilizando-se aproximadamente 80 gramas de amostra,

inicialmente saturada de água, colocadas em placas de vidro circulares, de modo a formarem camadas semelhantes às superfícies das colunas que ficaram expostas à secagem (Montagens Experimentais 1 e 2).

As placas foram colocadas em dessecadores contendo soluções salinas saturadas ou hidróxido de potássio, submetendo-se as amostras à diferentes condições de umidade relativa (UR) do ar. Uma revisão sobre o controle da UR do ar através da utilização de soluções salinas é apresentado por ROCKLAND, 1960; YOUNG, 1967 e ROSSI & ROA, 1980. Os dessecadores são colocados em uma estufa com temperatura controlada, que é mantida a 30^oC durante toda a realização dos experimentos. Atingido o equilíbrio, determina-se as umidades das amostras através do método gravimétrico.

As soluções utilizadas, com as respectivas umidades relativas proporcionadas por elas a 30^oC são apresentadas na Tabela (3.2).

TABELA (3.2). UMIDADES RELATIVAS PROPORCIONADAS POR SOLUÇÕES SALINAS SATURADAS A 30^oC.

SOLUÇÃO	UR (%)
KOH	7.0
LiCl	12.0
KCH ₃ CO ₂	22.0
MgCl ₂ . 8H ₂ O	33.0
K ₂ CO ₃ . 2H ₂ O	43.0
Na ₂ Cr ₂ O ₇ . 2H ₂ O	52.0
NaCl	75.0
KCl	85.0
K ₂ SO ₄	96.0

3.7. TRANSMISSÃO DIRETA DE RAIOS GAMA E TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA

3.7.1. EQUIPAMENTO EXPERIMENTAL

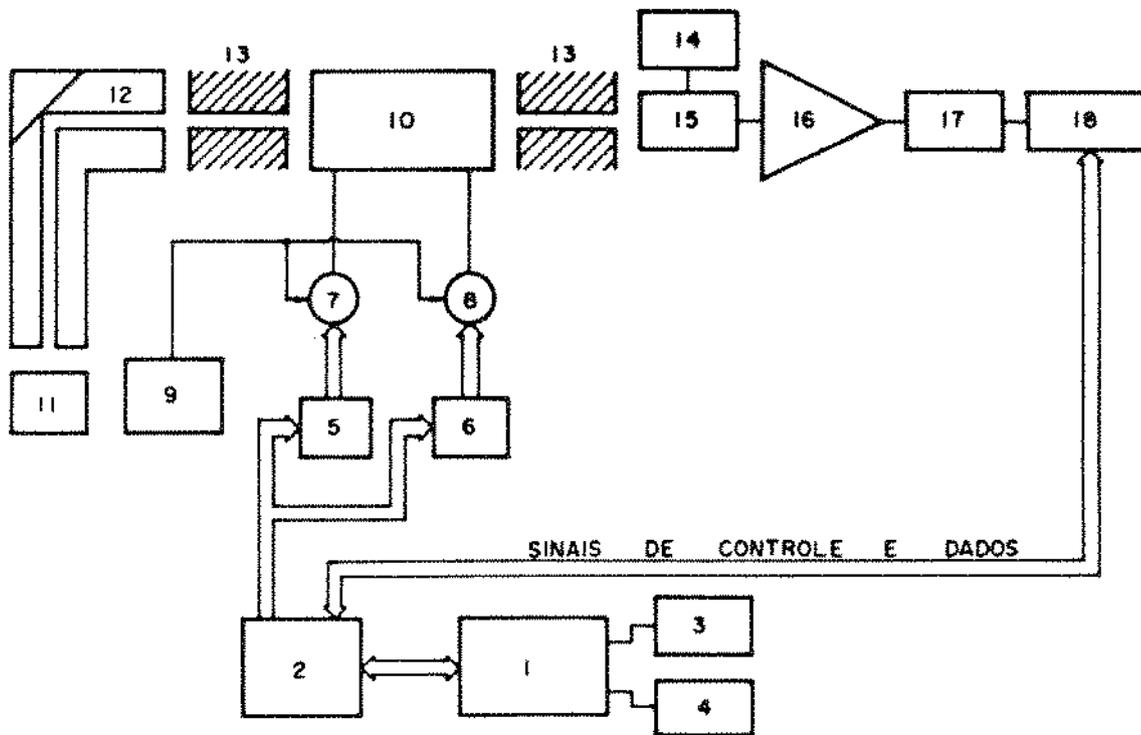
O equipamento experimental para medição dos coeficientes de atenuação das amostras é parte do mini-tomógrafo de raios gama e está esquematizado na Figura (3.8) e ilustrado pela Figura (3.9). O sistema é constituído basicamente de duas partes: uma essencialmente eletrônica de controle e processamento (blocos 1 a 10) e outra nuclear (blocos 11 a 18), incluindo fonte, colimadores e cadeia nuclear.

O controle e o processamento são realizados com um computador de 8 bits (1, 3 e 4) que, através de "software" de controle e "hardware" interfaciado aos motores de passo (5 a 9), coordena os movimentos de rotação e translação da amostra. Estes movimentos são necessários para fazer a varredura da amostra.

Na parte nuclear (11 a 18), tem-se a fonte de raios-X ou raios- γ (11). A radiação passa por um colimador de chumbo (13), atravessa a amostra colocada na mesa de rotação e translação (10) e os fótons que passaram pela amostra são novamente colimados (13). Isto permite diminuir a divergência do feixe e evitar que a radiação espalhada pelo objeto analisado alcance o detetor (15).

O sistema eletrônico de contagem de fótons é constituído por:

- a) detetor de cintilação de NaI(Tl), que está associado a uma fotomultiplicadora, permitindo assim obter alta eficiência na conversão da energia da radiação absorvida em fótons de luz (15).
- b) fonte de alta tensão (14)
- c) amplificador (16)



- | | |
|---|--|
| 1 - Microcomputador | 10 - Mesa tomográfica |
| 2 - Interface | 11 - Fonte de Raios-X ou Raios gama |
| 3 - Impressora gráfica | 12 - Suporte do alvo secundário fluorescente |
| 4 - Vídeo | 13 - Colimadores |
| 5 - Controle do motor de translação | 14 - Fonte de alta tensão |
| 6 - Controle do motor de rotação | 15 - Detector |
| 7 - Motor de translação | 16 - Amplificador |
| 8 - Motor de rotação | 17 - Monocanal |
| 9 - Fonte de alimentação para os motores de passo | 18 - Controlador - Temporizador |

FIGURA 3.8. DIAGRAMA DE BLOCOS DO MINI-TOMÓGRAFO DE RAIOS-X OU RAIOS- γ

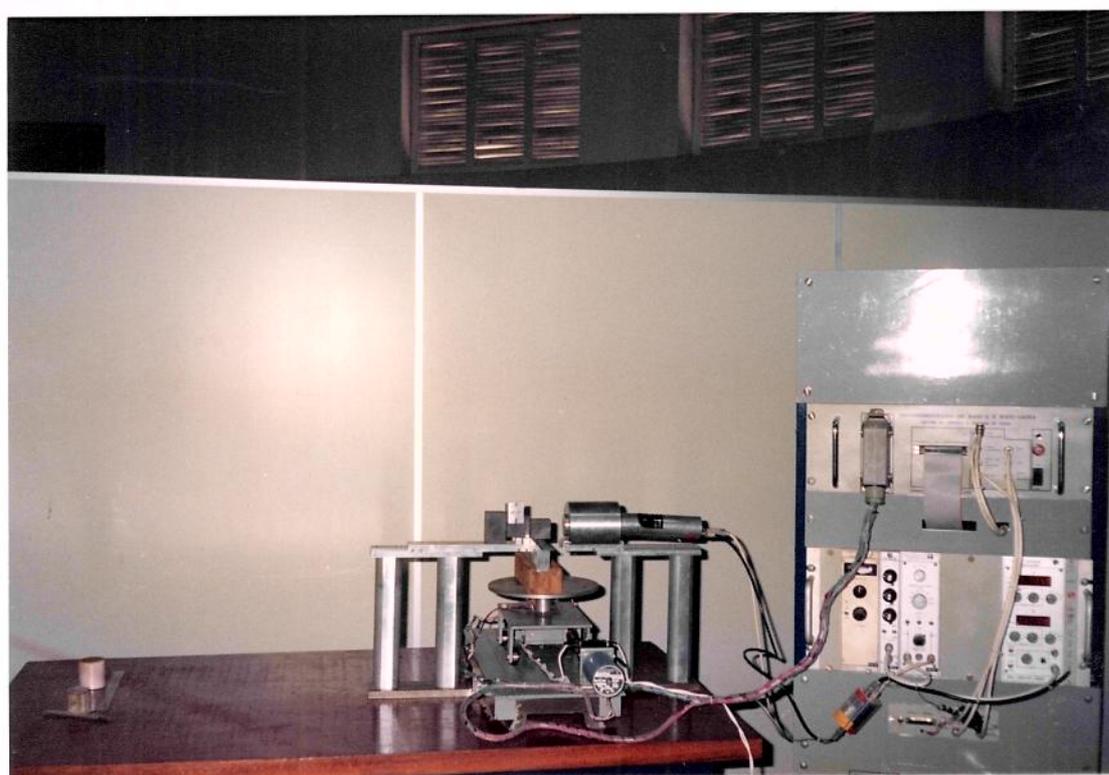
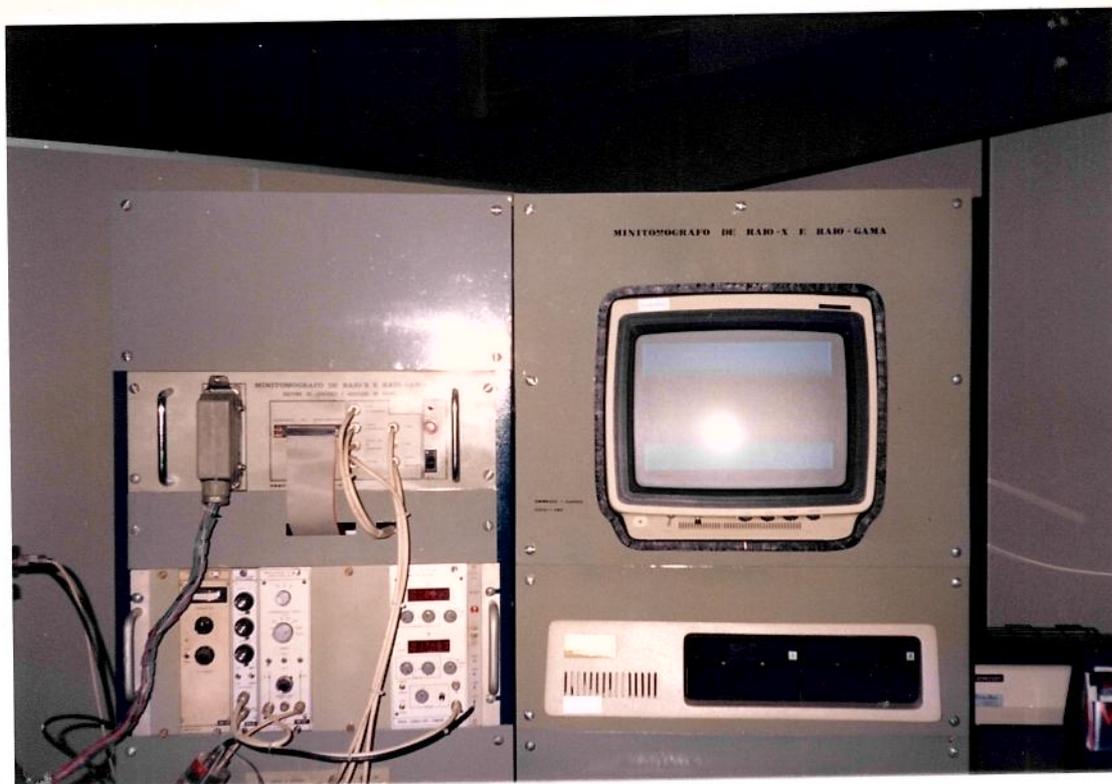


FIGURA 3.9. VISTA GERAL DO MINI-TOMÓGRAFO DE RAIOS-X OU RAIOS- γ

d) contador e temporizador (18)

A interface (2) é construída com circuitos de alta confiabilidade, apresentando arquitetura de transmissão e recepção de dados na forma de barramento paralelo. O "software" básico de controle e o de processamento são em linguagem de programação Pascal.

A fonte radioativa utilizada pelo sistema é ^{241}Am , com energia igual a 59,6 KeV e atividade de 300 mCi.

3.7.2. PROPRIEDADES DA MISTURA DE AREIA E CAULIM COM RELAÇÃO À INTERAÇÃO COM A RADIAÇÃO GAMA

Para essas determinações trabalhou-se com uma colimação de 2 mm e com 4.8 cm de distância entre a fonte de amerício e o detetor.

3.7.2.1. DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ATENUAÇÃO DE MASSA

Um dos primeiros passos a serem dados quando se inicia um trabalho usando a TDR- γ é a determinação do coeficiente de atenuação de massa ($\bar{\mu}$) do material estudado, permitindo a compararação dessa sua propriedade física com a de outros materiais.

Determinou-se o coeficientes de atenuação de massa para a mistura de areia e caulim, cujo procedimento utilizado é apresentado por REICHARDT, 1965 e ZUCCHI & NASCIMENTO, 1982.

Para as amostras utilizadas, encontrou-se um valor de $\bar{\mu} = 0.241 \text{ cm}^2/\text{g}$.

3.7.2.2. CURVAS DE CALIBRAÇÃO

CURVA DE CALIBRAÇÃO DE $\mu \times \rho$

Para a determinação desta curva, adotou-se o seguinte procedimento:

- Secou-se a amostra em estufa a 105°C por 24 horas
- Efetuou-se as medidas das dimensões e das massas dos recipientes de "pexiglass" utilizados
- Fêz-se medidas da intensidade de radiação transmitida através de cada recipiente vazio. Essas medidas foram efetuadas em três pontos distintos, em um mesmo plano horizontal de cada recipiente. Em cada ponto, repetiu-se as medidas por cinco vezes, para minimizar os erros devidos às flutuações no nível de emissão de fótons pela fonte de amerício.
- Preencheu-se os recipientes com a amostra seca, procurando-se variar a densidade global através da variação do grau de compactação da amostra. Calculou-se as densidades obtidas a partir das massas e dos volumes das amostras.
- Adotando o mesmo procedimento usado para os recipientes vazios,

fêz-se as medidas de intensidade de radiação transmitida para cada recipiente contendo a amostra.

- Efetuou-se medidas para determinar a radiação de fundo, colocando-se um bloco de chumbo entre a fonte e o detetor e medindo-se o número de fótons detectados pelo sistema.

A partir destas medições e da Lei de BEER, determinou-se os coeficientes de atenuação lineares para cada amostra.

Os resultados encontrados, assim como a melhor equação que contempla os pontos experimentais, estão listados na Tabela (3.3) e graficados na Figura (3.10). O ajuste foi realizado através do Método dos Mínimos Quadrados, obtendo-se uma curva com coeficiente de correlação igual a 0,989.

CURVA DE CALIBRAÇÃO DE $\mu \times \theta$

O procedimento foi análogo ao anterior, procurando-se agora conservar a densidade global do meio o mais próximo possível de um valor fixo. Mediu-se a densidade em um plano da amostra usando a TDR- γ e a curva de calibração de $\mu \times \rho$. Essa medida é fundamental para que se normalize os coeficientes de atenuação para uma densidade de referência. Feito isso, umidificou-se as amostras à vários conteúdos de umidade distintos, adicionando-se volumes de água previamente calculados, com a finalidade de se conseguir as umidades volumétricas pretendidas. Deve-se cuidar para que não ocorram modificações na estrutura do meio, causadas pela própria adição da água. Uma adição lenta e gradativa da água permite que o ar presente nos

interstícios do meio poroso possa ser eliminado, também gradativamente. Após a adição da água, veda-se cada recipiente com parafina líquida e aguarda-se aproximadamente uma semana para que a água se distribua pelo meio.

Os resultados, com a curva de ajuste dos pontos determinada pelo Método dos Mínimos Quadrados, são apresentados na Tabela (3.4) e na Figura (3.11). O coeficiente de correlação obtido para a curva foi 0,889.

Os resultados das tomografias foram obtidos em Unidades do Mini-tomógrafo (UM), que apresentam uma relação de dependência linear (coeficiente de correlação igual a 0,999) com μ , dada pela Equação (3.4).

$$UM = -28,423 + 5889.955 \mu \quad (3.4)$$

TABELA 3.3 - PONTOS EXPERIMENTAIS DA CURVA DE CALIBRAÇÃO DE $\mu \times \rho$

ρ [g/cm ³]	μ [cm ⁻¹]
1,39	0,337
1,49	0,369
1,61	0,390
1,69	0,401
1,72	0,421
1,74	0,428
1,77	0,436
1,78	0,438
1,83	0,441
1,84	0,444

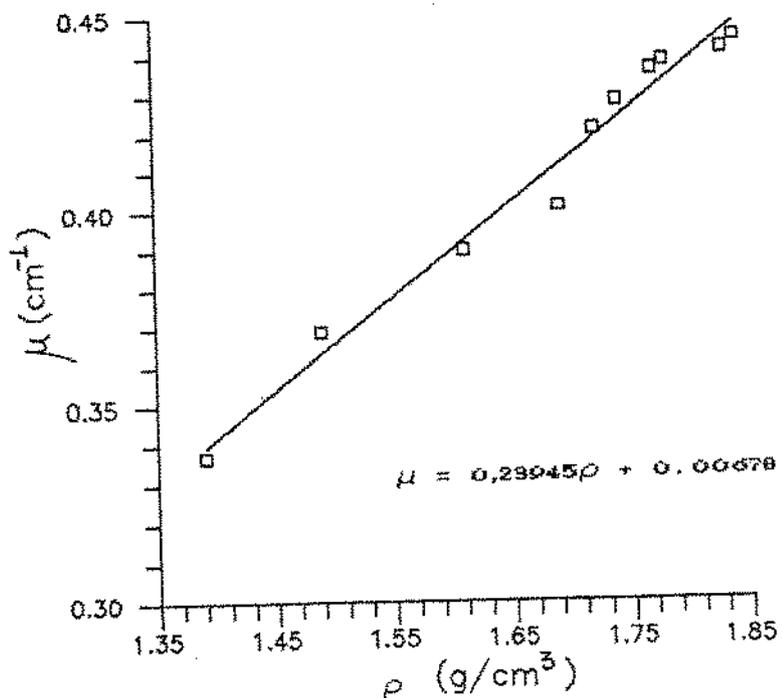


FIGURA 3.10. CURVA DE CALIBRAÇÃO DE $\mu \times \rho$

TABELA 3.4 - PONTOS EXPERIMENTAIS DA CURVA DE CALIBRAÇÃO DE $\mu \times \theta$

θ [cm ³ de água / cm ³ de amostra]	μ [cm ⁻¹]
0,30	0,469
0,20	0,437
0,15	0,457
0,10	0,433
0,08	0,429
0,06	0,427
0,04	0,413
0,01	0,420

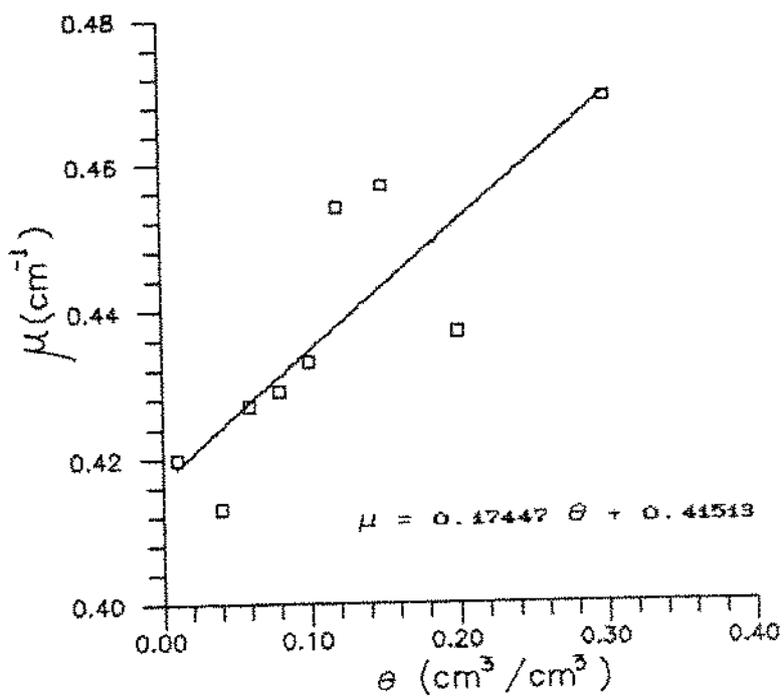


FIGURA 3.11. CURVA DE CALIBRAÇÃO DE $\mu \times \theta_{\omega}$

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. EXPERIMENTOS PRELIMINARES UTILIZANDO A TRANSMISSÃO DIRETA DE RAIOS GAMA

No início do presente trabalho procurou-se realizar uma série de experimentos, com o objetivo de tomar um maior contato com a técnica da atenuação de raios gama na medição da densidade e umidade em meios porosos. Realizou-se tais experimentos sem a preocupação de encontrar resultados que pudessem ser tratados quantitativamente. No entanto, são ilustrativos para o entendimento dos princípios sobre os quais esta técnica se apóia e de aspectos gerais que caracterizam os meios e os fenômenos estudados.

4.1.1. EXPERIMENTOS COM A MISTURA DE AREIA E CAULIM

Preparou-se uma coluna com a amostra inicialmente seca, sem a preocupação de que o método de preenchimento proporcionasse uma distribuição de densidades homogênea. Após o preenchimento, fêz-se uma varredura com o feixe colimado de raios- γ ao longo da mesma, registrando-se o número de fótons que atravessaram suas secções transversais a cada 5 mm de intervalo, utilizando-se um tempo de espera (tempo de exposição ao feixe colimado de raios gama) igual a 30 segundos para cada ponto. Em seguida, fêz-se a umidificação da coluna através de uma adição de água lenta e gradual sobre a extremidade livre da mesma, que então foi vedada e colocada em repouso.

