

*"Análise de Parâmetros
Adimensionais num Escoamento
em Meio Poroso Visando a
Deformação de Elementos
Cerâmicos"*

ANTONIO CARLOS FRANÇA

316

ANTONIO CARLOS FRANÇA

ANÁLISE DE PARÂMETROS ADIMENSIONAIS
NUM ESCOAMENTO EM MEIO POROSO
VISANDO A DEFORMAÇÃO DE ELEMENTOS CERÂMICOS

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para a do título de Doutor em Engenharia Mecânica na área de Transmissão e Conversão de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Roberto Carrocci

Guaratinguetá
2006

F814a França, Antonio Carlos
Análise de parâmetros adimensionais num escoamento em meio poroso visando a deformação de elementos cerâmicos / Antonio Carlos França.- Guaratinguetá : [s.n.], 2006
126f.: il.
Bibliografia: f. 104-106
I
Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2006
Orientador: Prof. Dr. Luiz Roberto Carrocci

1. Escoamento 2. Porosidade I. Título

CDU 532.546



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

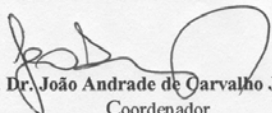
“ANÁLISE DE PARÂMETROS ADIMENSIONAIS NUM ESCOAMENTO
EM MEIO POROSO VISANDO A DEFORMAÇÃO DE ELEMENTOS
CERÂMICOS”

ANTONIO CARLOS FRANÇA

ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA”

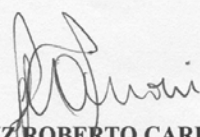
PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: TRANSMISSÃO E CONVERSÃO DE ENERGIA

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO



Prof. Dr. João Andrade de Carvalho Júnior
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. LUIZ ROBERTO CARROCCI
Orientador / Unesp-Feg



Prof. Dr. JOSÉ ANTONIO PERRELLA BALESTIERI
Unesp-Feg



Prof. Dr. MARCELO RODRIGUES DE HOLANDA
EEL/USP/Lorena



Prof. Dr. ADRIANO FRANCISCO SIQUEIRA
EEL/USP/Lorena



Prof. Dr.ª JANAÍNA FERREIRA BATISTA LEAL
EEL/USP/Lorena

Julho de 2006

DADOS CURRICULARES**ANTONIO CARLOS FRANÇA**

NASCIMENTO	25.07.1946 – CAÇAPAVA / SP
1971/1977	Curso de Graduação Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá – UNESP
1983/1983	Curso de Pós-Graduação nível de Especialização (Lato Sensu) em Engenharia Econômica - Faculdade de Ciências Econômicas e Administrativas de Guaratinguetá
1998/2000	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Mestrado, na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá – UNESP
2000/2006	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Doutorado, na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá – UNESP

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, o Grande Arquiteto do Universo, e à minha família por terem me dado a vida e a alegria de viver;

agradeço ao meu orientador, prof. Dr. Luiz Roberto Carrocci pela sua orientação, dedicação, incentivo e auxílio desde o mestrado, sem este, o estudo aqui apresentado não teria sido realizado;

agradeço aos meus amigos, colegas e funcionários que não mediram esforços para ajudar-me nessa jornada que exigiu deles amizade e dedicação:

Adriano Francisco Siqueira, Dr., EEL-USP,

Antonio Clélio Ribeiro, MsC., EEL-USP,

Érika Pettermann da Silva, Prof., COTEL – EEL-USP

Janaina Ferreira Batista Leal, Dra., EEL-USP,

José A. Perrella Balestieri, Dr., FEG-UNESP

José Augusto Rodrigues, Dr., INPE

Marcelo Rodrigues Holanda, Dr., EEL-USP,

Maria Lucia Caetano P. Silva, Dra., EEL-USP,

Nacir Izidoro, Prof., COTEL- EEL-USP,

Oswaldo Luiz Cobra Guimarães, Dr., EEL-USP,

Paulo Armando Panunzio, MsC., COTEC-UNESP

Regina Célia e Elisa Mara, Secretárias de PG-FEG-UNESP

Rodrigo Aquino Almeida, Eng., Cerâmica Jovem,

Tessie Gouvea da Cruz, MsC., FEG-UNESP, e

Waldinei e Bruono Sesar, Tec. Lab., INPE.

Eu só preciso (para viver)

Eu só preciso de amor e de um sorriso

Eu só preciso ver e sentir a alegria das crianças, o brilho no olhar, é disso que eu preciso

Eu só preciso ver e sentir a beleza das flores

Eu só preciso trazer na lembrança, do passado, os meus amores

Eu só preciso ver e sentir, depois da chuva, a multicolor do arco íris, todos os matizes

Eu só quero que você, eu, ele, ela, nós todos sejamos felizes

Eu só preciso agradecer a Deus, por tudo que ele me deu

Eu só preciso dizer que o meu amor é universal mas é único e é seu.

RENÉ KHATTAR

FRANÇA, A. C. **Análise de parâmetros dimensionais num escoamento em meios porosos visando à deformação de elementos cerâmicos.** 2006. 126f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2006.

RESUMO

É comum serem identificadas trincas em alvenaria de tijolos, não somente depois de um certo tempo da construção, mas também, por vezes, durante a própria construção. Essas trincas, ou deformações estruturais ocorrem por diversos fatores de ordem técnica, dentre os quais, um deles devido à umidade absorvida pelos elementos da parede (tijolos e argamassa). Tal umidade pode vir das condições do ambiente (dia úmido), de chuvas, do solo e até do excesso da quantidade de água contida na argamassa de assentamento. Em contato com os elementos porosos da parede, tijolos e argamassa, a água concorrerá para a percolação capilar, dando origem a consideráveis esforços internos, que virão provocar deslocamentos estruturais, os quais, via de regra, são diferentes para o tijolo e para a argamassa, dessa forma, provocando o aparecimento de trincas. Os fenômenos que dão origem às deformações foram estudados em um trabalho de pesquisa por FRANÇA (2000), analisados e quantificados em laboratório, no qual se confirmou a hipótese de que a somatória dos esforços capilares provocados pelo deslocamento de um fluido em um meio poroso, pode atingir valores elevados ao ponto de causar na estrutura deslocamentos e, conseqüentemente, trincas. Por isso, o deslocamento do fluido por entre os canais existentes entre as partículas do meio poroso, processado sob a forma de uma frente de fluido se deslocando, denominada velocidade de percolação, necessitou ser visualizado e matematicamente tratado.

. Esse trabalho buscou como objetivo principal traçar o perfil do deslocamento e dar à velocidade de percolação uma modelagem matemática baseada na equação geral de Navier-Stokes.

Foi necessário buscar conhecimentos do micro mundo dos labirintos formados por poros entre as partículas de areia, argila e cimento. Fez-se necessário medir, de

forma indireta, o tamanho dos poros e sua relação com o tamanho das partículas. Buscou-se relacionar elementos de um escoamento de fluido laminar de baixíssima velocidade, com Número de Reynolds muito menor que um, e relacionar entre si parâmetros como perímetro molhado, raio hidráulico, porosidade, circularidade e arranjo físico entre as partículas, de modo a permitir uma visão do fenômeno por analogia e comparação com meios porosos de dimensões previamente conhecidas.

De um modo geral, os estudos de percolação em meios porosos se prendem aos fenômenos da filtração e a ações que venham otimizar seu processo. Diferentemente deles, essa pesquisa objetivou a percolação natural sem interferências externas. Apenas os esforços capilares agindo, e tendo como reação as perdas de carga naturais a um escoamento laminar, como pressão ambiente e o esforço gravitacional.

No trabalho são apresentados as características do meio poroso e os tipos de águas encontradas na estrutura porosa. São abordados aspectos do escoamento em meios porosos cerâmicos de alvenaria de tijolos e argamassa. Apresenta também a base de como foi colocada a proposta de modelagem para efetuar as estimativas dos valores dos esforços e da velocidade. Mostra os valores e dados obtidos sob forma de tabelas e gráficos e detalha a metodologia e procedimentos utilizados para a escolha dos corpos de prova, medições e descrição dos instrumentos e equipamentos utilizados. São apresentadas conclusões daquilo que foi desenvolvido e observado, acompanhado de algumas sugestões sobre cuidados a serem tomados com os elementos de alvenaria para prevenir as inconvenientes trincas e efeitos visuais desagradáveis, além de sugestões para trabalhos futuros.

Palavras chaves: meio poroso, porosidade, percolação em alvenaria de tijolos e higroscopia.

FRANÇA, A. C., **Analysis of adimensional parameters in a flowage in porous elements aiming the deformation of ceramic elements.** 2006. 126p. Thesis. (Doctorate in Mechanical Engineering) – College of Engineering – Campus of Guaratinguetá, University of the State of São Paulo, 2006

ABSTRACT

The identification of cracks in brick masonry is quite common, not only after a certain period of time post-building but also, sometimes, during the building. These cracks or structural deformations are due to several factors of technical order. One of them is related to the moistness absorbed by the elements of the wall (brick and mortar). Such moistness can be the result of the environment conditions (dank day), rain, soil and even of the excess of water in the laid mortar. In contact with the wall porous elements, brick and mortar, the water will facilitate the capillary percolation, giving berth to remarkable internal efforts, which will cause structural dislocation. These dislocations are, usually, different for the brick and for the mortar, so causing the cracks. The phenomena that cause the deformations were studied in a research by FRANÇA (2000), analyzed and quantified in laboratory, which validated the hypothesis that the sum of the capillary efforts caused by the dislocation of a fluid in a porous element can reach high values to a point that causes dislocations and consequently cracks in the structure. Therefore, the dislocation of the fluid through the channels existing among the particles of the porous element, processed in a form of a dislocating front of fluid, named velocity of percolation, needed to be visualized and mathematically treated.

This work aimed, as the main objective, to trace the profile of the dislocation and give to the velocity of percolation a

mathematical modeling based on the general equation of Navier-Stokes.

It was necessary to search for knowledge of micro world of the labyrinths formed by pores among the sand, clay and cement particles. It became indispensable to measure, in an indirect way, the size of the pores and its relation with the size of the particles. It was also necessary to relate elements of an extremely low velocity laminar fluid flowage, with Number of Reynolds smaller than one, and relate among them parameters such as wet perimeter, hydraulic radius, porosity, circularity and physical arrangement among the particles, in such a way to make possible a vision of the phenomena by analogy and a comparison with porous means of previously known dimensions.

Altogether, the studies of percolation in porous elements are linked to the phenomena of filtration and to the actions that may optimize the process. Differently, this research was focused on the natural percolation with no external interferences. Only the capillary efforts acting, and having as reaction the losses of natural charge to a laminar flowage, the result is an environmental pressure and the gravitational effort.

The characteristics of the porous element and the types of water found in the porous structure are presented in this work. Aspects of the flowage in ceramic porous elements of brick and mortar masonry are broached. It also presents the basis on how the proposal of modeling to perform the estimates of the values of efforts and velocity. It shows the values obtained in the form of tables and graphs and details the methodology and procedures utilized to choose the bodies of proof, measurements and description of the instruments and equipments utilized. Conclusions are presented of what was developed and observed, together with some suggestions on precautions to be taken with the

masonry elements in order to prevent the inconvenient cracks and the troublesome visual effects, besides suggestions for works to come.

Key words: porous element, porosity, percolation in brick masonry and hygroscoy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Partícula porosa, tamanho médio do poro 0,00045mm (0,45 μ , 450Å) ampliada 100 vezes.....	26
Figura 2 - Arranjos físicos de partículas esféricas de mesmo diâmetro estruturadas de formas diferentes.....	27
Figura 3 - Classificação das águas em um corpo poroso.....	31
Figura 4 - Trinca provocada por acúmulo de água em peitoril de janela.....	33
Figura 5 - Trinca em parede e adiantado processo de degeneração em argamassa devido à contínua presença de umidade.....	33
Figura 6 - Trinca vertical causada por movimentações higroscópicas em parede de tijolos comuns e argamassa de cimento e areia.....	33
Figura 7 - Tubo Capilar de diâmetro “d”, reto e único.....	34
Figura 8 - Representação de dois poros capilares comunicantes de diâmetros diferentes.....	35
Figura 9 - Trincas horizontais na alvenaria de .tijolos.....	37
Figura 10 - Trincas na parte inferior de muros de alvenaria.....	37
Figura 11 - A expansão da alvenaria solícita o concreto à tração.Trincas em peças estruturais.....	37
Figura 12 - Seção transversal de um corpo poroso.....	39
Figura 13 - Coeficiente de perda por atrito f para fluido de massa específica ρ , viscosidade μ , velocidade superficial u_s e porosidade ϕ . fluido em um meio poroso de partículas de diâmetro D_p	42
Figura 14- Representação de um meio poroso composto de tubos capilares de comprimento “l”.....	46
Figura 15- Representação dos espaços vazios entre as esferas de raio R_e envolvidas por quadrados de lado $2 R_e$ (arranjo cúbico de canal livre).....	53
Figura 16- Esquema de um elemento dz que pode representar um poro.....	47
Figura 17- Arranjo entre os meios equivalentes.....	60
Figura 18- Seção transversal de um meio poroso.....	64

Figura 19- Arranjo das partículas de forma cúbica de passagem livre.....	65
Figura 20- Arranjo das partículas de forma ortorrômbica de passagem livre.....	65
Figura 21- Curva cumulativa da Área Superficial.....	68
Figura 22 - Função contínua, plana, não negativa $y = f(x)$	70
Figura 23 - Ilustração das áreas retangulares de base Δx_i e altura $f(c_i)$ para $n = 4$	70
Figura 24- Escala de localização do tamanho dos poros medidos no porosímetro.....	74
Figura 25- Termobalança Shimadzu TGA-50H.....	77
Figura 26- Curvas de perda de massa x temperatura da amostra	78
Figura 27 - Esquema de vizinhos de um pixel $p(x,y)$	80
Figura 28 - Diâmetros maior e menor de um poro (objeto) observado.....	80
Figura 29 - Fotografia da microestrutura da superfície da amostra em que a tonalidade de cinza mostra os pontos mais profundos em cor escura e os pontos mais acima da superfície em tons claros.....	82
Figura 30 - Histograma de cinza em um determinado intervalo $[0, L-1]$ descrito por uma função do tipo $p(r_k)=n_k/n$, sendo r_k o k -ésimo nível de cinza; $k=0, 1, 2, \dots, L-1$; n_k o número de pixel com esse nível de cinza e n o número total de pixels na imagem.....	83
Figura 31- Imagem reconstruída de um trecho da superfície da amostra através da remontagem de 600 pontos analisados pelo processador.....	83
Figura 32 - Imagens digitais dos poros capturadas por níveis observados sobre iluminação de campo claro transmitido com tensão de lâmpada de halogênio - tungstênio do microscópio Apophat. A imagem mostra o contorno dos poros na cor preta e valor dos diâmetros maior e menor, em vermelho.....	84
Figura 33- Confinamento do corpo de prova na bancada de testes.....	84
Figura 34- Confinamento dos lados do corpo de prova e posição dos apalpadores.....	85
Figura 35- Confinamento do Corpo de Prova PAREDE na bancada.....	86
Figura 36- Corpos de prova para visualização da velocidade de percolação.....	87
Figura 37- Visão da frente de percolação dos corpos de prova para estudo da velocidade de umidificação.....	87

Figura 38 - Dimensões Externas do Tijolo.....	89
Figura 39- Extrapolação do valor do Fator de Fricção f para número de Reynolds $\ll 10$, escoamento laminar.....	97
Figura 40- Visão espacial adimensionalizada do comportamento da velocidade de percolação do fluido no meio poroso composto por esferas equivalentes.....	98
Figura 41- Curva de secagem do tijolo A.....	110
Figura 42- Curva de secagem do tijolo B.....	110
Figura 43 - Curva de secagem do tijolo C.....	111
Figura 44 - Curva de secagem do tijolo D.....	111
Figura 45 – Distribuição das Áreas dos poros na amostra.....	112
Figura 46 - Distribuição dos valores da circularidade dos poros na amostra.....	113
Figura 47 - Distribuição do tamanho dos perímetros dos poros na amostra.....	114
Figura 48 - Distribuição do Diâmetro Maior na amostra.....	115
Figura 49 – Distribuição do Diâmetro Menor na amostra.....	116

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Diâmetro Médio e Coeficiente de Permeabilidade de alguns Materiais	29
Tabela 2 - Velocidades críticas da água em materiais porosos com granulometria uniforme.....	29
Tabela 3 - Deformação por percolação de água em alguns materiais de construção civil.....	37
Tabela 4 - Porosidade dos meios equivalentes.....	60
Tabela 5 - Aspectos físicos e características dos corpos de prova porosos.....	62
Tabela 6 – Deformações, vazão e velocidades médias obtidas experimentalmente.....	63
Tabela 7 – Valores de P.r em função do ângulo θ	67
Tabela 8 - Dados e cálculos das curvas cumulativa e de distribuição.....	73
Tabela 9 - Perda de massa de água por amostra na termobalança.....	77
Tabela 10- Deformações medidas dos corpos dos prova em bancada.....	86
Tabela 11- Resumo estatístico dos valores obtidos no porosímetro e picnômetro para as amostras de tijolos.....	91
Tabela 12- Diâmetro dos poros, volume específico de vazios e massa das amostras.....	107
Tabela 13 - Volume ocupado por material, pelos poros e total.....	108
Tabela 14 - Resumo dos dados das Tabela 25 a 29.....	109
Tabela 15 - Distribuição das Áreas dos poros na amostra.....	112
Tabela 16 - Distribuição dos valores da circularidade dos poros na amostra.....	113
Tabela 17 - Distribuição do tamanho dos perímetros dos poros na amostra.....	113
Tabela 18 - Distribuição do Diâmetro Maior na amostra.....	114
Tabela 19 - Distribuição do Diâmetro Menor na amostra.....	115
Tabela 20 - Análise de distribuição de meso e macroporos A.....	117
Tabela 21 - Análise de distribuição de meso e macroporos B.....	118
Tabela 22 - Análise de distribuição de meso e macroporos C.....	119
Tabela 23 - Análise de distribuição de meso e macroporos D.....	120

Tabela 24 - Análise de distribuição de meso e macroporos CON.....	121
Tabela 25 - Análise da Massa Específica real Tijolo A.....	122
Tabela 26 - Análise da Massa Específica real Tijolo B.....	123
Tabela 27 - Análise da Massa Específica real Tijolo C.....	124
Tabela 28 - Análise da Massa Específica real Tijolo D.....	125
Tabela 29 - Análise da Massa Específica real Argamassa CON.....	126

LISTA DE SÍMBOLOS

Dimensões em unidades fundamentais do SI, entretanto, em alguns casos serão mantidas as unidades originais de dados tabelados obtidos em tabelas de autores diversos e fornecidas pelos equipamentos usados nos experimentos, bem como para uma melhor percepção das grandezas, por se tratarem de unidades de um universo muito pequeno, microscópico, de ordem inferior a 10^{-10} m, não propiciando uma imediata noção da dimensão da grandeza.

Å	Angstrom - unidade de comprimento	10^{-10} m
a	circularidade	-
A	Seção, área	m^2
A, B, C, D	denominação de corpos de prova de amostras de tijolo	-
A_{tc}	área interna do tubo capilar	m^2
A_e	área da esfera	m^2
A_E	área do paralelogramo envolvente	m^2
A_g	área gráfica	m^2
A_m	área molhada	m^2
A_p	área superficial total da partícula esférica	m^2
A_t	área transversal da partícula	m^2
A_q	área do quadrado envolvente da partícula	m^2
A_s	área ocupada pela partícula (sólido)	m^2
A_t	área gráfica total	m^2
A_v	área de vazios	m^2
c	coeficiente adimensional do meio	-
C	coeficiente de proporcionalidade	-
CON	denominação de corpo de prova de argamassa	-
D	diâmetro	m
D_e	diâmetro da partícula esférica	m

d	distância genérica	m
d_{10}	talhe efetivo de granulometria	mm
D_L	derivada de comprimento	-
D_m	diâmetro médio	m
D_{mp}	diâmetro médio da partícula	m
D_p	diâmetro da partícula	m
D_s	derivada de área	-
D_v	derivada de volume	-
e	espessura do meio	m
E_v	erro entre volumes medidos e calculados	-
ff	fator de forma	-
fp	fator de atrito	-
g	aceleração da gravidade	$m.s^{-2}$
h, j, J	perda de carga (metro de coluna de líquido)	mcl
h_{ac}	altura da água capilar	m
i	perda de carga (pressão)	Pa, $N.m^{-2}$
J	relação piesométrica	-
K	permeabilidade	$m.s^{-1}$
L, l	comprimento	m
N_p, n	número de partículas	-
N_c	número de tubos capilares	-
P, p	pressão ambiente	Pa, $N.m^{-2}$
P_m	perímetro molhado	m
$P_{S_{méd}}$	peso seco médio	kgf
Q	vazão	$m^3.s^{-1}$
Q_c	vazão volumétrica em meio de tubos capilares	$m^3.s^{-1}$
Q_e	vazão volumétrica em meio de esferas	$m^3.s^{-1}$
r	raio	m
R_c	raio interno do tubo capilar	m
R_e	raio da esfera	m
Rey	número de Reynolds efetivo	-

$Re_{y_{ac}}$	número de Reynolds aparente meio esferas	-
$R'ey_{ee}$	número de Reynolds efetivo meio esferas	-
$Re_{y_{ac}}$	número de Reynolds aparente meio tubos capilares	-
$Re_{y_{ee}}$	número de Reynolds efetivo meio tubos capilares	-
R_h	raio hidráulico	m
R_{h_p}	raio hidráulico do meio poroso de partículas	m
$R_{h_{mpe}}$	raio hidráulico do meio poroso de partículas esféricas	m
$R_{h_{mptc}}$	raio hidráulico do meio poroso de tubos capilares	m
R_p	raio da partícula equivalente	m
S_n	Soma das áreas de n retângulos	m^2
S, s	superfície	m^2
t	temperatura	$^{\circ}C$
u_i	velocidade intersticial ou efetiva	$m.s^{-1}$
um	micro metro	
u_s	velocidade superficial ou aparente	$m.s^{-1}$
v	velocidade média	$m.s^{-1}$
V	volume total do meio poroso	m^3
V_{tc}	volume interno do tubo capilar	m^3
V_e	volume da esfera	m^3
V_{GEO}	volume calculado geometricamente	m^3
V_{MM}	volume de material maciço	m^3
V_s	volume total de partículas sólidas e volume real de sólido	m^3
$V_{s_{méd}}$	volume sólido médio	m^3
V_{ve}	volume de vazios da estrutura esférica	m^3
V_p	volume da partícula esférica	m^3
W	trabalho	J
ΔL	variação de comprimento do tubo	m
Δp	perda de carga e variação de pressão	Pa, $N.m^{-2}$
θ	ângulo	-
φ	coeficiente de porosidade ou fração de vazios	-
φ_v	coeficiente de porosidade volumétrica	-

Ψ	esfericidade	-
ρ	massa específica	kg.m^{-3}
Γ, γ	tensão superficial	kg.s^{-2}
ν	viscosidade cinemática	$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$
ν_c	viscosidade crítica	$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$
μ	viscosidade dinâmica	$\text{m}^{-1}.\text{kg.s}^{-1}$
ϵ_v	porosidade calculada com índices volumétricos	-
ϵ_s	porosidade calculada com índices superficiais	-

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS
LISTA DE TABELAS
LISTA DE SÍMBOLOS

1	INTRODUÇÃO	22
1.1	A BUSCA PELO ENTENDIMENTO DOS FENÔMINOS DE ESCOAMENTO.....	22
1.2	OBJETIVO.....	23
1.3	CONTRIBUIÇÃO DO TRABALHO.....	24
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	25
2.1	O MEIO POROSO.....	25
2.2	ÁGUAS PRESENTES NOS MEIOS POROSOS.....	30
2.3	O MECANISMO E AS CARACTERÍSTICAS DA PERCOLAÇÃO DE ÁGUA EM ELEMENTOS DE CONSTRUÇÃO – TIJOLOS, CONCRETOS E ARGAMASSA - E SEUS EFEITOS.....	32
2.4	O ESCOAMENTO.....	38
2.5	CÁLCULO DO PARÂMETRO POROSIDADE OU FRAÇÃO DE VAZIO	43
2.6	ESTIMATIVA DAS VELOCIDADES	43
2.7	RAIO HIDRÁULICO PARA UM MEIO POROSO.....	44
2.8	NÚMERO DE REYNOLDS PARA UMA ESTRUTURA POROSA.....	47
2.9	DETERMINAÇÃO DE CORRELAÇÕES IMPORTANTES PARA OS MEIOS POROSOS COMPOSTOS DE ESFERAS E DE TUBOS CAPILARES.....	48
2.10	DETERMINAÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE O RAIO DA ESFERA E O RAIO DO TUBO CAPILAR PARA MEIOS POROSOS EQUIVALENTES	51
2.11	DETERMINAÇÃO DAS VELOCIDADES SUPERFICIAL E INTERSTICIAL PARA O MEIO POROSO	52
2.11.1	Estrutura de Esferas	52
2.11.2	Estrutura de Tubos Capilares.....	54
2.11.3	Determinação da Permeabilidade K	54
2.11.3.1	Estrutura de Esferas	55
2.11.3.1	Estrutura de Tubos	56
2.12	FOMULAÇÃO PARA CÁLCULO DA VAZÃO POR MODELAGEM DIFERENCIAL	57
2.13	DEFINIÇÃO DAS ÁREAS DE ESCOAMENTO E SÓLIDA EM UM MEIO POROSO.....	58
2.14	COMPARAÇÃO ENTRE AS VAZÕES	59
2.15	COMPARAÇÃO ENTRE POPROSIDADES DOS MEIOS EQUIVALENTES	60
3	CONSIDERAÇÕES E MEDIÇÕES EXPERIMENTAIS	61
3.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	61