Durante o processo de umidificação, observou-se visualmente o avanço da frente de umidificação e, antes que essa alcançasse a extremidade oposta

da coluna, fêz-se uma varredura com o feixe de radiação. Repetiu-se este procedimento após um intervalo de 11 horas e os resultados são apresentados na Figura (4.1). Nota-se, ao se observar a linha que une os pontos representativos dos números de fótons que atravessam a coluna seca, que esta possui uma distribuição de densidades irregular. Uma distribuição homogênea apresentaria uma menor variação nas intensidades de radiação registradas pelo detetor, visto que a coluna possui secção reta constante. Pode-se observar o avanço da frente de umidificação que provoca uma diminuição na intensidade de radiação transmitida devido à presença da água que, na primeira curva de umidificação percolou até a secção de cota $z = 12$ cm.

Na segunda curva de umidificação, nota-se a evolução da frente com a modificação do perfil de umidade em toda a coluna. Ocorre uma diminuição da atenuação do feixe para pontos próximos da extremidade livre da coluna, pois a água continua sendo transferida das regiões de maior para as de menor concentração, até que seja atingido o equilíbrio. É interessante notar também, que as formas das curvas são semelhantes, determinadas pelas distribuições iniciais de densidades, que dependem do modo como as colunas foram preparadas. A diferença nos números de fótons que atravessam a coluna nos dois instantes, depende da variação do conteúdo de umidade na secção.

Utilizando os mesmos critérios de preparação e umidificação das colunas, realizou-se experimentos para observar o fenômeno de migração de umidade sob condições de secagem. Partiu-se de uma coluna seca, à qual foi adicionada água destilada. Esta coluna foi deixada em repouso por vários dias, e o perfil de umidade foi acompanhado até que alcançasse um estado de equilíbrio, comprovado pela constância do mesmo num período de 24 horas. Essa coluna foi submetida na sua extremidade, a uma secagem promovida por ar aquecido. Após algum tempo, fêz-se uma varredura com o feixe de radiação,

observando-se a presença de uma frente de secagem, cujos resultados são apresentados na Figura (4.2). Analogamente ao ocorrido na umidificação, nota-se o avanço de uma frente de secagem, que ainda não alcançou a secção da coluna de cota $x = 12$ cm, no instante em que foram feitas as medições. Não se preocupou em anotar o tempo de secagem, pois a intenção do experimento era apenas qualitativa e não havia controle sobre as condições psicrométricas do ar de secagem.

Para estes experimentos, não foi possível avaliar os perfis de umidade e as distribuições iniciais de densidade nas colunas, pois não se conhecia as relações de dependência entre estas grandezas e os coeficientes de atenuação lineares, assim como os coeficientes de atenuação de massa para os materiais estudados. É necessário determinar-se previamente as curvas de calibração de $\mu \times \rho$, $\mu \times \theta$ e o valor de $\bar{\mu}$ para esse material.

4.1.2. EXPERIMENTOS COM UMA AMOSTRA DE FUBÁ

4.1.2.1. DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ATENUAÇÃO DE MASSA

A conservação de alimentos através do uso de radiação ionizante é uma técnica bastante conhecida (DESROSIER, 1963). No entanto, não se encontrou trabalhos relativos à utilização da TDR- γ e da TR na medição da densidade e umidade em alimentos. Nesse sentido, procurou-se realizar alguns estudos preliminares de utilização da TDR- γ para se medir a densidade de colunas preenchidas com milho moído e fubá comercial.

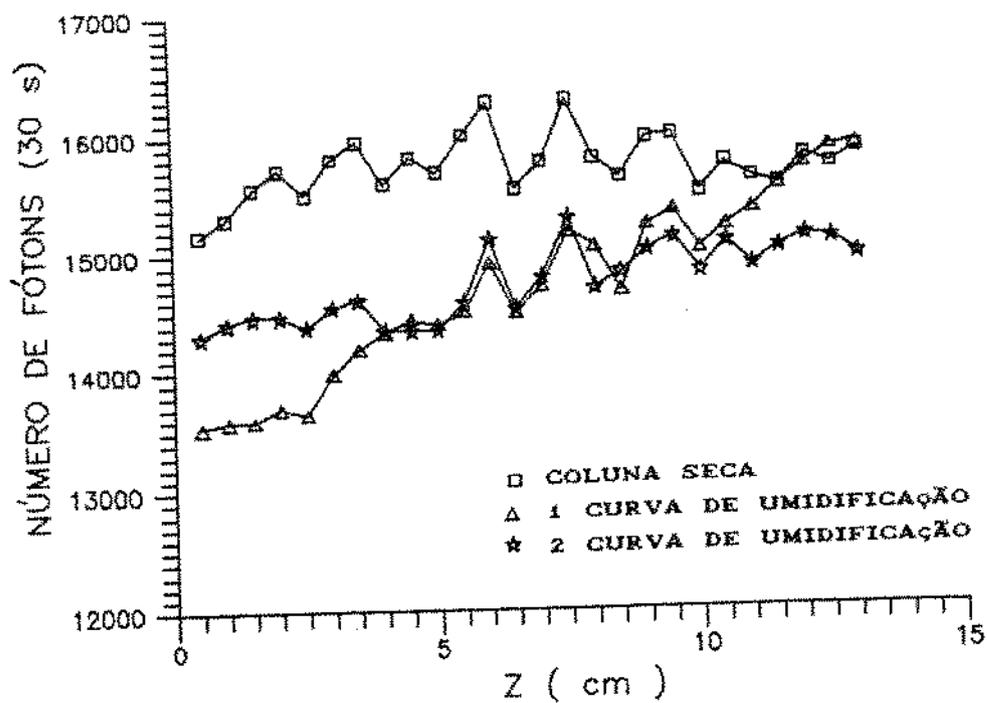


FIGURA 4.1. EXPERIMENTO PRELIMINAR DE UMIDIFICAÇÃO

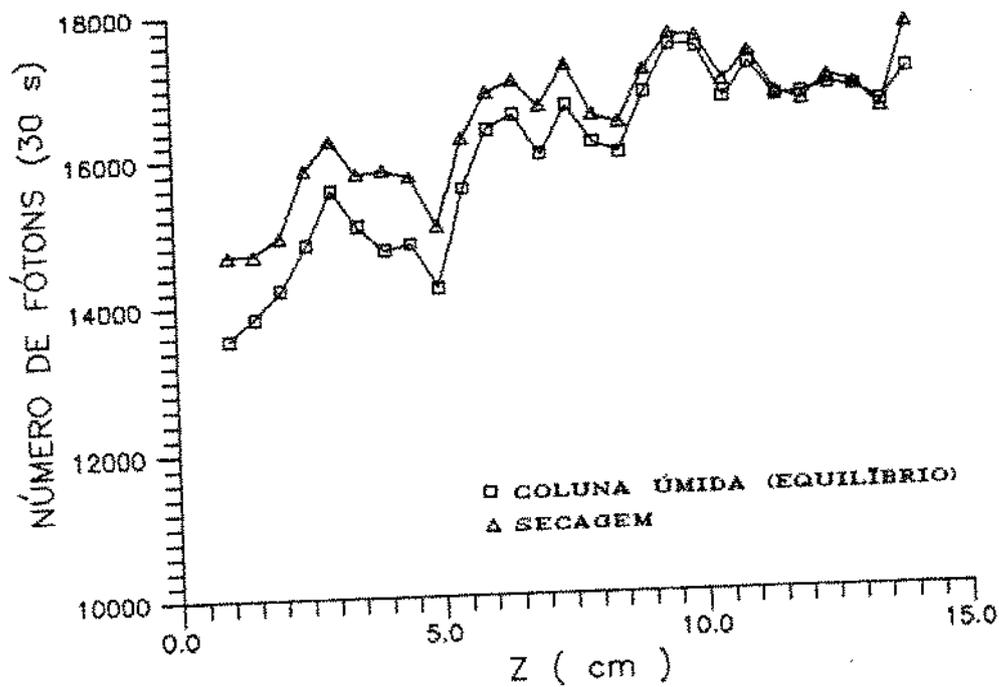


FIGURA 4.2. EXPERIMENTO PRELIMINAR DE SECAGEM

O coeficiente de atenuação de massa ($\bar{\mu}$) determinado para o fubá foi 0,184 cm²/g. Para o milho moído encontrou-se $\bar{\mu} = 0.186$ cm²/g. Estes valores são iguais, dentro da faixa de precisão do TDR- γ , o que só confirma a teoria (Capítulo 2), pois $\bar{\mu}$ não depende do grau de fragmentação do material (ou da densidade aparente), sendo uma propriedade física do mesmo. Os resultados encontrados são específicos para as amostras analisadas, não sendo possível de generalizar, pois a composição físico-química de cereais está sujeita a variações, dependendo da origem do mesmo. Desse modo, se a quantidade de sais minerais (metais) presente no milho variar, podem ocorrer variações no valor de $\bar{\mu}$.

4.1.2.2. ESTUDO DO PREENCHIMENTO DAS COLUNAS

A Figura (4.3) mostra a distribuição de densidades para uma coluna preparada a partir de uma amostra de fubá secada em estufa a 105°C/24h. O preenchimento da coluna foi análogo ao MPU (usado para a mistura de areia e caulim). A distribuição de densidades foi bastante homogênea, com um Coeficiente de Variação (CV) igual a 1,62%. A média aritmética das densidades "pontuais" é igual a 0,89 g/cm³, muito próxima da determinada gravimetricamente ($\rho = 0,88$ g/cm³). As densidades foram determinadas dividindo-se os coeficientes de atenuação lineares (μ) encontrados, pelo coeficiente de atenuação de massa ($\bar{\mu}$) da amostra. Os resultados foram bastante reprodutíveis, demonstrando a possibilidade do uso da TDR- γ para a determinação da densidade aparente em meios similares a este.

Pesquisou-se a possibilidade de se utilizar a TDR- γ para estudos da dinâmica da água nas colunas preparadas. A Figura (4.4) mostra os resultados

obtidos para uma coluna de fubá submetida a um processo de umidificação , segundo a metodologia proposta na Montagem Experimental 1, onde substituiu-se a solução higroscópica por água destilada. A curva superior representa a coluna seca no seu estado inicial, enquanto a curva inferior representa a situação da coluna após 6 horas de contato com a atmosfera de alta umidade relativa. Apresenta-se apenas os resultados das intensidades de radiação transmitidas através da coluna, pelo fato de não se poder afirmar que a modificação da atenuação do feixe de raios gama, ocorrida para a curva inferior, foi devida unicamente ao aumento da umidade ao longo da coluna, pois o processo de transferência de umidade modifica a densidade do meio poroso. No entanto, é possível determinar-se, simultaneamente, a densidade e a umidade para os materiais expansivos, desde que se utilize o TDR- γ com dupla energia (COREY *et alli*, 1971 e ZUCCHI & NASCIMENTO, 1982).

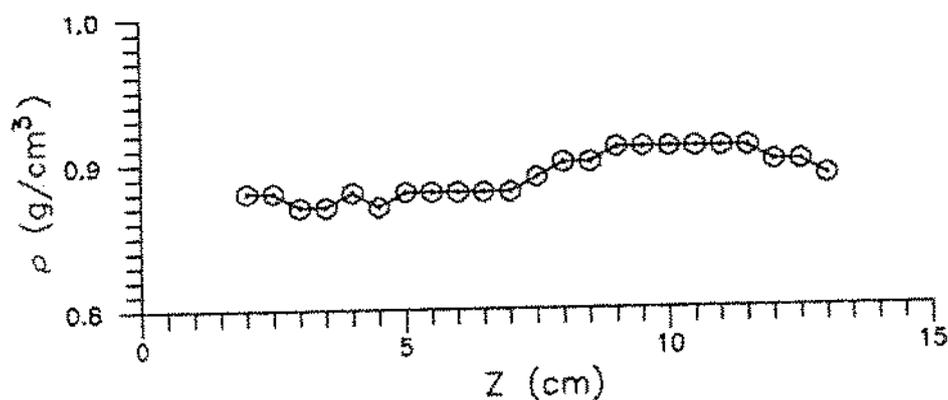


FIGURA 4.3. DISTRIBUIÇÃO DE DENSIDADES EM UMA COLUNA DE FUBÁ SECO, DETERMINADA ATRAVÉS DA TÉCNICA DA ATENUAÇÃO DE RAIOS- γ

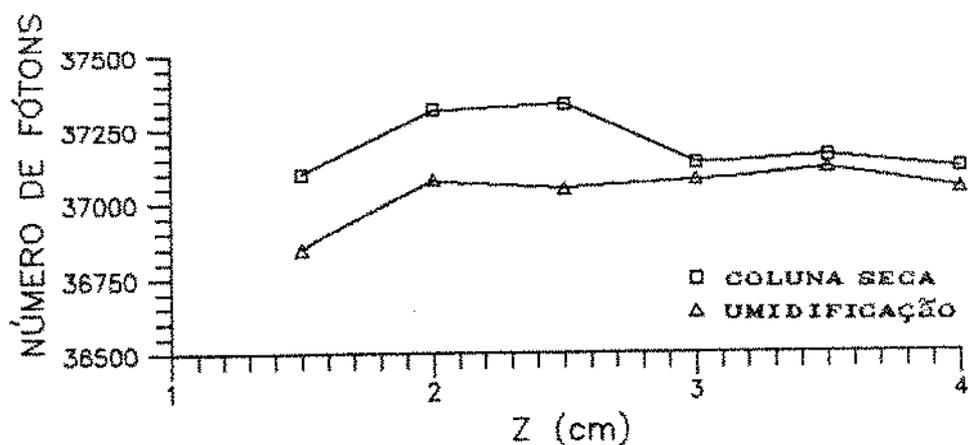


FIGURA 4.4. EXPERIMENTO PRELIMINAR DE UMIDIFICAÇÃO DE UMA COLUNA DE FUBÁ, INICIALMENTE SECA, FAZENDO USO DA MONTAGEM EXPERIMENTAL 1 E DO TDR- γ

4.2. ESTUDO DOS MÉTODOS DE PREENCHIMENTO DE COLUNAS USANDO A TDR- γ E A TR (MISTURA DE AREIA E CAULIM)

4.2.1. MÉTODO DE PREENCHIMENTO DE COLUNAS COM AMOSTRA SECA (MPS). ESTUDO DAS DISTRIBUIÇÕES INICIAIS DE DENSIDADE E UMIDADE. ACOMPANHAMENTO DOS PROCESSOS DE TRANSFERÊNCIA DE UMIDADE.

Conhecidas as relações de dependência do coeficiente de atenuação linear com a densidade e a umidade, pode-se pesquisar métodos de preparação de colunas que proporcionassem homogeneidade com relação a ρ e ω , e que possuíssem boa reprodutibilidade. O MPS foi testado como uma primeira opção,

e os resultados foram comparados com os obtidos a partir de colunas preparadas aleatoriamente.

Com relação às distribuições de densidades ao longo das colunas preparadas pelo MPS, pode-se observar, pela Figura (4.5), que estas são homogêneas, com Coeficientes de Variação (CV) que podem ser considerados pequenos. Os valores de CV para as colunas 1, 2 e 3 são, respectivamente, 0,57; 0,61; e 0,51%. Deve-se notar que, nas três colunas, existe dificuldade de compactação do meio poroso nas extremidades das mesmas, encontrando-se aí os pontos de menor densidade. Paralelamente, comparando-se as densidades médias obtidas para as colunas, encontrou-se um CV = 0,5%, que também pode ser considerado satisfatório, face à dificuldade natural de se reproduzir colunas de meio poroso a partir de sólidos granulados.

A Figura (4.6) mostra a distribuição de densidades em uma coluna preparada aleatoriamente, sem critério definido. Neste caso, nota-se uma menor homogeneidade, além de uma menor densidade média. Observa-se também um decréscimo no valor da densidade, do topo para o fundo da coluna.

Fazendo-se uma análise visual das colunas preparadas pelo MPS, observou-se nas mesmas a presença de faixas mais claras, de ocorrência periódica, no sentido longitudinal. Essas faixas apareceram devido à separação do caulim, provocada pelas batidas nas laterais das colunas durante o processo de preenchimento, tornando-se um impedimento ao uso deste procedimento.

Quanto às distribuições de umidade, as colunas não podem ser consideradas homogêneas, como pode ser visto na Figura (4.7). Nesta figura, as curvas superiores representam as distribuições de umidade ao longo das colunas, em condições de equilíbrio hídrico. Esse equilíbrio foi considerado após as colunas, vedadas, permanecerem 10 dias em repouso, quando notou-se

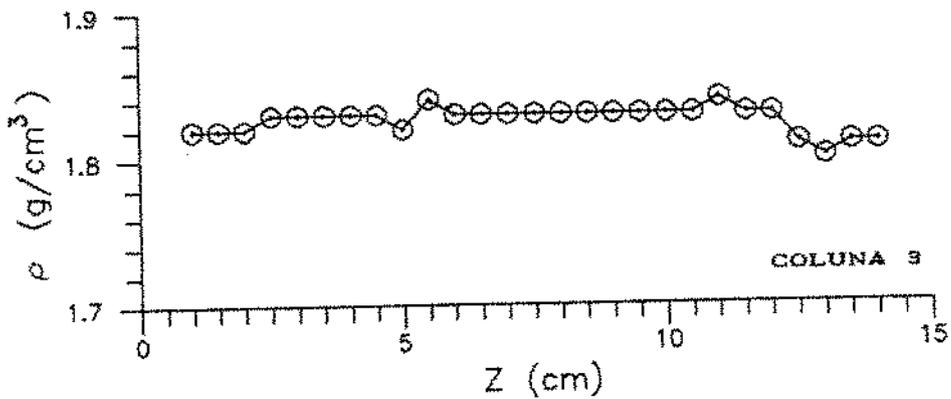
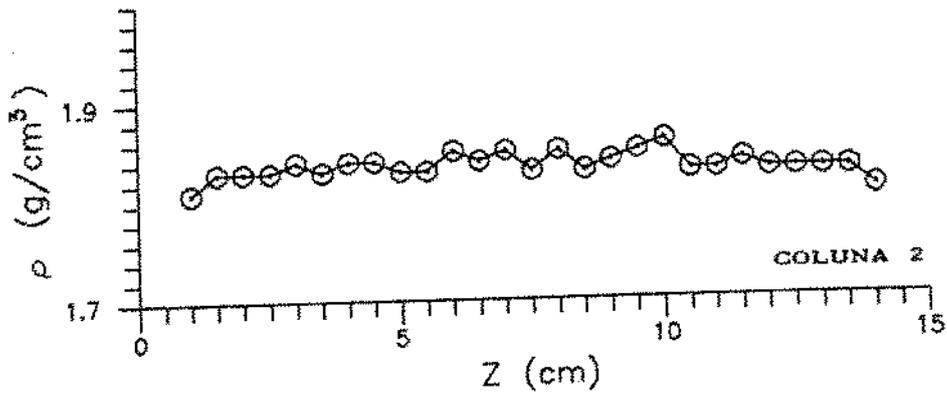
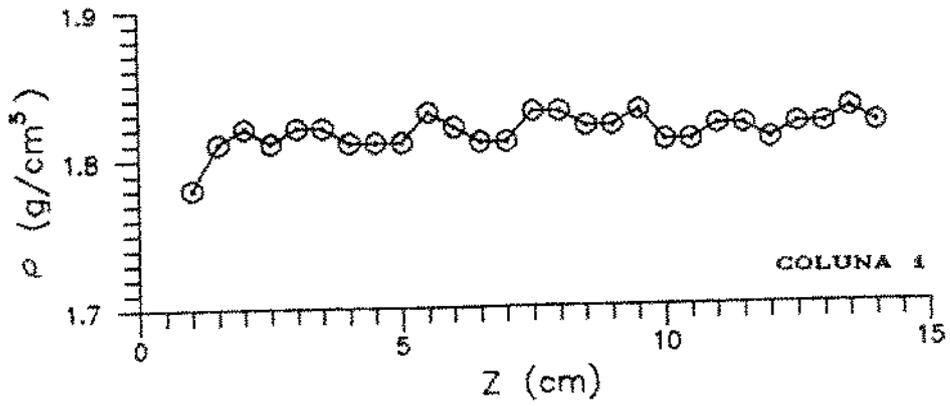


FIGURA 4.5. DISTRIBUIÇÕES DE DENSIDADES EM COLUNAS PREPARADAS PELO MPS

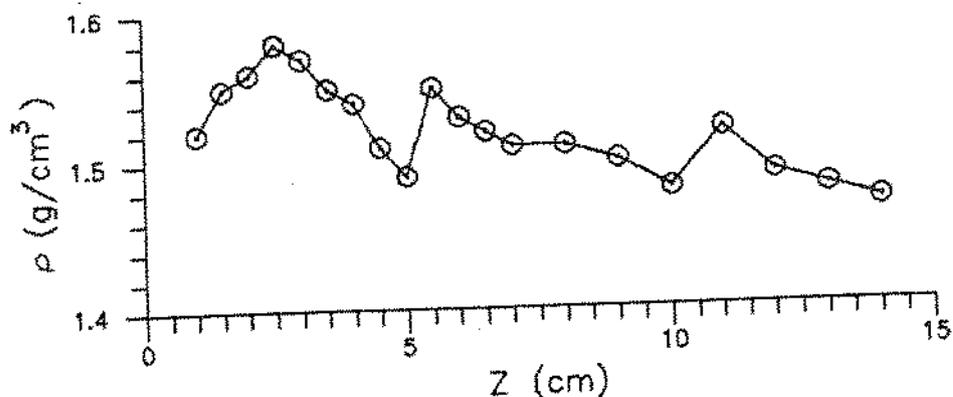


FIGURA 4.6. DISTRIBUIÇÃO DE DENSIDADES EM UMA COLUNA PREPARADA ALEATORIAMENTE

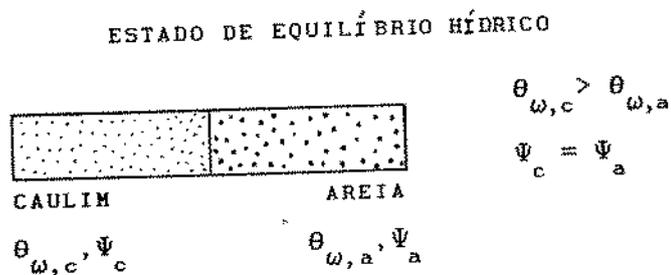
que não ocorreram modificações dos perfis, determinados pelo TDR- γ , num período de 24 horas. As outras duas curvas inferiores são relativas a tempos de secagem iguais a 24 e 48 horas, utilizando-se a Montagem Experimental 1.

Analisando-se as distribuições iniciais de umidade (curvas superiores da Figura 4.7) para as colunas 1 e 2, nota-se a presença de vários pontos de máximo e mínimo, que seriam, respectivamente, pontos de altas e baixas concentrações de caulim (lembrando que as distribuições de densidade são homogêneas, como mostrado na Figura 4.5). Sabe-se que o caulim (argilas em geral) possui uma capacidade de retenção de água significativamente superior à da areia (HILLEL, 1980).

A análise dessas distribuições de umidade ao longo das colunas se torna interessante, mostrando que, para meios não homogêneos, a diferença de umidade não pode ser usada como o gradiente de potencial para a transferência de massa. Neste caso, a diferença de potencial capilar (Ψ) é a

verdadeira força motriz da transferência. Caso contrário, não seria possível que colunas com gradientes de umidade tão grandes permanecessem em estado de equilíbrio. LUIKOV (1966) propõe o potencial capilar, Ψ , definido na Equação (2.12), como o gradiente de potencial efetivo para a transferência de massa em meios porosos. FORTES & OKOS (1981), trabalhando com meios porosos capilares, utilizam como gradiente de potencial um gradiente de umidade de equilíbrio, com base no fato de que a água, nestes meios, pode se mover em oposição ao gradiente de umidade.

A situação encontrada para a mistura de areia-caulim (Figura 4.7, curvas superiores), pode ser esquematizada, genericamente, do seguinte modo:



Analisando-se as curvas de secagem na Figura (4.7), nota-se que o formato das mesmas permaneceu praticamente inalterado, modificando-se apenas suas posições, que se deslocaram para regiões dos gráficos representativas de menores teores de umidade, em decorrência do processo de secagem. Os gradientes de umidade se mantêm altos ao longo das colunas, apesar da umidade média decrescer. Também pode-se perceber que as umidades no fundo das colunas são altas para os dois casos apresentados, possivelmente devido ao acúmulo de caulim, consequência da separação do mesmo durante o processo de preenchimento.

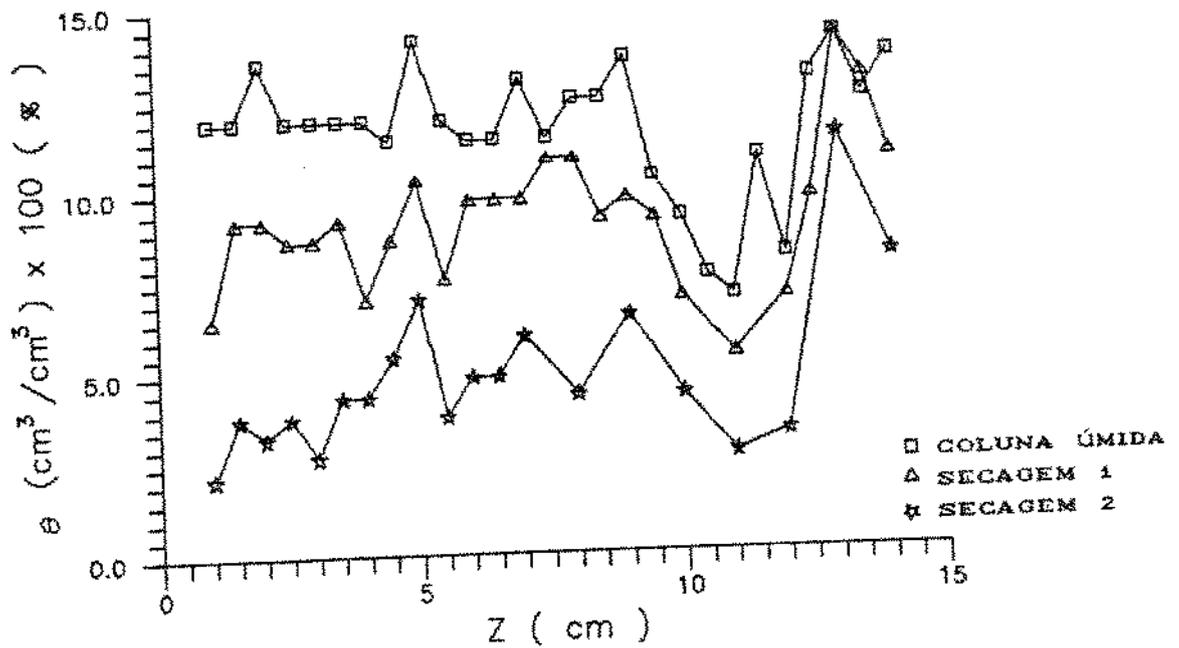
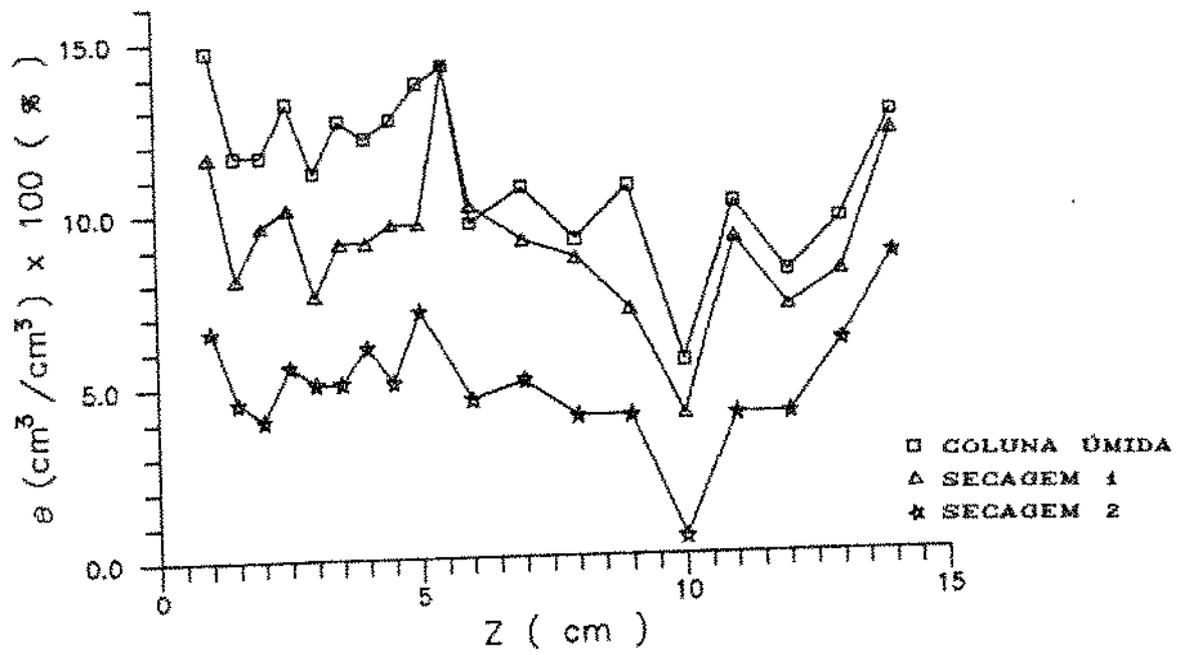


FIGURA 4.7. DISTRIBUIÇÃO DE UMIDADE EM ESTADO DE EQUILÍBRIO PARA AS COLUNAS PREPARADAS PELO MPS E POSTERIORMENTE UMIDIFICADAS (CURVA SUPERIOR). ACOMPANHAMENTO DO PROCESSO DE SECAGEM UTILIZANDO A MONTAGEM EXPERIMENTAL 1 (CURVAS INFERIORES)

Um resultado que despertou atenção, repetindo-se nos dois experimentos apresentados, foi a presença de uma região de baixo conteúdo de umidade, situada em torno da cota $z = 10-12$ cm. Uma possível explicação para esse efeito baseia-se na análise da dinâmica do ar presente inicialmente nos poros da matriz porosa, que é obrigado a se locomover, à medida em que a água da frente de umidificação vai percolando o meio. Parte deste ar consegue escapar para o meio ambiente, se movimentando em contra-corrente com a frente (muitas vezes, ocorreram rupturas nas colunas de meio poroso, com formação de bolhas intermitentes de ar próximo à superfície). O ar que não segue este caminho, desloca-se para o fundo da coluna e se acumula nessa região, impedindo que a umidificação ocorra normalmente. A realização de furos ao longo de uma das laterais das colunas contribuiu positivamente para a atenuação deste problema, o que reforça a hipótese levantada acima.

Uma análise teórica e experimental sobre a embebição de meios porosos por um fluido molhante, e o deslocamento do fluido não-molhante inicialmente presente na rede porosa, é apresentada por LENORMAND (1983). Este autor discute os mecanismos de deslocamento dos fluidos, assim como os processos de formação de "clusters" (porções de fluidos aprisionadas na rede porosa) de fluido não-molhante. Este é um problema de grande interesse para a Engenharia de Petróleo, no que diz respeito à extração de petróleo das rochas porosas, nas quais o mesmo se encontra naturalmente.

4.2.2. MÉTODO DE PREENCHIMENTO DE COLUNAS COM A AMOSTRA ÚMIDA (MPU)

4.2.2.1. ESTUDO DAS DISTRIBUIÇÕES INICIAIS DE DENSIDADE E UMIDADE

Este método permitiu a obtenção de colunas com distribuições de densidades bastante homogêneas, com coeficientes de variação em torno de 1,6%, como pode ser visto no item (4.2.3), que trata sobre tomografia computadorizada.

Com relação à homogeneidade da umidade, também obteve-se bons resultados, como é mostrado na Figura (4.8), onde os CV para as distribuições iniciais de umidade ao longo das colunas foram em torno de 1.0%. Neste caso, as umidades foram determinadas através do Método Gravimétrico, pelo seccionamento das colunas em fatias, conforme explicado no Capítulo (3).

A porosidade obtida para as colunas foi estimada através da determinação da densidade da mistura de areia e caulim ($\rho_0 = 2,56\text{g/cm}^3$) e das densidades aparentes das colunas de meio poroso, encontrando-se um valor igual a 0,35.

4.2.2.2. ACOMPANHAMENTO DA SECAGEM DAS COLUNAS PELO TDR- γ

Realizou-se experimentos de secagem em colunas preparadas através do MPU, utilizando-se a Montagem Experimental 1 e o TDR- γ . A realização de varreduras nas colunas nos seus estados iniciais mostrou valores de μ homogêneos ao longo das mesmas, o que é representativo de distribuições de densidade homogêneas, pois, com relação à umidade, sabe-se que o MPU

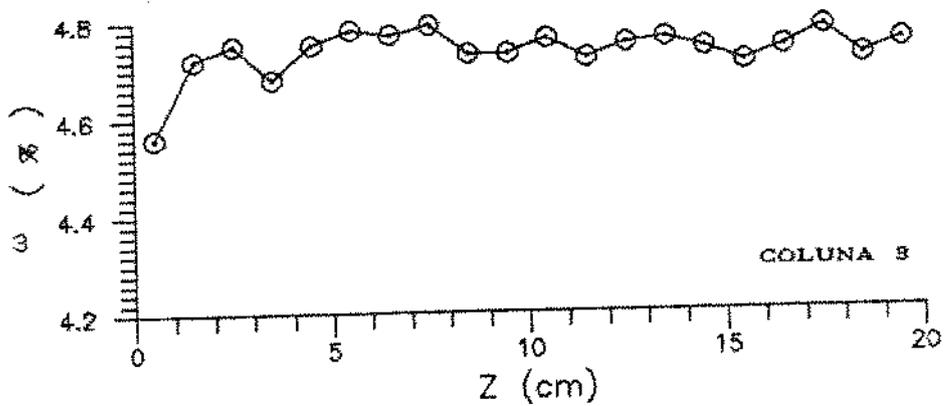
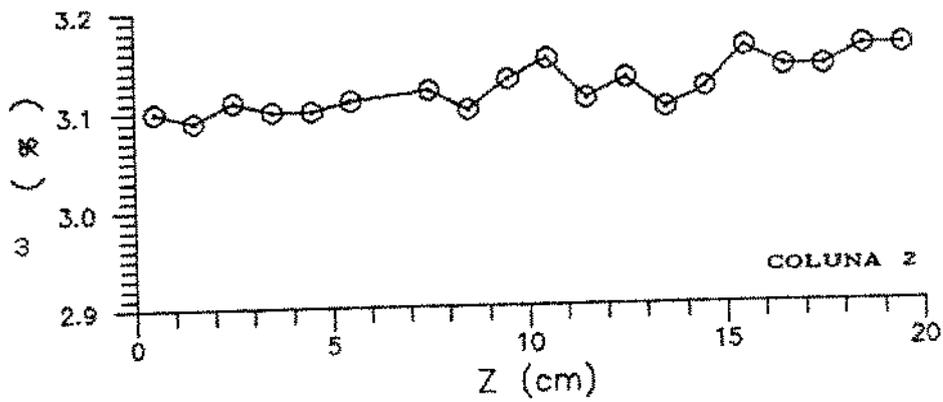
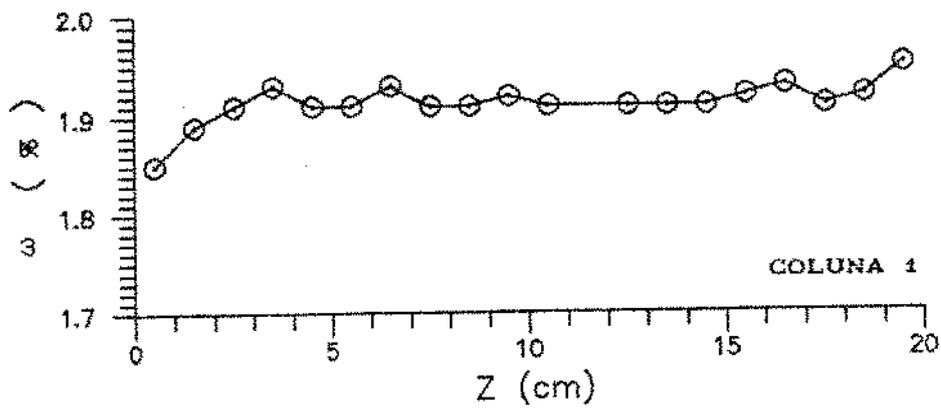


FIGURA 4.8. DISTRIBUIÇÕES INICIAIS DE UMIDADE EM COLUNAS PREPARADAS PELO MPU

proporciona colunas bastante homogêneas, como apresentado no item (4.2.3). As tensões criadas durante o processo de secagem provocou modificações da estrutura porosa, comprovado pelo aumento dos valores de μ próximos da superfície da coluna exposta ao ar de secagem. Isso é indicativo de um aumento da densidade nesses pontos, pois ocorreu, simultaneamente, uma diminuição da umidade, que tenderia a diminuir a fração de radiação atenuada. Paralelamente, observou-se a presença de pontos de máximo e mínimo, de ocorrência periódica, que podem indicar uma reacomodação do meio, problema frequentemente encontrado quando trabalha-se com materiais expansivos. Esses problemas podem ser resolvidos através do acompanhamento simultâneo da densidade e umidade em cada secção, utilizando-se o TDR- γ com duas energias (COREY *et alii*, 1971 e ZUCCHI & NASCIMENTO, 1982).

4.2.3. ESTUDO DAS COLUNAS ATRAVÉS DA TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA (TAC)

As tomografias foram realizadas nas secções médias das colunas, nos sentidos longitudinais das mesmas. Os resultados são obtidos em Unidades do Minitomógrafo, que possuem uma relação de dependência linear com o coeficiente de atenuação linear, μ , representada pela Equação (3.4).

Fez-se uma série de tomografias com colunas preparadas a partir de amostras secas, e resultados representativos dessas análises são mostrados nas Figuras (4.9) e (4.10), onde são apresentadas as distribuições de densidades ao longo das colunas (a variação da Unidade de Imagem, PIXEL, de 0 a 80, indica a variação da posição na coluna, de uma extremidade à outra). A Figura (4.9) mostra uma coluna (10 cm de comprimento por 3,8 cm de

largura) preparada aleatoriamente, colocando-se grandes porções de amostra na mesma e forçando-se uma compactação através de batidas leves nas laterais da coluna. Deste modo, obteve-se uma coluna que apresentou CV = 2,0%, com relação a distribuição de densidades. A densidade média foi menor neste caso ($\rho = 1,59 \text{ g/cm}^3$), se comparada com os métodos de preenchimento de colunas MPS e MPU. A Figura (4.10) mostra a distribuição de densidades em uma coluna (5 cm de comprimento por 3,8 cm de largura) preparada pelo MPS, resultando numa coluna com CV = 1,59%. As regiões da curva relativa a valores do pixel acima de 56 e abaixo de 10 são relativas à parafina, utilizada para fixar a amostra na coluna de "pexiglass" e à base da coluna, respectivamente.

Para se estudar a isotropia das colunas preparadas através do MPU, fez-se uma série de tomografias. Resultados representativos desses experimentos são apresentados nas Figuras (4.11) e (4.12). As colunas foram preparadas com a amostra umidificada até 8,11% de umidade (base seca), realizando-se os experimentos com colunas de 3,80 cm de aresta por 10,0 cm de comprimento. A densidade aparente média das colunas, determinadas gravimetricamente, foi de $1,70 \text{ g/cm}^3$.

Para se calcular as densidades aparentes secas nas diferentes secções das colunas, descontou-se dos coeficientes de atenuação lineares encontrados, a parcela correspondente à contribuição da umidade de 0,0811 g de água / g de matéria seca.

As condições de realização das tomografias foram as seguintes:

Passo linear	2 mm
Passo angular	3°
Passo total	110 mm
Rotação completa	180°
Tempo de espera	20 segundos

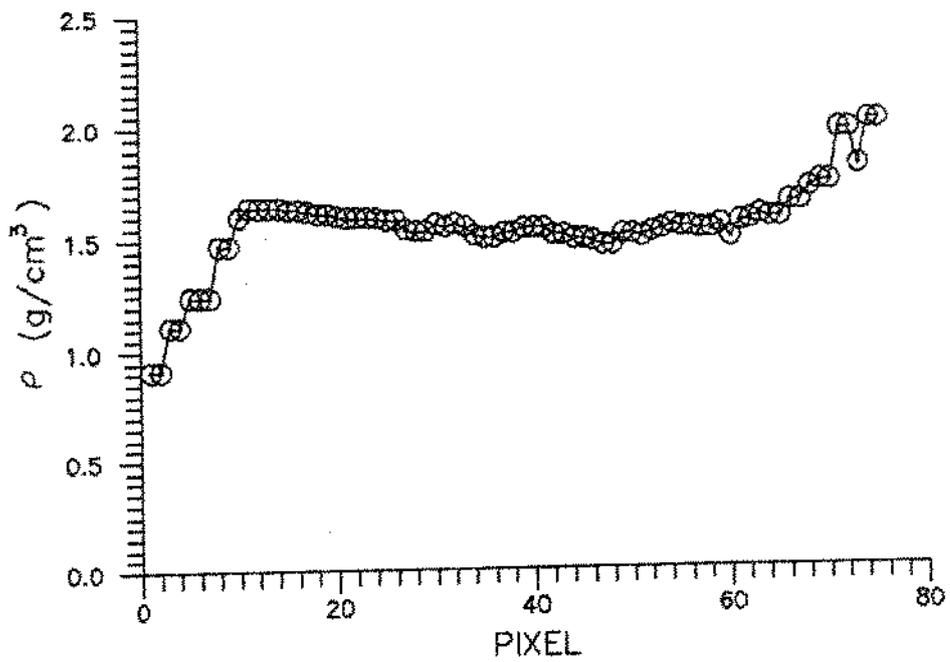


FIGURA 4.9. DISTRIBUIÇÃO DE DENSIDADES DETERMINADA ATRAVÉS DA TR PARA A COLUNA PREPARADA ALEATORIAMENTE

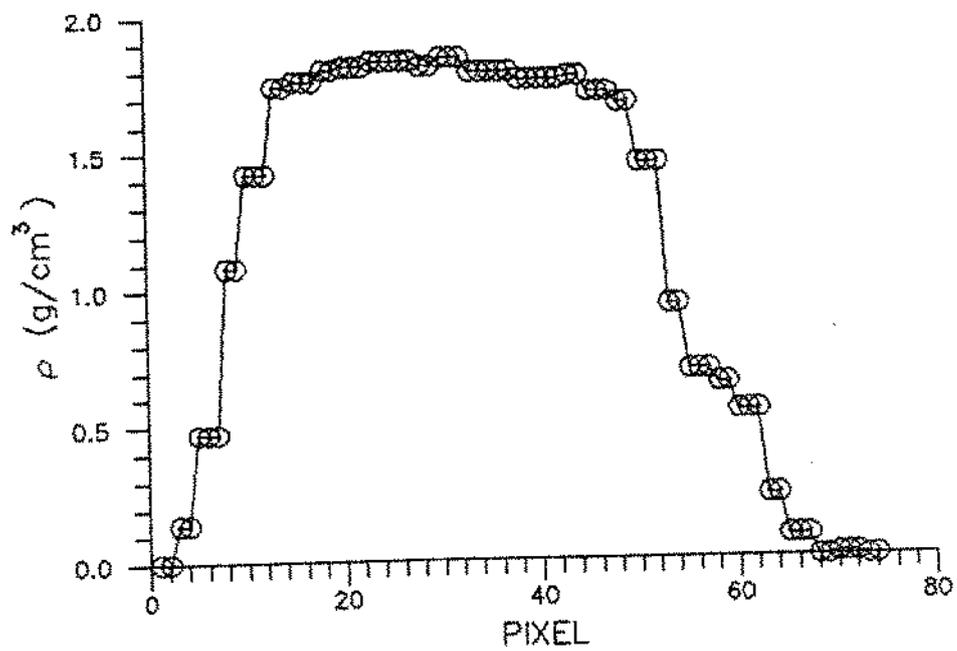


FIGURA 4.10. DISTRIBUIÇÃO DE DENSIDADES DETERMINADA ATRAVÉS DA TR PARA A COLUNA PREPARADA PELO MPS

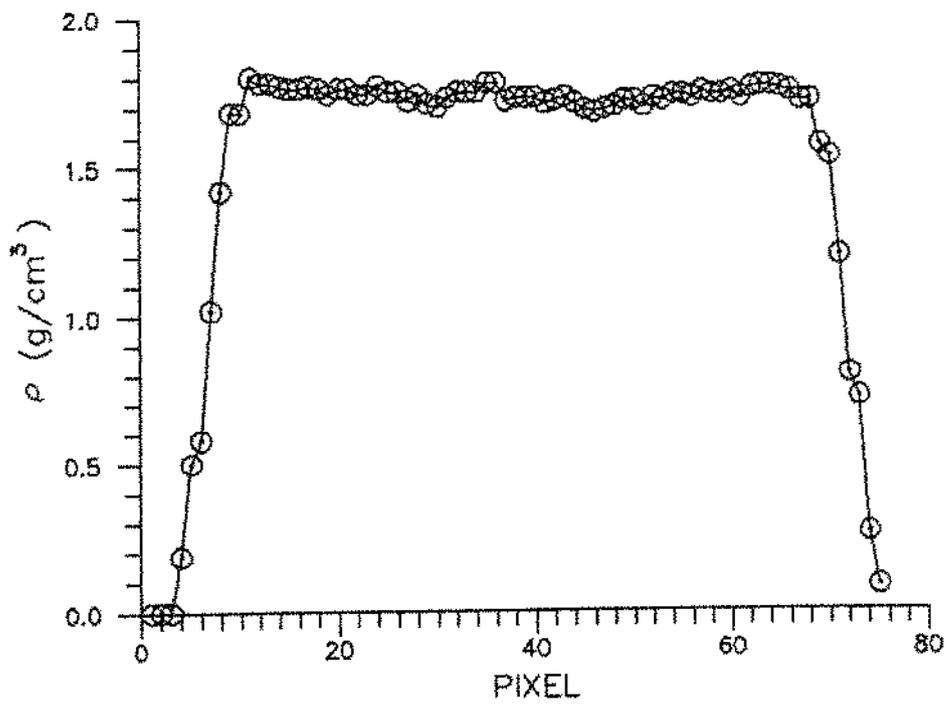


FIGURA 4.11. DISTRIBUIÇÃO DAS DENSIDADES MÉDIAS ENCONTRADAS PARA O PLANO DE CORTE TOMOGRÁFICO (SECÇÃO LONGITUDINAL MÉDIA) DE UMA COLUNA PREPARADA PELO MPFU

Pela análise da Figura (4.11), pode-se notar que a distribuição de densidades na coluna foi bastante homogênea (CV = 1,49%), com um valor médio de $\rho = 1,74 \text{ g/cm}^3$, bem próximo daquele determinado gravimetricamente, através de pesagem e medições das dimensões da coluna.