3.2	MEDIÇÃO DO TAMANHO DOS POROS	65
3.2.1	Descrição do método do porosímetro de mercúrio	66
3.2.2	Distribuição do tamanho do poro	71
3.2.3	Distribuição da superfície do poro	73
3.2.3.1	Distribuição dos poros	74
3.3	MEDIÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA – PICNÔMETRO	75
3.4	MEDIÇÃO DA MASSA DAS AMOSTRAS – TERMOBALANÇA	76
3.4.1	Características da Termobalança	77
3.5	MEDIÇÃO DOS POROS POR PROCESSAMENTO DE IMAGEM	78
3.5.1	Metodologia	78
3.5.2	Caracterização do Processador de Imagens	81
3.6	MEDIÇÃO DAS DEFORMAÇÕES PROVOCADAS POR PERCOLAÇÃO	84
3.7	VISUALIZAÇÃO DA VELOCIDADE DE ABSORÇÃO DA ÁGUA – PERCOLAÇÃO.....	87
3.8	VOLUME DO TIJOLO.....	89
3.8.1	Volume determinado por imersão.....	89
3.8.2	Volume Calculado Geometricamente “ V_{GEO} ”	89
3.8.3	Erro entre os volumes medido e calculado geometricamente	90
3.8.4	Cálculo do volume do tijolo a partir da massa específica medida no picnômetro multivolume.....	90
4	FORMULAÇÃO DIFERENCIAL.....	92
4.1	FORMULAÇÃO	92
4.2	COMPROVAÇÃO DE “H” –PERDA DE CARGA POR PERCOLAÇÃO	93
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	100
	REFERÊNCIAS.....	104
	ANEXOS.....	107
A.1	RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DO TAMANHO DOS POROS – POROSÍMETRO AUSCAN – 33 QUANTACHROME.....	107
A.2	RESULTADOS DA ANÁLISE DA MASSA ESPECÍFICA REAL - PICNÔMETRO MULTIVOLUME 1305 –MICROMERITIC	109
A.3	CURVAS DE SECAGEM NA TERMOBALANÇA SHIMADZU TGA-50H	109
A.4	DISTRIBUIÇÃO DE DADOS DO OBTIDOS PELO MÉTODO DE PROCESSADOR DE IMAGENS	112
B	Tabelas do Porosímetro Autoscan – 33 Quantachome.....	117
C	Tabelas do Picnômetro Multivolume 1305 – Micromeritic.....	1

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

1.1 A BUSCA PELO ENTENDIMENTO DOS FENÔMENOS DE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS

A crescente procura por novos materiais para soluções de problemas de ordem técnica e o universo de informações hoje disponível têm gerado prioridades de pesquisas acadêmicas nos diversos campos do conhecimento. Esse trabalho, inserindo-se nesse contexto, tem por objetivo procurar esclarecer fenômenos e estudar o comportamento do escoamento de um fluido através de um meio poroso de dimensões microscópicas, em especial no que diz respeito à percolação natural da água em um meio poroso, sob a influência das tensões capilares. Ele poderá colaborar com desenvolvimento de novas tecnologias em materiais e equipamentos. Dentre esses, podemos citar: os materiais cerâmicos de alta resistência, tal como os utilizados na fabricação de motores de nova geração; os materiais sintéticos de elevada resistência mecânica; materiais isolantes térmicos e elétricos; nos estudos da área da filtração, na extração de petróleo, água e gases, bem como nos estudos da influência da mistura do nano-fluido para ganho de eficiência em bombeamentos e de materiais da construção civil, inclusive na medicina. A complexidade de entendimento do comportamento de parâmetros como velocidades do fluido, esforços e perdas de carga no mundo das micro-estruturas despertaram para esse trabalho o interesse em visualizar sob a forma de figura como a velocidade de um fluido se processa num meio poroso, considerando a distância percorrida pelo fluido sob a influência de esforços capilares, da pressão atmosférica e do efeito gravidade.

No trabalho buscou-se estudar a percolação de um fluido em um meio poroso de forma abrangente e barata. Foi escolhido como fluido a água pelas suas características padronizadas, e como meio poroso, o tijolo comum de construções de alvenaria, pela sua larga utilização, sem custo e disponibilidade. Os estudos tiveram início em uma pesquisa para obtenção de título de mestrado (FRANÇA, 2000) na qual buscando as tensões provocadas no meio poroso pela percolação de água, sentiu-se a necessidade de um aprofundamento em busca do perfil da velocidade do escoamento, o objetivo desse trabalho.

1.2 OBJETIVO

A velocidade de percolação da água como foi medida e as observações feitas nos experimentos da dissertação de mestrado (FRANÇA, 200) despertaram para a necessidade de visualização do seu comportamento ponto a ponto de forma tridimensional que mostrasse como ela se desenvolveu quantitativamente em função do tempo e da altura de percolação natural. Por essa razão, iniciou-se uma nova linha de pesquisas com o objetivo de mostrar o perfil da velocidade de percolação da água em um meio poroso cerâmico e comprovar sob a forma de modelagem matemática a função velocidade de percolação observada.

Antes, porém para melhor conhecimento dos fenômenos que influenciam no deslocamento do fluido, procurou-se conhecer a estrutura microscópica do meio poroso, tijolo, e suas características físicas. Buscou-se medir os parâmetros que influenciariam na modelagem da velocidade, tais como dimensões dos poros, tamanho das partículas e a implicação de fatores como porosidade, permeabilidade, Número de Reynolds, perímetro molhado e outros. O conhecimento desses elementos e as informações experimentais levados na equação de Navier-Stokes possibilitaram a modelagem.

1.3 CONTRIBUIÇÃO DO TRABALHO

Os resultados obtidos dos estudos realizados no mestrado, FRANÇA (2000), demonstrou em bancada de testes a influência da percolação de água na estrutura de um meio poroso cerâmico, buscou-se aqui um modelo que representasse a velocidade do fluido através do complexo caminho entre as partículas.

A diversidade de tamanhos e formas geométricas das partículas do meio poroso, a variedade de canais vazios, suas formas e dimensões influenciam diretamente no valor do esforço capilar, com interferência direta na velocidade do fluido sob a forma de perda de carga, na altura da percolação. Todas essas características interagem nas dimensões microscópicas do meio poroso de forma natural dificultando medições e interpretações. Para a obtenção do perfil da velocidade de percolação foram necessários buscar conhecimentos do mundo microscópico do meio cerâmico mesmo que de forma indireta nas medições em laboratório.

A grande maioria dos trabalhos de pesquisa com meios porosos, de um modo geral visa a aplicação de esforços externos aplicados para maximizar o fluxo por entre os poros de modo a otimizar filtrações e lubrificações.

Esse trabalho, diferentemente dos outros, vem buscar exclusivamente a influência de fenômenos naturais sob forma direta e indireta, como a dos esforços capilares, a ação da gravidade, dos esforços da coesão, da rugosidade das superfícies e do arranjo entre partículas na velocidade de percolação. Esses fenômenos somados se refletem principalmente na geração de perdas de carga que contrariamente ao fluxo da percolação agem independentemente de estar o meio poroso mergulhado ou não em um fluido ou ainda submetido a algum tipo de pressão.

Com apoio de equipamentos específicos dos Laboratórios Associados de Propulsão e Combustão do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais LCP-INPE, dos laboratórios de pesquisa da Faculdade de Engenharia Química de Lorena – FAENQUIL, hoje Escola de Engenharia de Lorena - USP e dos laboratórios de pesquisa de materiais da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá – FEG-UNESP, que as medições indiretas no meio poroso foram possíveis de serem realizadas.

Paralelamente, esse trabalho explora um tratamento matemático mais refinado utilizando conceitos de área e volumes molhados e de raio hidráulico. Com isso, criou-se a possibilidade de aproximar a estrutura sólida do meio poroso de uma estrutura imaginária formada por esferas de raios conhecidos e disposta de maneiras diferentes, arranjo, e ainda, uma analogia composta de tubos capilares paralelos também arranjados de forma conveniente como com as esferas e dessa forma, foi mais fácil visualizar modelos para cálculos da velocidade do fluido no interior do meio poroso. Os resultados melhoraram e esse trabalho passou a tratar o meio poroso de maneira mais detalhada e específica, fazendo com que a modelagem se tornasse adequada e mais precisa.

CAPÍTULO 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 O MEIO POROSO

Meios porosos são materiais naturais ou sintéticos que possuem poros, isto é vazio entre os elementos sólidos ou partículas de sua estrutura molecular, por onde pode passar um volume expressivo de fluido, como mostrado na Figura 1. Como exemplo, podem ser citadas as aglomerações de areias, certas formações rochosas, alguns materiais cerâmicos, fígado humano, dentre outros. Ao atravessar um meio poroso, o fluido o faz através dos vazios existentes entre as partículas, utilizando-se deles como canais para escoamento. As dimensões dos espaços vazios ou poros, usados pelos fluidos em escoamentos, dependem de fatores variáveis, como por exemplo, o tamanho da partícula, sua esfericidade ou sua forma geométrica, e da rugosidade de sua superfície (FRANCIS, 1980).

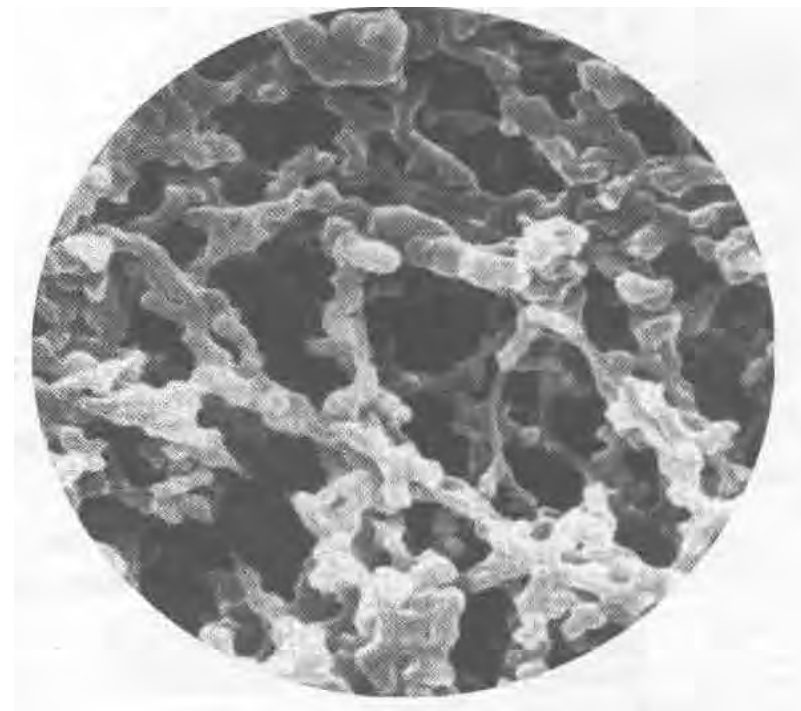


Figura 1- Partícula porosa, tamanho médio do poro 0,00045mm (0,45 μ , 450Å), ampliada 100 vezes. (Catálogo CBA)

A velocidade do fluido através dos vazios é difícil de ser determinada diretamente em função da diversidade de parâmetros, decorrente da geometria dos poros. Ela pode ser expressa em função da velocidade superficial “ u_s ” (velocidade aparente) e da velocidade intersticial “ u_i ” (velocidade efetiva), através dos poros de um trecho percorrido. A velocidade de um fluido, através de uma seção transversal total não obstruída, pode ser calculada imaginando-se o corpo como se constituído por diversas seções de espessura infinitamente pequenas e paralelas, como se fossem pequenos cilindros paralelos. Pelos fatores variáveis acima mencionados, do mesmo modo que a distância percorrida, a velocidade superficial é definida pela razão entre a vazão do fluido “ Q ” através de uma seção transversal imaginária do poro, dada por:

$$u_s = \frac{Q}{A}, \quad (1)$$

e a velocidade intersticial através dos poros, dada por:

$$u_i = \frac{Q}{A - A_s} \Rightarrow u_i = \frac{Q}{\varphi A}, \text{ sendo:} \quad (2)$$

Q a vazão, A a seção ou área ocupada pelos poros, A_s a área ocupada pelas partículas sólidas e φ a porosidade.

A dificuldade na determinação da velocidade se prende ao fato de a grande maioria dos meios porosos ser formada por arranjos aleatórios das partículas e ainda depender de fatores como seu tamanho e geometria. A figura 2 representa graficamente alguns arranjos possíveis quando consideradas as partículas de forma esférica e de tamanhos uniformes. Neste trabalho serão analisados arranjos de partículas esféricas e de tubos capilares que permitam, analiticamente, analogias com situações que se aproximem da mistura de argila com areias. Em decorrência disso, lançar mão de fatores como esfericidade, porosidade, tamanho dos poros, tamanho da partícula e raio hidráulico, para entender o fluxo através dos espaços vazios por onde o fluido escoar, como será mostrado na modelagem teórica para cálculo da superfície de vazios.

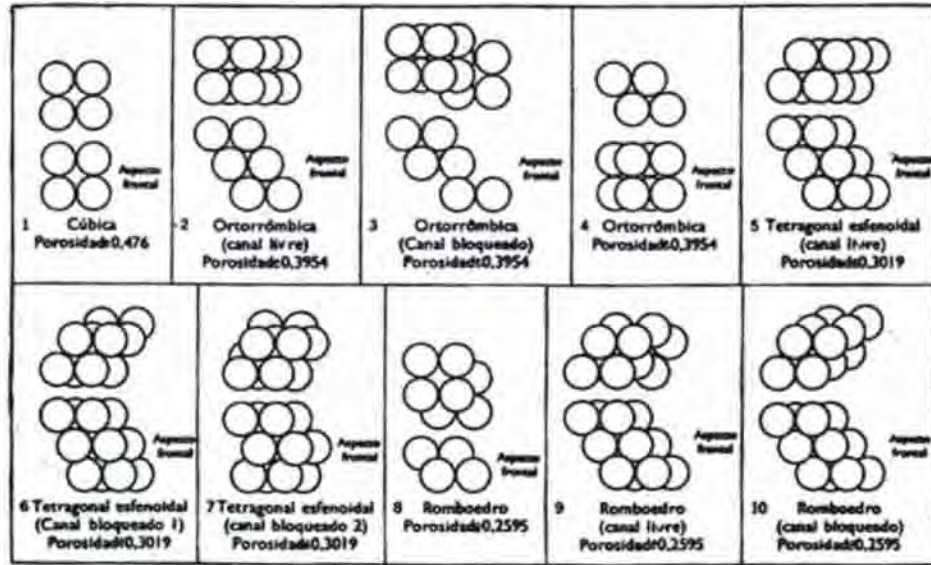


Figura 2 – Arranjos físicos de partículas esféricas de mesmo diâmetro estruturadas de formas diferentes (BROWN, 1963)

Ao se considerar a forma esférica da partícula para efeito de estudo da porosidade de um meio, deve-se ter em mente a sua esfericidade ψ , definida como o quociente entre a área superficial de uma esfera, cujo volume seja muito próximo ao da partícula, e a área superficial da partícula.

$$\Psi = \frac{\text{área superficial da esfera}}{\text{área superficial da partícula}} \quad (3)$$

Também, pode ser considerado um meio poroso formado por partículas quase esféricas, no qual o Número Equivalente de Partículas Esféricas “ N_p ” do meio é dado pela equação:

$$N_p = \frac{Am}{Ap} = \frac{Vs}{Vp} \quad (4)$$

sendo: A_m a área total molhada de partículas em contato com o fluido, A_p a área superficial total da partícula do meio, V_s o volume de sólidos e V_p o volume da partícula esférica.

Dessa forma, observa-se que a porosidade de um meio guarda estreita relação com a esfericidade da partícula. Esta poderia ser utilizada como um meio de determinação da porosidade do meio, se as partículas fossem de tamanho uniforme, mas isto não é o que ocorre na prática. São esperadas, então, diferentes porosidades para meios compostos por partículas uniformes com arranjos diferentes, bem como para os meios de partículas não uniformes.

Para a determinação dos vazios existentes numa seção de um corpo poroso (por exemplo, a transversal), usa-se o coeficiente de porosidade volumétrico, que é a relação entre o volume de vazios existente no volume total do meio poroso e o volume total. O coeficiente de porosidade, ou simplesmente porosidade, depende da composição granulométrica do meio e do arranjo das partículas; se estas forem esferas, por exemplo, a porosidade vale 0,476, se seu arranjo for da forma cúbica; 0,3954 se da forma ortorrômbica; 0,3019 se da forma tetragonal e ainda 0,2595 da forma romboédrica, conforme mostra a Figura 2.

O Coeficiente de Permeabilidade K (alguns valores de K são apresentados na Tabela 1), que exprime a capacidade de percolação do meio e de como o fluido escoar através dele, é determinado medindo-se a vazão volumétrica e o volume de fluido que atravessa um meio poroso, dividindo-o pela seção transversal do meio. O coeficiente de permeabilidade também é função da perda de carga, da espessura da camada de meio poroso e da temperatura do meio. Pela clássica equação de Darcy, o valor da permeabilidade para uma dada temperatura pode ser determinado pela expressão:

$$K = \frac{Q}{A} \cdot \frac{e}{\Delta_p} \quad \text{ou} \quad Q = KiA \quad (5)$$

sendo: i a perda de carga por unidade de comprimento, Q a vazão volumétrica, A a seção transversal, e a espessura do meio que o fluido atravessa e Δ_p a perda de carga.

As Tabelas 1 e 2, para ilustração, apresentam valores de diâmetro médio, coeficiente de permeabilidade, porosidade, velocidades médias da água, à temperatura de 20°C, através de alguns materiais de granulometria uniforme.

Tabela 1- Diâmetro Médio e Coeficiente de Permeabilidade de alguns Materiais

Diâmetro médio e coeficiente de permeabilidade de alguns materiais		
Meio Poroso	Diâmetro Médio da Partícula (10⁻³ m)	Permeabilidade K (10⁻³ m/s)
Argila	< 0,005	< 0,01
Areia muito fina	0,05 ~ 0,1	0,01
fina	0,1 ~ 0,25	0,02 ~ 0,07
média	0,25 ~ 0,50	0,3 ~ 0,45
grossa	0,50 ~ 1,0	0,7 ~ 1,2
Cascalho úmido	1 ~ 2	5 ~ 10

(GARCEZ, 1970).

Tabela 2 – Velocidades críticas da água em materiais porosos com granulometria uniforme

Velocidades médias (10⁻³ m/s)								
Porosidade %	Diâmetro médio da partícula (10⁻³ m)							
	0,1	0,2	0,5	1,0	2,0	4,0	10,0	20,0
25	490,0	231,0	92,5	46,2	23,1	11,6	4,6	2,5
30	358,0	179,0	71,6	36,0	18,4	9,2	3,5	1,8
35	286,0	143,0	51,4	28,6	14,5	7,1	2,8	1,4
40	231,0	115,4	46,2	23,1	11,6	5,7	2,5	1,1

(GARCEZ, 1970).

A Porosidade ou Coeficiente de Porosidade “ ϕ ” também é um fator que auxilia nos estudos para determinação do fluxo em meios porosos. A porosidade é dada por:

$$\phi = \frac{V - V_s}{V} = 1 - \frac{V_s}{V} \quad (6)$$

sendo: V_s o volume ocupado pelas partículas sólidas e V o volume total do meio poroso.

Allen Hazen (1965) sugere outra fórmula que condiciona o meio e a temperatura, na qual a granulometria do meio é representada pelo diâmetro das partículas que correspondem a uma determinada percentagem do todo. Essa dimensão característica é representada pelo diâmetro das partículas que são maiores que aquelas que constituem 10% do peso do material. A fórmula de Hazen para a permeabilidade é a seguinte:

$$K = cd_{10}^2(0,7 + 0,03t)[\text{m/dia}] \quad (7)$$

sendo: c um coeficiente que depende do meio, variando desde 700 a 1 000 para a areia limpa e uniforme, e 400 para a areia suja, d_{10} o talhe efetivo (que caracteriza a granulometria) em mm e t a temperatura em °C.

O estudo de um meio poroso guarda um estreito relacionamento entre a forma geométrica das partículas que o compõem e a forma como estão arranjadas entre si.

2.2 ÁGUAS PRESENTES NOS MEIOS POROSOS

Ao escoamento da água através de um sistema permeável, meio poroso, denomina-se infiltração ou percolação. Este escoamento, um fenômeno isotrópico e sensivelmente homogêneo, ocorre em materiais constituídos de um conjunto de partículas sólidas que deixam entre si vazios que poderão estar parcial ou totalmente preenchidos pela água. A dispersão da umidade no meio poroso ocorre nas fases, sólida, líquida e gasosa. Conquanto estas três fases possam existir simultaneamente, é a fase líquida que mais comumente se apresenta na natureza.

A umidade pode ter acesso aos materiais porosos de maneira natural quando submetido a condições como chuva, neve, umidade do ar ambiente e por capilaridade quando submerso. Também pode ocorrer nos materiais umedecidos nos processos de beneficiamento na produção industrial ou manufaturada. Na produção de componentes construtivos à base de ligantes hidráulicos, emprega-se regularmente quantidade de água superior à necessária para que ocorram as reações de hidratação, permanecendo no material a umidade excedente. Os componentes de alvenaria, como os tijolos, elementos cerâmicos, e argamassas, têm seu umedecimento no processo de assentamento *a priori*, prática comum que visa impedir a retirada brusca de água das argamassas, o que viria a prejudicar a aderência entre os elementos.

A quantidade de água absorvida por um material poroso depende basicamente de dois fatores: da sua porosidade e da sua capilaridade. A porosidade é função do tamanho das partículas sólidas, de suas formas geométricas e dos espaços vazios entre elas (arranjos). Neste meio a água se desloca através dos poros contínuos,

comparativamente ao movimento em pequenos tubos capilares, cujas paredes são em parte substituídas pela água que enche os poros vizinhos e que transmite a pressão de um tubo ao outro. No solo ou em paredes de alvenaria a água se eleva por entre os poros dos materiais, por capilaridade, a alturas de cerca de 30 cm ou mais quando submersos (CAPUTO, 1987), também comprovado experimentalmente nos ensaios de bancada (FRANÇA, 2000).

As águas contidas nos corpos porosos podem ser classificadas como apresentado na Figura 3.

- *Água livre*: é a que se encontra, escoando ou não, em abundância no corpo nela emergido, preenchendo todos os espaços vazios até o seu nível livre;

- *Água capilar* (h_{ac}): é aquela que sobe, escoar por entre os espaços vazios do corpo pelo efeito capilar, acima da superfície livre da água;

- *Água adesiva*: é aquela que, sob a forma de película, envolve e adere na superfície da partícula;

- *Água higroscópica*: é aquela que permanece no corpo aparentemente seco, quando em presença do ar ambiente decorrente de sua umidade natural;

- *Água de constituição*: aquela que faz parte da estrutura molecular da partícula sólida.

Destas águas, as higroscópicas, livres e capilares são as que irão ser consideradas na formulação desse trabalho e que podem ser totalmente evaporadas pelo efeito do calor, quando os materiais são submetidos a temperaturas superiores a 100°C. Na fase gasosa vapores de água e carbono combinados também podem preencher os poros.

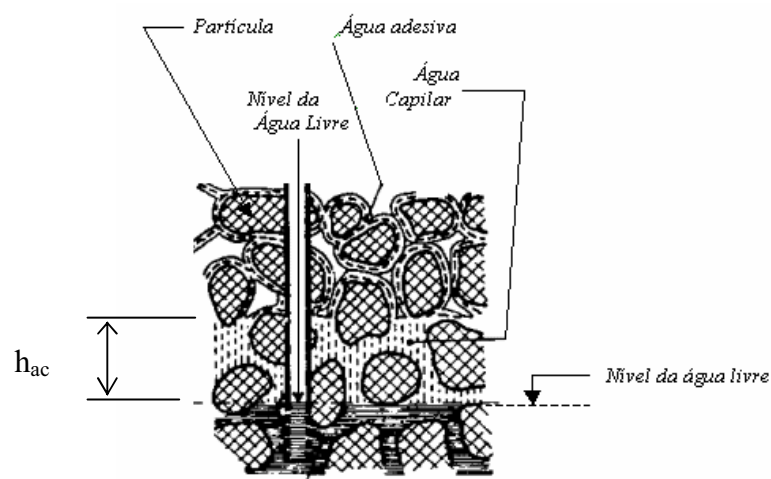


Figura 3- Classificação das águas em um corpo poroso.

2.3 O MECANISMO E AS CARACTERÍSTICAS DA PERCOLAÇÃO DE ÁGUA EM ELEMENTOS DE CONSTRUÇÃO – TIJOLOS, CONCRETOS E ARGAMASSA - E SEUS EFEITOS.

São observados em edificações, principalmente nas de alvenaria, fenômenos prejudiciais aos aspectos estrutural e estético de paredes, tetos e estruturas, decorrentes da umidade que percola através de materiais porosos de que são constituídas. Entre estes, destacamos a trinca estrutural em paredes e suas conseqüências estéticas, como fissuras da argamassa de revestimento e da pintura. Outros aspectos indesejáveis decorrentes da umidade infiltrada, como manchas, bolores, desenvolvimento de bolhas e desagregação, também são observados.

O fator estrutural tem importância relevante quando se considera o risco a que a estrutura fica submetida, onde os esforços provocam deslocamentos, trincas e suas reações. A preocupação quanto à resistência das paredes, deve-se acrescentar a sensação desagradável da coexistência com um ambiente visivelmente antiestético e um desconforto em termos de segurança como mostrado nas Figuras 4, 5 e 6. Soma-se a tais fatores físicos o fator econômico por conta do custo dos materiais e da mão de obra aplicada.

FRANÇA (2000) procurou, através de simulações em bancadas de laboratório, demonstrar os efeitos decorrentes da percolação da água em meios porosos e mensurar os esforços causadores das indesejáveis trincas nas estruturas compostas por tijolos comuns aglutinados com argamassa de cimento e areia.

A água pode ter acesso aos materiais de construção, causando-lhes um aumento do teor de umidade, produzindo expansão. Este acesso pode ser de forma natural, por absorção da umidade do meio ambiente (chuvas, alagamentos, umidade do ar) e provocada pela umidificação necessária no processo de assentamento (TOMAZ, 1989).

O fenômeno físico da capilaridade consiste no escoamento de fluidos por interstício das pequenas dimensões deixadas entre partículas sólidas, vazios, que podem ser traduzidos como uma elevação da umidade acima de um certo nível denominado Nível de Saturação.



(A. C. França)

Figura 4 - Trinca provocada por acúmulo de água em peitoril de janela



(A. C. França)

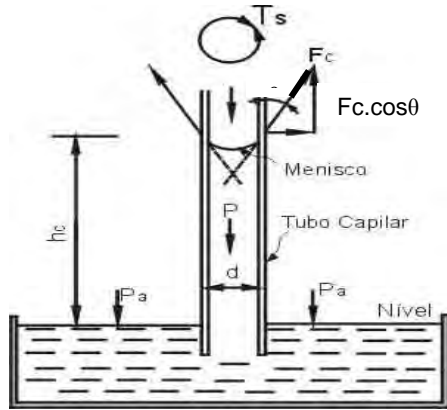
Figura 5 - Trinca em parede e adiantado processo de degeneração em argamassa devido à contínua presença de umidade.



(A. C. França)

Figura 6- Trinca vertical causada por movimentações higroscópicas em parede de tijolos comuns e argamassa de cimento e areia.

O movimento do líquido através do tubo capilar é descrito pela lei de Darcy em que a água sobe pelo tubo capilar de diâmetro “d” até uma altura h_c , tal que a componente vertical da força capilar F_c seja igual ao peso da coluna de água suspensa, como mostrado na Figura 7.



T_s – Tensão superficial de contato da água com a parede interna do tubo.
 P – Pressão
 P_a – Pressão atmosférica
 F_c – Força capilar
 θ – Ângulo de contato
 h_c – Altura da coluna de líquido suspensa
 d - Diâmetro interno do tubo

Figura 7- Tubo Capilar de diâmetro “d”, reto e único.(Fonte CAPUTO, 1978)

O equacionamento para determinação da força capilar é dado por:

$$F_c \cdot \cos \theta = \Pi d \cdot T_s \cdot \cos \theta = \frac{\Pi d^2}{4} h_c \gamma_a \Rightarrow h_c = \frac{4T_s}{d\gamma_a} \cos \theta \quad (8)$$

O ângulo de contato é introduzido porque a força responsável pelo deslocamento do fluido através do poro é função desse ângulo. No caso do líquido ser a água, a tensão superficial vale $\cong 0,076 \text{g/cm} = 8 \text{mg/mm}$ (BUILDING R. ESTABLISHMENT, 1979) e o equilíbrio atingido quando θ (ângulo de contato) = 0, daí a expressão

$$h_c \text{ max.} = \frac{4T_s}{d\gamma_\theta} \quad (\text{Lei de Jurin}) \quad (9)$$

ou, para fins práticos, considerando T_s e γ_θ da água, tem-se:

$$h_h \text{ max.} = \frac{0,306}{d} \quad (\text{d em cm}) \quad (10)$$

assim, em corpos argilosos (paredes de tijolos comuns), com partículas sólidas de diâmetro inferior a 0,005 mm, $h_c \text{ max}$ pode atingir alturas de 30cm ou mais (CAPUTO, 1978). Esta é uma condição suficiente para geração de esforços capilares que provocam trincas pela água que percola, decorrente da umidade do solo. Para o mercúrio (Hg) usado em porosímetros com o propósito de não molhar as paredes do meio, o ângulo de contato é $\theta = 140^\circ$. O ângulo de contato do fluido, além da

viscosidade do fluido, também é influenciado pela rugosidade e acabamento da superfície intrínseca do poro. O porosímetro foi utilizado nesse trabalho para conhecimento das características do meio poroso.

Segundo OLIVEIRA (1992), a pressão responsável pela elevação do líquido nos capilares, bem como a velocidade de deslocamento desde o início da penetração até a saturação e o volume da água absorvida, são dados pelas expressões (11), (12) e (13), levando-se em conta o modelo da Figura 8 que representa dois poros comunicantes de diâmetros diferentes.

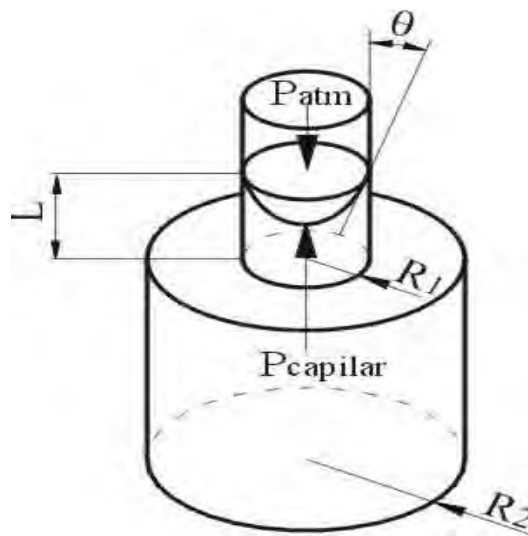


Figura 8 - Representação de dois poros capilares comunicantes de diâmetros diferentes.

$$\text{Pressão} \quad \Delta P = 2\Gamma \cos\theta \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (11)$$

$$\text{Velocidade do Escoamento} \quad v = \frac{\Gamma \cos\theta}{4\mu} R_1 \left(1 - \frac{R_1}{R_2} \right) \frac{1}{L} \quad (12)$$

$$\text{Volume absorvido} \quad V_e = n\pi \left(\frac{\Gamma \cos\theta}{2\mu} \right)^{\frac{1}{2}} R_1^2 \sum_{i=0}^{t_s} \left(1 - \frac{R_1}{R_2} \right)^{\frac{1}{2}} (\Delta t_i)^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

TOMAZ (1989) mostra sob forma de desenhos, Figuras 9, 10 e 11 e da Tabela 3, algumas a seguir reproduzidas para ilustração, os efeitos provocados pela percolação de água em paredes de edifícios.

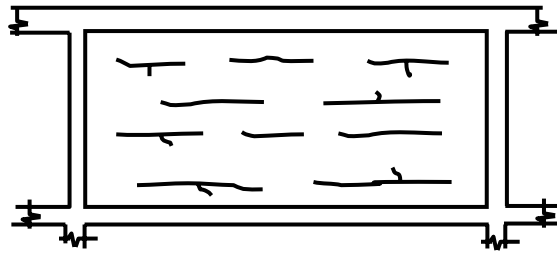


Figura 9- Trincas horizontais na alvenaria de tijolos (TOMAZ, 1989).

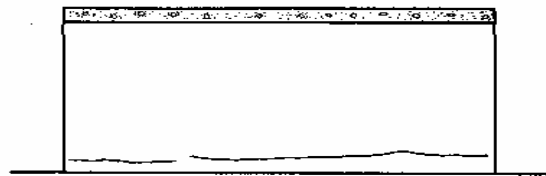


Figura 10 - Trincas na parte inferior de muros de alvenaria (TOMAZ, 1989).

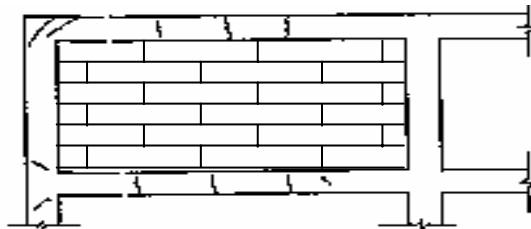


Figura 11 – A expansão da alvenaria sollicita o concreto à tração. Trincas em peças estruturais (TOMAZ, 1989).

As deformações acima citadas não levam em conta as deformações térmicas que também são responsáveis por movimentações no material, cujo coeficiente de dilatação térmica linear é da ordem de $(4 - 12) \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ para as rochas naturais, $(7 - 14) \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ para os compostos a base de cimento e de $(5 - 14) \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ para os tijolos e blocos (TOMAZ, 1989).

Tabela 3 – Deformação por percolação de água em alguns materiais de construção civil.

Material	Movimentação devido à umidade (%)	
	Reversível	Irreversível (+) expansão (-) contração
Rochas Naturais		
Calcário	0,01	-
Arenito	0,07	-
Compostos de Cimento		
Argamassa	0,02 – 0,06	0,04 – 0,10 (-)
Concreto-seixo rolado	0,02 – 0,06	0,03 – 0,08 (-)
Concreto-brita	0,03 – 0,10	0,03 – 0,08 (-)
Concreto celular	0,02 – 0,03	0,07 – 0,09 (-)
Cimento-fibra de vidro	0,15 – 0,25	0,07 (-)
Cimento-amianto	0,10 – 0,25	0,08 (-)
Tijolo ou Bloco vazado		
Concreto	0,02 – 0,04	0,02 – 0,06 (-)
Concreto celular	0,02 – 0,03	0,05 – 0,09 (-)
Sílico calcário	0,01 – 0,05	0,01 – 0,04 (-)
Barro cozido	0,02	0,02 – 0,07 (+)

Fonte (TOMAZ, 1989)

2.4 O ESCOAMENTO

O escoamento de vários tipos de fluidos em diferentes meios porosos pode ser estudado pela Lei de Darcy na sua forma clássica, que diz respeito à velocidade do fluido no meio como uma função direta do gradiente de pressão.

As condições de escoamento em meios porosos cerâmicos são também dependentes da natureza das partículas (areia, argila, limbo, solos em geral), da forma e das dimensões dos elementos que constituem o meio. É possível conhecer tais parâmetros naturais através de comparações ao escoamento em tubos capilares ou em estrutura composta por esferas e, sendo os poros de dimensões variáveis em função do tamanho das partículas, Muskat (1937) propõe, por analogia em suas experiências, que o regime seja laminar e que a velocidade crítica da água corresponda ao valor 1 do número de Reynolds. Para temperatura da água de 20°C, e viscosidade $\nu = 0,0001 \text{ m}^2/\text{s}$, a velocidade crítica será $V_c = 0,01/d$, sendo “d” o diâmetro médio das partículas.

Para meios porosos com diâmetro médio de partícula de 1 mm (areia grossa), a velocidade crítica será cerca de 0,1 mm/s. Pode-se atingir velocidades críticas da ordem de 0,03 a 0,04 mm/s (2,6 a 3,5 m/dia) sem sair do regime laminar (NEVES, 1982). No entanto, para uma análise mais adequada, é preciso fazer algumas adaptações de parâmetros e fatores para se obter resultados reais para esses escoamentos.

Alguns autores, de um modo geral, sugerem desenvolvimentos de estudos para escoamento em meio poroso os conceitos de: esfericidade, raio hidráulico, número de equivalência de partículas esféricas e Número de Reynolds modificado (adaptado para o meio poroso). Com isso, é possível estimar com valores médios os efeitos da velocidade, da perda de carga e de outros parâmetros em determinados intervalos de Número de Reynolds, no escoamento através de meio poroso (Papanastasiou, 1994).

O número de Reynolds baseado no diâmetro médio da partícula e dependente de fatores como esfericidade, rugosidade e arranjo das partículas, pode ser calculado pela expressão (STRETER, 1961):

$$Re' = \frac{D_p \Psi v \rho}{\nu}, \quad (14)$$

Em que, D_p é o diâmetro médio da partícula, v a velocidade calculada como se o trecho do escoamento não fosse poroso, ρ a massa específica do fluido, ν a viscosidade cinemática do fluido e Ψ um coeficiente que leva em consideração a esfericidade da partícula e a porosidade do meio.

Para o Número de Reynolds Efetivo, propõe-se a formulação a seguir, baseada no conceito de raio hidráulico,

$$\begin{aligned} Re_y &= \frac{\rho u_i D}{\mu} = \frac{\rho u_i (2R_h)}{\mu} = \frac{2\rho u_i \left(\frac{\phi R_p}{3(1-\phi)} \right)}{\mu} = \frac{2\rho \phi u_i R_p}{\mu 3(1-\phi)} = \frac{2\rho R_p u_s}{3\mu(1-\phi)} \Rightarrow \\ \Rightarrow Re_y &= \frac{2\rho R_p u_s}{3\mu(1-\phi)} \end{aligned} \quad (15)$$

sendo: ρ é a massa específica do fluido, μ a viscosidade dinâmica do fluido e R_p o raio da partícula, $u_i = u_s/\phi$, definido a partir do seu raio hidráulico para um meio poroso. O

Raio Hidráulico para um meio poroso (Rh_p) é a relação entre a área molhada pelo escoamento e o perímetro molhado;

$$Rh_p = \frac{V - V_s}{A_m} = \frac{V_v}{A_m} \quad (16)$$

na qual: V é o volume total do meio, V_s o volume de sólidos no meio, V_v o volume de vazios do meio e A_m a área molhada pelo fluido. Sendo $\phi = (V - V_s)/V \Rightarrow (V - V_s) = \phi V$, substituindo na equação (15) temos:

$$Rh_p = \frac{\phi V}{A_m} = \frac{\phi \frac{4}{3} \pi R_p^3}{(1 - \phi) \cdot 4 \pi R_p^2} = \frac{\phi R_p}{3(1 - \phi)} \quad (17)$$

Os estudos pioneiros do movimento da água em meios porosos são atribuídos a Darcy em 1856, e Dupuit em 1865, que propuseram modelos matemáticos nos quais a velocidade nos meios porosos é proporcional à perda de carga unitária oferecida pelos poros do meio. Segundo Dupuit, $u_s = kJ$, em que k é um coeficiente dependente da resistência oferecida pelo meio e $J = dh/ds$ a relação piezométrica em qualquer ponto do percurso. Na teoria de Darcy, a velocidade de infiltração, que é a velocidade média com que a água se desloca no meio, é dada por $v = Q/A$, sendo, “ Q ” a vazão e “ A ” a seção total do meio poroso. A seção de vazios no meio, como na mostrado na Figura 12, é $A_v = \phi A$, em que ϕ corresponde a uma razão percentual da seção total, ou seja, a porosidade. Portanto,

$$Q = v \times A = k (dh/dl) \times \phi A \quad (18)$$

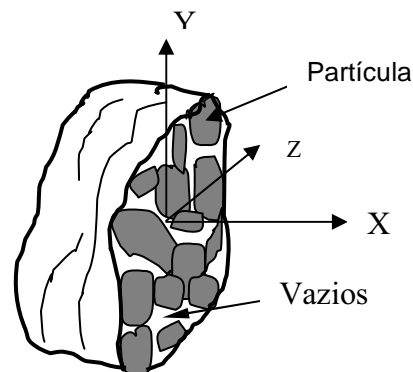


Figura 12- Seção transversal de um corpo poroso.

Da equação de clássica de Bernoulli temos:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + h_{1-2} \Rightarrow \Delta \left(\frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} + Z \right) = h \quad (19)$$

em que h indica a altura na qual quanto mais a água percola (direção vertical – nesse caso) maior é a perda de carga.

De Darcy – Weisbach pode ser obtida a perda distribuida, ou seja,

$$h = f \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} = f \frac{\Delta L}{2g} \cdot \frac{u_i^2}{\left(\frac{\varphi \cdot R_p}{3(1-\varphi)} \right)} \Rightarrow h = 3f \left(\frac{u_i^2}{2g} \right) \left(\frac{2\Delta L}{D_p} \right) \left(\frac{1-\varphi}{\varphi} \right) \quad (20)$$

fazendo $D_p = 2R_p$ temos

$$h = 3f \left(\frac{u_i^2}{2g} \right) \left(\frac{2\Delta L}{D_p} \right) \left(\frac{1-\varphi}{\varphi} \right) \Rightarrow h = 6f \left(\frac{u_s^2}{2g} \right) \left(\frac{\Delta L}{D_p} \right) \left(\frac{1-\varphi}{\varphi^3} \right) \quad (21)$$

Verifica-se que as perdas por atrito decrescem com o acréscimo da porosidade φ e com o tamanho da partícula, D_p , em que f é um fator de atrito para meios porosos quantificado empiricamente por alguns autores (Papanastasiou, 1994);

1) Ergun

$$f = 1,75u_s^2 \left(\frac{\Delta L}{D_p} \right) \left(\frac{1-\varphi}{\varphi^3} \right) + 150u_s \left(\frac{\Delta L}{D_p^2} \right) \left(\frac{1-\varphi}{\varphi^3} \right) \left(\frac{\mu}{\rho} \right) \quad (22)$$

2) Blake - Kozeny - escoamento laminar para $Re_y < 10$

$$f = 150u_s \left(\frac{\Delta L}{D_p^2} \right) \left(\frac{1-\varphi}{\varphi^3} \right) \left(\frac{\mu}{\rho} \right) \quad (23)$$

3) Burke – Plumbes - escoamento turbulento para $Re_y > 1000$

$$f = 175u_s^2 \left(\frac{\Delta L}{D_p^2} \right) \left(\frac{1-\varphi}{\varphi^3} \right) \quad (24)$$

Essas equações estão plotadas na Figura 13.

Para que as equações (22), (23) e (24) fiquem com unidades coerentes, isto é metro de coluna de fluido [mcf], com as equações (20) e (21), devemos dividi-las por “g”, e então:

$$\text{Ergun} \quad f = \frac{1,75u_s^2}{g} \left(\frac{\Delta L}{D_p} \right) \left(\frac{1-\varphi}{\varphi^3} \right) + \frac{150u_s}{g} \left(\frac{\Delta L}{D_p^2} \right) \left(\frac{1-\varphi}{\varphi^3} \right) \left(\frac{\mu}{\rho} \right) \quad [\text{mcf}] \quad (25)$$

é normalmente usada para análise da maioria dos casos de escoamento em engenharia e aplicada utilizando o termo de Darcy, sendo o termo de Blake – Kozeny para regime laminar e o termo de Burke – Plummer para escoamento turbulento.

Blake – Kozeny para escoamento laminar (para $Re_y < 10$)

$$f = \frac{150}{g} u_s \left(\frac{\Delta L}{D_p} \right) \left(\frac{1-\varphi}{\varphi^3} \right) \left(\frac{\mu}{\rho} \right) \quad [\text{mcf}] \quad (26)$$

Burke – Plummer para escoamento turbulento (para $Re_y > 1000$)

$$f = \frac{175}{g} u_s^2 \left(\frac{\Delta L}{D_p^2} \right) \left(\frac{1-\varphi}{\varphi^3} \right) \quad [\text{mcf}] \quad (27)$$

Para o escoamento turbulento, não é mais significativo o efeito viscosidade, mas sim, as dimensões e a rugosidade dos poros por onde o fluido vai passar. Não é o caso do meios porosos aqui em estudo.

Há de se considerar também que o escoamento por caminhos irregulares depende da constituição física da partícula, com formas uniformes ou não. A determinação da porosidade não é suficiente para definição do fenômeno a que chamamos de escoamento em meios porosos, pois existem também a variação granulométrica e o arranjo físico entre as partículas. Outra dificuldade ocorre na determinação com exatidão da velocidade real efetiva de escoamento em uma canícula individual.

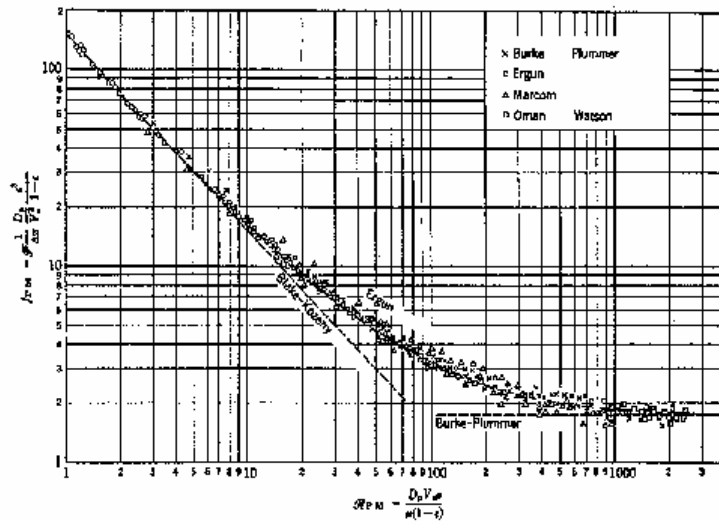


Figura 13 – Coeficiente de perda por atrito f para fluido de massa específica ρ , viscosidade μ , velocidade superficial u_s e porosidade ϕ . fluindo em um meio poroso de partículas de diâmetro D_p (Papanastasiou, 1994).

Sabe-se que ao se considerar uma seção reta do meio, podemos visualizar duas velocidades, uma perpendicular à seção e outra no sentido paralelo dela, que poderiam ser também definidas como permeabilidade perpendicular (K_{\perp}) e permeabilidade paralela ($K_{||}$) à direção do fluxo (FREIRE, 1982). Nesse trabalho não serão considerados tais fatos, daí considerar-se sempre uma velocidade média na direção da percolação natural (z).

2.5 CÁLCULO DO PARÂMETRO POROSIDADE OU FRAÇÃO DE VAZIO

Denominando:

ϕ = porosidade

A_s = área real de sólidos de uma seção do meio poroso;

A = área total da seção do meio poroso;

V_s = volume real de sólidos do meio poroso;

V = volume total do meio poroso;

a equação (6) também pode ser escrita como:

$$\phi = \frac{A - A_s}{A} = 1 - \frac{A_s}{A} \tag{28}$$

2.6 ESTIMATIVA DAS VELOCIDADES

Geralmente trabalha-se com os conceitos de velocidade superficial (u_s) também chamada de velocidade aparente, podendo ainda ser aproximada da velocidade média e de velocidade intersticial (u_i) ou velocidade efetiva, com a qual o fluido atravessa o meio poroso. Essa é a razão de se trabalhar com estimativas, e não com valores fixos. Pode-se estimar a velocidade superficial pela vazão dada pela Equação 1 e a velocidade intersticial pela Equação 2. Sabendo que o parâmetro porosidade (ϕ) pode ser escrito através da relação de áreas, temos:

$$\phi = \frac{A - A_s}{A} \Rightarrow A - A_s = \phi A \quad \text{ou} \quad V - V_s = \phi V \quad (29)$$

Considerando que o escoamento em meios porosos é laminar, a velocidade intersticial pode ser escrita em função da perda de carga unitária (J) e de um coeficiente de proporcionalidade (C), podendo ser escrito por:

$$u_i = CJ \quad (30)$$

Dessa forma, considerando-se poros cilíndricos de diâmetro D , o coeficiente C pode ser obtido da fórmula de Poiseville-Darcy-Weisbach, como a seguir:

$$h = f \frac{L v^2}{D 2g} \Rightarrow h = \frac{64}{\text{Re } \gamma} \frac{L V^2}{D 2g} \Rightarrow h = \frac{64}{\frac{\rho V D}{\mu}} \frac{L V^2}{D 2g} \Rightarrow h = \frac{32 \mu L V}{\gamma D^2} \quad (31)$$

$$\text{da Equação (12)} \Rightarrow J = \frac{32 \mu V}{\gamma D^2} \quad (32)$$

$$\text{portanto,} \quad V = J \left(\frac{\gamma D^2}{32 \mu} \right) = u_i \quad (\text{velocidade intersticial}) \quad (34)$$

$$\text{Comparando com a equação (30), temos que:} \quad C = \frac{\gamma D^2}{32 \mu} \quad (34)$$

A velocidade u_i é aquela usada nos balanços de massa, quantidade de movimento e de energia, enquanto a velocidade u_s é determinada ou medida.