A Figura (4.12) mostra o resultado da distribuição de densidades em uma coluna preparada de modo idêntico à anterior. No entanto, para esta, realizou-se dois cortes tomográficos, mostrando suas secções médias longitudinais, conforme ilustrado na Figura (4.13). A Figura (4.12) sugere, dentro de certos limites, uma isotropicidade da coluna (CV = 1,64%), diante da dificuldade natural de se preparar colunas homogêneas e isotrópicas a partir de sólidos granulados. Paralelamente, nas Figuras (4.14) e (4.15) apresenta-se as imagens destas tomografias, reconstruídas através de um método matemático de reconstrução de imagem, pertencente ao "software" do minitomógrafo. Estas imagens não permitem, por si só, avaliar quantitativamente as densidades nas diferentes posições da coluna, mas dão uma idéia da homogeneidade da mesma, através da densidade de pontos que apresentam nas diferentes regiões.

Na Figura (4.16), que mostra a imagem de um plano de corte tomográfico de uma coluna contendo grãos de soja, percebe-se as diferenças nas densidades de pontos entre as regiões em que os grãos estão presentes e as regiões vazias do leito. Analisando-se as Figuras (4.14) e (4.15), vemos que a densidade de pontos é praticamente a mesma em todas as regiões das imagens, com excessão dos contornos das mesmas, que representam as paredes das colunas de "pexiglas", material que possui um baixo coeficiente de atenuação de massa. Os pontos espalhados aleatoriamente ao redor, são artefatos gerados pela reconstrução da imagem, não possuindo significado físico real com relação ao problema discutido.

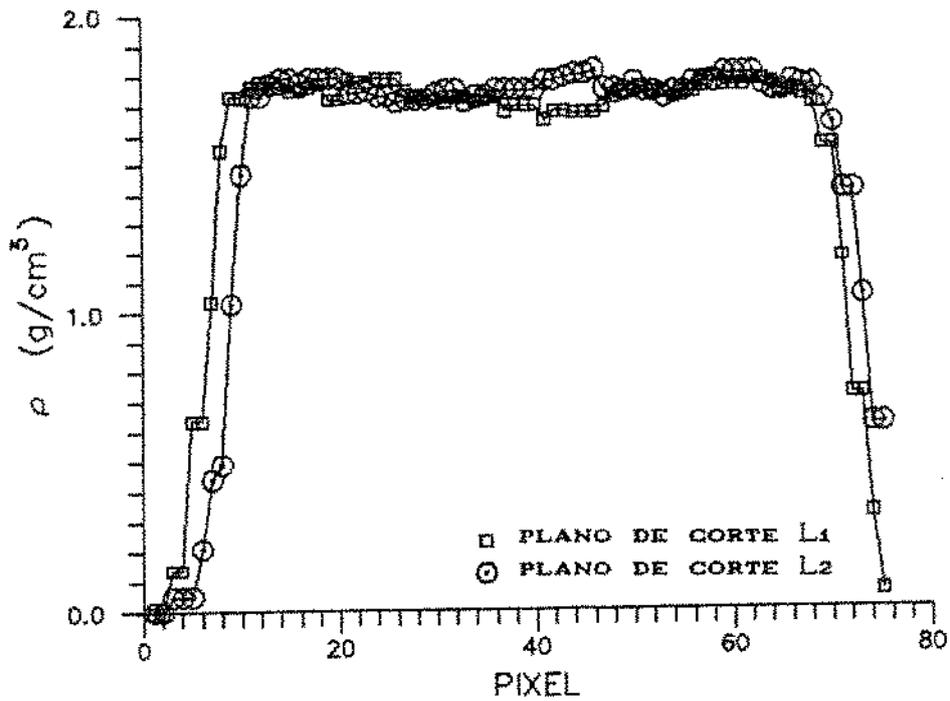


FIGURA 4.12. DISTRIBUIÇÃO DAS DENSIDADES MÉDIAS ENCONTRADAS PARA OS PLANOS DE CORTE TOMOGRÁFICOS (SECÇÕES LONGITUDINAIS MÉDIAS, FIGURA 4.13) DE UMA COLUNA PREPARADA PELO MPU

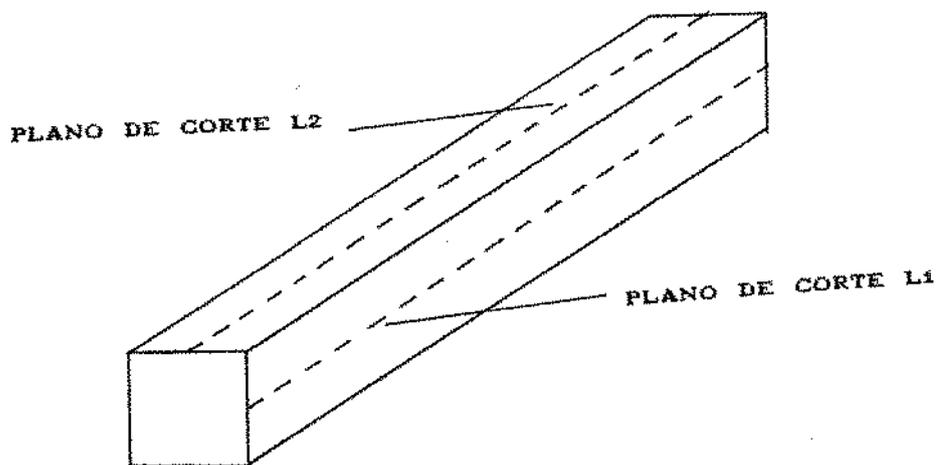


FIGURA 4.13. ILUSTRAÇÃO DOS PLANOS DE CORTE TOMOGRÁFICOS

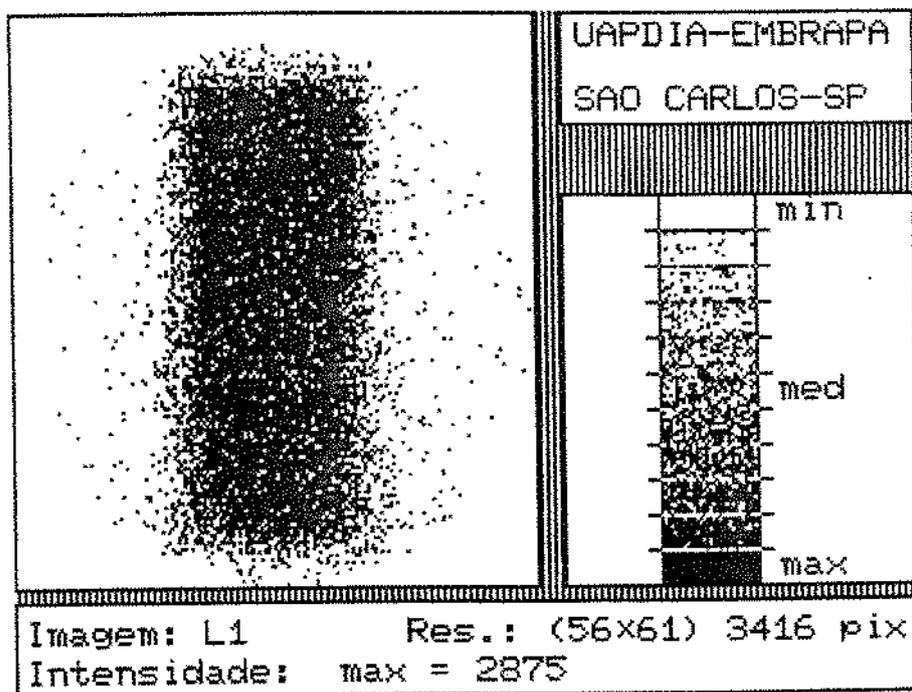


FIGURA 4.14. IMAGEM DO PLANO DE CORTE L_1

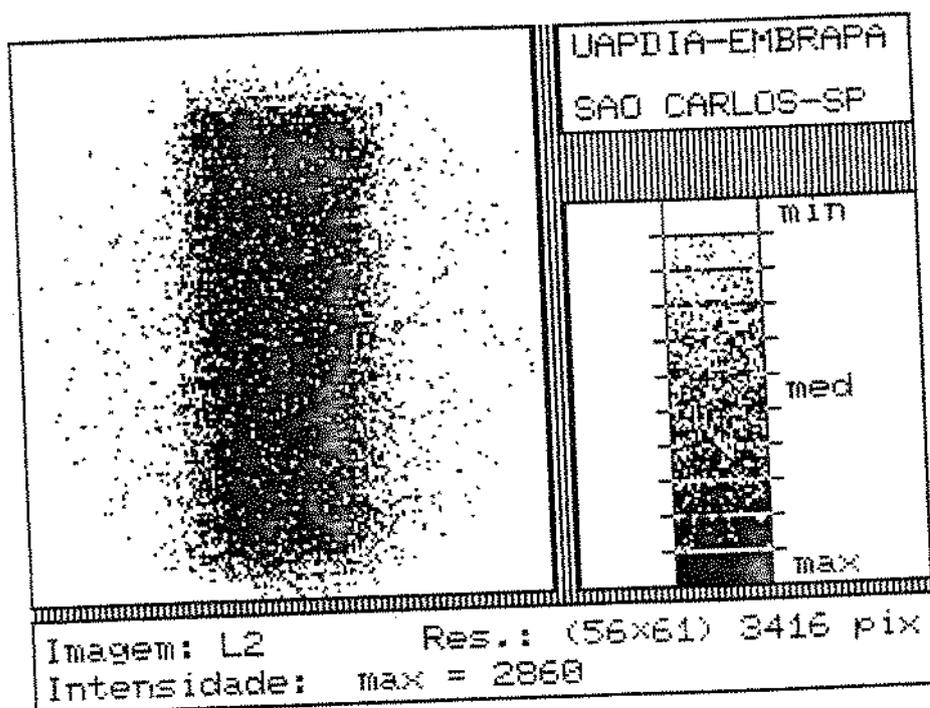


FIGURA 4.15. IMAGEM DO PLANO DE CORTE L_2

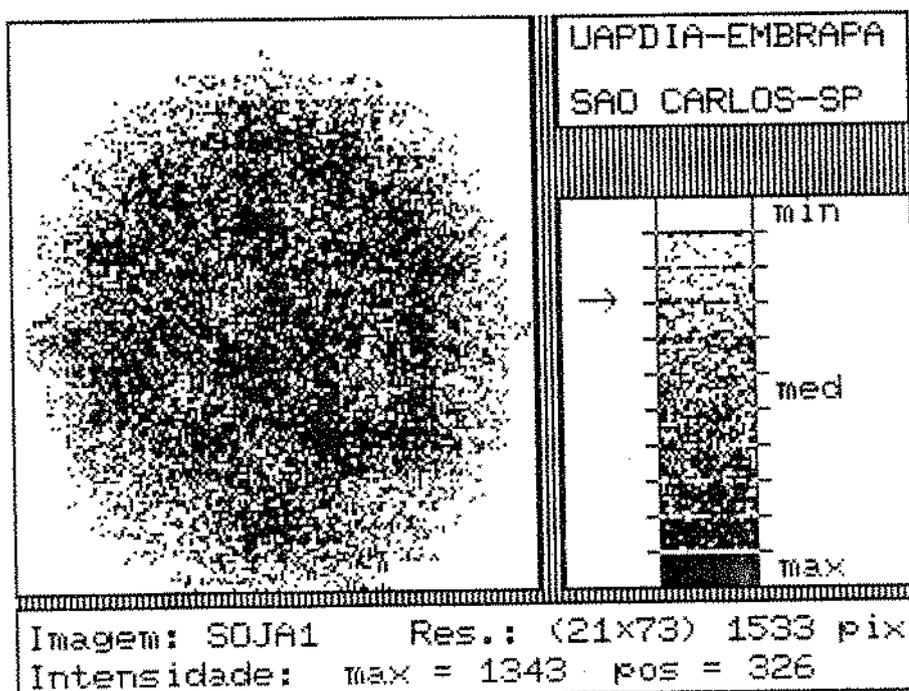


FIGURA 4.16. IMAGEM DO PLANO DE CORTE DE UMA COLUNA
CONTENDO GRÃOS DE SOJA

4.3. PERFIS TRANSIENTES DE UMIDADE. COMPORTAMENTO DO COEFICIENTE DE DIFUSÃO COM A UMIDADE E A TEMPERATURA

4.3.1. MONTAGEM EXPERIMENTAL 1

Com esta montagem experimental, obteve-se uma série de perfis transientes de umidade, a partir dos quais determinou-se o comportamento do coeficiente de difusão com a concentração. Os resultados obtidos foram pouco reprodutíveis, dificultando a realização de uma análise conclusiva. Essa baixa reprodutibilidade se deve, possivelmente, à formação de perfis de concentração de umidade no ar presente no espaço vazio do erlenmayer. No entanto, forneceu informações importantes para o projeto da Montagem Experimental 2, que reduziu significativamente o tempo experimental. Isso foi possível através de um aumento do Coeficiente Global de Transferência de Massa entre o ar de secagem e as superfícies das colunas, obtido através da instalação do micro-ventilador para promover a convecção.

4.3.2. MONTAGEM EXPERIMENTAL 2.

4.3.2.1. PERFIS TRANSIENTES DE UMIDADE

Os perfis transientes de umidade encontrados para as colunas submetidas ao processo de secagem, utilizando-se a Montagem Experimental 2, são apresentados nas Figuras (4.17) a (4.26).

Os experimentos foram realizados a partir de diferentes teores iniciais de umidade e diferentes temperaturas (30, 40, 60, 80^oC). Os perfis

são de fácil identificação, com uma dispersão que, visualmente, pode ser considerada pequena. Exceção ocorre nos experimentos realizados a partir de $\omega_0 = 8\%$ [Figuras (4.22) e (4.23)], onde o próprio método de preeenchimento das colunas prejudicou a distribuição de umidade inicial. Baseado nestes perfis, pode-se determinar os coeficientes de difusão correspondentes às diferentes umidades e temperaturas. É possível perceber uma tendência no comportamento de D com relação a ω , pela observação dos perfis de concentração nas colunas, pois os maiores gradientes de concentração aparecem nas colunas que possuem os menores teores de umidade, o que seria uma consequência de menores coeficientes de difusão, conforme pode ser observado na Equação (3.3). Os cálculos desses coeficientes, segundo o método proposto no Capítulo 3, confirmam essa tendência. No entanto, mostram um comportamento mais complexo, que necessita de uma análise detalhada, baseada nos possíveis mecanismos de transferência de umidade em meios porosos.

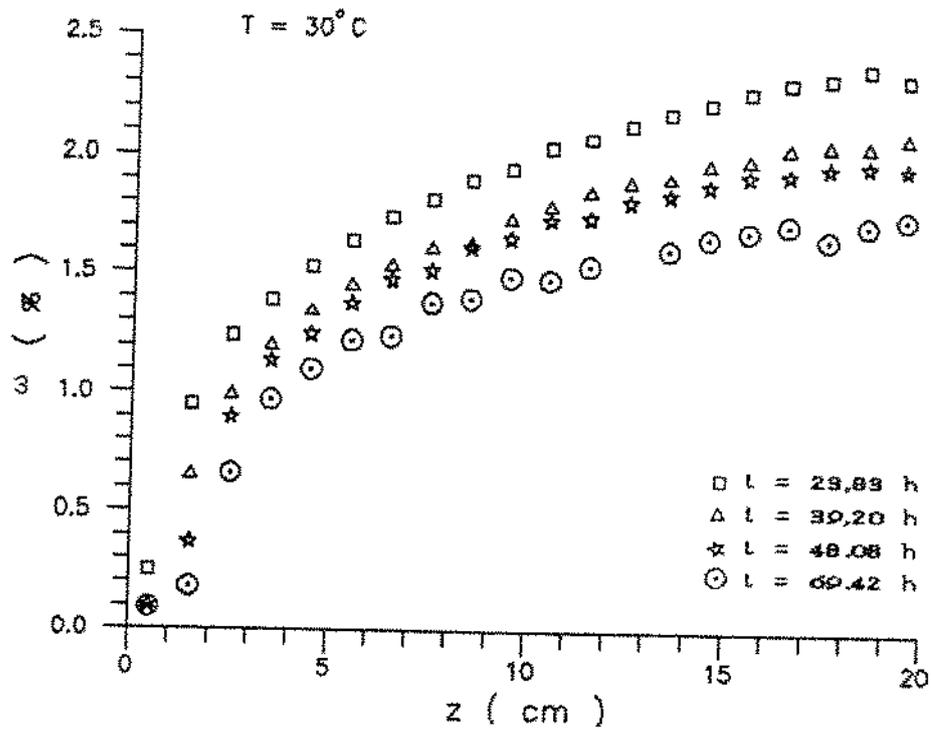


FIGURA 4.17. PERFÍS TRANSIENTES DE UMIDADE DURANTE O PROCESSO DE SECAGEM, A 30°C ($\omega_0 = 2,53\%$)

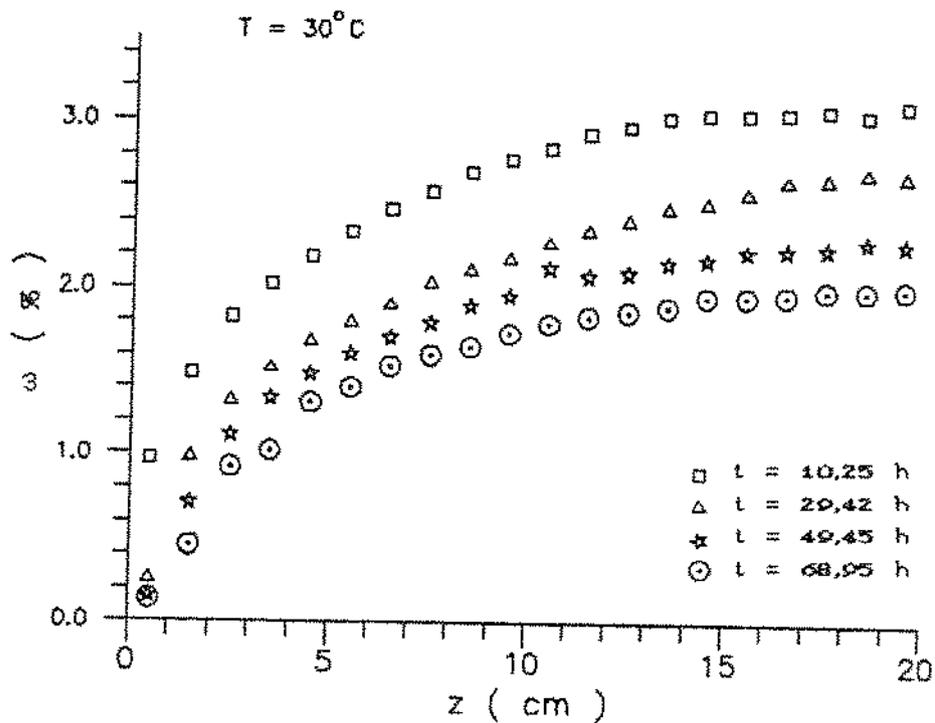


FIGURA 4.18. PERFÍS TRANSIENTES DE UMIDADE DURANTE O PROCESSO DE SECAGEM, A 30°C ($\omega_0 = 3,15\%$)

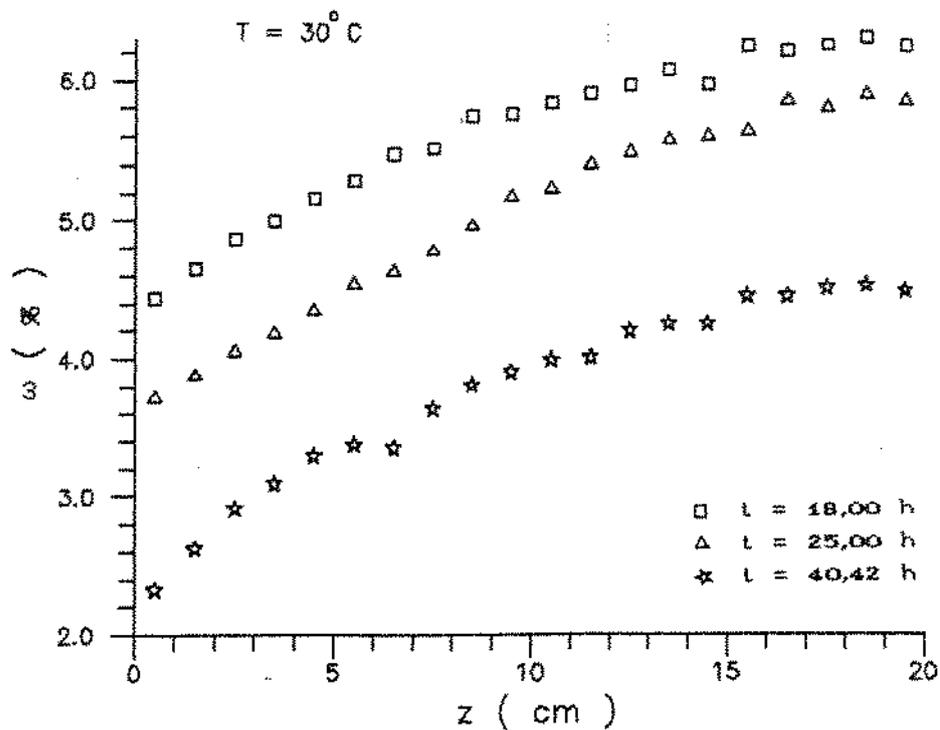


FIGURA 4.19. PERFÍS TRANSIENTES DE UMIDADE DURANTE O PROCESSO DE SECAGEM, A $30^{\circ}C$ ($\omega_0 = 5,30\%$)