Lembrando-se de que nem todos os poros estão disponíveis para o escoamento, alguns podem reter o fluido por atração gravimétrica, atração molecular, cavidades sem saída, ou outro efeito, pode-se então escrever a partir das equações (1) e (29) que;

$$u_s = \phi u_i \quad (35)$$

mostrando que a velocidade superficial u_s e a velocidade intersticial u_i guardam uma proporcionalidade entre si correspondente à porosidade ou fração de vazios do meio.

2.7 RAIOS HIDRÁULICO PARA UM MEIO POROSO

É necessário introduzir o conceito de Raio Hidráulico (R_h) por se tratar o meio poroso composto por canais irregulares e sinuosos, difíceis de se estimar a área de escoamento. Fazendo a relação entre a área molhada (A_m) e o perímetro molhado (P_m), pode-se obter o raio hidráulico da Equação (10) e para efeito de modelagem teórica, aproximar a estrutura sólida porosa de uma estrutura composta por esferas de mesmo diâmetro ou por tubos capilares paralelos.

A) Para uma estrutura porosa formada por esferas de mesmo diâmetro como na Figura 2 tem-se:

$$R_h = \frac{V - V_s}{A_m} = \frac{V_v}{A_m} \quad (36)$$

e, buscando as Equações (11) e (29), tem-se para o hidráulico do meio poroso formado por esferas:

$$Rh_{mpe} = \frac{V - V_s}{A_m} = \frac{V_v}{A_m} = \frac{\varphi V}{A_m} \quad (37)$$

A área molhada corresponde ao contato total entre o fluido e o sólido considerando o número de partículas (N_p) esféricas equivalente às partículas do meio, cada uma com área (A_p), volume (V_p) e raio (R_p), formando um volume total (V), todas apenas tangenciando as outras.

Portanto tem-se:
$$Rh_{mpe} = \frac{\varphi V}{A_m} = \frac{\varphi V}{N_p \cdot A_p} \quad (38)$$

Essa equação mostra que o meio poroso pode ser substituído por uma estrutura sólida de partículas esféricas com área molhada $A_m = N_p \times A_p$, logo, pela Equação (4) o Rh_{mpe} pode ser escrito:

$$Rh_{mpe} = \frac{\varphi V}{N_p \cdot A_p} = \frac{\varphi V}{\frac{V_s}{V_p} \cdot A_p} = \frac{\varphi \cdot V \cdot V_p}{A_p \cdot V_s} = \frac{\varphi \cdot V_p}{\frac{V_s}{V} \cdot A_p} \quad (39)$$

e sendo
$$\varphi = 1 - \frac{V_s}{V} \Rightarrow \frac{V_s}{V} = 1 - \varphi \quad (40)$$

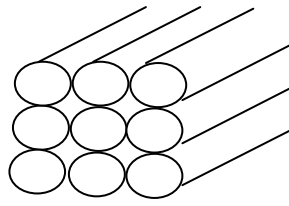
da combinação dessas equações resulta:

$$Rh_{mpe} = \frac{\varphi V_p}{(1 - \varphi) A_p} \quad (41)$$

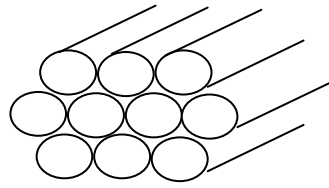
Escrevendo Rh_{mpe} em função do raio ou do diâmetro da partícula, pode-se ter:

$$Rh_{mpe} = \frac{\varphi \left(\frac{4}{3} \pi R_p^3 \right)}{(1 - \varphi) 4\pi R_p^2} = \frac{4\varphi R_p^3}{3(1 - \varphi) \cdot 4R_p^2} \Rightarrow Rh_{mpe} = \frac{\varphi R_p}{3(1 - \varphi)} \quad \text{ou} \quad Rh_{mpe} = \frac{\varphi D_p}{6(1 - \varphi)} \quad (42)$$

B) para uma estrutura porosa formada por tubos capilares como na Figura 14,



a) arranjo cúbico
canal livre
porosidade $\phi = 0,524$



b) arranjo ortorrômbico
canal aberto
porosidade $\phi = 0,6046$

Figura 14 – Representação de um meio poroso composto de tubos capilares de comprimento “l”.

O raio hidráulico para um meio poroso composto por tubos capilares (Rh_{mptc}) é dado, análogamente, como nas Equações (10) e (37) por:

$$Rh_{mptc} = \frac{V - V_s}{Am} = \frac{V_v}{Am} \quad \text{e} \quad \phi = \frac{V - V_s}{V} \Rightarrow V - V_s = \phi V$$

e portanto,

$$Rh_{mptc} = \frac{\phi V}{(1 - \phi)Am} \quad (43)$$

Considerando N_c o número de tubos capilares equivalente ao meio poroso, cada um com área interna A_c , volume interno V_c e raio R_c , formando um volume total V .

O raio hidráulico é dado pelas Equações (41) a (47) e mostra que o meio poroso pode ser substituído por uma estrutura de tubos capilares paralelos arranjados como na Figura 32, sendo a área molhada total do tubo dada por:

$$Am = N_c \cdot A_{tc} \quad (44)$$

logo,

$$N_c = \frac{Am}{A_{tc}} \quad (45)$$

qual ainda ser escrito como: $Nc = \frac{Vs}{V_{tc}}$. (46)

Portanto, o Rh_{mpc} pode ser escrito por:

$$Rh_{mpc} = \frac{\varphi V}{Nc \cdot A_{tc}} = \frac{\varphi V}{\frac{Vs}{V_{tc}} \cdot A_{tc}} = \frac{\varphi \cdot V \cdot V_{tc}}{A_{tc} \cdot Vs} \quad (47)$$

sendo $\varphi = 1 - \frac{Vs}{V} \Rightarrow \frac{Vs}{V} = 1 - \varphi$

pode ser escrito:

$$Rh_{mpc} = \frac{\varphi \cdot V_{tc}}{(1 - \varphi)A_{tc}} \quad (48)$$

Escrevendo Rh_{mpc} em função do raio ou do diâmetro capilar, tem-se:

$$Rh_{mpc} = \frac{\varphi \left(\frac{\pi D_c^2}{4} \right) \cdot l}{(1 - \varphi) \pi D_c l} = \frac{\varphi (\pi D_c^2) l}{4(1 - \varphi) \pi D_c l} \Rightarrow Rh_{mpc} = \frac{\varphi D_c}{4(1 - \varphi)} \quad \text{ou} \quad Rh_{mpc} = \frac{\varphi R_c}{2(1 - \varphi)} \quad (49)$$

Comparando as Equações (42) e (43), pode-se escrever a relação entre o diâmetro da esfera equivalente e o comprimento do tubo capilar L,

$$Rh_{mpe} = Rh_{mpc} \Rightarrow \frac{\varphi De}{6(1 - \varphi)} = \frac{\varphi L}{(1 - \varphi)} \Rightarrow De = 6 L \quad (50)$$

2.8 NÚMERO DE REYNOLDS PARA UMA ESTRUTURA POROSA.

a) Estrutura porosa formada por esferas de mesmo diâmetro.

a1) Número de Reynolds aparente já definido na Equação (9) pode ser escrito agora com a velocidade superficial u_s ou velocidade aparente como:

$$\begin{aligned} \text{Re } y &= \frac{\rho u_s D}{\mu} = \frac{\rho u_s 2Rh_{mpe}}{\mu} \Rightarrow \text{Re } y = \frac{\rho u_s \phi R_p}{3(1-\phi)\mu} \Rightarrow \\ \Rightarrow \text{Re } y_{ae} &= \frac{\rho u_s \phi R_p}{3(1-\phi)\mu} \quad \text{ou} \quad R'ey_{ae} = \frac{\rho u_s \phi D_p}{3(1-\phi)\mu} \end{aligned} \quad (51)$$

que são os Números de Reynolds Aparente ($\text{Re}_{y_{ae}}$) e o Número de Reynolds Efetivo ($R'ey_{ee}$) do meio composto por esferas equivalentes.

a2) Analogamente, o Número de Reynolds efetivo para velocidade efetiva u_i , velocidade efetiva ou intersticial é dado por:.

$$u_s = \phi u_i \Rightarrow \text{Re } y_{ee} = \frac{\rho u_i \phi^2 R_p}{3(1-\phi)\mu} \quad \text{ou} \quad R'ey_{ee} = \frac{\rho u_i \phi^2 D_p}{6(1-\phi)\mu} \quad (52)$$

b) Estrutura porosa formada por tubos capilares.

b1) Número de Reynolds aparente (u_s velocidade aparente)

$$\begin{aligned} \text{Re } y &= \frac{\rho u_s D}{\mu} = \frac{\rho u_s 2Rh_{mpc}}{\mu} = \frac{\rho u_s \phi R_c}{2(1-\phi)\mu} \Rightarrow \\ \Rightarrow \text{Re } y_{ac} &= \frac{\rho u_s \phi R_c}{2(1-\phi)\mu} \quad \text{ou} \quad R'ey_{ac} = \frac{\rho u_s \phi D_c}{4(1-\phi)\mu} \end{aligned} \quad (53)$$

b2) Número de Reynolds efetivo (u_i velocidade efetiva)

$$u_s = \phi u_i \Rightarrow \text{Re } y_{ec} = \frac{\rho u_i \phi^2 R_p}{2(1-\phi)\mu} \quad \text{ou} \quad R'ey_{ec} = \frac{\rho u_i \phi^2 D_p}{4(1-\phi)\mu} \quad (54)$$

2.9 DETERMINAÇÃO DE CORRELAÇÕES IMPORTANTES PARA OS MEIOS POROSOS COMPOSTOS DE ESFERAS E DE TUBOS CAPILARES

Usando “Ae” para a área, “Ve” para o volume e “De” para o diâmetro da esfera, podemos escrever:

$$A_e = 4 \pi (R_e)^2 = \pi (D_e)^2 \quad \Rightarrow \quad A_e = a (D_e)^2 \quad (55)$$

$$V_e = 4/3 \pi (D_e/2)^3 = \pi / 6 (D_e)^3 \quad \Rightarrow \quad V_e = \pi/6 (D_e)^3 \quad (46)$$

Relacionando essas equações $A_e = a D_e^2$ com $V_e = b D_e^3$, pode ser escrito que a relação entre a área e volume da esfera é dado por:

$$\lambda = \frac{a}{b} = \frac{\pi}{\frac{\pi}{6}} = \frac{6}{D_e} \quad (57)$$

que vem a confirmar a Equação (50), pois λ é uma relação entre a área da seção e volume da esfera equivalente, ou em outras palavras, o comprimento de um cilindro de diâmetro equivalente ao da esfera de mesmo volume.

As relações até aqui verificadas permitem também admitir, por analogia, que também existe uma relação de proporcionalidade entre os meios e o raio hidráulico deles compostos por esferas equivalentes e de tubos capilares. Podendo ser escrito para efeito de confirmação dos desenvolvimentos até aqui apresentados, deve-se verificar a relação existente entre a vazão (Q_c) de um meio poroso composto por tubos capilares e seu equivalente, composto por esferas com vazão (Q_e). Segundo Papanastous (1994), a vazão para escoamento através de uma estrutura porosa é:

$$Q_c = n \frac{\pi}{8\mu} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta L} \cdot R_c^4 \quad (58)$$

sendo: Q_c = vazão volumétrica

R_c = raio do tubo capilar

n = número de tubos capilares do meio

μ = viscosidade do fluido

ΔP = variação de pressão

ΔL = variação do comprimento dos tubos

$$\begin{aligned}
u_i &= \frac{Q_c}{A_v} \Rightarrow Q_c = u_i \cdot A_v = u_i \cdot \varphi A \Rightarrow \\
\Rightarrow u_i \cdot \varphi A &= n \frac{\pi}{8\mu} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta L} \cdot R_c^4 \Rightarrow \\
\Rightarrow n &= \frac{2,548 \cdot u_i \cdot \varphi A \mu \Delta L}{\Delta P \cdot R_c^4} \quad \text{ou} \quad n = \frac{2,548 \cdot u_s A \Delta L}{\Delta P \cdot R_c^4} \mu \quad (59)
\end{aligned}$$

e aplicando as correlações anteriores para transformar a vazão Q_c nos tubos em vazão Q_e entre as esferas, verifica-se também uma correlação entre o diâmetro do tubo capilar e o diâmetro da partícula equivalente D_p :

$$\frac{D_p}{D_c} = \frac{6}{4} \Rightarrow D_p = \frac{6}{4} D_c \Rightarrow R_p = \frac{3}{2} R_c \quad (60)$$

Considerando ainda, que “n” indica o número de vazios na estrutura de tubos capilares, aplicando isso ao volume, tem-se:

$$n(\pi R_c^2 L) = V_{V_e} \quad (61)$$

Para uma estrutura de esferas arranjadas de forma cúbica (Figura 2) e porosidade $\varphi = 0,476$, então,

$$\begin{aligned}
V - V_s &= \varphi V \quad \text{e} \quad V - V_{V_e} = 0,476 V \quad \text{então,} \\
V - V_s &= V_{V_e} \quad (62)
\end{aligned}$$

portanto, substituindo na Equação (61) obtém-se;

$$n(\pi R_c^2 L) = 0,476(8R_e^3) \Rightarrow n(\pi R_c^2 L) = 3,808 R_p^3 \quad (63)$$

em que $8R_e^3$ é o volume do cubo envolvente da esfera e R_p o raio da partícula equivalente.

Em outras palavras, o volume de vazios entre as esferas de um meio poroso composto por esferas de mesmo diâmetro e arranjado de forma cúbica é dado por:

$$Vv_e (\text{arr. Cúbico}) = 3,808 R_p^3 \quad (64)$$

De forma análoga, e considerando os arranjos ortorrômnicos de canal aberto (Figura 2) e ortorrômnico de canal bloqueado (Figura 2), pode-se escrever:

$$Vv_e (\text{arr. Ortorrômnico aberto}) = 3,163 R_p^3 \quad (65)$$

$$Vv_e (\text{arr. Ortorrômnico bloqueado}) = 2,415 R_p^3 \quad (66)$$

Substituindo a Equação (64) na (61), tem-se:

$$n(\pi R_c^2 L) = 3,808 R_e \Rightarrow n = \frac{1,21 \cdot R_e^3}{L \cdot R_c^2} \quad (67)$$

que, substituindo na Equação (58), fornece:

$$Q_c = n \frac{\pi}{8\mu} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta L} \cdot R_c^4 = \left(\frac{1,21 \cdot R_e^3}{R_c \cdot L} \right) \frac{\pi}{8\mu} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta L} \cdot R_c^2 \quad (68)$$

$$Q_c = \frac{1,21 \cdot R_e^3}{L} \frac{\pi}{8\mu} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta L} \cdot R_c^2 \quad (69)$$

Essas equações fornecem a vazão nos meios porosos equivalentes.

2.10 DETERMINAÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE O RAIOS DA ESFERA E O RAIOS DO TUBO CAPILAR PARA MEIOS POROSOS EQUIVALENTES.

Para que as condições de escoamento sejam iguais, os espaços de vazios devem ser equivalentes nas duas estruturas esquematizadas, como na Figura 2, com a Figura 14a e Figura 2, com a Figura 14b, equivalentes aos arranjos cúbicos de canal livre e ortorrômnicos de canal aberto. É importante notar que não existe relação entre arranjos ortorrômnicos de canal bloqueado de esferas com o mesmo arranjo para tubos. Dessa forma, fazendo iguais os volumes dos espaços vazios para os dois meios porosos equivalentes, tem-se;

$$\begin{aligned} V_{v_e} = V_{v_c} &\Rightarrow 3,808 Re^3 = n\pi Rc^2 L \Rightarrow \\ Rc^2 = \frac{3,808 \cdot Rp^3}{\pi L} &\Rightarrow Rc^2 = \frac{1,21 \cdot Re^3}{L} \end{aligned} \quad (70)$$

Através da relação de raios hidráulicos, Equações (42) e (49) e sendo considerando $Rh_{mpe} = Rh_{mptc}$, para que haja equivalência entre os meios, pode ser escrito:

$$\frac{\varphi R_p}{3(1-\varphi)} = \frac{\varphi R_c}{2(1-\varphi)} \Rightarrow \frac{R_p}{R_c} = \frac{3}{2} \quad (71)$$

pode-se ter:

$$\begin{aligned} Q_e = \frac{1,21}{L} \cdot \frac{\pi}{8\mu} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta L} \cdot Rp^3 \cdot Rc^2 &= \frac{1,21}{L} \cdot \frac{\pi}{8\mu} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta L} \cdot Rp^3 \cdot \left(\frac{2}{3}Rp\right)^2 = \\ = \frac{\pi}{8\mu} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta L} \cdot \frac{1,46Rp^5}{L} &\Rightarrow Q_e = \frac{1}{L} \cdot \frac{0,21}{\mu} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta L} \cdot Rp^5 \end{aligned} \quad (72)$$

2.11 DETERMINAÇÃO DAS VELOCIDADES SUPERFICIAL E INTERSTICIAL PARA O MEIO POROSO-

2.11.1- Estrutura de Esferas.

Dada a equação (69) e considerando que $u_s = Q_e / A$, em que A é área da seção reta do cubo envolvente da esfera, Figura 15, pode ser escrito:

$$A = 2 R_p \times 2 R_p \quad \Rightarrow \quad A = 4 R_p^2 \quad (73)$$

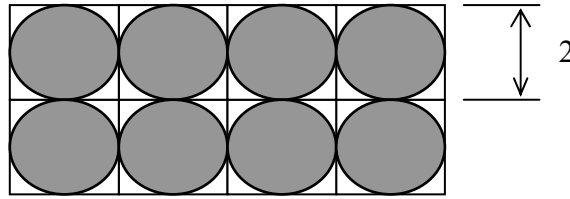


Figura 15 – Representação dos espaços vazios entre as partículas equivalentes de raio R_p envolvidas por quadrados de lado $2 R_p$ (arranjo cúbico de canal livre).

Dado que velocidade superficial é dada por $u_s = \frac{Q_e}{A}$ e a área do transversal do cubo envolvente da esfera dada por $4 R_p^2$, fazendo as substituições necessárias, tem-se que essa velocidade pode ser escrita:

$$u_s = \frac{\pi}{8\mu} \cdot \frac{1,46}{4R_p^2} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta L} \cdot \frac{R_p^6}{L^2} \Rightarrow u_s = \frac{1,46\pi}{32\mu} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta L} \cdot \frac{R_p^4}{L^2} \quad (74)$$

a) A porosidade do meio poroso composto por esferas (arranjo cúbico de canal livre) determinada por dados volumétricos φ_v é dada por:

$$\varphi_v = 1 - \frac{V_s}{V} = 1 - \frac{\frac{4}{3}\pi R_e^3}{8R_e^3} = 1 - 0,523 \quad \Rightarrow \quad \varphi_v = 0,476 \quad (75)$$

Para $\varphi_v = 0,476$, a velocidade intersticial é expressa por:

$$u_i = \frac{Q_e}{\varphi_v A} = \frac{\frac{\pi}{8\mu} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta L} \cdot \frac{1,46R_p^6}{L^2}}{0,476 \cdot 4R_e^2} \Rightarrow u_i = \frac{1,46\pi}{15,23\mu} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta L} \cdot \frac{R_p^4}{L^2} \quad (76)$$

que, comparada às equações (74) e (83) resulta em:

$$u_i > u_s \quad (77)$$

b) A porosidade do meio poroso composto por esferas (arranjo ortorrômico)

$$\phi_v = 1 - \frac{V_s}{V} \Rightarrow \phi = 0,3954 \quad (78)$$

$$u_s = \frac{Q_e}{A} = \frac{1,46\pi}{32\mu} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta L} \cdot \frac{R_p^4}{L^2} \quad (79)$$

$$u_i = \frac{Q_e}{\phi A} \cdot \frac{\pi}{8\mu \cdot 0,3954 \cdot 4R_p^2} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta L} \cdot \frac{1,46R_p^2}{L^2} \Rightarrow u_i = \frac{1,46\pi}{12,65\mu} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta L} \cdot \frac{R_p^4}{L^2} \quad (80)$$

que, novamente comparadas com a equação (74) resulta em:

$$u_i > u_s \quad (81)$$

2.11.2- Estrutura de Tubos Capilares.

a) Velocidade Superficial

$$u_s = \frac{Q_c}{A} = \frac{n \frac{\pi}{8\mu} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta L} \cdot R_c^4}{n\pi R_c^2} \Rightarrow u_s = \frac{1}{8\mu} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta L} \cdot R_c^2 \quad (82)$$

b) Velocidade Intersticial.

$$\phi = \frac{A - A_s}{A} \Rightarrow A_v = \phi A$$

$$u_i = \frac{Q_c}{A} = \frac{n \frac{\pi}{8\mu} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta L} \cdot R_c^4}{\phi n\pi R_c^2} \Rightarrow u_i = \frac{1}{8\phi\mu} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta L} \cdot R_c^2 \quad (83)$$

2.11.3 Determinação da Permeabilidade K

3.11.3.1 Estrutura de Esferas

a) Arranjo Cúbico de canal livre.

Usando a Equação 480 – pg. 179, do Papanastosiou (1994), em que a velocidade superficial em uma direção é dada por:

$$u = -\frac{K}{\mu} \frac{d}{dx} (P + \rho g z) \quad \text{e igualando a Equação (74)} \quad (84)$$

obtem-se:
$$K = \frac{0,666 \cdot R_p^4}{L^2} \cdot \frac{\Delta L}{\Delta P} \quad (85)$$

b) Arranjo Ortorrômico de canal aberto

Igualando
$$u_i = \frac{1,46 \cdot \pi \cdot \Delta P \cdot R_p^4}{15,23 \mu \cdot \Delta L \cdot L^2} = \frac{0,36 \cdot \Delta P \cdot R_p^4}{\mu \cdot \Delta L \cdot L^2} \quad \text{como em (84) tem-se:}$$

$$K = \frac{0,36 \cdot R_p^4}{L^2} \cdot \frac{\Delta L}{\Delta P} \quad (86)$$

3.11.3.2 Estrutura de Tubos

a) Arranjo Cúbico de canal livre.

Procedendo analogamente para u_s dado na Equação (82) $\Rightarrow K = \frac{1}{8} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta L} \cdot R_c^2 \quad (87)$

b) Arranjo Ortorrômico de canal aberto.

Procedendo analogamente para u_i dado na Equação (83) $\Rightarrow K = \frac{1}{8\phi} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta L} R_c^2 \quad (88)$

c) De uma outra maneira, ainda pode-se calcular K como a seguir:

fazendo A_s (área ocupada por sólidos) = área do quadrado envolvente de n tubos capilares - área dos tubos capilares, isto é,

$$A_s = l^2 - n\pi R_c^2 \quad (89)$$

e substituindo na expressão

$$u_i = \frac{Q_c}{\varphi A} = \frac{Q_c}{(l^2 - n\pi R_c^2)} = \frac{n \frac{\pi}{8\mu} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta L} \cdot R_c^4}{(l^2 - n\pi R_c^2)} \quad \text{que igualando a } u_i = \frac{K}{\mu} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta L} \text{ e simplificando}$$

$$\text{obtém-se:} \quad K = \frac{R_c^2}{8} \cdot \frac{1}{\frac{l^2}{n\pi R_c^2} - 1} \quad (90)$$

fazendo: $A_s = l^2 - n\pi R_c^2$, substituindo e rearranjando, obtém-se:

$$K = \frac{R_c^2}{8} \cdot \frac{1}{\left[\frac{l^2}{n\pi R_c^2} - \frac{n\pi R_c^2}{n\pi R_c^2} \right]} = \frac{R_c^2}{8} \cdot \frac{1}{\left[\frac{A}{A_v} - 1 \right]} = \frac{R_c^2}{8} \cdot \frac{1}{\left[\frac{1}{\varphi} - 1 \right]} = \frac{R_c^2}{1 - \varphi} = \frac{R_c^2}{8} \cdot \frac{\varphi}{1 - \varphi} \Rightarrow$$

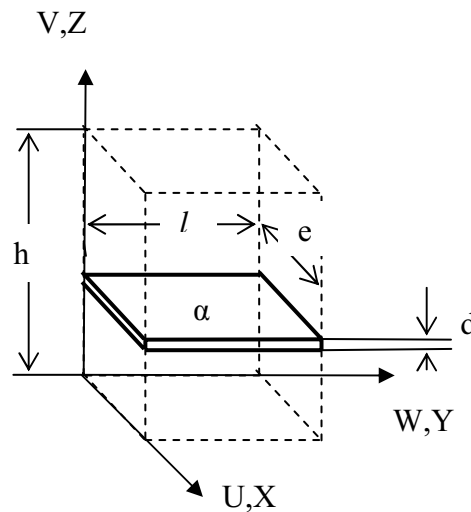
$$K = \frac{\varphi R_c^2}{8(1 - \varphi)} \quad (91)$$

portanto:

$$\begin{array}{l} \text{para } K = \begin{array}{l} \nearrow \infty \Rightarrow \frac{l^2}{n\pi R_c^2} = 1 \Rightarrow A_T = A = A_c \Rightarrow \text{Tubo livre} \\ \searrow 0 \Rightarrow R_c = 0 \Rightarrow \text{sólido (meio impermeável)} \end{array} \end{array}$$

2.12 FORMULAÇÃO PARA CÁLCULO DA VAZÃO POR MODELAGEM DIFERENCIAL.

Segundo HOUPEURT (1975), STREETER (1961) e PFEFFERMANN (1968), pode-se formular uma expressão para estimar valores de vazão em meio poroso, considerando uma fissura muito pequena (de forma plana) ao longo de um eixo, conforme mostrado na Figura 16.



Escoamento unidimensional em Z ($U=0, W=0$)

Plano α = frente de avanço da percolação

Condições de contorno:

Para $Z = 0 \Rightarrow P = P_0$

onde

P_0 = pressão no plano xy

$Z = h \Rightarrow P = P_2$ ($P_2 < P_0$)

P_2 = pressão no topo da coluna.

Figura 16- Esquema de um elemento dz que pode representar um poro.

Considerando a equação de Navier-Stokes, na sua forma geral, na direção de Z, e procedendo uma análise de ordem de grandeza nos termos, pode-se obter a equação que responde, de forma satisfatória, aos valores da velocidade de percolação no meio poroso,

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} + \rho \vec{V} \left(\nabla \vec{V} \right) = \rho \vec{g} - \nabla P + \mu \nabla^2 \vec{V} \quad (92)$$

e fazendo as considerações de análise dos termos, pode-se chegar à equação abaixo:

$$\text{Escoamento transitório } \frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} - \frac{\mu V}{\rho K} \quad (93)$$

$$\text{Escoamento Permanente } \frac{V \partial V}{\partial z} + \frac{\mu V}{\rho K} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial P}{\partial z} \quad (94)$$

$$\text{ou, } \frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\mu V}{\rho K} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} \quad (95)$$

para as condições de contorno:

$$t = 0 \Rightarrow V = 0 \text{ e } P = P_0$$

$$t > 0 \Rightarrow z = 0 \Rightarrow V_0 = Q / A$$

$$z = h \Rightarrow V = 0$$

$$\text{sendo } \frac{\mu V}{\rho K} = \text{Termo de Darcy} \text{ e } Q = \frac{KA}{\mu} \frac{dP}{dz} \quad (96)$$

com: Q = vazão

K = permeabilidade

A = área transversal ao escoamento

μ = viscosidade cinemática

dP/dz = gradiente de pressão que empurra o escoamento

2.13 DEFINIÇÃO DAS ÁREAS DE ESCOAMENTO E SÓLIDA EM UM MEIO POROSO

Considerando serem os poros do meio poroso o espaço pelo qual o fluido escoar, pode-se escrever:

Área de Escoamento (A_v) = Área de Vazios (Poros) = Porosidade do Meio (ϕ) em termos absolutos, isto é, em termos percentuais, portanto, pode ser concluído que a

$$\text{Área Sólida do Meio } (A_s) = 1 - \phi \quad (97)$$

$$\text{Sendo "A" a área total, } A - A_s = \phi A \quad (98)$$

então, $\phi = (A - A_s) / A \Rightarrow \phi = 1 - (A_s / A)$ o que nos permite concluir que em termos de área:

$$A_v = \phi \quad (99)$$

$$A_s = 1 - \phi \quad (100)$$

2.14 COMPARAÇÃO ENTRE AS VAZÕES

Considerando a equivalência entre os dois meios porosos e comparando as vazões obtidas pelas Equações (58) e (67), vazões dos meios compostos por tubos capilares e por esferas, respectivamente, para se ter uma idéia do relacionamento entre eles, essas equações podem ser igualadas,

$$Q_c = n \frac{\pi}{8\mu} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta L} \cdot R_c^4 = Q_e = \frac{\pi}{8\mu} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta L} \cdot \frac{1,46 \cdot R_e^6}{L^2}, \quad e$$

considerando ainda para este caso os raios das esferas iguais aos dos tubos capilares de parede infinitamente fina,

$$R_e = R_c = R$$

Pode ser concluído:

$$n = \sqrt{R/L} \quad (101)$$

ou seja, obtém-se, com o valor do raio das esferas e o comprimento dos tubos capilares (L), o número de tubos (n) em meios porosos equivalentes de vazões e raios iguais. Entretanto, essa condição só ocorre no plano imaginário em que as esferas se tocam, considerando a mesma direção do fluxo para ambos os meios. Isso porque, em uma frente de fluxo, logo após o plano, o fluido preenche os espaços vazios entre as esferas, voltando novamente a repetir a condição no plano seguinte. Tal condição não ocorre no meio equivalente formado por tubos capilares que tem fluxo de forma constante.

2.15 COMPARAÇÃO ENTRE POROSIDADES DOS MEIOS EQUIVALENTES

Comparando os meios conforme mostrado na Figura 17, verifica-se que a porosidade de um meio composto por esferas é o inverso do outro composto por tubos capilares.

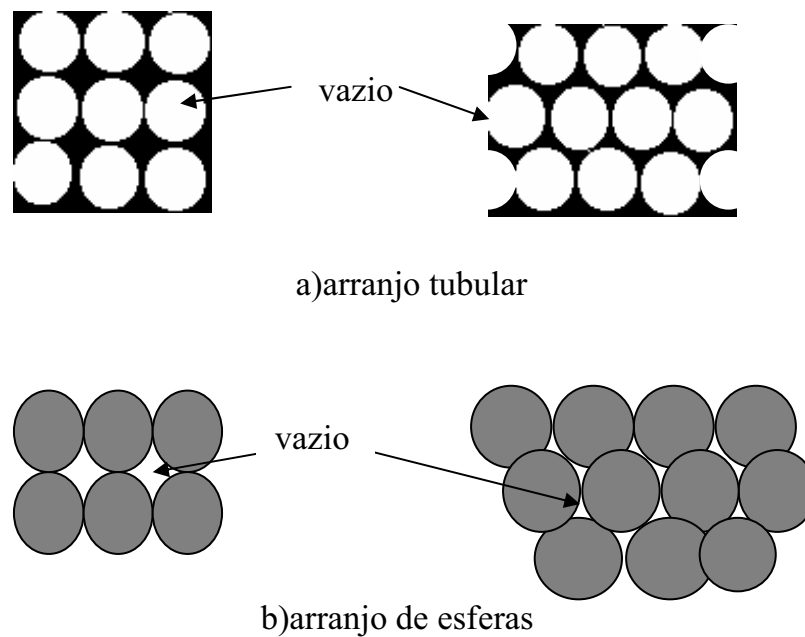


Figura 17 – Arranjo entre os meios equivalentes

Nessas condições o índice de porosidade pode ser escrito como na Tabela 4:

Tabela 4 – Porosidade dos meios equivalentes

ÍNDICE DE POROSIDADE ϕ DOS MEIOS POROSOS EQUIVALENTES		
Meio Poroso Composto por	Arranjo Cúbico Canal livre	Arranjo Ortorrômico Canal aberto
Esferas	0,476	0,3954
Tubos Capilares	0,524	0,6046

CAPÍTULO 3 CONSIDERAÇÕES E MEDIÇÕES EXPERIMENTAIS

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este trabalho teve início nos experimentos desenvolvidos em FRANÇA (2000) que constituiu na determinação experimental do valor dos esforços a que as partículas de um meio poroso estão submetidas quando sujeitos à percolação de água. Para isso, tomou-se como corpo de prova para os ensaios tijolos comuns de barro cozido, de dimensões 200 x 100 x 50 mm, por serem corpos porosos de fácil acesso, de baixo custo, por serem largamente empregados e por sofrerem as conseqüências dos efeitos da percolação da água.





Os tijolos são brutos, de procedência das Olarias NM de Nelson Medeiros, produzidos com argila do município de Paraibuna, e de José Isaías, produzidos com argila do município de Cruzeiro, ambos no Vale do Paraíba, SP. Tais tijolos são de composição argilosa homogênea de boa qualidade (com pouca ou sem areia), conformação artesanal, queima uniforme em fornos típicos a óleo ou a lenha, dimensões constantes e muito pouca deformação estrutural. Foram selecionados aleatoriamente em um distribuidor, de um empilhamento por mais de 30 dias, protegidos contra chuvas e de mesma fornada (ver características e aspectos físicos na Tabela 5).

Para a determinação dos esforços em questão foi planejada e construída uma bancada de testes que propiciasse, em um ambiente de laboratório (laboratório de mecânica dos fluidos da FAENQUIL), condições de execução e reprodução dos ensaios, com boa confiabilidade dos resultados.

Os ensaios constaram da medição da deformação dos corpos de prova nas três dimensões, longitudinal, transversal e horizontal, quando submetidos à umidificação por gotejamento de água, de forma lenta e contínua. Com os dados levantados, tabelados e avaliados, buscou-se nos fundamentos dos escoamentos de fluidos em meios porosos e em literaturas pertinentes referenciadas, as ferramentas para a determinação dos esforços provocados pelo deslocamento da água nos espaços vazios

por entre as partículas da argila. Foram feitos testes em tijolos individualmente, em uma pequena parede construída de forma normal com argamassa comumente utilizada e em um bloco conformado com a mesma argamassa, para determinação das condições desta.

Tabela 5- Aspectos físicos e características dos corpos de prova porosos

Aspectos dos corpos de prova – Meios Porosos			
Amostra Identificação	Aspecto	Característica	Fabricante
A		Mais Claro. Prensado à máquina. Queimado em forno a lenha.	Olaria de Paraibuna SP Produção Jun 2001
B		Mais escuro. Prensado à máquina.	Olaria do Embaú Cruzeiro SP
C		Queimado em forno a lenha.	Produção Jul 2001
D		<i>Comum para parede a vista.</i> Prensado à máquina. Queimado em forno a lenha	Olaria de Paraibuna SP Produção Jun 2001

Nota: Amostras B e C de fornadas diferentes.

A. C. França

Para medição das deformações foram utilizados instrumentos de medição com grau de precisão da ordem de 0,01 mm e de boa procedência (Tesa e Mitutoyo). Nos

cálculos foi considerada precisão na casa dos centésimos, e nos arredondamentos, desconsiderados os valores imensuráveis que uma obra de alvenaria requer. A tabela 6 apresenta os resultados obtidos.

Na continuidade desse trabalho será enfocada a determinação da velocidade de percolação de forma a traçar o seu perfil, buscando um modelo matemático que permita prever valores e comportamentos.

Tabela 6 – Deformações, vazão e velocidades médias obtidas experimentalmente

Amostra	Deformação (mm)			Velocidade Média (mm/s)	Vazão (ml/s)
	Transversal	Longitudinal	Horizontal		
Tijolo	0,035	0,016	0,013	$0,250 \times 10^{-5}$	0,0107
Argamassa	0,050	0,030	0,010	$1,378 \times 10^{-5}$	0,0413
Tijolo com Argamassa	0,150	0,025	0,050	$0,348 \times 10^{-5}$	0,01475

Para a determinação do volume ocupado por vazios e do volume ocupado por partículas sólidas de um meio poroso, em especial neste estudo, para um corpo de prova composto de argila (tijolo comum de barro cozido), considera-se uma seção transversal, cuja constituição é apresentada na Figura 18.

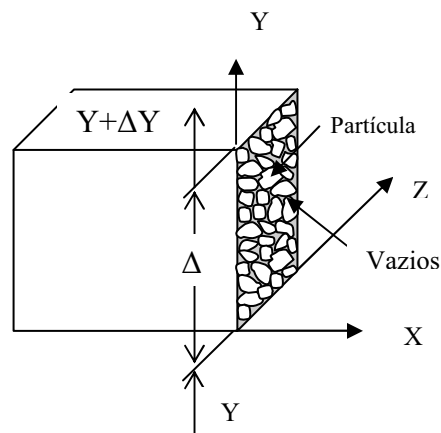


Figura 18- Seção transversal de um meio poroso.

Para melhor entendimento, desconsidera-se a forma irregular da partícula da mistura de barro (areia e argila) para tijolos, considerando-a esférica e com estruturas como propostas nas Figuras 19 e 20, conseqüentemente, pode-se considerar o arranjo físico de distribuição entre elas como cúbico ou ortorrômico, ambos de passagens livres. Isto porque para partículas com diâmetro médio $< 0,005$ mm, o que serve para o caso em estudo, pode-se considerar os espaços vazios como capilares. Dessa forma, as partículas arranjadas são dispostas como na Figura 19, em que D_{MA} é o diâmetro médio da partícula de argila.

$$A_P = \frac{\pi}{4} D_{MA}^2 \quad (\text{área da esfera cortada por um plano que passa pelo seu centro}) \quad (102)$$

A_P é a área da seção transversal da partícula,

$$A_Q = D_{MA}^2 \quad (103)$$

A_Q a área do quadrado envolvente da partícula e

$$A_V = (A_Q - A_P) = (1 - \pi/4) D_{MA}^2 = 0,214(D_{MA}^2) \quad (104)$$

A_V a área de vazios na seção transversal arranjada.

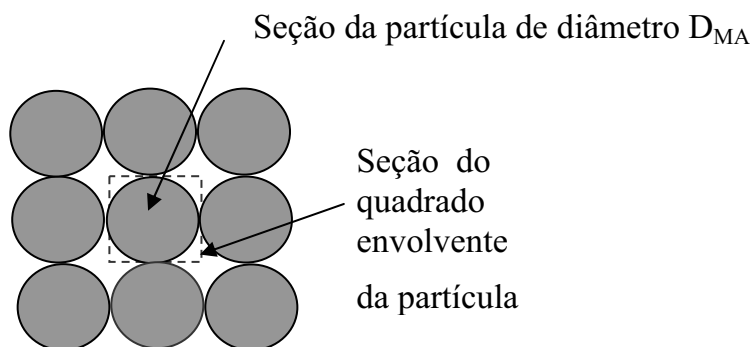


Figura 19- Arranjo das partículas de forma cúbica de passagem livre.

Levando-se em conta o valor do diâmetro médio da argila igual a 0,005 mm, obtem-se:

- Área do quadrado envolvente da partícula : $A_Q = 2,5 \times 10^{-5} \text{ mm}^2$. (105)

- Área da seção reta da partícula: $A_P = 1,97 \times 10^{-5} \text{ mm}^2$ (106)

o que corresponde a 78,6% em área de ocupação da seção transversal total mostrada.

- Área de vazios entre partículas: $A_V = 0,535 \times 10^{-5} \text{ mm}^2$ (107)

o que corresponde a 21,4% em área de ocupação da seção transversal mostrada.

Portanto, teoricamente, para uma seção reta de um meio poroso de argila, 78,6% em área é ocupada por partículas e 21,4% em área de espaços vazios por onde a água poderá fluir, para o caso da estrutura mostrada acima, ou $\phi = 0,476$ (Figura 2).

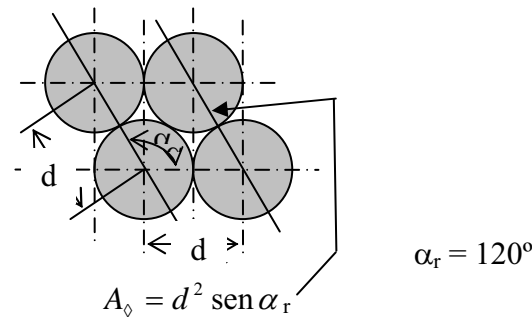


Figura 20- Arranjo das partículas de forma ortorrômbica de passagem livre.

Com o mesmo raciocínio anterior, pode-se calcular a área de vazios para uma distribuição ortorrômbica, conforme mostrado na Figura 20. Nesta condição tem-se:

- Área do paralelogramo envolvente: $A_E = 2,165 \times 10^{-5} \text{ mm}^2$ (108)

- Área da seção reta da partícula: $A_P = 1,965 \times 10^{-5} \text{ mm}^2$ (109)

- Área de vazios entre partículas: $A_V = 0,202 \times 10^{-5} \text{ mm}^2$ (110)

correspondente a 10,29% da seção reta do meio poroso, ou $\phi = 0,3954$ (Figura 2).

Entre as duas configurações teóricas, cúbica e ortorrômbica, existe uma relação de aproximadamente 1,2 vezes mais espaços vazios para a primeira. Se esse fato for aliado ao tamanho aleatório das partículas, pode-se verificar uma grande diversificação de resultados a serem esperados. Basta uma pequena alteração no arranjo das partículas para que se obtenham valores completamente diferentes de porosidade.

3.2- MEDIÇÃO DO TAMANHO DOS POROS

Considerando que os poros de um meio formam interstícios contínuos e interconectados, estatisticamente homogêneos, entre as partículas mal ajustadas, formam o corpo poroso. Esses interstícios ocupam parte do volume do meio, podendo chegar a 80% em alguns casos, esses poros são classificados pelo seu tamanho em:

MICROPORO – menores que 2nm (2×10^{-6} mm)

MESOPORO – compreendido entre 2 e 50nm (2 e 50×10^{-6} mm)

MACROPORO – maiores que 50nm (50×10^{-6} mm)

Deve ser observado que as faixas são bem amplas, o que contribui para uma pequena alteração no arranjo das partículas para serem obtidos valores completamente diferentes de porosidade.

Buscou-se nos Laboratórios Associados de Combustão e Propulsão do Instituto de Pesquisas espaciais, LACP-INPE, acesso ao porosímetro de mercúrio para medição da porosidade das amostras. A técnica do porosímetro de mercúrio consiste em medir o volume de mercúrio que penetra no meio sob pressão hidrostática aplicada. O equipamento vai aumentando a pressão sobre o mercúrio, que penetra nos poros de raios cada vez menores, medindo a variação do volume do mercúrio até a pressão máxima aplicada pelo equipamento.

3. 2.1 Descrição do método do porosímetro de mercúrio

Foi empregado para as medidas o seguinte equipamento:

Porosímetro AUSCAN – 33

Modelo: 33 B

Pressão Máxima: 33000 psia (227,6 Mpa)

Fabricante: Quanta Chrome Corporation

A característica principal para a escolha do mercúrio como líquido a ser pressionado para o interior dos poros de um meio poroso está na sua propriedade de não molhar o corpo com o qual faz contatos, conseqüentemente, não há penetração no poro por ação de forças capilares. O mercúrio deve ser, então, forçado para dentro dos poros pela aplicação de uma pressão externa, sendo a dificuldade de penetração inversamente proporcional ao tamanho dos poros. Admitindo o poro cilíndrico, oco, de diâmetro “d”, raio “r” e comprimento “l”, tendo superfície interna dada pela equação

$$A_i = - 2\pi r l, \quad (111)$$

o trabalho necessário para o mercúrio fazer contato com a superfície externa do poro é dado pela expressão:

$$W = -2\pi r l \gamma \cos \theta \quad (112)$$

sendo: γ = tensão superficial do Hg = $0,480 \times 10^{-4}$ J/cm² e θ = ângulo de contato.

O trabalho necessário para forçar o mercúrio para dentro do cilindro é dado por:

$$W_2 = P\pi r^2 l \quad (113)$$

sendo: P é a pressão absoluta aplicada.

Sendo $W_1 = W_2$, as equações (112) e (113) podem ser escritas:

$$P.r = 2\gamma \cos \theta \text{ (eq. de Washburn)} \quad (114)$$

Essa equação mostra que, com acréscimo da pressão, o mercúrio penetra progressivamente nos poros, assumindo-se γ e θ constantes. A tabela 7 fornece vários valores de P.r para diferentes valores de θ , com $\gamma = 0,480 \times 10^{-4}$ J/cm².

Tabela 7 – Valores de P.r em função do ângulo θ

Valores de P.r em função do Ângulo de contato θ			
θ °	P.r [kg.cm ⁻² .mm]x10 ⁻³	θ °	P.r [kg.cm ⁻² .mm]x10 ⁻³
100	1,69985	130	6,29185
105	2,53361	135	6,92173
110	3,34768	140	7,50101
115	4,13645	145	8,02123
120	4,89428	150	8,47818
125	5,47355		

O volume dos poros é determinado pelo conhecimento do volume de mercúrio penetrado por várias pressões aplicadas. Das equações (112) e (113) é obtido:

$$-2\pi r l \gamma (\cos \theta) = P \Delta V \quad (115)$$

assumindo a superfície de contato do poro com o mercúrio $S = 2\pi r l$, tem-se:

$$-S\gamma (\cos \theta) = P \Delta V \quad (116)$$

então, no limite de variação dr,

$$dS = - \frac{P dV}{\gamma (\cos \theta)} \quad (117)$$

e a superfície, então, é calculada por:

$$S = -\frac{1}{\gamma(\cos\theta)} \int_0^V P dV \quad (118)$$

Considerando as informações apresentadas pelo fabricante, as diferentes unidades de pressão, V em cm^3 , $\theta = 140^\circ$ e $\gamma = 480 \text{ erg/cm}^2$, a equação (118) tem as formas seguintes:

$$S = 0,0188 \int_0^V P dV \quad [\text{m}^2]; \text{ para } P \text{ [psia]} \quad (119)$$

$$S = 2,773 \times 10^{-5} \int_0^V P dV \quad [\text{m}^2]; \text{ para } P \text{ [kgf/m}^2] \quad (120)$$

Por integração gráfica, usando a curva cumulativa da Figura 21, a área superficial de todos os poros preenchidos até a pressão de 227,6 Mpa (33000 psia no medidor do aparelho) é calculada como se apresenta:

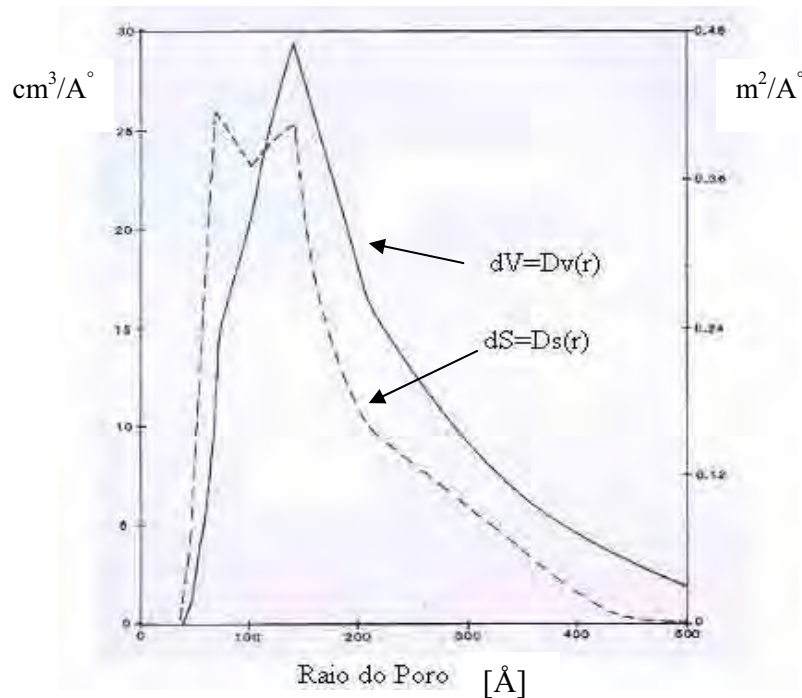


Figura 21 – Curva cumulativa da Área Superficial

Área “A” sobre a curva total para o volume máximo de mercúrio introduzido, medido por planimetria: $A = 55,2 \text{ cm}^2$

$$\text{Fator de normalização} = \frac{5000 \text{psia} \cdot 10^{-1} \text{cm}^3 \text{g}^{-1}}{4 \text{cm}^2 \text{ papelgráfico}} = 125 \frac{\text{psia} \cdot \text{cm}^3 \text{g}^{-1}}{\text{cm}^2} \quad (121)$$

$$\int_0^V P dV = 55,2 \text{ cm}^2 \cdot \frac{125 \text{psia} \cdot \text{cm}^3 \text{g}^{-1}}{\text{cm}^2} = 6900 \text{ psia cm}^3/\text{g} \quad (122)$$

$$S = 0,0188 \int_0^V P dV = 0,0188 \times 6900 = 129,7 \text{ m}^2/\text{g} \quad (123)$$

Analogamente, a área superficial do poro para qualquer variação de r é obtida pelo método acima. Por exemplo, a área A_1 acima da curva medida de 2500 psia ($r=0,0427 \mu\text{m}$) para 33000 psia ($r=0,00323 \mu\text{m}$) é $50,1 \text{ cm}^2$.

$$\text{A superfície } S = 0,0188 \times 50,1 \times 125 = 117,7 \text{ m}^2/\text{g} \quad (124)$$

Portanto a área superficial de poros no intervalo de $0,0427$ a $0,0023 \mu\text{m}$ é de $117,7 \text{ m}^2/\text{g}$. A área dos poros maiores e vazios entre partículas é dada por diferença com a área total e a área acima, ou $12,0 \text{ m}^2/\text{g}$.