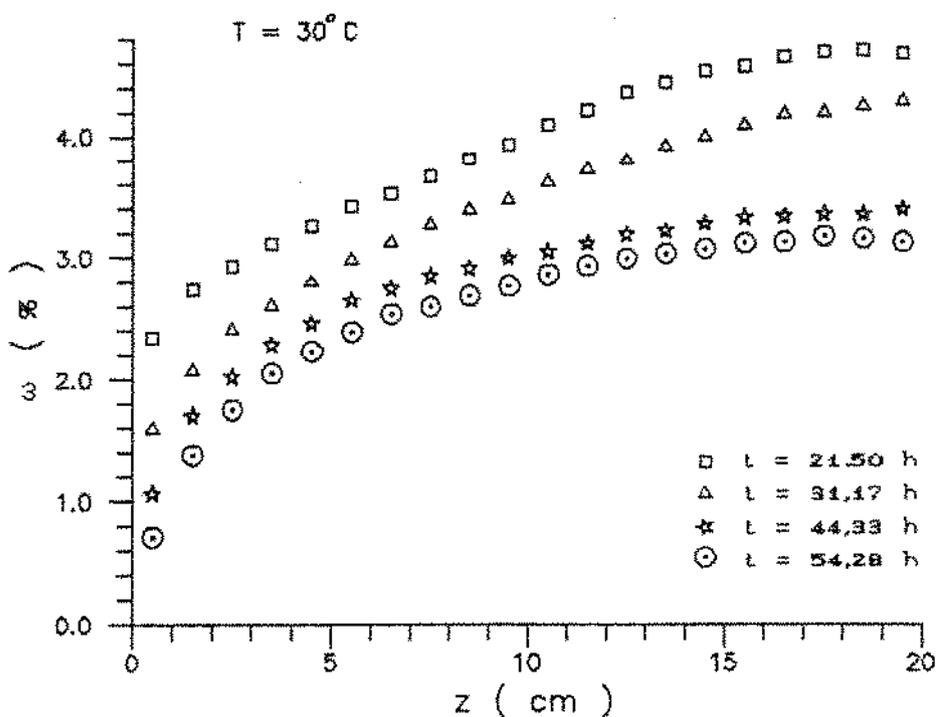


FIGURA 4.20. PERFÍS TRANSIENTES DE UMIDADE DURANTE O PROCESSO DE SECAGEM, A $30^{\circ}C$ ($\omega_0 = 6,84\%$)

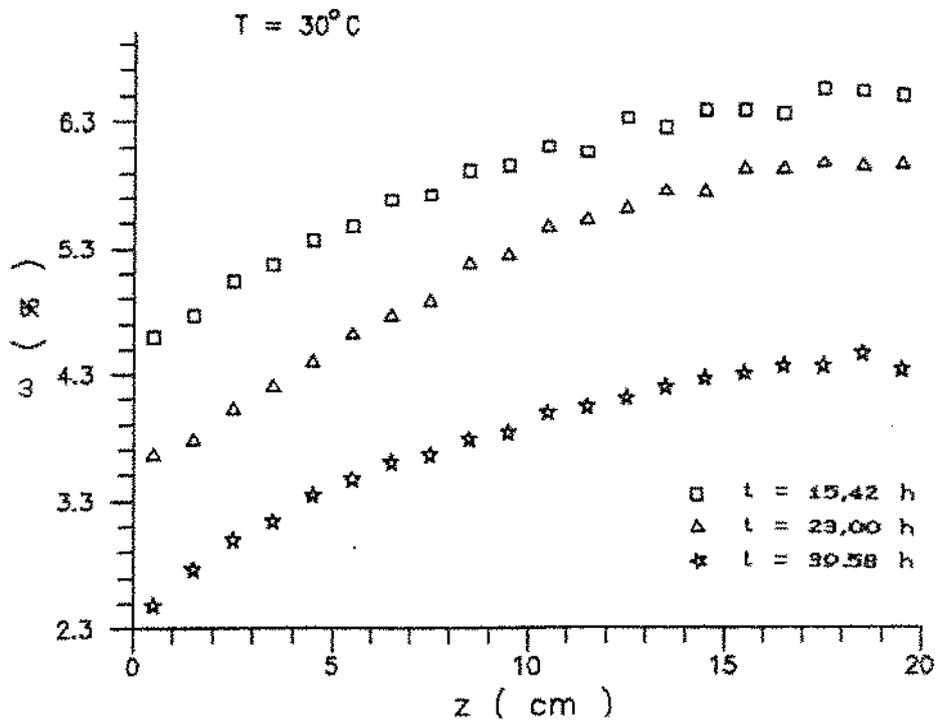


FIGURA 4.21. PERFÍS TRANSIENTES DE UMIDADE DURANTE O PROCESSO DE SECAGEM, A 30°C ($\omega_0 = 6,95\%$)

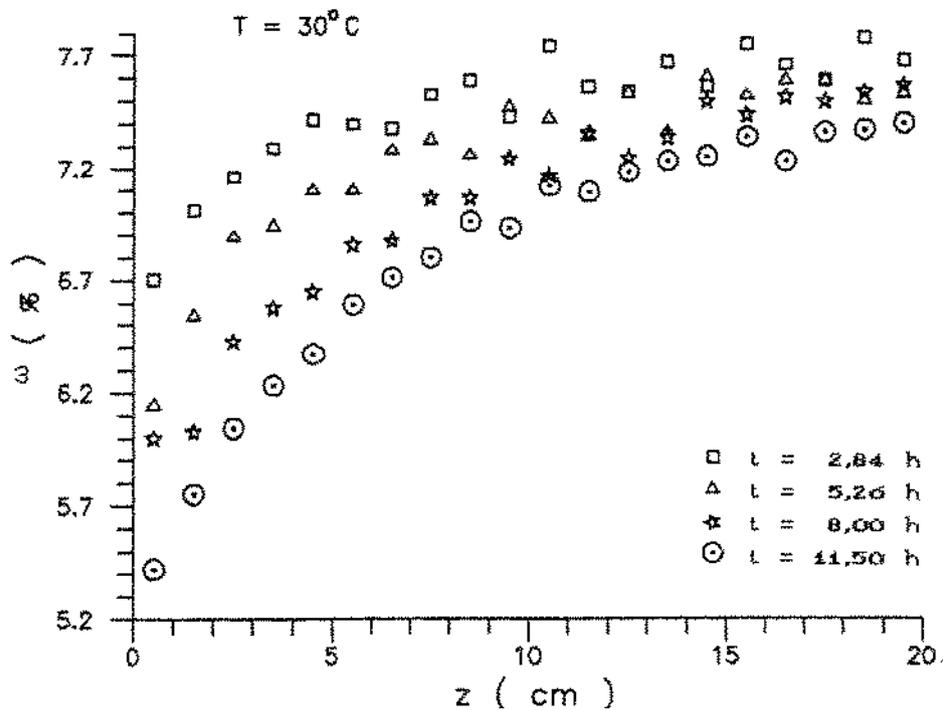


FIGURA 4.22. PERFÍS TRANSIENTES DE UMIDADE DURANTE O PROCESSO DE SECAGEM, A 30°C ($\omega_0 = 7,68\%$)

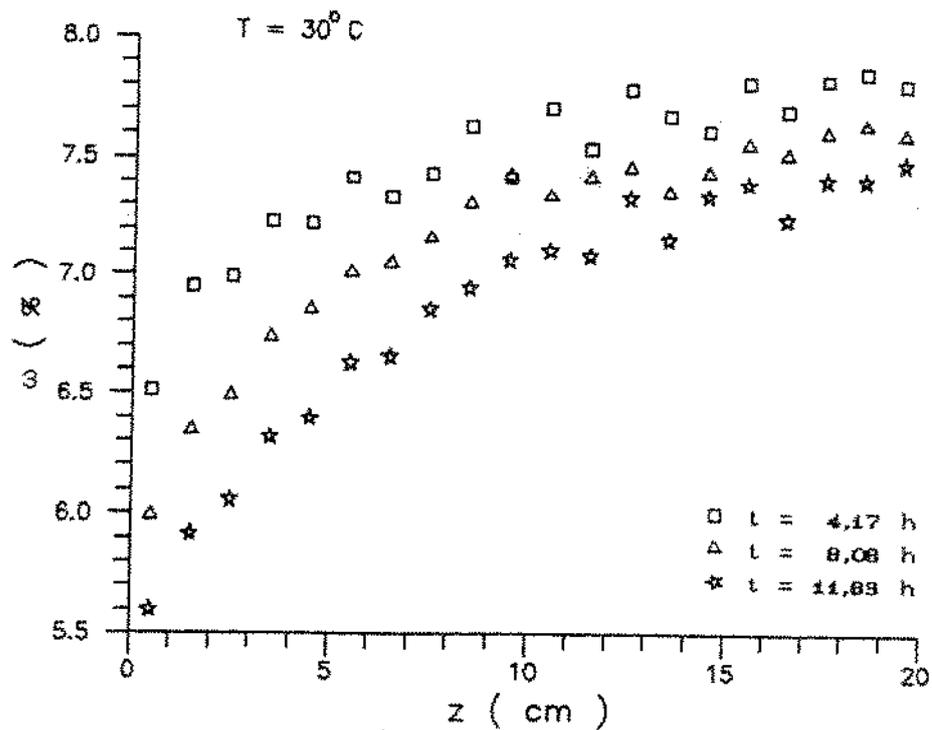


FIGURA 4.23. PERFÍS TRANSIENTES DE UMIDADE DURANTE O PROCESSO DE SECAGEM, A 30°C ($\omega_0 = 7,84\%$)

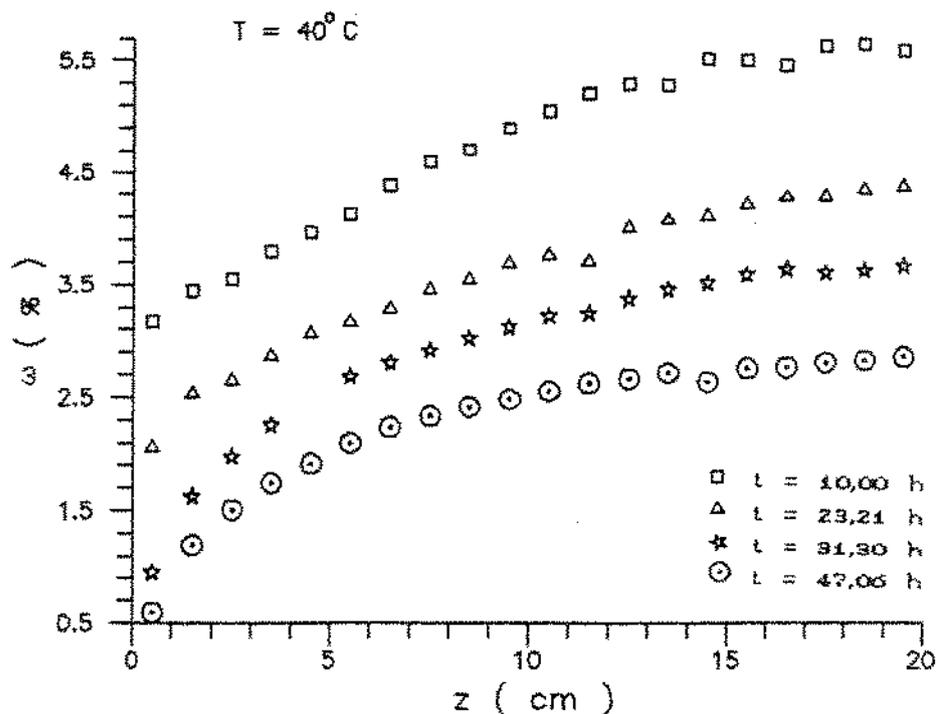


FIGURA 4.24. PERFÍS TRANSIENTES DE UMIDADE DURANTE O PROCESSO DE SECAGEM, A 40°C ($\omega_0 = 6,00\%$)

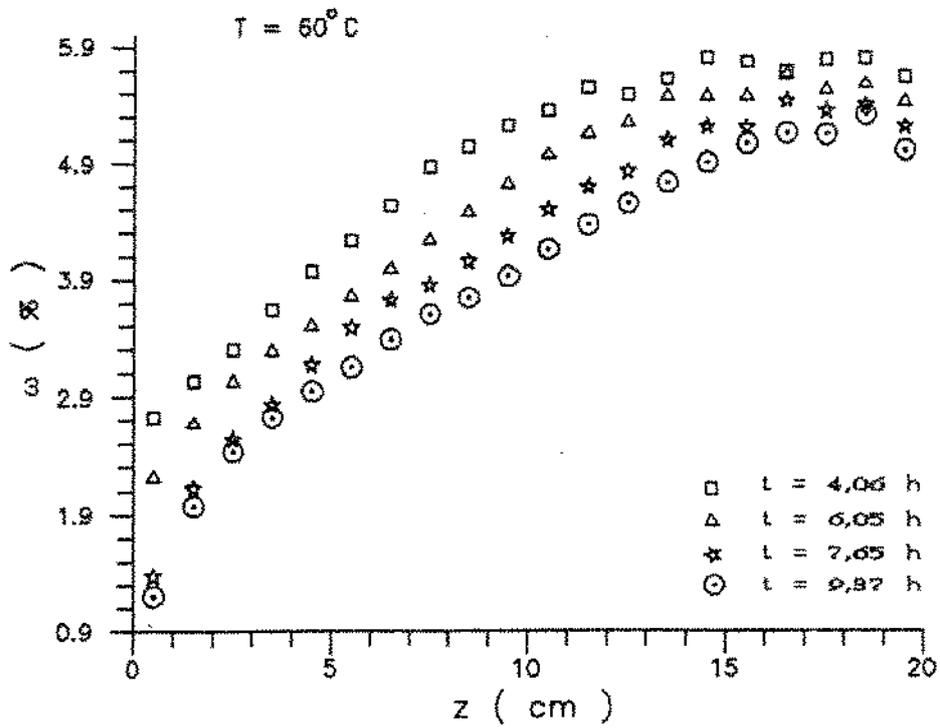


FIGURA 4.25. PERFIS TRANSIENTES DE UMIDADE DURANTE O PROCESSO DE SECAGEM, A 60°C ($\omega_0 = 6,02\%$)

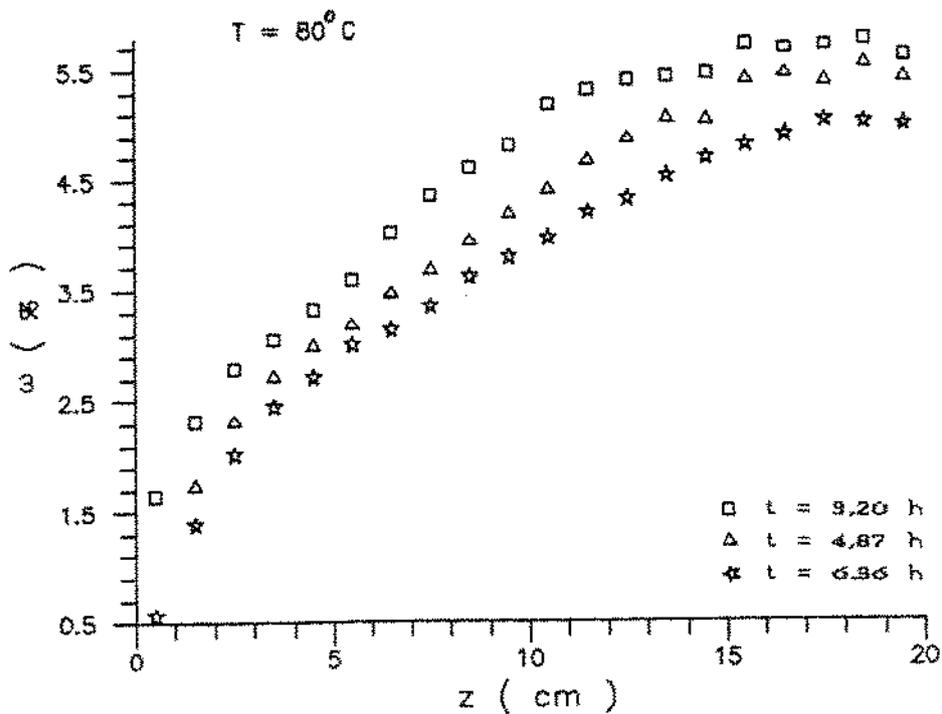


FIGURA 4.26. PERFIS TRANSIENTES DE UMIDADE DURANTE O PROCESSO DE SECAGEM, A 80°C ($\omega_0 = 6,01\%$)

4.3.2.2. COMPORTAMENTO DO COEFICIENTE DE DIFUSÃO COM A UMIDADE E A TEMPERATURA

Os comportamentos do coeficiente de difusão com a umidade e com a temperatura são apresentados nas Figuras (4.27) e (4.28), respectivamente.

A Figura (4.27) representa a variação do coeficiente de difusão com o conteúdo de umidade do meio a 30^oC. Os valores dos coeficientes cobrem uma faixa que corresponde a concentrações entre 0,3 e 7,5%. Como se pode observar, o coeficiente isotérmico de difusão varia exponencialmente quando ω varia entre 0,3 e 3,9%. Para teores de umidade entre 3,9 e 5,0%, D varia pouco, apresentando um máximo para concentrações entre 4,2 e 4,6%. Em seguida, há uma queda brusca no valor do coeficiente, resultando num mínimo quando a concentração está em torno de 5,6%. A partir desta concentração, D volta a crescer exponencialmente.

O comportamento encontrado para esse coeficiente apresenta pontos comuns com importantes trabalhos citados na literatura. Trabalhando, respectivamente, com areia e com argila, KEEY (1972), adaptando dados de De VRIES (1957) e PHILIP (1955), citado por PHILIP (1975), apresentam dados experimentais para o comportamento de D em função da umidade que, qualitativamente, são muito semelhantes ao encontrado para a mistura areia-caulim.

A existência de pontos de máximo e de mínimo também foi encontrada por JURY & MILLER (1971) e VAN DER KOI (1971), trabalhando com colunas de areia e com blocos de concreto celular, respectivamente. Por outro lado, esse comportamento não pode ser considerado comum a todos os meios porosos, pois está intimamente ligado à função de distribuição dos poros com relação ao diâmetro, conforme postulado por LUIKOV (1966).