Na figura 21, ainda pode ser visto que a altura inicial da inclinação da curva cumulativa é atribuída à invasão dentro dos poros maiores e vazios interpartículas. A inclinação da curva a 2500 psia (17,241 Mpa) indica que poros em torno de $0,04 \mu\text{m}$ estão começando a encher e que a invasão ocorre progressivamente nos poros menores enquanto a pressão é elevada. Por volta de 15000 psia (103,450 Mpa) não é verificada a introdução adicional tomando espaço, indicando que o volume de pequenos poros existe em poros de raios menores que $0,0071 \mu\text{m}$. Para a obtenção dos parâmetros medidos pelo porosímetro, utilizou-se para cálculo das áreas abaixo das curvas $D_v(r)$ e $D_s(r)$, o método de aproximação da figura gerada pela curva ao das figuras cujas áreas são previamente conhecidas como na Figura 23. Como exemplo, considere-se uma função plana contínua $y = f(x)$ como a da Figura 22, em que se quer determinar a área "S" delimitada pela função compreendida entre os pontos a e b sobre o eixo dos X e por duas retas $x = a$ e $y = b$.

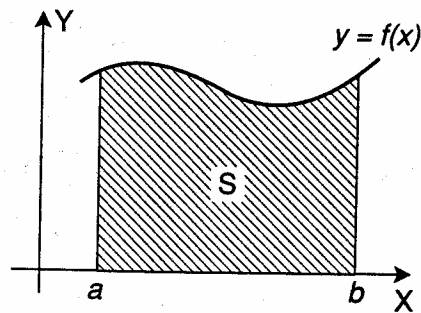


Figura 22 – Função contínua, plana, não negativa $y = f(x)$

O método consiste em dividir o intervalo $[a, b]$ em n sub intervalos, como no caso da Figura 37, em que $n = 4$, escolhendo os pontos

$$a = x_0 < x_1 < \dots < x_{i-1} < x_i < \dots < x_n = b \quad (125)$$

Seja $\Delta x_i = x_i - x_{i-1}$ o comprimento do intervalo $[x_{i-1}, x_i]$.

Em cada um desses intervalos $[x_{i-1}, x_i]$, escolhe-se um ponto c_i com $i = 1, \dots, n$, de modo a se construir um retângulo de base Δx_i e altura $f(c_i)$ (ver para $n = 4$ na Figura 37 a representação dos retângulos).

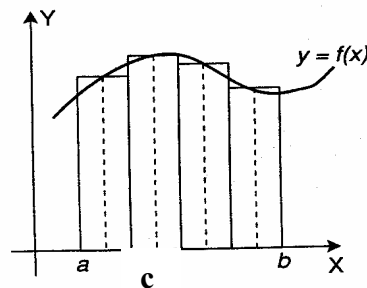


Figura 23 – Ilustração das áreas retangulares de base Δx_i e altura $f(c_i)$ para $n = 4$

A soma das áreas dos n retângulos, que se representam por S_n , é dada por:

$$S_n = f(c_1) \Delta x_1 + f(c_2) \Delta x_2 + \dots + f(c_n) \Delta x_n = \sum f(c_i) \Delta x_i \text{ para } n = 1, \dots, n \quad (151)$$

Essa soma é denominada *soma de Reimann* da função $f(x)$.

Pode-se observar que a medida que n cresce cada Δx_i , $n = 1, \dots, n$, torna-se muito pequeno, a soma das áreas retangulares aproxima-se do que intuitivamente entende-se como área de “S”.

Dessa forma, pode-se definir a área abaixo de uma curva de uma função $y = f(x)$,

contínua, não negativa em $[a, b]$, como:

$$S = \lim_{\text{máx}\Delta x_i \rightarrow 0} \sum_{i=1}^n f(c_i) \Delta x_i \quad (126)$$

na qual para cada $i = 1, \dots, n$, c_i é um ponto arbitrário do intervalo $[x_{i-1}, x_i]$.

No caso, aqui analisado, para as curvas $D_V(r)$ e $D_S(r)$, denomina-se o eixo x de eixo R e os intervalos de R_i com $i = \pm 1$, ou seja: R_{i-1} , R_i , R_{i+1} em cujo ponto analisado R_i geram-se as proporções:

$$\text{Diferença posterior : } \Delta_2 = \left(\frac{R_{i+1} - R_i}{2} \right) \quad (127)$$

$$\text{Diferença anterior: } \Delta_1 = \left(\frac{R_i - R_{i+1}}{2} \right) \quad (128)$$

e as áreas abaixo das curvas dadas pelas somatórias:

$$\sum D_V(r_i) [\Delta_1 + \Delta_2] \quad \text{e} \quad \sum D_S(r_i) [\Delta_1 + \Delta_2] \quad (129)$$

que correspondem às áreas abaixo das curvas $D_V(r) \times r$ e $D_S(r) \times r$, sendo r o raio médio dos poros. Este método foi usado para verificar os dados fornecidos porosímetro de mercúrio AUTOSCAN – 33 apresentado nas tabelas 12 e 13 e Anexos B1 a B5.

3.2.2 Distribuição do tamanho do poro

Admitindo dV ser o volume elementar de todos os poros com raio entre r e $r + dr$, tem-se:

$$dV = D_V(r)dr \quad (130)$$

sendo $D_V(r)$ a função volume do tamanho do poro definida como o volume por intervalo unitário de raio. Diferenciando a equação (40) e assumindo constante γ e θ , obtém-se:

$$Pdr + rdP = 0 \quad (131)$$

e combinando as equações (51) e (52) produz-se:

$$-dV = D_V(r) \frac{rdP}{P} \quad \leftrightarrow \quad D_V(r) = -\frac{P}{r} \frac{dV}{dP} \quad (132)$$

O sinal negativo é eliminado em função da variação do volume ser medida como decrescente. A Equação (132) representa convenientemente a redução da curva cumulativa para a curva de distribuição que fornece o volume do poro por unidade de intervalo de raio mostrada na Figura 21.

Da Figura 21 retira-se uma série de valores de $\Delta V/\Delta P$, os quais multiplicados pelo valor da pressão no final do intervalo e divididos pelo raio correspondente, permitem montar a Tabela 8 com valor bruto do raio do poro para cada ponto da curva cumulativa.

Tabela 8- Dados e cálculos das curvas cumulativa e de distribuição.

Dados e cálculos das curvas cumulativa e de distribuição							
P [psia]	ΔP [psia]	r [Å]	V [cm ³]	ΔV [cm ³]	$\Delta V/\Delta P \times 10^3$ [cm ³ /psia]	$D_V(r) \times 10^4$ [cm ³ /Å]	$D_S(r)$ [m ² /Å]
25	25	42680	0,085	0,085	3,400	0,020	0,000
100	75	10670	0,142	0,057	0,760	0,071	0,000
500	250	2134	0,330	0,079	0,316	0,740	0,000
5000	2500	213,4	0,633	0,172	0,0688	16,120	0,1511
10000	2500	106,7	0,825	0,053	0,0212	19,869	0,3724
20000	5000	53,35	0,862	0,002	0,0004	1,500	0,0562
30000	5000	35,57	0,863	0,000	-	-	-

1 psia = 6,896 x 10⁻³ MPa = 0,0703 kg/cm² - 1 Å = 10⁻⁶ m

dados do fabricante

3.2.3 Distribuição da superfície do poro

A distribuição superficial do poro $D_s(r)$ é a área superficial por poro de raio unitário. Diferenciando $D_s(r)$, tem-se:

$$D_s(r) = \frac{dS}{dV} \frac{Dv}{dr} \quad (133)$$

Considerando os poros cilíndricos, então

$$\frac{dS}{dV} = \frac{2}{r} \quad (134)$$

e usando a equação (51)

$$D_s(r) = \frac{2}{r} Dv(r) \quad (135)$$

A última coluna da Tabela 8 fornece os valores de $D_s(r)$ que são também plotados na Figura 21. A área total sobre o volume ou curva de distribuição é proporcional ao volume total do poro ou área do poro, respectivamente. Com a adoção da razão de uma área gráfica Ag' em algum intervalo para a área gráfica total At' , o volume do poro ou a área superficial em um intervalo pode ser calculado por:

$$V_{\text{intervalo}} = V_{\text{total}} \frac{Ag'}{At'} \quad (136)$$

$$S_{\text{intervalo}} = S_{\text{total}} \frac{Ag'}{At'} \quad (137)$$

3.2.3.1 Distribuição dos poros.

A variação no tamanho total do poro com a variação do raio do poro é dada por:

$$D_L = dL/dr \quad (138)$$

e uma vez que $dV = \pi r^2 dL$ (139)

$$D_L = \frac{1}{\pi r^2} \frac{dV}{dr}, \quad (140)$$

usando as equações (51) e (52) tem-se:

$$D_L = \frac{P}{\Pi r^2} \frac{dV}{dP} \quad (141)$$

A função distribuição de volume é dada por:

$$D_V(r) = \frac{P}{r} \frac{dV}{dP} \quad (142)$$

e portanto, $D_L = \frac{D_V(r)}{\Pi r^2}$ (143)

Desta maneira, dividindo-se a função distribuição de volume pela área de abertura do poro e assumindo os poros cilíndricos, a variação total do tamanho do poro com o raio do mesmo pode ser calculada. Um sistema de redução de dados está disponível no porosímetro Autoscan – 33 que armazena e plota dados, para fornecimento de dados onde são mostrados os diâmetros e o volume dos poros em função da pressão aplicada no mercúrio, bem como a relação de espaço vazio por grama de material para cada distribuição porosa ver as Tabelas 20 a 24 no Anexo B.

A medição do tamanho dos poros realizada mostra com uma boa certeza a variação desse tamanho nas amostras de tijolos e argamassa, conforme esquematizado na Figura 24. Para valores inferiores a 100Å, o porosímetro não mede, ficando limitado à pressão de operação de 227,6 MPa (33000 psia) que é aplicada para que o mercúrio penetre nos poros do meio. Valores acima de 500 Å, o equivalente a 5 µm ou 0,0005 mm, correspondem a 10% dos tamanhos medidos nas amostras de tijolo e a 17,2% na de argamassa.

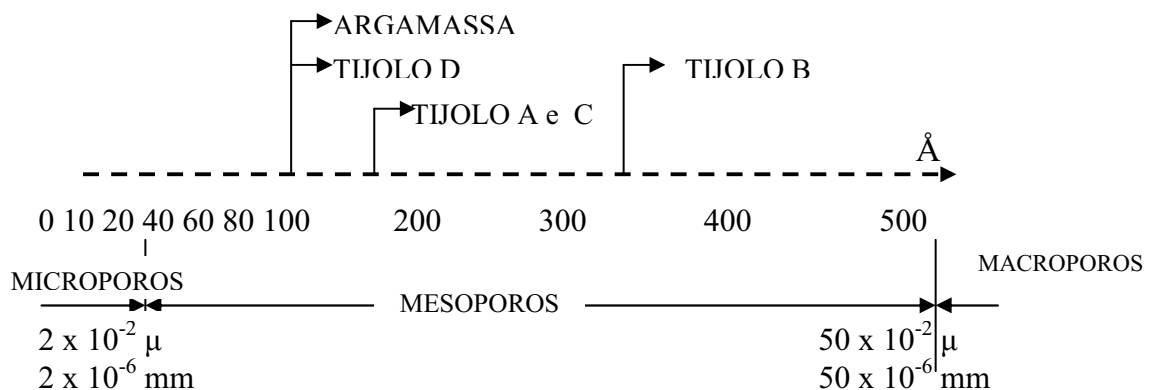


Figura 24 – Escala de localização do tamanho dos poros medidos no porosímetro.

Com isso, pode-se afirmar que os tijolos e argamassa utilizados nesse trabalho se classificam como meios compostos por mesoporos, com porosidade ϕ variando de 0,01 a 0,61, ficando o valor médio em torno de 0,32, ou seja, indicando ser esses meios compostos de mais ou menos 32% de vazios e formando canais por onde o fluxo percola. Dependendo da qualidade do “barro”, se contiver muito elemento orgânico (gravetos, pedaços de folhas) misturado à argila, o que poderão ser eliminados no processo de queima do tijolo, deixando como consequência verdadeiras crateras no meio poroso, o que poderá produzir até 65% de vazios no meio.

3.3 MEDIÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA – PICNÔMETRO

Para determinar com precisão a massa específica das amostras, para se conhecer o volume real de material do meio, empregou-se o equipamento de propriedade do LACP-INPE:

Picnômetro Multivolume 1305

Fabricante: Micromeritics

O Picnômetro Multivolume 1305 executa medição da estrutura volumétrica por observação da redução da capacidade de gás na câmara de amostra causada pela presença da amostra. Considerando que o gás – geralmente Hélio – dentro da câmara penetra uniformemente no menor dos poros e espaços vazios, bem como em superfícies irregulares da amostra ali colocada, a variação do volume, assim observada pela introdução de um sólido na câmara do gás permite calcular a massa específica teórica máxima do sólido, comprimindo o gás na câmara. Este método não detecta poros fechados no sólido, como ocorre em uma bola de pingue-pongue, por exemplo.

A câmara de amostras com a amostra sólida presente é primeiramente carregada com o gás a pressão de $1,4 \text{ kg/cm}^2$ (20 psig). Após a medida de volume e subsequente expansão dessa carga de gás para uma segunda medida de volume à mesma temperatura e zero de pressão, obtém-se uma nova medida de pressão, que se torna progressivamente menor. A aplicação da equação de balanço de massas para o gás permite o cálculo do volume da amostra quando são conhecidos o volume da câmara de amostra vazia, a expansão e a relação da queda de pressão. Os resultados das

medições da massa específica das amostras de tijolos comuns obtido no picnômetro encontram-se nas Tabelas 25 a 29 no Anexo C.

3.4 MEDIÇÃO DA MASSA DAS AMOSTRAS - TERMOBALANÇA

Utilizou-se de uma termobalança SHIMADZU modelo TGA-50H, Figura 25, do laboratório de Materiais Diversos do Departamento de Engenharia Química da EEL-USP, que opera na faixa da temperatura ambiente até 1.500°C, com análises simultâneas termogravimétrica (TGA) e termogravimétrica derivativa DrTGA, isto é, a derivada da curva de comportamento da curva de comportamento, a curva média.

As amostras de tijolos A, B, C e D foram analisadas por termometria na razão de 20°C/min em fluxo de nitrogênio numa faixa de temperatura de 25 a 900°C, Tabela 9.

A análise termogravimétrica do comportamento de cada amostra, para verificação da perda de massa de água da amostra, é mostrada nas Figuras 42 a 45 no Anexo A3, de acordo com as curvas ilustradas na Figura 26.

3.4.1 Características da Termobalança

Equipamento: Shimadzu TGA-50H (Figura 25)

Faixa de temperatura (°C) : Ambiente a 1500

Faixa de medição de peso (mg) : ± 20 e ± 200

Capacidade de leitura (mg) : 0,001

Faixa de programação de aquecimento : de 0,1 °C/h a 50,0 °C/min

Atmosfera do forno: Hidrogênio



Figura 25 – Termobalança Shimadzu TGA-50H

Tabela 9 - Perda de massa de água por amostra na termobalança

Amostra	Peso Inicial mg	Intervalo de temperatura °C	Perda de massa mg %	Peso final mg %	Perda Total mg %
A	13,650	40 a 600	0,292 2,142	13,339	0,311
		600 a 800	0,019 0,138	97,722%	2,278%
B	7,138	28 a 600	não perdeu	7,138	zero
C	6,887	40 a 400	0,126 1,826	6,680	0,207
		400 a 800	0,081 1,180	96,994%	3,006%
D	12,990	40 a 600	0,062 0,475	12,928	0,062
				99,523%	0,477%

Notas: 1 - Variação de temperatura: 20°C/min; 2 – Atmosfera de Nitrogênio; 3 – Taxa de vazão: 20 ml/min; 4 – Célula de Platina – Fonte: Laboratório da EEL-USP

A figura 26 mostra as curvas de comportamento da amostra com a variação da temperatura na termobalança .

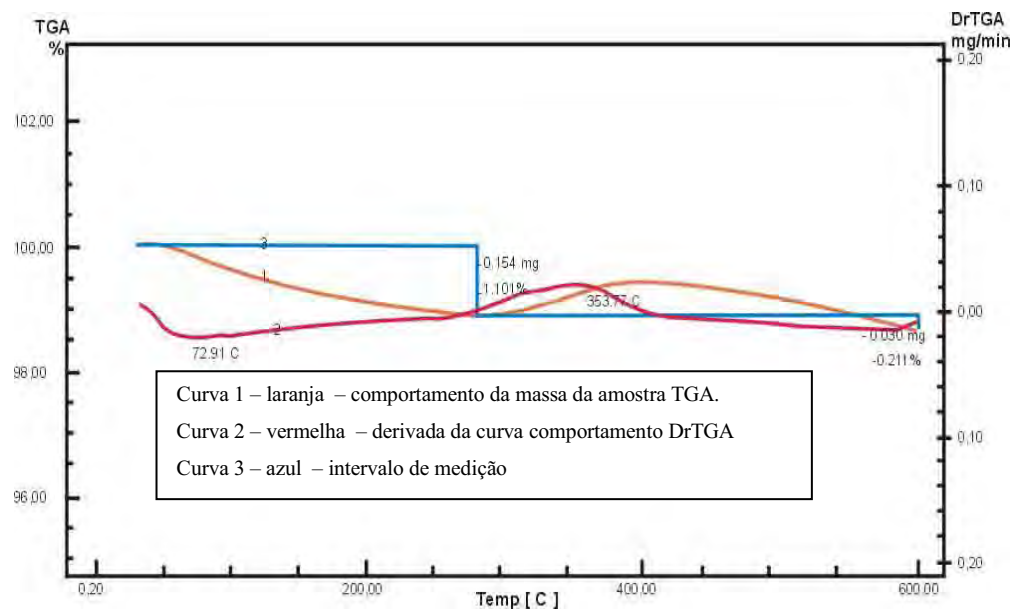


Figura 26- Curvas de perda de massa x variação de temperatura da amostra.

3.5 MEDIÇÃO DOS POROS POR PROCESSAMENTO DE IMAGEM.

3.5.1 Metodologia

Um método moderno de se medir porosidade e muito utilizado atualmente é a técnica de processamento de imagens, que envolve a extração de informações a partir de imagens digitalizadas. O processamento e a análise destas está ligado a recentes desenvolvimentos tecnológicos e científicos de grande utilidade para diversas áreas da engenharia, principalmente quanto à microscopia quantitativa da Engenharia de Materiais. A complexidade das microestruturas dos diversos materiais, bem como suas propriedades e formas de arranjo entre as partículas, tem no processamento de imagens um recurso amplo e cada vez mais relevante de caracterização estrutural, CRUZ, T. G. (2003).

Muito empregado na caracterização de cerâmicas porosas diversas, o método vem facilitando o entendimento e a aplicação em meios porosos de diversas áreas da Engenharia. Em especial se destaca o estudo do comportamento da água que infiltra nos meios porosos dos materiais básicos da construção civil, como o tijolo e a argamassa, criando esforços capazes de provocar trincas e deslocamento de massas.

Esse estudo, em suas diversas etapas de processamento, buscou estabelecer parâmetros para o monitoramento das condições de processo e as características da porosidade da amostra.

O fundamento da imagem digitalizada se baseia em uma função de intensidade luminosa, bidimensional, denotada por $f(x,y)$, na qual o valor da amplitude da função nas coordenadas (x,y) fornece a intensidade do brilho da imagem no ponto. Sendo a luz uma forma de energia, a função $f(x,y)$ é positiva e finita, caracterizando-se por dois componentes: a quantidade de luz observada incidindo no objeto e a quantidade de luz refletida pelo objeto. Tais componentes, iluminação e refletância, são representados por $i(x,y)$ e $r(x,y)$, respectivamente. O produto dessas funções resulta:

$$f(x,y) = i(x,y) \cdot r(x,y), \quad \text{com } 0 < i(x,y) < \infty \text{ e } 0 < r(x,y) < 1 \quad (144)$$

Denomina-se nível de cinza “ l ” à intensidade de uma imagem monocromática “ f ” de um ponto nas coordenadas (x,y) , ficando “ l ” limitado a uma escala denominada “escala de cinza” na qual $l = 0$ é considerado negro e $l = L$ é considerado branco.

Todos os valores intermediários são tons de cinza variando continuamente entre $L_{\min} < l < L_{\max}$. Portanto, a imagem digitalizada é uma imagem $f(x,y)$ digitalizada tanto em coordenadas espaciais quanto em brilho. A imagem digital monocromática pode ser considerada como uma matriz $(N \times M)$, em que as linhas e colunas identificam cada ponto na imagem e o valor correspondente na matriz identifica o seu nível de cinza, a saber:

$$f(x,y) = \begin{bmatrix} f(0,0) & f(0,1) & \cdots & f(0,M-1) \\ f(1,0) & f(1,1) & \cdots & f(1,M-1) \\ \vdots & & & \\ f(N-1,0) & f(N-1,1) & \cdots & f(N-1,M-1) \end{bmatrix} \quad (145)$$

Portanto, a matriz representa uma imagem digital em que cada elemento é denominado “Pixel” ou “Pels”. Um pixel é um ponto qualquer no espaço amostrado,

avaliado no plano (x,y) com intensidade luminosa conhecida. Um ponto “p” de coordenadas (x,y) possui 2 vizinhos na direção vertical e 2 na horizontal, denominados $N_4(p)$, como mostrado na Figura 27

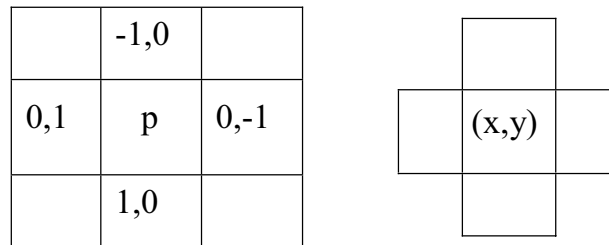


Figura - 27 Esquema de vizinhos de um pixel $p(x,y)$.

A partir desses princípios, a técnica de processamento de imagens consegue, por uma série de operações seqüenciais e específicas informações ponto a ponto, recriar a imagem do objeto. O processamento e análise de um objeto seguem alguns passos fundamentais: visualização, aquisição de imagens, pré-processamento, segmentação e representação de dados. Com este último, é possível extrair informações quantitativas que representem o objeto analisado através de imagens, gráficos e tabelas estatísticas. É possível obter parâmetros estereológicos, tais como: tamanho (área, diâmetro, comprimento ou perímetro), forma, razão de aspecto de forma e circularidade.

A área é calculada pelo número de pixels contido em cada objeto. Os valores de área real são obtidos pela normalização direta da imagem de acordo com tamanho real dos pixels. A razão de aspecto é determinada como a razão entre os eixos, maior e menor, de uma elipse equivalente ao objeto, conforme Figura 28.

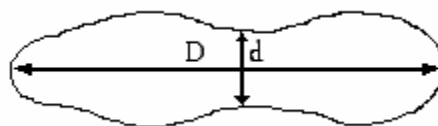


Figura 28 – Diâmetros maior e menor de um poro (objeto) observado.

O diâmetro médio, também chamado de diâmetro de Feret é dado pela média aritmética entre os diâmetros horizontal “D” e vertical “d” e o comprimento maior do eixo D é obtido dos valores de área dos objetos:

$$D = \frac{2}{\sqrt{\frac{A}{\pi}}} \quad (146)$$

O perímetro (p) é dado pelo comprimento da borda do objeto retificada.