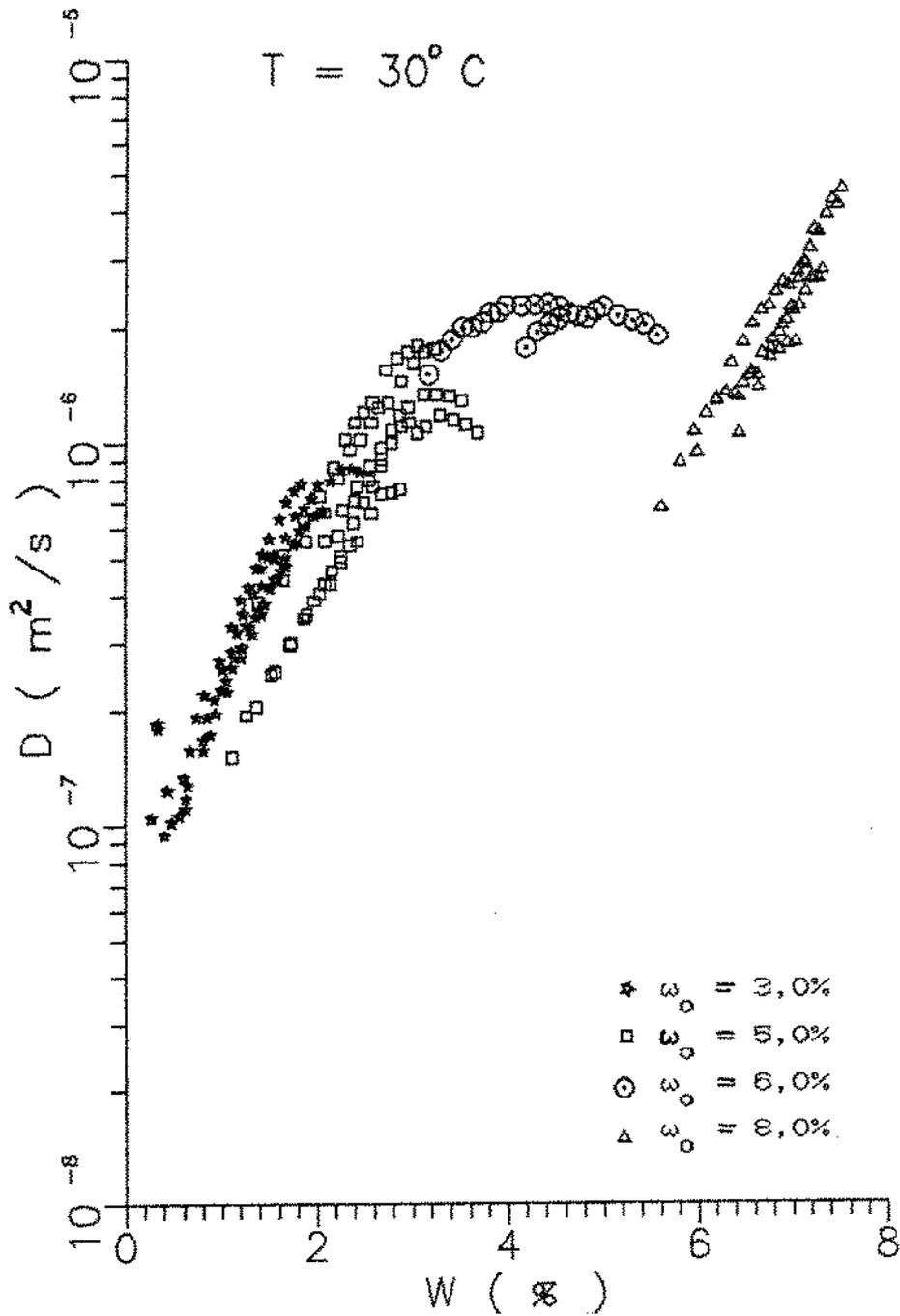


FIGURA 4.27. COMPORTAMENTO DO COEFICIENTE DE DIFUSÃO COM A UMIDADE ($30^{\circ} C$)

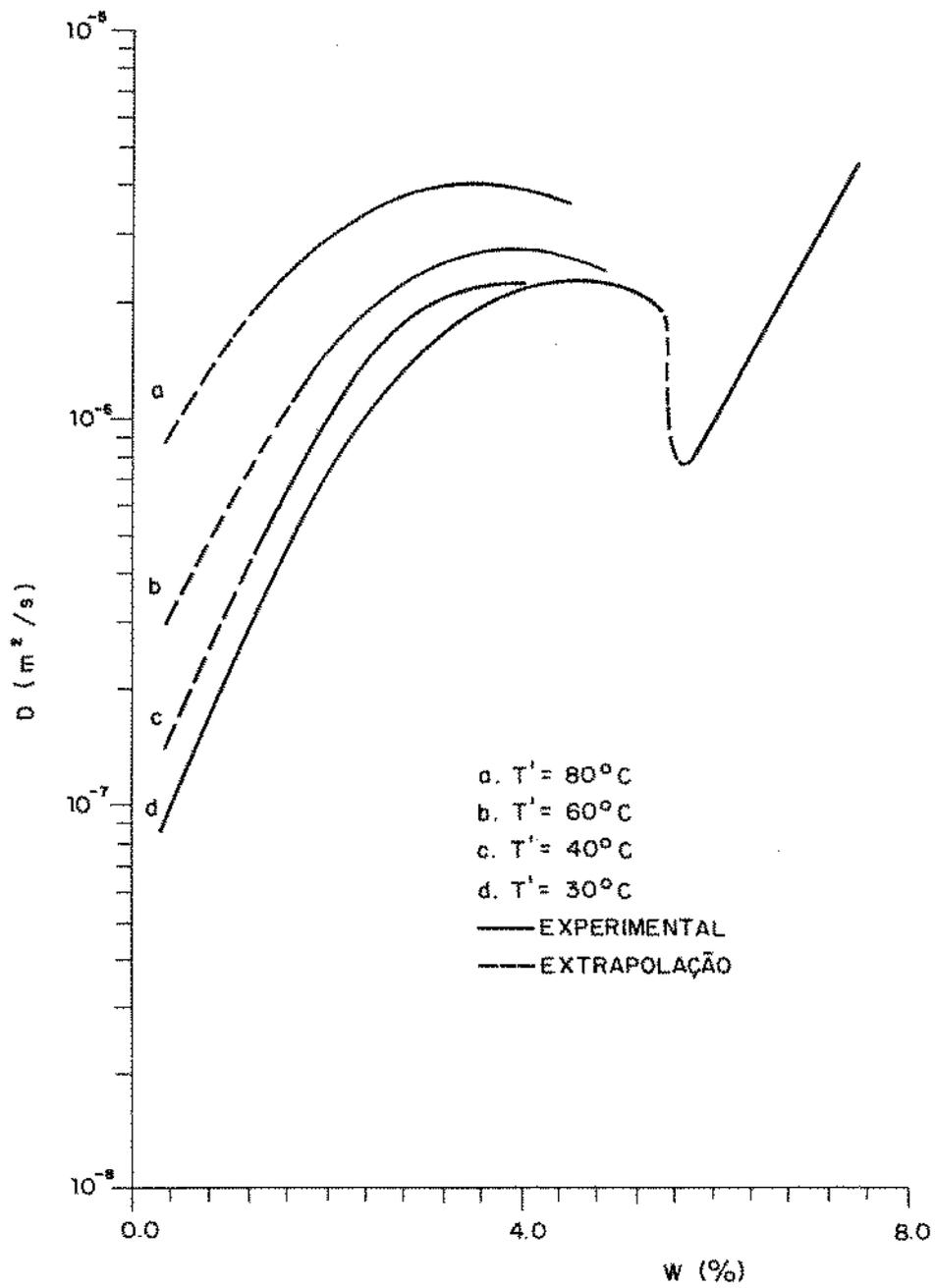


FIGURA 4.28. COMPORTAMENTO DO COEFICIENTE DE DIFUSÃO COM A TEMPERATURA E COM A UMIDADE

CRAUSSE (1983), trabalhando com colunas de meio poroso submetidas a condições de secagem, não encontrou pontos de máximo e mínimo para D em função da umidade (ω), mas um patamar, numa situação de transição para o fluxo de umidade governado pelas forças capilares, representado pelo primeiro termo da Equação (2.13).

A Equação (2.37a) do modelo fenomenológico mostra que haverá um fluxo de massa sempre que houver gradientes de concentração e/ou temperatura no meio. No presente caso, o experimento é macroscopicamente isotérmico, e o fluxo de umidade deveria ocorrer exclusivamente devido aos gradientes de concentração. No entanto, estes gradientes induzem um fluxo de calor devido ao transporte de calor latente pelo vapor d'água, representado pela segunda parcela do lado direito da Equação (2.37b). Deste modo, a rigor, o experimento não é intrinsecamente isotérmico pois, no processo de evaporação, o próprio meio fornece a energia necessária para a mudança de fase, o que provoca depressões na temperatura do mesmo com o avanço da frente de secagem.

CEAGLSKE & HOUGEN (1937), citados por WIEGAND & TAYLOR, 1961, mediram abaixamentos de temperatura da ordem de 29°C em pequenas amostras de areia, secadas com ar a 65°C . WIEGAND & TAYLOR, 1961 também apresentam dados de literatura para experimentos realizados com placas de areia de 3 cm de espessura, com o ar de secagem a 35°C , onde as depressões de temperatura encontradas foram da ordem de 16°C .

Os gradientes de temperatura surgem principalmente devido ao elevado calor latente de vaporização da água, associado ao baixo calor específico do meio poroso. Quando o ar de secagem está na mesma temperatura do meio, mas a uma menor umidade relativa que o ar presente na superfície do meio poroso, ocorre um resfriamento rápido desta superfície, que tende ao equilíbrio,

através de uma mudança na temperatura, acompanhada por uma pequena perda de umidade. Neste caso, pode-se dizer, com relação à superfície do meio poroso, que o processo de resfriamento é isoentálpico, ou seja, o próprio meio se resfria para fornecer o calor necessário para a evaporação da água.

Os experimentos de WIEGAND & TAYLOR, 1961, mostram uma rápida queda na temperatura do meio, assim que um fluxo de ar seco entra em contato com a superfície da amostra. Se o fluxo de ar seco, que está a uma temperatura maior que a superfície do meio, continua, esta perderá umidade, até alcançar as condições de equilíbrio com o ar de secagem. Existe portanto, dois fenômenos básicos para se alcançar o equilíbrio termodinâmico entre o ar de secagem e o meio poroso. Um fenômeno rápido, envolvendo uma queda na temperatura da superfície do meio, acompanhado de um fenômeno mais lento, de diminuição da umidade do meio. Por outro lado, nos experimentos de WIEGAND & TAYLOR (1961), as depressões de temperatura nunca excederam 3°C à 5 cm de profundidade da superfície e não constatou-se depressões de temperatura para espessuras maiores que 10 cm. BIMBENET & LONCIN (1971) esquematizaram este problema conforme a Figura (4.29), onde os subíndices a e s são relativos ao ar e à superfície do meio poroso.

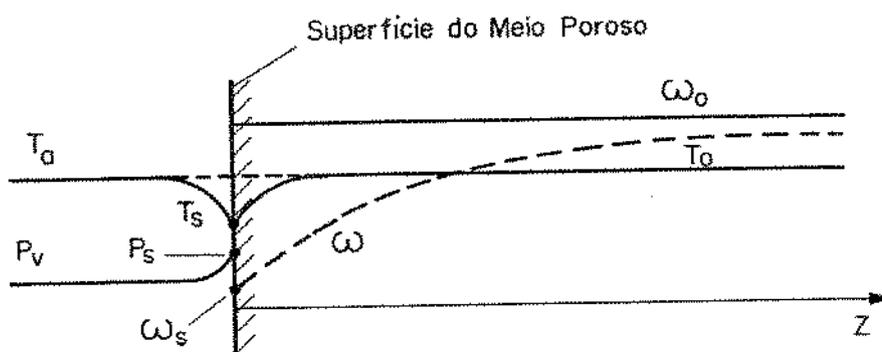


FIGURA (4.29). COLUNA DE MEIO POROSO SUBMETIDA
A UM PROCESSO DE SECAGEM
(ADAPTADO DE BIMBENET & LONCIN, 1971)

No presente caso, não se mediu a temperatura da superfície do meio poroso exposta ao ar seco. No entanto, devido ao longo período de exposição da superfície ao ar, a temperatura da mesma tende a diminuir, no sentido de atingir a temperatura de bulbo úmido do ar contido na caixa, ou seja, 12,5 °C. Por outro lado, cabe lembrar que o sistema (caixa + colunas) se encontra numa estufa com temperatura constante e com intensa movimentação de ar, o que favorece a diminuição dos gradientes de temperatura na coluna. Deste modo, torna-se difícil se pronunciar sobre a temperatura T_s , representada na Figura (4.29).

Quanto à umidade da superfície, ω_s , pode-se dizer que a mesma tende a diminuir para valores próximos da umidade de equilíbrio com o ar de secagem (UR = 7,0 %, T = 30°C), ou seja, $\omega = 0.00075$ g de água / g de matéria seca. No entanto, também neste caso, não é seguro afirmar-se tal fato. Analisando-se os perfis de umidade experimentais, nota-se que seriam necessários enormes gradientes de concentração próximos à superfície, para conciliar a situação física de equilíbrio para a umidade nessa região, principalmente para os experimentos que iniciam com a umidade do meio acima de 6,0 % (Figuras 4.20 a 4.23). No Capítulo 5, propõe-se uma estratégia de estudo para elucidar essa questão.

O coeficiente de difusão pode ser separado em duas parcelas, que mostram as contribuições das fases líquida e vapor, como apresentado nas Equações (2.25) e (2.26). A importância relativa de D_l e D_v depende da umidade do meio que, por sua vez, define o modo de interação entre os fluidos (líquido e vapor) e a matriz porosa. Uma ilustração dessas possibilidades é apresentada nas Figuras (4.30) e (4.31).

Para os teores mais reduzidos de umidade, a difusão se dá exclusivamente na fase vapor [situações (a) e (b) da Figura (4.30)],

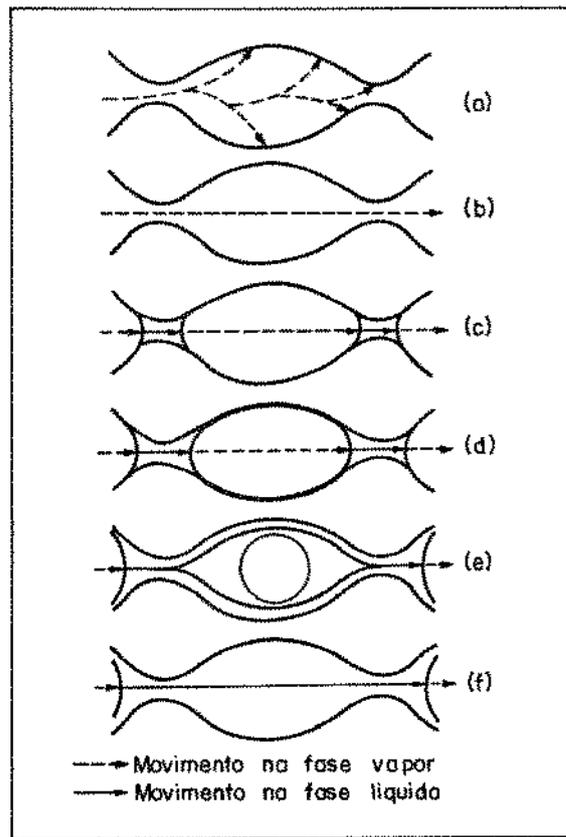


FIGURA 4.30. MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE UMIDADE EM MEIOS POROSOS

(a) ADSORÇÃO, (b) TRANSFERÊNCIA DE VAPOR, (c) VAPORIZAÇÃO-CONDENSAÇÃO, (d) DIFUSÃO DE SUPERFÍCIE, (e) FLUXO HIDRÁULICO INSATURADO, (f) FLUXO HIDRÁULICO SATURADO (ROSE, 1963b)

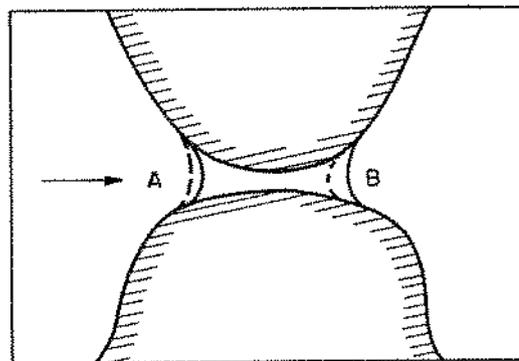


FIGURA 4.31. DETALHE DA SITUAÇÃO (C) DA FIGURA 4.30. (PHILIP & DE VRIES, 1957)

enquanto houver um gradiente de pressão parcial de vapor entre dois pontos do meio. A mistura de areia-caulim é muito pouco higroscópica, apresentando uma umidade de equilíbrio igual a 0,27 %, com o ar a uma umidade relativa (UR) igual a 97%, como pode ser visto na Figura (4.32), que representa a isoterma de equilíbrio de umidade para o meio a 30⁰C. A partir deste ponto, um acréscimo de ω provoca pequenas mudanças na UR do ar presente nos interstícios do meio poroso, e podemos concluir que $(\partial P_v / \partial \omega)_T$ tende a zero, à medida em que a umidade do meio aumenta. Assim, não havendo gradiente de potencial para a transferência de vapor, toda a transferência de massa se daria no estado líquido, a partir de $\omega = 0,27\%$. No entanto, essa hipótese mostra-se inadequada para descrever os processos de transferência de umidade quando as duas fases (líquido e vapor) estão presentes.

Uma proposta para explicar a transferência de umidade em meios porosos quando a água está presente nas fases líquida e vapor, é apresentada por PHILIP & De VRIES (1957) e corroborada por ROSE (1963a), que sugerem a existência de um mecanismo onde a fase vapor continua participando ativamente do processo de transferência de umidade. Deste modo, procuram explicar as diferenças entre os resultados experimentais encontrados e os esperados teoricamente, quando se considera toda a transferência de umidade na fase vapor.

As bolsas de líquido que se formam nas "gargantas" dos poros (formadas nos pontos de contato entre os grânulos que compõem o meio) devido à condensação de umidade, agiriam não como uma barreira à passagem de vapor mas, pelo contrário, estabelecendo um "curto circuito" para o movimento do mesmo. Para isso, haveria uma acomodação dos meniscos, inicialmente em equilíbrio com as fronteiras. Estes autores supõem que um gradiente de pressão parcial de vapor, devido a campos de temperatura, produz um fluxo de

vapor na direção indicada pela flexa na Figura (4.31). Deste modo, o processo de condensação-evaporação tenderia a diminuir a curvatura de A e aumentar a curvatura de B. Essa teoria busca explicar o contínuo crescimento de D, mesmo com a diminuição da área de secção livre para o movimento do vapor, à medida em que a umidade do meio aumenta, mas não o suficiente para que haja fluxo viscoso. Nos experimentos realizados, os campos de temperatura poderiam estar presentes, associados à formação da frente de secagem, e poderiam explicar o comportamento de D no intervalo de umidade do meio entre 0,35 e 3,9%. De outro modo, seria difícil explicar o crescimento exponencial de D nessa faixa de umidade.

O patamar e o ponto de mínimo que aparecem na Figura (4.27) podem ser vistos como uma região de transição para o fluxo viscoso, representada pelas situações (d) e (e) da Figura (4.30).

O comportamento exponencial de D a partir de $\omega = 5,6\%$ deve-se ao início do escoamento viscoso, pelo surgimento da continuidade na fase líquida, possibilitando a transferência de líquido mediante um gradiente de potencial. A partir deste ponto, a contribuição da fase vapor no processo de transferência de umidade é desprezível, podendo-se dizer que o coeficiente de difusão global D é igual ao coeficiente de difusão na fase líquida D_1 e que o fluxo global de umidade pode ser descrito pelo primeiro termo da Equação (2.13).

As explicações apresentadas para as transições das situações (c) e (d) para (e) ganham apoio, ao compararmos os resultados com aqueles obtidos por WYCKOFF & BOTSET (1936), citado por ROSE (1963), que mostrou que a condutividade na fase líquida é desprezível para teores de umidade abaixo de 20% da saturação completa do meio. Tal comportamento ocorreu para quatro tipos de areia de tamanhos de partículas uniformes, distribuídas

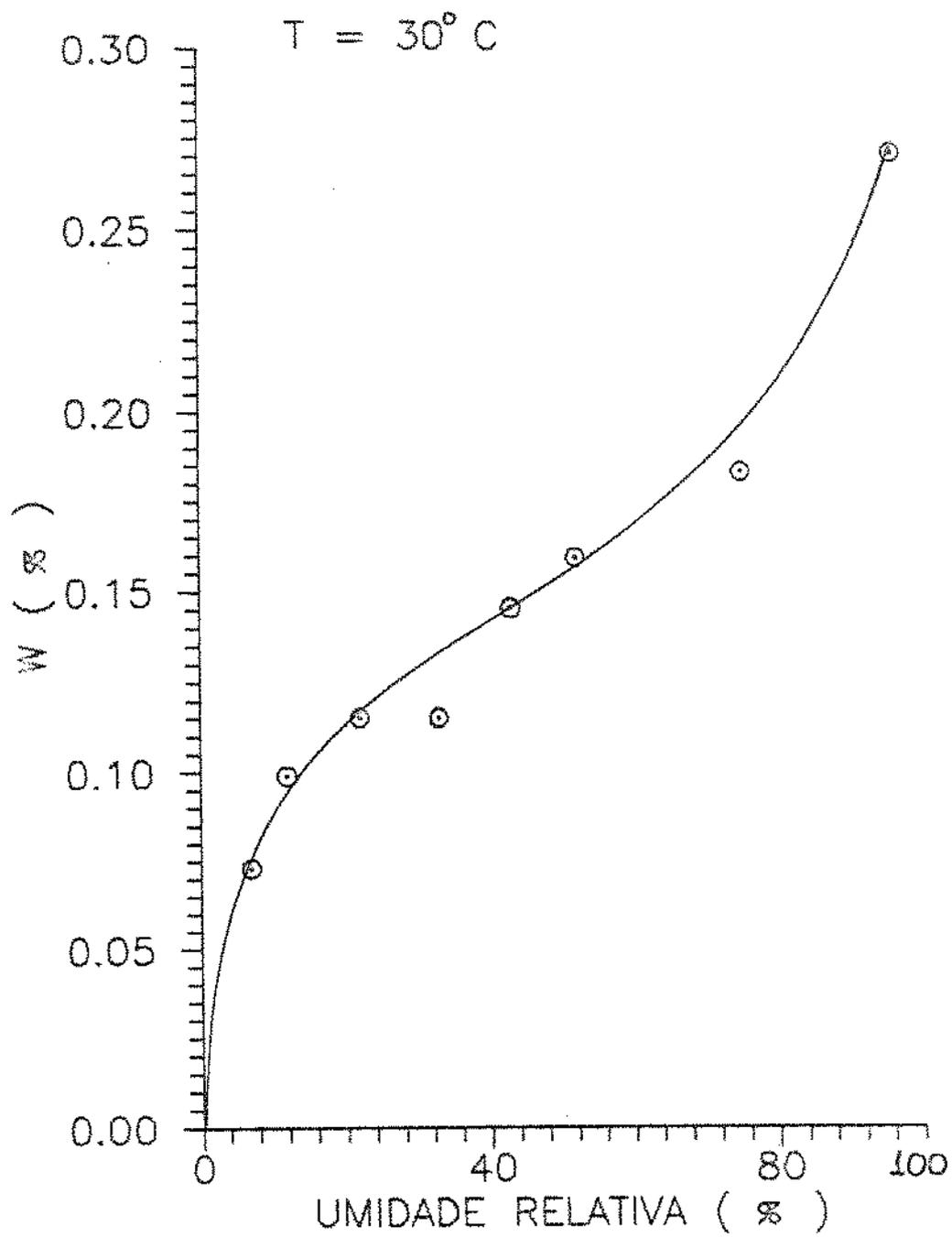


FIGURA 4.32. ISOTERMA DE EQUILÍBRIO DE UMIDADE PARA A MISTURA AREIA-CAULIM EM CONDIÇÕES DE DESORÇÃO

aleatoriamente quando da estruturação do meio. Para a mistura de areia-caulim, 20% da saturação corresponde a uma umidade de 4,2%, que situa-se numa região do gráfico onde não ocorreria fluxo viscoso, concordando com os resultados encontrados por WYCKOFF & BOYSET (1936). JURY & MILLER (1974), trabalhando com areia, encontraram resultados muito próximos dos encontrados nos presentes experimentos, sob o ponto de vista qualitativo e quantitativo. Os experimentos de CRAUSSE (1983) demonstraram que D coincidia com D_1 quando a função $D(\omega)$ assumia o comportamento logarítmico, característico do fluxo viscoso.

Apesar dos experimentos realizados serem restritos a teores de umidade menores que 7,5%, inúmeros dados encontrados na literatura (PHILIP & De VRIES, 1957; CRAUSSE, 1983 e QUADRI, 1987) indicam que D deve continuar crescendo, até a completa saturação do meio. Mais especificamente, QUADRI (1987), trabalhando com o mesmo meio, em condições de umidificação, encontrou resultados que confirmam esta hipótese. A mudança no comportamento do fluxo pode ser visualizada pela situação (e) da Figura (4.30). A situação (f) corresponde ao fluxo viscoso em condições de saturação do meio, podendo ser analisado como um problema de mecânica de fluidos.