O fator de forma é estimado pela equação:

$$ff = \frac{4\pi A}{p^2} \quad (147)$$

sendo que esse fator “ff” se aproxima do valor “1” para objetos circulares e de “0” para objetos alongados, rugosos ou com reentrâncias.

A circularidade é calculada pela equação:

$$a = \frac{4A}{\pi(Dm)^2} \quad (148)$$

em que “Dm” é o diâmetro médio. Para objetos mais circulares, a circularidade se aproxima de “1” e se afasta para objetos mais alongados.

3.5.2 Caracterização do Processador de Imagens.

O equipamento utilizado para ensaio foi o microscópio APOPHOT de propriedade do laboratório de materiais da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá – UNESP, com as características:

Microscópio APOPHOT
Câmara Digital Pixera Profissional

Microcomputador munido do programa “UTHSCSA Image Tool 2,0, de domínio público, incrementado pelo pacote de rotinas Image Processing Toolkit 4.0, da Reindeer Games Inc”.

Uma amostra do tijolo A, previamente seco por 24 horas em estufa a 120°C foi colocada sobre a lâmina de vidro de espessura de 0,152mm e fotografada no microscópio óptico gerando 600 dados que processados e analisados, geraram as informações mostradas nas figura nº 29, 30, 31 e 32.

Os dados gerados pelo processador de imagem e as curvas estatísticas de distribuição de área, perímetro, circularidade, tamanho do perímetro dos poros e seus diâmetros maior e menor estão apresentados no Anexo A4, Tabelas 15 a 19 e Figuras 45 a 49.

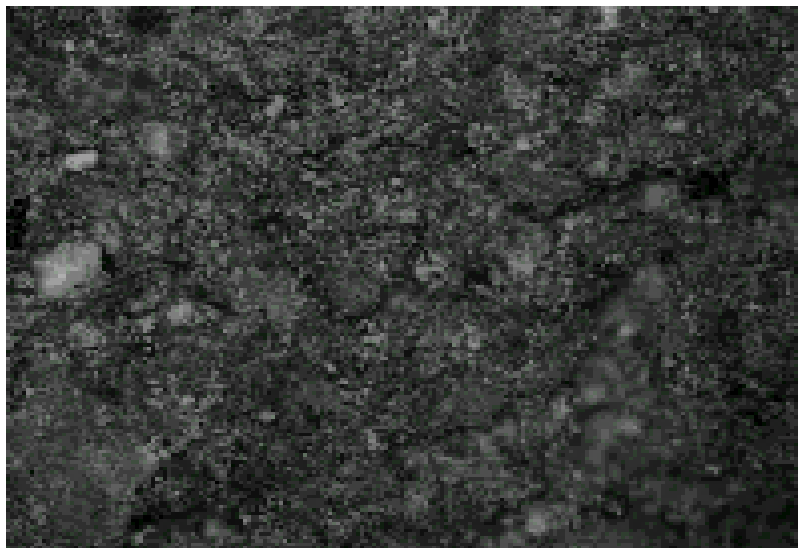


Figura 29- Fotografia da microestrutura da superfície da amostra em que a tonalidade de cinza mostra os pontos mais profundos em cor escura e os pontos mais acima da superfície em tons claros.

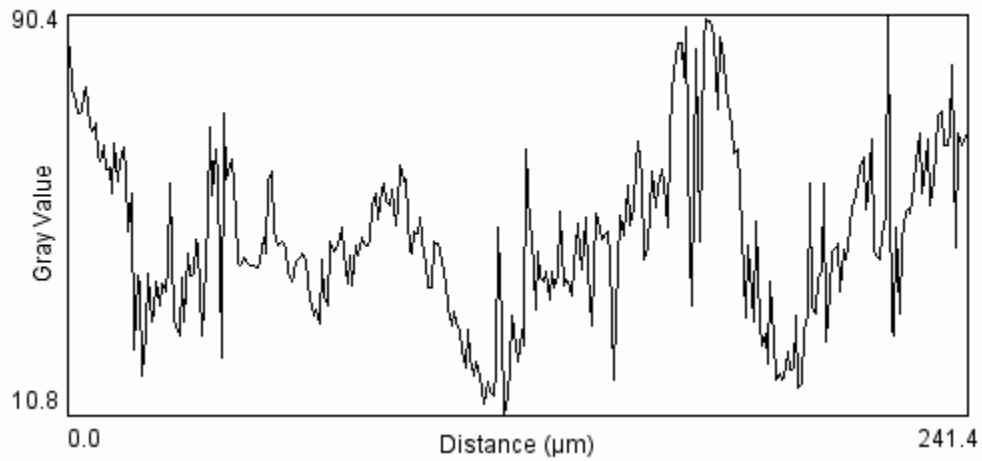


Figura 30- Histograma de cinza em um determinado intervalo $[0, L-1]$ descrito por uma função do tipo $p(r_k)=n_k/n$, sendo r_k o k -ésimo nível de cinza; $k=0, 1, 2, \dots, L-1$; n_k o número de pixel com esse nível de cinza e n o número total de pixels na imagem.

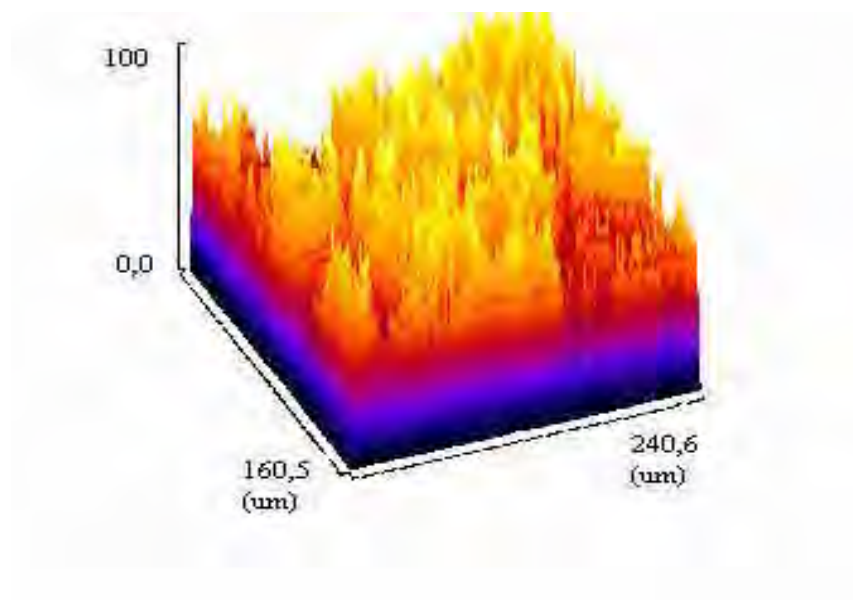


Figura 31- Imagem reconstruída de um trecho da superfície da amostra através da remontagem de 600 pontos analisados pelo processador.

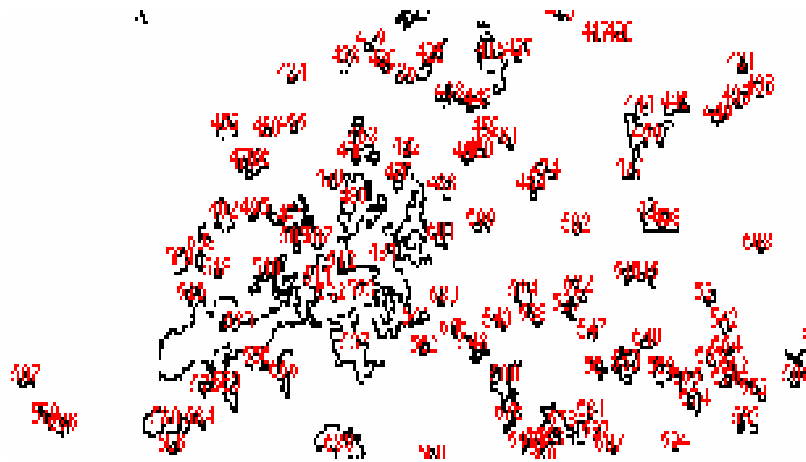


Figura 32- Imagens digitais dos poros capturadas por níveis observados sobre iluminação de campo claro transmitido com tensão de lâmpada de halogênio - tungstênio do microscópio Apophat. A imagem mostra o contorno dos poros na cor preta e valor dos diâmetros maior e menor, em vermelho.

3.6 MEDIÇÃO DAS DEFORMAÇÕES PROVOCADAS POR PERCOLAÇÃO

Para a determinação das deformações provocadas pela percolação de água, construiu-se uma bancada de testes em chapa de aço carbono de modo a permitir o confinamento do corpo de prova em três de seus lados (Figuras 33 e 34).



Figura 33- Confinamento do corpo de prova na bancada de testes.

Dessa forma, toda deformação a que o corpo de prova (c.p.) é submetido pode ser medida nas faces opostas às fixas da bancada por três relógios comparadores Mitutoyo MD.2046 – 10mm – 0,01, montados em bases magnéticas, com os apalpadores perpendiculares às faces não confinadas do c.p.. Entre os apalpadores e as faces livres do c.p., foram inseridas chapas de aço planas, com dimensões pouco menores (cerca de 2 cm) que as faces do c.p. para que a deformação sentida correspondesse a das faces deste e não somente do ponto em contato com o apalpador. As chapas se apoiaram na base da bancada sobre um filme de graxa para inibir o atrito.

Os corpos de prova foram levados à bancada de testes e confinados rigidamente três dos seus lados, conforme mostra a Figura 34.

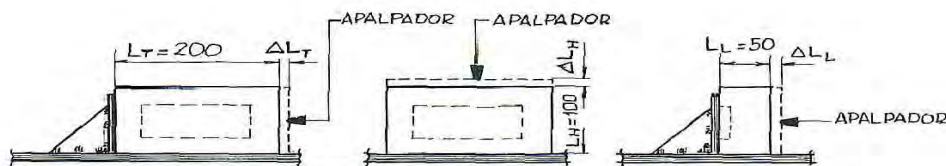


Figura 34- Confinamento dos lados do corpo de prova e posição dos apalpadores.

A leitura da deformação foi realizada após cada corpo de prova absorver cerca de 300ml de água. Este valor foi estabelecido observando-se que, ao atingir esse volume gotejado, os corpos de prova passaram a descartar a umidade excedente sobre a bancada e a não mais apresentar deformação. O tempo médio decorrido entre o início do gotejamento de água (aproximadamente de 1ml/min) e a saturação foi em torno de 4 h e 30 min para cada um deles.

Os valores das deformações medidas pelos relógios comparadores (coluna 3 da Tabela 10) se mantiveram inalterados por mais de 24 h, quando o experimento foi encerrado.

Após o encerramento da experiência, os corpos de prova foram novamente pesados para confirmação do volume de umidade absorvida. (Tabela 10).

Para a umidificação dos corpos de prova foi utilizada uma bureta graduada de vidro, com regulagem da vazão da água, apoiada e suspensa por um suporte vertical, ver Figura 33 e 35. O gotejamento de água foi regulado para que toda a

umidificação do corpo de prova se desse por absorção capilar e sem a ocorrência de transbordamento.



Figura 35 – Confinamento do Corpo de Prova PAREDE na bancada

Os corpos de prova foram colocados para secar em estufa de secagem FANEM Mod. 315 S6, com temperatura entre 105 e 110°C por um período ininterrupto de 48 horas para eliminação das umidades: higroscópica (inferior a 1% para umidade relativa do ar menor que 95% (BROWN, 1963)), capilar e livre, absorvidas do ambiente em que estiveram armazenados.

Tabela 10 – Deformações dos corpos de prova medidas em bancada

Corpo Prova	(1)	(2)	(3)	Deformação (mm)	
	Peso Seco (g)	Peso Úmido (g)	Transversal ΔL_T	Longitudinal ΔL_L	Horizontal ΔL_H
A	1391,4	1702,6	0,040	0,020	0,010
B	1279,1	1595,4	0,030	0,010	0,010
C	1342,6	1625,3	0,035	0,020	0,020
Valores Médios (*)	1337,7	1641,1	0,035	0,016	0,013
CON	1289,8	1490,6	0,050	0,030	0,010
PAREDE	16 580	19 410	0,180	0,025	0,050

(*) Os valores médios foram calculados levando em consideração apenas os c.p. A, B, e C. Os valores das deformações medidas nos corpos de argamassa (CON) e parede foram mantidas na tabela para contribuição de informações.

3.7 VISUALIZAÇÃO DA VELOCIDADE DE ABSORÇÃO DA ÁGUA – PERCOLAÇÃO

Para visualizar se a velocidade de difusão da água no meio poroso em estudo foram preparados três corpos de prova como esquematizados na Figura 36, ou seja, um tijolo comum, outro com 10 mm de argamassa nele agregada (3:1, cimento Portland composto Montes Claros, CP II – F – 32 e areia média lavada de procedência do rio Paraíba do Sul) e um bloco feito com a mesma argamassa medindo 200 x 100 x 50 mm, todos pré secados em estufa por 24 horas e a 150°C.

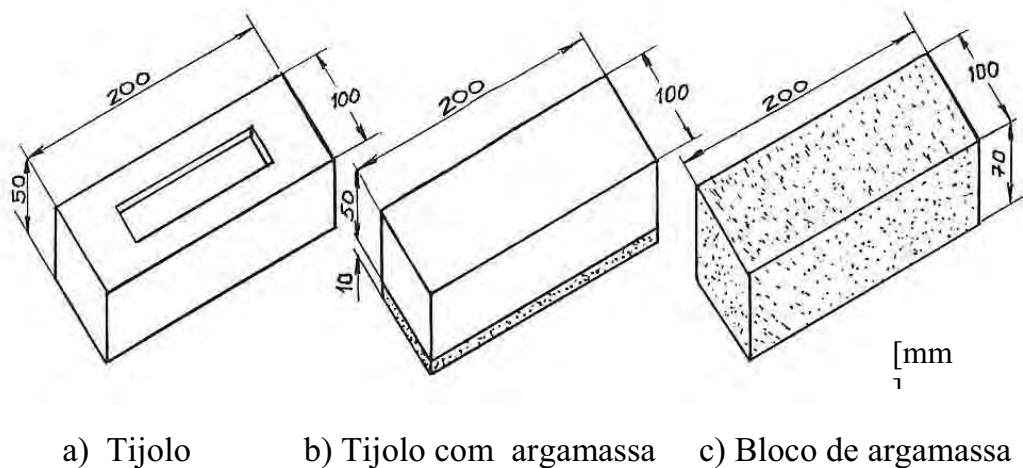


Figura 36 – Corpos de prova para visualização da velocidade de percolação.



Figura 37- Visão da frente de percolação dos corpos de prova para estudo da velocidade de umidificação.

Os corpos de prova foram acomodados em uma bandeja, como mostrado na Figura 37, e nela despejado água lenta e continuamente, de modo a permitir o processo de absorção somente por capilaridade, com cuidado para não haver submersão por imersão e conseqüente interferência de esforços provocados por empuxo.

A velocidade média lenta com que a frente de umidade se deslocava, $31,0 \times 10^{-5}$ mm/s (FRANÇA, 2000), perfeitamente visível nas laterais dos corpos de prova destacou algumas observações e mostrou a necessidade de uma visualização do seu perfil através de um modelo matemático que permitisse uma análise mais profunda de seu comportamento. Essa necessidade deu origem aos estudos apresentados.

Das observações realizadas na bancada de ensaio destacam-se:

a) A frente de percolação no tijolo simples (a) mostrou-se ser em torno da metade da velocidade observada no bloco de argamassa (c).

b) No tijolo com 10 mm de argamassa (b), essa em contato com o fundo da bandeja, manteve o mesmo comportamento de velocidade que no tijolo simples (a), o que era de se esperar, uma vez que o meio poroso argamassa permitia a passagem de água com cerca do dobro da velocidade.

c) A frente de percolação atingiu a superfície superior dos corpos de prova tijolos na forma de manchas mostrando ser esses meios porosos muito irregulares, ou seja, em algumas regiões do meio a perda de carga era maior que em outras, atrasando a frente de deslocamento do fluxo da água. Tais manchas se expandiam e depois de algum tempo toda superfície estava molhada.

d) No corpo prova de argamassa a ocorrência de manchas foi visivelmente menor que nos tijolos, destacando ser esse meio poroso mais homogêneo e oferece menos resistência à percolação.

e) Nos três casos, após as superfícies superiores estarem totalmente umedecidas, ocorreu da água começar a verter sobre elas numa clara demonstração de que os esforços capilares dos meios porosos ainda não haviam sido equilibrados com a pressão ambiente.

Essas observações suscitaram a necessidade de se buscar justificativas para tais comportamentos e qual o envolvimento de fenômenos como porosidade, perímetro molhado dos poros, permeabilidade do meio, tamanho dos poros, esforços capilares,

dentre outros que permitissem uma modelagem matemática para representar numérica e graficamente o fluxo de um fluido em um meio poroso.

3.8 VOLUME DO TIJOLO

3.8.1 Volume determinado por imersão.

A partir dos experimentos de FRANÇA (2000) para a determinação do volume sólido do tijolo, nos quais se adotou o método da imersão total dos corpos de prova em água, três tijolos identificados pelas letras A, B e C foram inteiramente pintados com tinta látex impermeabilizante e, após secagem natural, imersos individualmente em recipiente de vidro graduado -fundo de escala 1 ml – cheio de água. Por diferença de volumes, foi obtido o valor do volume sólido médio “ $V_{s_{méd}}$ ”, conforme abaixo:

$$\begin{aligned} \text{Tijolo A} &\Rightarrow 924,9 \text{ ml} \\ \text{Tijolo B} &\Rightarrow 933,7 \text{ ml} \quad \Rightarrow V_{s_{méd}} = 924,9 \text{ ml} \\ \text{Tijolo C} &\Rightarrow 916,1 \text{ ml} \end{aligned} \quad (149)$$

3.8.2 Volume Calculado Geometricamente “ V_{GEO} ”

Da Figura 38 tem-se $V_{GEO} = (20 \times 10 \times 5) - (13 \times 5 \times 1) \Rightarrow$

$$V_{GEO} = 935 \text{ cm}^3 \quad (150)$$

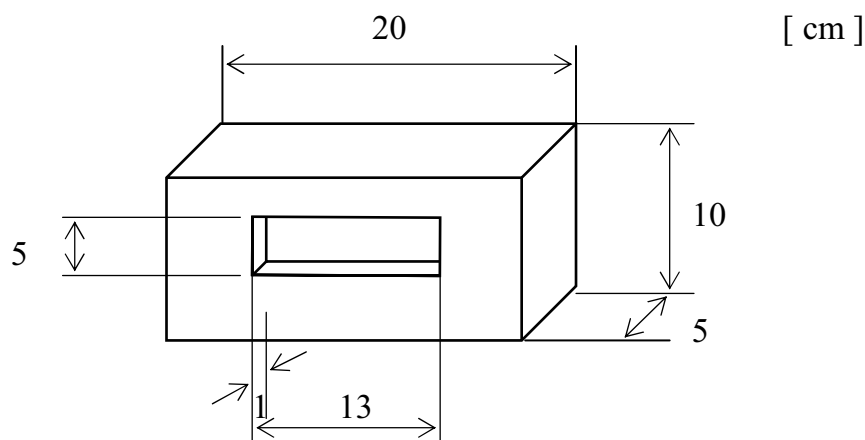


Figura 38 – Dimensões Externas do Tijolo

3.8.3 Erro entre os volumes medido e calculado geometricamente.

$$E_V = [(V_{GEO} - V_{méd}) / V_{GEO}] \times 100 \Rightarrow E_V = [(935 - 924,9) / 935] \times 100$$

$$\Rightarrow E_V = 1,08 \% \quad (151)$$

Esse erro é atribuído à dispersão dos valores de volume medidos na imersão.

3.8.4 Cálculo do volume do tijolo a partir da massa específica medida no picnômetro multivolume.

O volume de material maciço do tijolo “ V_{MM} ” é dado por:

$$\begin{aligned} \text{de FRANÇA (2000):} \quad \Rightarrow \quad \rho_{méd} &= 2,670 \text{ g/cm}^3 & (152) \\ P_{S_{méd}} &= 1321,4 \text{ g (peso seco médio)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rho_{méd} = P_{S_{méd}} / V_{MM} \Rightarrow V_{MM} &= 1321,4 \text{ g} / 2,670 \text{ g/cm}^3 \Rightarrow \\ \Rightarrow V_{MM} &= 494,906 \text{ cm}^3 & (153) \end{aligned}$$

volume esse correspondente a um tijolo confeccionado de material maciço, sem poros ou espaços vazios internos. Esse valor corresponde a cerca de 50% do valor medido ou calculado em (149) e (150), ou seja, um tijolo com volume correspondente à metade do volume real. A esse valor, $494,906 \text{ cm}^3$, tem que ser acrescentado os volumes ocupados pelos poros classificados como macroporos – maiores que $50 \times 10^{-6} \text{ mm}$ – e o volume de cavidades vazias muito maiores que os macroporos, no valor de $300,5 \text{ cm}^3$, FRANÇA (2000). Esse valor foi determinado pela diferença entre os pesos seco e úmido médios dos tijolos, uma vez que a percolação, assim medida a pressão atmosférica, não permite que a água penetre nos macros e mesoporos, como verificado nos experimentos com o porosímetro a mercúrio, sob pressão de 230 Pa (33000 psia). Portanto, o volume de vazios do tijolo é dado pela soma dos volumes ocupado por poros e por cavidades internas.

$$V_{\text{vazios}} = V_{\text{poros}} + V_{\text{cavidades}} = 214,002 + 300,5 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow V_{\text{vazios}} = 514,502 \text{ cm}^3 \quad (154)$$

Dessa forma, a massa específica do tijolo quando calculada com esses valores é:

$$\rho = P_{s_{\text{méd}}} / V_{\text{vazios}} = 1321,8 \text{ g} / 514,502 \text{ cm}^3 \Rightarrow \rho = 2,569 \text{ g/cm}^3 \quad (155)$$

Comparando esse valor com o da massa específica da Tabela 11, verifica-se um erro de 5,8% quando comparado ao valor médio e variando de 3,7 a 10 %, se considerado os valores mínimos e máximos.

Tabela 11 – Resumo estatístico dos valores obtidos no porosímetro e picnômetro para as amostras de tijolos

GRANDEZA	UNIDADE	VALOR MÍN.	VALOR MÉDIO	VALOR MÁX.	DESVIO PADRÃO
MASSA ESPECÍFICA	g / cm ³	2,668 C	2,7285	2,854 B	0,0742209
VOLUME ESPECÍFICO	cm ³ /g	0,3505854 B	0,36676	0,3748125 C	0,00971481
VOLUME MATERIAL	cm ³	0,1648856 A	0,196437	0,2229422 C	0,0227046
VOLUME DE VAZIOS	cm ³	0,06597 D	0,084815	0,10106 A	0,0131953
VOLUME TOTAL	cm ³	0,2657377 B	0,281252	0,3151422 C	0,0202048
POROSIDADE	%	23,71 D	30,27	38,00 A	0,0509

Obs. As letras inseridas nos quadros das colunas dos valores mínimos e máximos se referem à amostra onde o valor ocorreu

Esse erro reflete a imperfeição na fabricação dos tijolos pela ocorrência de uma gama muito grande de poros e existência de cavidades que não seriam classificadas nem como macroporos devido a seu tamanho infinitamente maior. Tais cavidades têm comportamento diferenciado em termos de escoamento do fluido. O seu preenchimento se dá unicamente em função da velocidade de escoamento do fluido através dos poros, não sendo afetado pelos efeitos da capilaridade. Por outro lado, a existência de microporos medidos pelo porosímetro também alteraria os cálculos dos dados de FRANÇA (2000), uma vez que naquele estudo não se considerou o escoamento sobre pressão nos micro e mesoporos.

CAPÍTULO 4 FORMULAÇÃO DIFERENCIAL

4.1 - FORMULAÇÃO

Por se tratar de um escoamento transitório, ao atingir os pontos de pressão iguais à pressão capilar o escoamento pára. Portanto, partindo da equação de Navier-Stokes na sua forma diferencial da quantidade de movimento, Equação (156), com análise de grandeza dos termos, pode-se ter a equação governante na direção vertical e preferencial de percolação, como abaixo:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{V\partial V}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} - \frac{\mu V}{\rho K} \quad (156)$$

com as condições iniciais e de contorno para $z=0$

$$\begin{aligned} t=0 &\rightarrow V=0 \quad \text{e} \quad P=P_0=h'+h'_{\text{em } 30 \text{ cm}} \\ t>0 &\rightarrow z=0 \rightarrow V=Q/A \\ &z=h \rightarrow V=0 \end{aligned}$$

em que $h'_{\text{em } 30 \text{ cm}}$ é a altura medida experimentalmente em FRANÇA (2000), a qual a água atinge, por percolação, em parede de alvenaria.