Rigorosamente, não se pode concluir que o coeficiente de difusão encontrado é o coeficiente D da Equação (3.37a) pois, conforme a análise apresentada, é bastante provável a existência de gradientes de temperatura ao longo da coluna, principalmente em regiões próximas à superfície do meio em contato com o ar de secagem. Por outro lado, segundo LUIKOV (1966), a parcela do coeficiente de difusão associada aos gradientes de concentração é, normalmente, a predominante.

A tentativa de explicação do comportamento apresentado pelo coeficiente de difusão está associada a uma análise parcial do problema,

limitada pelas informações experimentais disponíveis. Com relação ao estudo dos mecanismos através dos quais a água migra em meios porosos submetidos a gradientes de temperatura, importantes informações poderiam ser obtidas através do uso de sais como traçadores do movimento de umidade na fase líquida (GURR *et alii*, 1952; KUZMAK & SEREDA, 1957).

O comportamento do coeficiente de difusão com relação à temperatura é mostrado na Figura (4.28). A variação de D com a temperatura pode ser explicada pela influência que esta exerce sobre todos os parâmetros que definem $D(\omega, T)$, explicitados nas Equações (2.15) e (2.24). JACKSON (1963) mostrou que a variação de D com T , para o fluxo viscoso, pode ser explicada pela dependência da viscosidade cinemática (ν) e da tensão superficial (σ) com a temperatura. Basicamente, esta influência está colocada nas funções $\Psi(\omega, T)$ e $K(\omega, T)$. Para D_v deve-se, paralelamente, considerar o efeito de $[P_s(T)/T^2]$ da Equação (2.24a). O termo $[P/(P-P_v)]$ é aproximadamente igual a 1, e não varia significativamente com a temperatura, o mesmo ocorrendo para $\phi = P_v/P_s$. A variação do coeficiente de difusão do vapor d'água no ar (D_a), pode ser considerada como uma função de $T^{1,5}$, conforme a teoria de CHAPMAN-ENSKOG (CUSSLER, 1984).

JACKSON (1965) e KEEY (1972) sugerem o emprego do conceito de energia de ativação para difusão, para estimar a dependência do coeficiente de difusão com a temperatura, do seguinte modo:

$$D = D_0 \exp \left[\frac{E}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (4.1)$$

onde D_0 é o coeficiente de difusão à temperatura de referência T_0 e E é a energia de ativação para difusão. Pode-se estimar valores de E através da inclinação da curva $(\ln D) \times (1/T)$, que é numericamente igual a E/R .

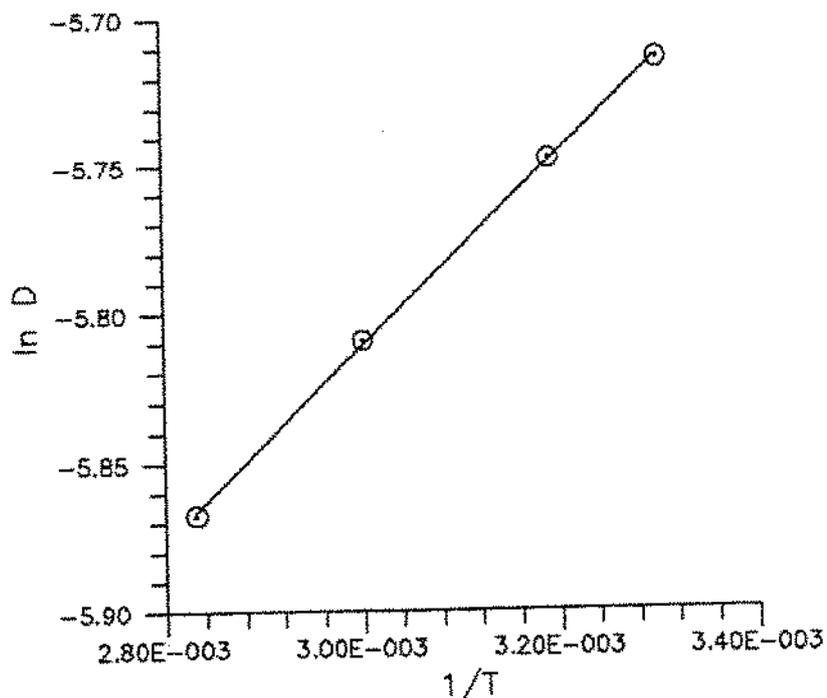


FIGURA 4.33. ESTIMATIVA DA ENERGIA DE ATIVAÇÃO PARA DIFUSÃO

Pela regressão linear da curva, encontrou-se um valor de $E = 0,65$ Kcal/Mol, com um coeficiente de correlação igual a 0,999, conforme pode ser visualizado na Figura (4.33). Os dados de D e T utilizados para este cálculo são relativos a $\omega = 2\%$. JACKSON (1965) apresenta um estudo mais detalhado, tanto sob o ponto de vista teórico quanto experimental, cujos resultados são de difícil comparação com os aqui encontrados, devido a inúmeros fatores relacionados às condições experimentais.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

- A preparação de colunas de meios porosos a partir de sólidos granulados não homogêneos (grande amplitude de granulometria e diferentes capacidades de retenção de água) deve ser acompanhada de cuidados especiais, para evitar a separação dos sólidos de baixa granulometria. Nesse sentido, a preparação de colunas, partindo-se da amostra previamente umidificada, se mostrou mais adequada para os objetivos do presente trabalho, proporcionando colunas homogêneas, isotrópicas e com distribuições de umidade uniformes.

- O Método de Atenuação de Raios- γ e a Tomografia Reconstitutiva apresentaram-se como ferramentas poderosas para auxiliar na preparação de colunas de meios porosos granulares. Com relação à utilização desses métodos para estudos da dinâmica da água nas colunas submetidas ao processo de secagem, seria necessário se realizar mais experimentos, utilizando-se estratégias experimentais mais adequadas. No entanto, as dificuldades tenderão a permanecer, pois as tensões criadas durante o processo de secagem modificam a estrutura do meio. Neste caso, uma alternativa pode ser a utilização do Método de Atenuação de Raios- γ com dupla energia, que permite o acompanhamento simultâneo da densidade e da umidade num ponto. Também faz-se necessário maiores estudos sobre a utilização da TDR- γ e da TR no estudo da dinâmica da água em produtos biológicos, mas os resultados iniciais demonstram que existe a possibilidade dessa utilização.

- Para a determinação do comportamento do coeficiente de migração de umidade com a umidade e a temperatura, desenvolveu-se uma metodologia experimental simples, de fácil montagem e de baixos custos de montagem e

operacional. Essa metodologia proporcionou resultados de alta reprodutibilidade, e poderá ser utilizada para diversos tipos de meios porosos, efetuando-se as devidas adequações.

- O comportamento do coeficiente de difusão efetivo (D) encontrado para a mistura areia-culim encontrou alguns pontos comuns com importantes trabalhos citados na literatura. Observou-se uma variação da ordem de 100 vezes para D , quando a umidade do meio variou de 0,3 a 8,0%. Dentro desse intervalo, o coeficiente apresentou um ponto de máximo e um ponto de mínimo, consequência dos mecanismos de transferência de umidade nos meios porosos. As umidades correspondentes aos pontos de máximo e de mínimo são específicas para o meio estudado (areias em geral, Capítulo 4). A variação das propriedades estruturais do meio pode deslocar esses pontos para a direita ou para a esquerda (Figura 4.27), pois os mecanismos são funções da topologia do meio. Nesse sentido, seria interessante o conhecimento de parâmetros como área específica e função de distribuição dos poros, a partir do que poder-se-ia tirar outras conclusões. A inferência de propriedades de transporte de meios porosos a partir de suas propriedades estruturais, e a inferência de propriedades estruturais a partir das propriedades de transporte é uma frente de estudo que vem merecendo grande atenção por parte de inúmeros pesquisadores.

- Não se pode afirmar que o coeficiente de difusão efetivo encontrado é o coeficiente D da Equação (2.37a), pois é bastante provável a existência de gradientes de temperatura. No entanto, a parcela deste coeficiente associada aos gradientes de concentração deve ser a predominante.

- Experiências adicionais devem ser realizadas para que se possa tirar conclusões mais seguras quanto à influência da umidade e da temperatura sobre o coeficiente de migração de umidade (coeficiente de difusão efetivo). Poder-se-ia isolar os efeitos dos gradientes térmicos, trabalhando-se com colunas de diâmetros reduzidos, imersas em banho termostático. Uma outra alternativa seria a determinação dos perfis de temperatura nas colunas, instalando-se termopares ao longo das mesmas.

- Para a investigação do fenômeno de transferência de massa na interface coluna - ar seco, propõe-se a realização de uma modelagem do processo de migração de umidade nas colunas, a partir da equação de conservação da massa para o sistema. Sugere-se a resolução dessa equação considerando-se, como condição inicial, uma umidade homogênea em toda a amostra, e uma condição de impermeabilidade para o fundo da coluna. Para a superfície exposta ao ar seco, propõe-se um estudo comparativo de duas condições de contorno distintas: uma condição de umidade constante (umidade de equilíbrio com o ar seco) e uma condição de fluxo, utilizando-se um coeficiente convectivo de transferência de massa, empírico, entre o ar seco e a superfície do meio. Pela resolução da equação, utilizando-se as condições de contorno propostas, obter-se-ia os perfis transientes de umidade para as colunas. A comparação com os perfis experimentais (Figuras 4.17 a 4.23) pode fornecer informações sobre a condição de contorno que melhor representa o fenômeno físico em questão.

- Para uma melhor compreensão dos fenômenos de transferência simultânea de calor e massa em meios porosos, seria interessante o estudo do fenômeno de migração de umidade devido a gradientes de temperatura, ou seja,

o estudo da termo-migração.

A grande variação de D com a umidade encontrada para a mistura areia-caulim é um fator estimulante para a realização de novos trabalhos, particularmente com produtos alimentícios. Em trabalhos relacionados à secagem desses produtos, é comum a utilização de modelos onde não é considerada a variação do coeficiente de difusão com a umidade do meio.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVARENGA, L.C.; FORTES, M.; PINHEIRO Fo., J.B.; HARA, T. Transporte de Umidade no Interior de Grãos de Feijão-Preto sob Condições de Secagem. Revista Brasileira de Armazenagem, Viçosa, 5(1):5-18, 1980.
- ANDERSON, J.G. Paper Moisture Measurement Using Micro Waves. Journal of Measurement & Control, 22(3):82-84, 1989.
- APPOLONI, C.R.; NARDOCCI, A.C.; OBUTI, M.M. Medidas do Perfil de Umidade de Amostras de Concreto em Infiltração Vertical, Através da Atenuação de Raios Gama. Comunicação de Pesquisa, FISUEL/P-009, Londrina, 1987.
- BENSON, I.B. Industrial Applications of Near Infrared Reflectance for the Measurement of Moisture. Journal of Measurement & Control, 22(3):45-49, 1989.
- BIMBENET, J.J.; LONCIN, M. Heat and Mass Transfer During Air Drying of Solids. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 49:860-865, 1971.
- BRAY, W.H. Water Vapor Pressure Control with Aqueous Solutions of Sulfuric Acid. Journal of Materials, JMLSA, 5(1):233-248, 1970.
- BROWN, J.M.; FONTENO, W.C.; CASSEL, D.K.; JOHNSON, G.A. Computed Tomographic Analyses of Water Distribution in Three Porous Foam Media. Soil Science Society of America Proceedings, 51:1121-1125, 1987.

- COREY, J.C.; PETERSON, S.F.; WAKAT, M.A. Measurement of Attenuation of ¹³⁷Cs and ²⁴¹Am Gamma Rays for Soil Density and Water Content Determinations. Soil Science Society of America Proceedings, 35:215-219, 1971.
- CRAUSSE, P. Etude Fondamentale des Transferts Couplé de Chaleur et Humidité en Milieu Poreux non saturé. Thèse d'Etat, 1983, INPT, Toulouse, France.
- CRESTANA, S. A Tomografia Computadorizada como um Novo Método para Estudos da Física da Água no Solo. Instituto de Física e Química de São Carlos-USP- Tese de Doutorado, 1985.
- CRESTANA, S.; CESAREO, R.; MASCARENHAS, S. Using a Computed Tomography Miniscanner in Soil Science. Soil Science, 142(1):56-61, 1986.
- CUSSLER, E.L. Diffusion, Mass Transfer in Fluid Systems. Cambridge University Press, 1984.
- DESROSIER, N.W. Conservacion de Alimentos, 11ed. Companhia Editorial Continental, S.A., 1981.
- De VRIES, D.A. Simultaneous Transfer of Heat and Moisture in Porous Media. Transactions of American Geophysical Union, 39(5):909-916, 1958.
- De VRIES, D.A. Heat Transfer in Soil - Heat and Mass Transfer in the Biosphere- Part 1(1), Scripta Book Company, 1975.
- DIRKSEN, C.; HUBER, M.J. Soil Water Flow Model with Two-Dimensional

Automatic Gamma Ray Attenuation Scanner. Water Resources Research, 14(4):611-614, 1978.

- ECKERT, E. R. G.; FAGHARI, M. A General Analysis of Moisture Migration caused by Temperature Differences in an Heat Mass Transfer, 23:1613-1623, 1980.
- FERRAZ, E. S. B. Determinação Simultânea de Densidade e Umidade de Solos por Atenuação de Raios- γ do Cs¹³⁷ e Am²⁴¹, ESALQ-USP, Livre Docência, 1974.
- FORTES, M; OKOS, M. R. A Non-Equilibrium Thermodynamics Approach to Transport Phenomena in Capillary Porous Media. Transactions of the ASAE, 1981, 756-760
- GARDNER, W. R. Solutions of the Flow Equations for the Drying of Soil and Other Porous Media. Soil Science Society Proceedings, 183-187, 1959.
- GIMSON, C. Using the Capacitance Charge Transfer Principle for Water Content Measurement. Journal of Measurement and Control, 22(3):79-81, 1989.
- GREENEWALT, C. H. Partial Pressure Water out Aqueous Solutions of Sulfuric Acid. Industrial and Engeneering Chemistry, 17(5):522-523, 1925.
- GURR, C. G.; MARSHALL, T. J.; HUTTON, J. T. Movement of Water in Soil Due to a Temperature Gradient. Soil Science, 74(5):335-345, 1952.
- HILLEL, D. Fundamentals of Soil Physics. Academic Press, 1980.

- JACKSON, R. D. Temperature and Soil-Water Diffusivity Relations. Soil Science Society of America Proceedings, 27(4):363-366, 1963.

- JURY, W. A.; MILLER, E. E. Measurement of the Transport Coefficients for Coupled Flow of Heat and Moisture in a Medium Sand. Soil Science Society of America proceedings, 38: 551-557, 1971.

- KEEY, R. B. Drying - Principles and Practice. Pergamon Press, Oxford, 1972.

- KUZMAK, J. M.; SEREDA, P. J. The Mecanism by which Water Moves Through a Porous Materials Subjected to a Temperature Gradient: 2. Salt Tracer and Streaming Potential to Detect Flow in the Liquid Phase. Soil Science, 84: 419-422, 1957.

- Le DUY, A.; ZAJIC, J. E. Communication to Editor. Biotechnology and Bioengineering, 15:810, 1973.

- LENORMAND, R. Déplacements Polyphasiques en Milieu Poreux sous l'influence des Forces Capillaires - Etude Experimentale et Modelisation de Type Percolation. INPT, Toulouse, France, Thèse d'Etat, 1981.

- LIBARDI, P. L.; REICHARDT, K. Generalização do Movimento da Água no Solo: Infiltração Horizontal. Resumo Apresentado à XXVI Reunião Anual da SBPC, Recife: 10-17, 1974.

- LOPES, R. T.; JESUS, E. F. O.; JUNQUEIRA, M. M.; MATOS, J. A.; BRANCO, L. M. C.; BARROS F. J. A.; BORGES, J. C. Aplicação de Radiações em Ensaio não

- Destrutivos - Laboratório de Instrumentação Nuclear da COPPE / UFRJ. VII Seminário de Ensaio Não-destrutivos - ABENDE, Rio de Janeiro, setembro de 1987.
- LUIKOV, A.V. Heat and Mass Transfer in Capillary-Porous Body. Pergamon Press, Oxford, 1966.
 - LUIKOV, A.V. Systems of Differential Equations of Heat and Mass Transfer in Capillary-Porous Bodies (Review). International Journal Heat Mass Transfer, 18:1-14, 1975.
 - MILLER, E.E.; MILLER, R.D. Physical Theory for Capillary Flow Phenomena. Journal of Applied Physics, 27 (4): 324-332, 1956.
 - NIELSEN, A.F. Moisture Distributions Measured by Gama-ray-attenuation Method and Moisture Diffusivity Calculated by Computer. The Thermal Insulation Laboratory - The Technical University of Denmark - Comunicação de Pesquisa, 1974.
 - NOREL, G. Etude des Milieux Poreux par Absorption d'un Rayonnement X ou γ Émis par une Source Radioactive. Université de Paris, Thèse d'Etat, 1965.
 - PERRIER, E.R.; PRAKASH, O. Heat and Vapour Movement During Infiltration into Dry Soils. Soil Science, 124(2):73-76, 1977.
 - PHILIP, J.R.; De VRIES, D.A. Moisture Movement in Porous Materials under

- Temperatures Gradients. Transactions of America Geophysical Union, 33(2):222-231, 1957.
- PHILIP, J.R. Water Movement in Soil. Heat and Mass Transfer in the Biosphere. Scripta Book Company, Jonh Wiley & Sons, 1975.
 - QUADRI, M.B. Dinâmica de Resposta de Tensiômetros: Desenvolvimento Experimental e Modelação Numérica. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica - UFSC, 1988.
 - REICHARDT, K. Uso da Radiação Gama na Determinação da Densidade Aparente e da Umidade do Solo. Tese de Doutorado, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz - USP, 1965.
 - ROCKLAND, L.B. Saturated Salt Solutions for Static Control of Relative Humidity Between 5^o and 40^oC. Analytical Chemistry, 32(10):1375-1376, 1960.
 - ROMA, W.N.L.; DALL'AGLIO, M.S. Medida de Umidade em Solos por Processo Térmico. Anais do II Congresso Latinoamericano de Transferência de Calor e Matéria, 1:371-378, 1986.
 - ROSE, D.A. Water Movement in Porous Materials: Part 1- Isothermal Vapor Transfer. British Journal of Applied Physics, 14:256-262, 1963(a).
 - ROSE, D.A. Water Movement in Porous Materials: Part 2 - The Separation of the Components of Water Movement. British Journal of Applied Physics,

14:491-496, 1963(b).

- ROSSI, S.J.; ROA, G. Secagem e Armazenamento de Produtos Agropecuários com o uso de Energia Solar e Ar Natural. Secretaria da Indústria, Comércio, Ciência e Tecnologia - Academia de Ciências do Estado de São Paulo, 1980.
- SHAH, D.J.; RANSEY, J.W.; WANG, M. An Experimental Determination of the Heat and Mass Transfer Coefficients in Moist Unsaturated Soils. International Journal Heat Mass Transfer, 27(7):1075-1085, 1984.
- SINGH, B.P.; CHANDRA, S. Evaluation of the Optimal Thickness of Soil Between Source and Detector in the Gamma-ray Transmission Method. Journal of Hidrology, 32:189-191, 1974.
- SLIGHT, H.A. The Measurement of Moisture Content. Journal of Measurement & Control, 22(3):42-44, 1989(a).
- SLIGHT, H.A. Further Thoughts on Moisture Measurement. Journal of Measurement & Control, 22(3):85-86, 1989(b).
- SOUZA, H.A. Transporte Simultâneo de Calor e Umidade em Meios Porosos: Método das Funções de Transferência. Departamento de Engenharia Mecânica - UFSC - Dissertação de Mestrado, 1985.
- VAN DER KOOI. Moisture Transport in Celular Concrete Roofs. Deelft, 1971

- WARNER, G. S.; NIEBER, J. L.; MOORE, I. D.; GEISE, R. A. Characterizing Macropores in Soils by Computed Tomography. Soil Science Society of America Journal, 53(3):653-660, 1989.

- WIEGAND, C. L.; TAYLOR, S. A. Temperature Depression and Temperature Distribution in Drying Soil Columns. Soil Science, 1961.

- WILKINSON, G. E.; KLUTE, A. The Temperature Effect on the Equilibrium Energy Status of Water Held by Porous Media. Soil Science Society Proceedings, 26:326-329, 1962.

- WILSON, R. E. Humidity Control by Means of Sulfuric Acid Solutions, with Critical Compilation of Vapor Pressure Data. The Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 13(4):326-331, 1921.

- WILTSHIRE, M. P. Ultrasonic Moisture Measurement. Journal of Measurement & Control, 22(3):51-53, 1989.

- YOUNG, J. F. Humidity Control in the Laboratory Using Salt Solutions - A Review. Journal of Applied Chemical, 17:241-245, 1967.

- YOUNG, L. Moisture Measurement Using Low Resolution Nuclear Magnetic Resonance. Journal of Measurement and Control, 22(3):54-55, 1989.

- ZUCCHI, O. L. A. D.; NASCIMENTO, V. F. F. Determinação dos Coeficientes de Atenuação de Massa de Solos e Água, Usando um Duplo Feixe de Radiação Gama em Linha (Cs-241 e Am-241) Para Três Diferentes Sistemas de

Detecção. Engenharia Nuclear na Agricultura, 4(2):122-142, 1982.

APÊNDICE

A. 1. MÉTODOS NUCLEARES DE DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE E UMIDADE EM MEIOS POROSOS

A. 1. 1. TÉCNICA DA TRANSMISSÃO DIRETA DE RAIOS GAMA

A. 1. 1. 1. INTRODUÇÃO

Nos experimentos realizados, foi de fundamental importância a determinação em laboratório, do conteúdo de umidade nos meios porosos estudados. Do mesmo modo, a determinação das densidades "pontuais" nos meios acondicionados em colunas, teve grande importância quando do estudo dos métodos de preparação que proporcionassem colunas homogêneas.

Existem vários métodos de medida direta e indireta da umidade em sólidos e meios porosos (ROMA, 1986; SLIGHT, 1989(a); SLIGHT, 1989(b); BENSON, 1989; WILTSHIRE, 1989; YOUNG, 1989; GIMSON, 1989 e ANDERSON, 1989).

A técnica da atenuação de raios gama tem ocupado um papel de destaque no estudo do fluxo da água nos materiais porosos, em colunas de laboratório (CRESTANA, 1985). É uma técnica não-destrutiva, rápida e de boa reprodutibilidade, possuindo cerca de 30 anos de uso. É provável que tenha sua origem inspirada no experimento de RUTHERFORD que em 1911, conforme é de conhecimento geral, propôs o seu modelo de estrutura atômica baseado no estudo da interação das partículas alfa com os núcleos de uma lâmina de ouro (CRESTANA, 1985).

Em síntese, pode-se dizer que a técnica da atenuação de raios gama (ou raios-X) apresenta como vantagens principais, ser não destrutiva e

permitir o estudo de volumes bastante restritos (NOREL, 1965). Este autor utiliza esta técnica para realizar medidas pontuais de porosidade e grau de saturação em colunas de meios porosos.

Estudos da dinâmica da água em processos de infiltração e drenagem em colunas de solo, utilizando a técnica da atenuação de raios gama, podem ser encontrados nos trabalhos de REICHARDT, 1965; COREY *et alli*, 1971; LIBARDI & REICHARDT, 1974; DIRKSEN & HUBER, 1978 e CRAUSSE, 1983.

NIELSEN, 1973 e APOLONI, 1987 utilizaram a TDR- γ para realizar estudos da dinâmica da água em colunas de concreto submetidas a processos de secagem e umidificação, respectivamente.

A.1.1.2. ATENUAÇÃO DE RAIOS GAMA - TEORIA

A.1.1.2.1. MECANISMOS DE INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO GAMA COM A MATÉRIA

Além das reações foto-nucleares, pode-se distinguir vários mecanismos pelos quais a radiação gama pode interagir com a matéria, segundo CONDON & ODISHAW, citado por REICHARDT, 1965.

a. Interação da radiação gama com a coroa eletrônica

a_1 - Efeito foto-elétrico

a_2 - Efeito Rayleigh

a_3 - Efeito Compton

b. Interação da radiação gama com o núcleo ou partículas do núcleo

b_1 - Efeito Compton nuclear

b_2 - Difusão nuclear coerente

b_3 - Efeito foto-elétrico nuclear

c. Interação da radiação gama com o campo elétrico do núcleo ou dos elétrons

c_1 - Efeito Delbrück

c_2 - Produção de par

d. Interação da radiação gama com campos de mésons em torno do núcleo

d_1 - Difusão por produção virtual de mésons

d_2 - Produção de mésons

A ocorrência desses processos de interação da radiação gama com a matéria é função da energia da fonte radioativa utilizada e do número atômico do material atenuador (REICHARDT, 1965). Para energias de até 1,4 MeV, apenas são importantes o efeito foto-elétrico, o efeito Compton e a produção de par (CRESTANA, 1985). Neste caso, pode-se escrever o coeficiente de atenuação linear μ pela soma:

$$\mu = \mu_f + \mu_c + \mu_p \quad (\text{A.1})$$

onde:

μ = coeficiente de atenuação total (cm^{-1})

μ_f = coeficiente de atenuação para o efeito foto-elétrico (cm^{-1})

μ_c = coeficiente de atenuação para o efeito Compton (cm^{-1})

μ_p = coeficiente de atenuação para a produção de par (cm^{-1})

Uma discussão detalhada sobre esses três mecanismos de interação entre os raios gama e a matéria pode ser encontrada nos trabalhos de REICHARDT, 1965 e FERRAZ, 1974.

Para a energia da fonte utilizada (Am^{241} , Energia = 60 KeV) pode-se assumir que o efeito foto-elétrico e a produção de par possuem pouca importância, e a Equação (2.38) pode ser simplificada.

$$\mu = \mu_c \tag{A.2}$$

CRESTANA, 1985 apresenta um exemplo, mostrando o coeficiente de atenuação de massa da água em função da energia dos fótons, onde pode-se observar a importância relativa dos três principais efeitos citados (Figura A.1).

A.1.1.2.2. ATENUAÇÃO DE UM FEIXE MONOENERGÉTICO

Quando um feixe colimado de radiação gama de intensidade I atravessa um meio material qualquer, de espessura dx , a fração de radiação desviada de sua trajetória ou absorvida, dI , é diretamente proporcional à espessura dx e à intensidade do feixe incidente (Figura A.2).

Deste modo, pode-se escrever que:

$$dI = - \mu I dx \tag{A.3}$$

onde a constante de proporcionalidade μ é denominada coeficiente de atenuação linear. O sinal negativo indica que quando dx aumenta, I diminui.

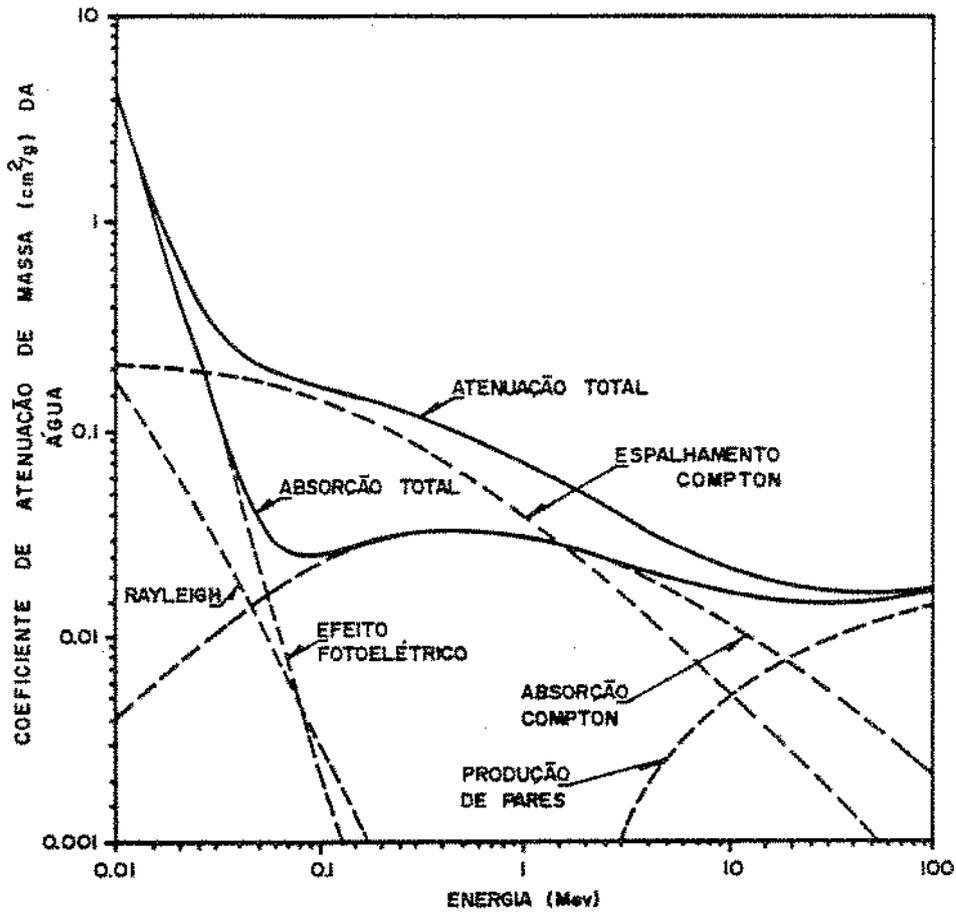


FIGURA A.1. IMPORTÂNCIA RELATIVA DOS DIFERENTES EFEITOS NO COEFICIENTE DE ATENUAÇÃO DE MASSA DA ÁGUA

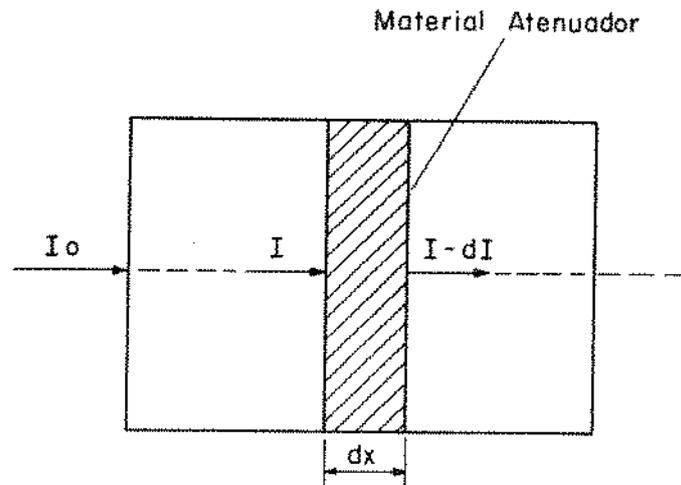


FIGURA A.2 - ESQUEMA DA ATENUAÇÃO DA RADIAÇÃO GAMA PELA MATÉRIA

Integrando a Equação (A.3) para variações da intensidade do feixe de radiação de I_0 até I e para variações da espessura do material absorvente de 0 (zero) a x , chega-se à expressão matemática que descreve o fenômeno da atenuação da radiação gama pela matéria.

$$I = I_{00} e^{-\mu x} \quad (\text{A.4})$$

O coeficiente de atenuação linear μ é uma função da energia da radiação gama, do material atenuante e do estado físico do mesmo. Dividindo-se μ pela densidade do material absorvente (ρ_{at}), obtém-se outro coeficiente, denominado coeficiente de atenuação de massa $\bar{\mu}$, que é independente do estado físico da substância, sendo uma propriedade física da mesma.

$$\bar{\mu} = \frac{\mu}{\rho_{at}} \quad (A.5)$$

O coeficiente de atenuação linear é dado em (cm^{-1}) e o coeficiente de atenuação de massa em (cm^2/g).

De (A.5) e (A.4), tem-se:

$$I = I_{oo} e^{-\bar{\mu}\rho x} \quad (A.6)$$

que é conhecida como Lei de LAMBERT-BEER e onde:

I = Intensidade do feixe emergente (número de fótons)

I_{oo} = Intensidade do feixe incidente (número de fótons)

$\bar{\mu}$ = Coeficiente de atenuação de massa do meio atenuante para a energia da fonte utilizada (cm^2/g)

ρ_{at} = densidade do meio atenuante (g/cm^3)

x = espessura do meio atenuante (cm)

A.1.1.2.3. ANÁLISE PARA UMA AMOSTRA DE MEIO POROSO

O método consiste em se medir a fração do feixe monoenergético de radiação gama que é atenuada pela amostra. Deve-se distinguir a fração atenuada pela amostra em questão e aquela atenuada por outros meios existentes entre a fonte e o detetor, que constituem constantes do problema. Os fótons, originados da desintegração radioativa da fonte, percorrem uma trajetória constituída de vários meios diferentes, antes de atingirem o

detetor. A Figura (A.3) ilustra, esquematicamente, o sistema fisico atravessado pelo feixe de raios gama ou raios-X.

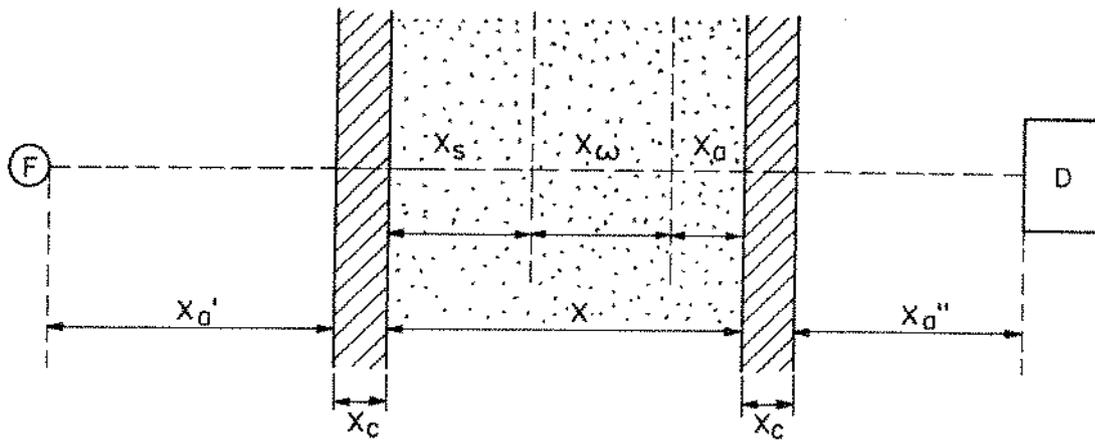


FIGURA A.3 - ILUSTRAÇÃO DA TRAJETÓRIA DO FÓTON

A trajetória do fóton se realiza:

- a. na camada de ar existente entre a fonte e o recipiente que contém a amostra ($x_{a'}$);
- b. na parede do recipiente que contém a amostra (x_c);
- c. na amostra (x), onde diferentes constituintes são caracterizados: a espessura do sólido propriamente dita (x_s), a espessura da camada de água (x_{ω}) e a espessura da camada de ar (x_a), devido à porosidade da amostra;
- d. novamente, na parede do recipiente (x_c);
- e. e finalmente, na camada de ar existente entre o recipiente que contém a amostra e o detetor ($x_{a''}$)

Pode-se então escrever a Equação (A.6), considerando-se,

separadamente, todos os meios que contribuem para a atenuação do feixe monoenergético de raios gama.

$$I = I_{00} \exp - \left[\bar{\mu}_s x_s \rho_s + \bar{\mu}_w x_w \rho_w + 2\bar{\mu}_c x_c \rho_c + \bar{\mu}_a x_a \rho_a + \mu_a \rho_a (x_{a'} + x_{a''}) \right] \quad (A.7)$$

sendo:

$\bar{\mu}_s$, $\bar{\mu}_w$, $\bar{\mu}_a$ e $\bar{\mu}_c$, respectivamente, os coeficientes de atenuação de massa do sólido, da água, do ar e do material que constitui a parede do recipiente;

ρ_s , ρ_w , ρ_a e ρ_c , respectivamente, densidade do sólido, da água, do ar e do material da parede do recipiente;

x_s , x_w , e x_a , respectivamente, as espessuras do sólido, da água e do ar presente nos poros da amostra. Assim, $x_s + x_w + x_a = x$;

x_c , $x_{a'}$, e $x_{a''}$, respectivamente, a espessura da parede do recipiente e as espessuras das camadas de ar existentes entre a amostra e o detetor.

Nas análises de rotina, onde se utiliza uma geometria fixa e sempre os mesmos recipientes, os dois últimos termos do expoente da Equação (A.7) se tornam constantes do problema. A fração do feixe atenuado (I_0) pelos atenuadores constantes do sistema (geometria) pode ser caracterizada à parte, fazendo-se uma análise da atenuação de um feixe que atravessa o sistema quando o recipiente está vazio, chegando-se à Equação (A.8).

$$I_0 = I_{00} \exp - \left[2\bar{\mu}_c \rho_c x_c + \bar{\mu}_a \rho_a (x_a + x_{a''} + x) \right] \quad (\text{A.8})$$

Pode-se eliminar essa constante do problema, dividindo-se (A.7) por (A.8) para obter a Equação (A.9).

$$I = I_0 \exp - \left[\bar{\mu}_s \rho_s x_s + \bar{\mu}_\omega \rho_\omega x_\omega + \bar{\mu}_a \rho_a (x_a - x) \right] \quad (\text{A.9})$$

Denominando de θ_s , θ_ω e θ_a as frações volumétricas do sólido, da água e do ar, na amostra e de tal forma que:

$$\theta_s + \theta_\omega + \theta_a = 1 \quad (\text{A.10})$$

vem que:

$$\begin{aligned} V_s &= V\theta_s \\ V_\omega &= V\theta_\omega \\ V_a &= V\theta_a \end{aligned} \quad (\text{A.11})$$

onde V é o volume total da amostra e V_s , V_ω e V_a são os volumes ocupados pelo sólido, pela água e pelo ar.

Do mesmo modo, para o meio poroso ilustrado pela Figura (A.3), pode-se escrever que:

$$\begin{aligned} x_s &= x\theta_s \\ x_\omega &= x\theta_\omega \\ x_a &= x\theta_a \end{aligned} \quad (\text{A.12})$$

Substituindo-se (A.12) em (A.9), obtém-se:

$$I = I_0 \exp - \left[\bar{\mu}_s \rho_s x \theta_s + \bar{\mu}_w \rho_w x \theta_w + \bar{\mu}_a \rho_a x (\theta_a - 1) \right] \quad (\text{A.13})$$

O último termo da exponencial, relativo a atenuação pela camada de ar dentro da amostra é muito pequeno, se comparado aos outros dois, pois a densidade do ar é da ordem de 10^3 vezes menor que as densidades do sólido e da água. Some-se a isso, o baixo coeficiente de atenuação de massa do ar ($\bar{\mu}_a$). Assim, a desconsideração deste termo provoca um erro inferior a 0.1% (FERRAZ, 1974).

A densidade do sólido (ρ_s) multiplicada pela fração volumétrica (θ_s) do sólido vem a ser a densidade aparente ("bulk density") do meio poroso seco ($\rho_0 = \rho_s \theta_s$), quando se considera desprezível a massa de ar presente nos poros do meio. Neste trabalho, a densidade aparente é muitas vezes denominada apenas por densidade do meio poroso.

Finalmente, admitindo-se que a densidade da água é sempre igual a 1 g/cm³, pode-se escrever a equação de atenuação na sua forma mais usual:

$$I = I_0 \exp -x(\bar{\mu}_s \rho_0 + \bar{\mu}_w \theta_w) \quad (\text{A.14})$$

lembrando que:

I = intensidade do feixe (número de fótons) que atinge o detetor após ser atenuado pela amostra e pelo recipiente,

I_0 = intensidade do feixe (número de fótons) que atingiria o detetor na ausência da amostra (recipiente vazio),

x = espessura da amostra (cm),

$\bar{\mu}_s$ = coeficiente de atenuação de massa do sólido para a energia da fonte utilizada (cm²/g),

$\bar{\mu}_\omega$ = coeficiente de atenuação de massa da água para a energia da fonte utilizada (cm^2/g),

ρ = densidade aparente do meio poroso (g/cm^3) e

θ_ω = unidade volumétrica no meio poroso ($\text{cm}^3 \text{ água}/\text{cm}^3 \text{ amostra}$).

Um estudo sobre a avaliação da espessura ótima da amostra a ser colocada entre a fonte e o detetor, para a otimização das medidas, pode ser encontrado nos trabalhos de SINGH, 1974 e FERRAZ, 1974. Este último faz uma análise das principais fontes de erro associadas ao método e apresenta alguns aspectos do método de atenuação de raios gama a duas energias, fazendo uma análise de sensibilidade do mesmo para as medidas da densidade e umidade em meios porosos.

A.1.2. TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA - PRINCÍPIOS

Quando se fala sobre tomografia computadorizada, as primeiras idéias que se associa são relativas às aplicações desta técnica no campo da medicina, com as importantes contribuições que a mesma vem trazendo. Isso é bastante natural, pelo próprio desenvolvimento histórico da tomografia, fortemente ligado a essa área de conhecimento (CRESTANA, 1985). No entanto, a tomografia vem se tornando uma poderosa ferramenta de análise não destrutiva de corpos em geral, sejam eles parte de seres vivos ou não.

De modo geral, as técnicas de obtenção de imagens a partir de projeções unidimensionais têm tido um grande número de aplicações nos últimos anos, com o desenvolvimento dos sistemas de computação, que permitiram o implemento de modelos matemáticos complexos de reconstrução de

imagem. Com esse avanço, sucederam-se as aplicações das técnicas de reconstrução que hoje são empregadas para a obtenção de imagens de simples peças industriais, até a obtenção de estrutura molecular de bactérias (LOPES *et alii*, 1987). A tomografia também tem sido utilizada para estudos de amostras arqueológicas e biológicas de interesse relevante, através de minitomógrafos especialmente construídos para esse fim (CRESTANA, 1985).

Em trabalho recente, WARNER *et alii*, 1989, apresentaram a possibilidade de caracterização de macroporos presentes em meios porosos, pelo uso da tomografia computadorizada (TC). Esse tipo de informação sobre a matriz porosa pode ser de grande valia para a predição de propriedades de transporte, como a condutividade hidráulica. Para um escoamento que obedece a lei de DARCY, a capacidade de transporte do meio poroso é governada pelo tamanho e grau de conexão dos espaços vazios. BROWN *et alii*, 1987 utilizaram a TC para realizar estudos da distribuição espacial da água em meios porosos, assim como a variação dessa distribuição com o tempo.

As bases matemáticas da tomografia, assim como as principais teorias de reconstrução de imagem são apresentadas por CRESTANA, 1985, juntamente com um resumo do desenvolvimento histórico da tomografia e do estado atual dos equipamentos mais modernos. Este autor propõe o uso da TC como um novo método de medida da densidade global e do conteúdo de água em meios porosos, assim como para estudos da dinâmica da água nestes meios. Realizou experimentos em colunas verticais de solos, determinando distribuições de umidade ao longo das mesmas. Apresenta resultados de um experimento que simula uma irrigação por gotejamento, onde se pode observar, através de uma imagem tridimensional, o avanço da frente de umidificação. A TR permite que se analise o escoamento para qualquer ângulo, plano ou posição num dado instante, em função do interesse do observador. CRESTANA *et alii*, 1986

propõe o uso de um minitomógrafo de raios gama como uma alternativa aos tomógrafos médicos, invariavelmente muito caros.

A tomografia não é inseparável do computador mas, no entanto, ele está presente em todos os tomógrafos comerciais modernos e, de modo geral, o termo TAC (tomografia auxiliada por computador) é utilizado e confundido com TC (tomografia computadorizada). Um termo mais geral, que dissocia a idéia da reconstrução da imagem da necessidade do emprego do computador é a denominação TR (tomografia reconstitutiva), que consiste na reconstrução de uma dada seção de um corpo, quando um número suficiente de projeções desta seção em diferentes direções é conhecido. A reconstrução da imagem de um objeto se apresenta como um problema matemático complexo, motivo principal do uso do computador (CRESTANA, 1985). Este autor faz uma revisão das bases matemáticas da TR, com as principais teorias de reconstrução de imagem, juntamente com seu desenvolvimento histórico.



FIGURA A.4 - OBTENÇÃO DE UMA TOMOGRAFIA

Na prática, ao se realizar uma tomografia, pode-se selecionar o plano de interesse e obter o número de projeções necessárias à reconstrução da imagem. Na Figura (2.6)(a) é mostrado o processo de varredura para a obtenção destas projeções. Em (b) tem-se um resultado típico de uma série de varreduras realizadas através de sucessivas translações lineares da fonte e do detetor em três diferentes posições angulares. Deste modo, através de uma técnica matemática de reconstrução de imagem, auxiliada por um computador, obtém-se a imagem do plano de corte de interesse.