Aplicando os seguintes fatores de adimensionalização para a equação de Navier-Stokes:

$$\begin{aligned} V' &= \frac{V}{V_0} & z' &= \frac{z}{h} & P' &= \frac{P}{\rho V_0^2} & t' &= \frac{t}{h/V_0} = \frac{t \cdot V_0}{h} \\ V &= V'V_0 & z &= z'h & P &= P'\rho V_0^2 & t &= \left(\frac{h}{V_0}\right)t' \end{aligned} \quad (157)$$

substituindo em (156) tem-se:

$$\frac{V_0}{h/V_0} \frac{dV'}{dt'} + \frac{V_0 V' V_0}{h} \frac{dV'}{dz'} = -\frac{1}{\rho} \frac{\rho V_0^2}{h} \frac{dP'}{dz'} - \frac{\mu}{\rho K} V_0 V' \quad \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{V_0^2}{h} \frac{dV'}{dt'} + \frac{V_0^2 V'}{h} \frac{dV'}{dz'} = \frac{-V_0^2}{h} \frac{dP'}{dz'} - \frac{\mu V_0}{\rho K} V' \quad \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{dV'}{dt'} + \frac{V' dV'}{dz'} = \frac{-dP'}{dz'} - \frac{\mu \cdot h}{\rho K V_0} V' \quad (158)$$

em $\frac{dP'}{dz'}$ é o fator pressão, $\frac{\mu h}{\rho K V_0}$ é o de porosidade e

$$\frac{dV'}{dt'} + V' \frac{dV'}{dz'} = B \quad (159)$$

o fator composto pela variação de perda de carga, isto é uma combinação de pressões estáticas e resistência ao deslocamento do fluido pelo fator porosidade.

4.2 - COMPROVAÇÃO DE “H” –PERDA DE CARGA POR PERCOLAÇÃO

Devido a restrições naturais ao escoamento no meio poroso tem-se uma perda de pressão, perda de carga que crescerá até atingir a pressão capilar, quando então o escoamento pára. Considerando “h” como o fator de perda de carga estudado e sugerido por Papanastasiou (1994), tem-se:

$$h = f \frac{\Delta L}{D_h} \cdot \frac{V^2}{2g} = f \frac{\Delta L (V_0)^2}{2g D_h} (V')^2 \quad (160)$$

Análise dimensional do fator “h”

a) da equação (160) pode-se escrever:

$$[h] = [f] [\Delta L/D_h] \cdot [v_0^2/2g] = [L/L] \cdot [L^2 T^{-2} / L T^{-2}] \Rightarrow [h] = [L]$$

b) como diferença de pressões:

$$[h] = [\Delta P] = [\rho g z] \Rightarrow [h] = \left[\frac{MLT^{-2}}{L^2} \right] = [ML^{-3} \cdot LT^{-2} \cdot L] \Rightarrow [h] = \left[\frac{MLT^{-2}}{L^2} \right] =$$

$$\left[\frac{M}{L^3} \frac{L}{T^2} \right] \cdot [L] \Rightarrow [h] = [L]$$

e, P' o termo adimensionalizado de pressão da equação de Navier-Stokes

$$P' = \frac{P}{P_0} = \frac{P}{\rho V_0^2} = \frac{\rho g h}{\rho V_0^2} = \frac{g h}{V_0^2} = \frac{g f \Delta L V_0^2 V'^2}{V_0^2 D_h 2 g} = \frac{f \Delta L}{2 D_h} (V')^2 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{\partial V'}{\partial z'} = \frac{f \Delta L}{D_h} \cdot V' \frac{\partial V'}{\partial z'} \quad (161)$$

em que o fator “ f ” é considerado constante quando para um escoamento em regime laminar em um meio poroso composto por esferas homogêneas, no qual o Número de Reynolds é muito pequeno, i.é, $Rey \ll 10$ (Papanastasiou, 1994), portanto, remontando a equação (158), tem-se:

$$\frac{\partial V'}{\partial t'} + \frac{V' \partial V'}{\partial z'} = - \left[\frac{f \Delta L}{D_h} V' \frac{\partial V'}{\partial z'} + \frac{\mu}{\rho K V_0} \frac{f \Delta L V_0^2}{D_h 2 g} (V')^3 \right] \quad (162)$$

Sendo V' no meio poroso uma velocidade superficial muito pequena e “ f ” constante,

$$\frac{\partial V'}{\partial t'} + \frac{V' \partial V'}{\partial z'} = - \frac{f \Delta L}{D_h} V' \frac{\partial V'}{\partial z'} \Rightarrow \frac{\partial V'}{\partial t'} + \left(1 + \frac{\rho \Delta L}{D_h}\right) \cdot V' \frac{\partial V'}{\partial z'} = 0 \quad (163)$$

Para solução analítica por separação de variáveis vai se abandonar a notação “ V' ” para as variáveis z' e t' nos cálculos a seguir, em razão de simplificar a dedução e não haver confusão com a simbologia tradicional de derivada.

$$V' = H(t) \cdot G(z) \quad (164)$$

$$H'(t) \cdot G(z) + \left(1 + \frac{f \Delta L}{D_h}\right) \cdot H(t) \cdot G(z) \cdot H(t) \cdot G'(z) = 0 \Rightarrow$$

a solução bidimensional analítica é :

$$\Rightarrow \frac{H'(t)}{H^2(t)} + \left(1 + \frac{f \Delta L}{D_h}\right) \cdot G'(z) = 0 \quad (165)$$

fazendo:
$$\frac{H'(t)}{H^2(t)} = -\lambda \Rightarrow H(t) = \frac{1}{\lambda t + C_2} \quad (166)$$

$$G'(z) = -\lambda \left(\frac{D_h}{1 + f\Delta L} \right) \Rightarrow G(z) = C_1 - \frac{\lambda D_h}{(1 + f\Delta L)} \cdot z \quad (167)$$

$$V'(z,t) = \frac{C_1 - \frac{\lambda D_h}{(1 + f\Delta L)} \cdot z}{\lambda t + C_2} \quad (168)$$

Condições de Contorno para $V'(z,t)$ adimensionalizada:

$$V'(z, 0) = 1$$

$$V'(1, t) = 0$$

$$C_1 = \frac{\lambda D_h}{(1 + f\Delta L)}$$

$$C_2 = \frac{\lambda D_h}{(1 + f\Delta L)} \cdot (1 - z);$$

portanto,
$$V'(z,t) = \frac{\frac{\lambda D_h \cdot (1 - z)}{(1 + f\Delta L)}}{\lambda t + \frac{\lambda D_h \cdot (1 - z)}{(1 + f\Delta L)}} \quad (169)$$

que é a equação adimensionalizada, a qual representa a velocidade de percolação.

Para solução dessa equação, devemos adimensionalizá-la multiplicando por V_0 e adotar o valor do fator de fricção do fluido com o meio poroso “ f ” de Papanastasiou (1994) o qual, através da equação de Ergun, verifica-se que as perdas por atrito decrescem com o acréscimo da porosidade ϕ e com o tamanho da partícula D_p .

f é um fator para meios porosos, quantificado empiricamente por alguns autores, como mostrado pelas Equações (22), (23) e (24) a seguir reproduzidas:

1) Ergun

$$f = 1,75u_s^2 \left(\frac{\Delta L}{D_p} \right) \left(\frac{1-\varphi}{\varphi^3} \right) + 150u_s \left(\frac{\Delta L}{D_p^2} \right) \left(\frac{1-\varphi}{\varphi^3} \right) \left(\frac{\mu}{\rho} \right)$$

2) Blake - Kozeny (escoamento laminar)

$$f = 150u_s \left(\frac{\Delta L}{D_p^2} \right) \left(\frac{1-\varphi}{\varphi^3} \right) \left(\frac{\mu}{\rho} \right) \quad \text{para } \text{Rey} < 10$$

3) Burke – Plumbes (escoamento turbulento)

$$f = 175u_s^2 \left(\frac{\Delta L}{D_p} \right) \left(\frac{1-\varphi}{\varphi^3} \right) \quad \text{para } \text{Rey} > 1000$$

Ergun apresenta a Equação (22) como a soma de dois termos. O primeiro termo a Equação (23) de Blake – Kozeny para escoamento laminar, para número de Reynolds menor que 10 que é o caso em estudo, escoamento em meios porosos a baixa velocidade. O segundo termo, a Equação (24) de Burke – Plumbes, para escoamentos turbulentos que não se aplica a esse caso.

Observa-se na Figura 39, uma extrapolação da Figura 13, que a curva formada pela equação de Blake – Kozeny se torna uma reta de inclinação de 45° quando o valor do número de Reynolds tende para zero, fornecendo para f o valor de 970 que será usado na resolução da Equação (169). Esse valor foi aqui adotado considerando que a Equação (23) de Blake-Kozeny apresenta continuidade e comportamento linear para $\text{Rey} < 10$, como destacado em linha tracejada na extrapolação da Figura 39.

A análise de meios porosos depende sensivelmente do tamanho dos poros, da exatidão da medição da porosidade do meio bem como da perda de carga a que o fluido é submetido. Adotou-se o valor $f = 970$, por extrapolação na Figura 39, por que não foi encontrado na literatura acessível e em sites eletrônicos disponíveis assuntos correlacionados com o fator de atrito para escoamentos cuja velocidade correspondesse a um número de Reynolds tendendo a zero, isto é, para um escoamento laminar com velocidade muito baixa e sem influência de esforços externos.

Considerando que em escoamentos laminares as funções são lineares, e que, uma cuidadosa observação na Figura 39 mostra que a tendência dos pontos na parte superior do gráfico é de alinhamento, com muito pouca dispersão em torno de uma linha média tracejada sob a influência do termo de Blake – Kozeny, Equação (23) é

visível e determinante a condição de linearidade para um o escoamento laminar a baixíssima velocidade.

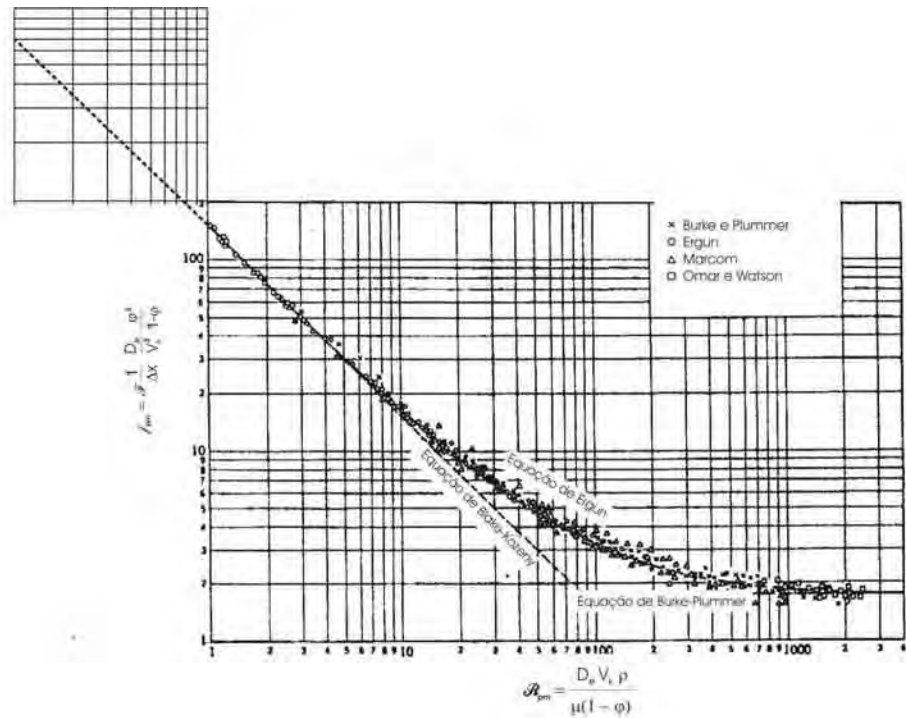


Figura 39 – Extrapolação da curva de Papanastasiou para obtenção do fator f para número de Reynolds < 1 , regime laminar.

A linearidade e a pequena dispersão dos pontos no intervalo $1 < \text{Rey} < 10$ nos deu segurança em adotar-se o recurso da extrapolação. Também são adotados valores do diâmetro hidráulico “ D_h ” = 1 o que considera ser o meio poroso composto por esferas de mesmo diâmetro totalmente molhadas e a porosidade intrínseca a ele através do número de Reynolds, como mostrado na Equação (42). Na equação adimensionalizada, para valor da área por onde a vazão medida experimentalmente, $Q = 0,01475 \text{ (cm}^3/\text{s)}$ escoou, adotou-se $A = 1 \text{ (cm}^2)$ e para a altura na direção de $z = 30 \text{ (cm)}$ (CAPUTO, 1978) valores esses também obtidos experimentalmente em FRANÇA, 2000. Com esses valores foi possível traçar a Figura 40 que mostra o comportamento da equação da velocidade da frente de percolação $V(z,t)$.

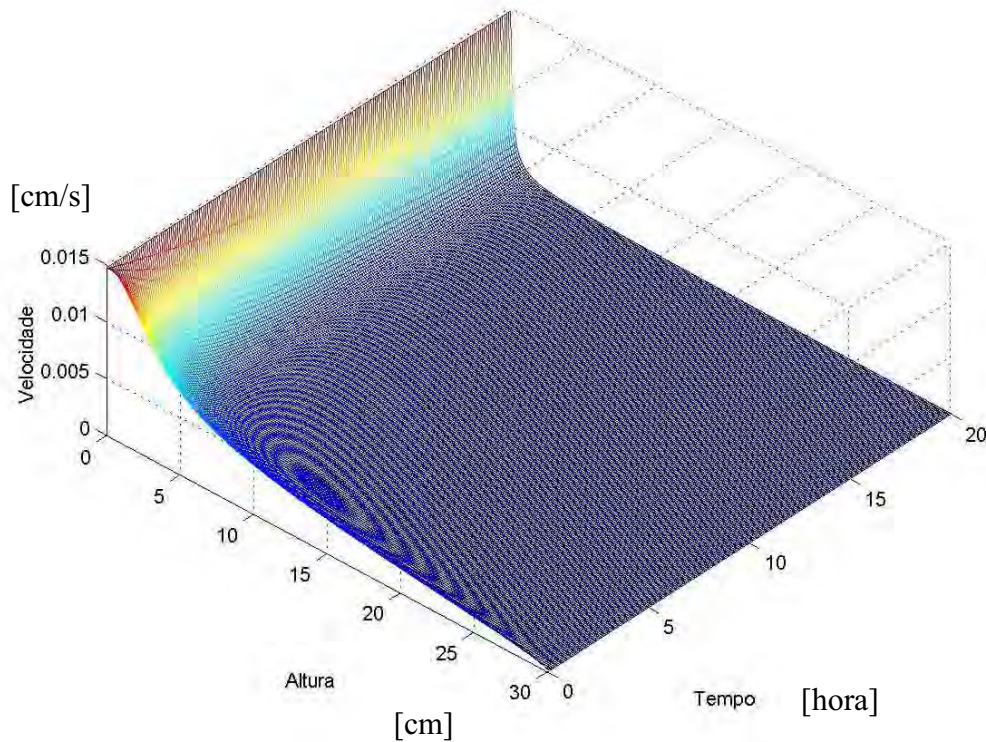


Figura 40 – Visão espacial do comportamento da velocidade de percolação do fluido no meio poroso composto por esferas equivalentes. Na figura as cores usadas são simplesmente ilustrativas.

A figura 40 mostra o comportamento da frente de deslocamento da percolação ao longo de um meio poroso imaginário, composto por esferas de mesmo diâmetro e arranjado de forma cúbica.

Pode-se observar que no tempo inicial igual a zero, entendendo-se não haver deslocamento do fluido no meio poroso nesse instante, só tem sentido se adotada uma vazão inicial, uma movimentação do fluido atingindo o meio independentemente do fator capilaridade que então passa a induzir o fenômeno da percolação quando o fluido atinge o meio. À medida que o fluido penetra o meio poroso, sob efeito da capilaridade, a perda de carga passa a interferir diretamente no deslocamento da vazão

inicial, fazendo com que ela tenda a se anular em torno do instante 20, como mostrado no ponto superior da figura.

Iniciado o deslocamento, a percolação ocorre até a altura 30, ponto inferior da figura, quando então praticamente o movimento pára, confirmando os resultados experimentais obtidos. Nesse ponto não haverá mais deslocamento do fluido, devido aos esforços gerados pela capilaridade, se igualem em módulo às perdas de carga geradas pela pressão atmosférica, pela gravidade e pelas perdas oriundas do percurso (coesão, rugosidade superficial, viscosidade do fluido e pelas variações dimensionais dos canais).

A vantagem da análise do comportamento adimensionalizado da equação da velocidade de percolação se prende ao fato de se poder visualizar a percolação independente de valores inicialmente adotados como condições de contorno, isso é, a partir do instante em que o fluido atinge o meio, e não existindo esforços externos, o deslocamento acontecerá pelo efeito capilar e enquanto esse existir e for superior ao das perdas de cargas naturais do meio. As variáveis z e t , altura e tempo, ficam visivelmente dependentes das dimensões dos poros. Tanto z , como t , se anulam para um meio não poroso (dimensões dos poros tendendo a zero) e voltam a se anularem nos extremos dos meios compostos por macroporos quando as dimensões dos canais se tornam grandes demais anulando o efeito capilar.

CAPÍTULO 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

É muito difícil medir ou mesmo estimar os parâmetros de um escoamento através de um meio poroso, devido à grande variedade de formas e tamanho dos canais formados entre as partículas sólidas, de dimensões microscópicas que apenas permitem medições indiretas e interpretações de comportamentos. Alguns equipamentos desenvolvidos para medir tamanho e dimensões dos poros realizam as medições por meios indiretos, como é o caso do porosímetro a mercúrio e do picnômetro multivolume.

Buscou-se no método de processamento de imagens uma visualização dos poros, como mostrado pelas Figuras 23 a 26 que ilustram uma variação muito grande de formas e dimensões dos poros. A partir do conceito de circularidade desse método, torna a análise mais compreensível e possível de ser quantificada. A partir daí pode ser pensado em uma analogia que representasse de maneira mais simples um meio poroso, como no caso de ser ele formado por um meio composto por esferas de diâmetros iguais ou de tubos capilares de diâmetros e comprimentos conhecidos e, então, através dos conhecimentos geométricos, procurar definir o comportamento desse meio como equivalente a um meio real. Da mesma maneira puderam ser estudados meios porosos compostos por esferas de dimensões conhecidas e arranjos de forma cúbica de canal livre, ortorrômbica de canal aberto e outros arranjos mais complicados onde o fator complicativo era a porosidade do meio. Para um estudo dessa natureza seria necessária a criação de modelos compostos por esferas e por tubos capilares e então submetidos a fluxo de água em mesmas condições e seus parâmetros medidos, analisados e comparados.

Com os valores obtidos experimentalmente de porosidade e conhecendo o regime de fluxo, laminar, com valores de Número de Reynolds $\ll 1$, com velocidade muito pequena imposta por grandes perdas de carga em decorrência de elevado fator de fricção, conforme estudos descritos por Paspanastasiou (1994), buscou-se um modelo matemático que permitisse de maneira simples e visualizada o comportamento da velocidade de percolação num meio poroso teórico e equivalente. Com a

adimensionalização da equação de Navier-Stokes, envolvendo parâmetros como porosidade, conceito de raio hidráulico, perímetro molhado, circularidade e arranjos conhecidos para um meio equivalente composto por esferas de mesmo diâmetro, de modo a excluir as influências dimensionais e tornando os parâmetros de contorno variáveis entre 0 e 1, chegou-se à Equação 169 que representa o modelo equivalente pesquisado. Usando os recursos do software Matlab, e então introduzindo novamente as condições de contorno dimensionalizadas, traçou-se a Figura 40. Nela é observado o comportamento da velocidade de percolação $V(z,t)$, variando com a altura e com o tempo, que mostra o comportamento buscado da velocidade de percolação no meio.

A velocidade inicial parte de um valor diferente de zero, uma vazão inicial, porque é preciso imaginar um meio poroso inicialmente isento de umidades, tomando contato com uma frente de umidade e, só então, quando o fluxo atingir o meio poroso, passam a existir os fenômenos capilares e os das perdas de cargas influenciando na percolação. A Figura 40 demonstra ser essa perda de carga muito grande quando um fluxo atinge o meio, impondo a ele uma redução drástica da velocidade inicial de contato com o corpo (coloração bordo da figura). O deslocamento do fluido, no meio, se dará impulsionado apenas pelo efeito capilar tendo como reação contrária a perda de carga, composta pela gravidade, pela pressão ambiente e pelos efeitos da coesão do fluido em contato com o material do meio.

O fenômeno percolação se anulará quando os esforços capilares se igualarem ao das perdas de carga. Os estudos práticos realizados (FRANÇA, 200) mostram que a altura tangida por percolação nos meios porosos, tijolo e argamassa, pode alcançar de 30 a 40 cm em um período em torno de 20 horas e permanecer no meio na forma de umidade presente até que as condições de vazão inicial deixem de existir e efeitos de evaporação atuem no meio.

Destaca-se também o comportamento das amostras de tijolos quando submetidas à medição da massa real na termobalança Shimadzu. Ao serem submetidas à variações de temperatura de 20°C/h até atingir a 600°C, as amostras A, C e D perderam umidade, enquanto a amostra B não perdeu, como mostrado nas Figuras 41 a 44 no Anexo A3. Verifica-se nas figuras que com o decorrer do tempo e com a elevação da temperatura, as amostras perdem umidade, mas em certas condições

também ganham umidade. A termobalança trabalha com a amostra imersa em atmosfera inerte de nitrogênio constantemente sendo substituído a razão de 20 ml/min retirando toda umidade que evapora do meio. O ganho de água que as curvas das figuras mostram a temperaturas acima de 100°C é atribuída inicialmente às umidades adesivas, higroscópicas e de constituição que precisam vencer o labirinto de poros para deixar o meio. Posteriormente, em um patamar de altas temperaturas, as umidades que surgem são atribuídas às águas oriundas de reações químicas de elementos orgânicos, presentes na argila ou mesmo da mistura desta com areia, uma vez que os tijolos usados para estudos são fabricados sem muitos critérios de pureza.

É comum na construção civil a dosagem de água na preparação de argamassas não ter um critério de medição do volume a ser aplicado na mistura de cimento e areia pela mão de obra, embora tecnicamente experimentada. Também, no assentamento de tijolos em paredes e de seu revestimento é muito comum serem esses molhados para facilitar a aderência com a argamassa, fazendo com que essa prática acrescente mais umidade ao tijolo, provocando um excesso de umidade nos poros e em consequência disso facilitando o processo de percolação, com consequentes efeitos de deformação estrutural. A presença da umidade em excesso no tijolo, somada a umidade que será absorvida do solo e das intempéries, provocará não só os efeitos negativos estruturais mas também o surgimento de manchas e bolhas que afetarão o visual da parede acabada em mais dias ou menos dias.

O fenômeno natural de percolação capilar da água em um meio poroso cerâmico observado na Figura 40 e modelado pela equação $V'(z,t)$, mostrou que com elementos medidos indiretamente, porosidade, tamanho dos poros e arranjos entre partículas, quando envolvidos com conceitos de circularidade, esfericidade e arranjos físicos de partículas esféricas ou de tubos capilares, permitem comparações e analogias que levaram a facilitar o seu entendimento. O comportamento da velocidade de percolação nas observações de bancada de laboratório só não são totalmente coincidentes com o da modelagem apresentada, em virtude de, na prática existirem interferências de outros elementos que não puderam ser considerados, tais como: buracos deixados dentro da amostra por elementos orgânicos que foram eliminados na queima do tijolo e por volumes com ou sem umidade confinados em bolhas impermeáveis, como se fosse um

ovo, que se comportam não como uma partícula, mas sim como um grande obstáculo a ser contornado pelo escoamento. Tais ocorrências provocam atraso em trechos da linha de frente de deslocamento da percolação como o que foi observado na prática e conseqüentemente desuniformidade na velocidade ao depararem com esses obstáculos no meio poroso.

Para a anulação dos efeitos naturais e indesejáveis em edificações, são necessários alguns cuidados como o controle do tamanho das partículas e da quantidade de umidade do meio poroso. O controle, mais cuidados com tamanho dos grãos de areia, a eliminação de impurezas orgânicas da argila, e da umidade, tornando importante a impermeabilização do local onde se edificarão paredes bem como do revestimento de acabamento, principalmente se externo e exposto a intempéries.

Como sugestão para trabalhos futuros na área de percolação em meios porosos destaca-se a comprovação da linearidade de comportamento da equação de Blake-Kozeny para escoamento com Número de Reynolds tendendo a zero, ou seja no limite entre a existência ou não de deslocamento do fluido. Nessas condições, provavelmente os conceitos de filtração e percolação poderão ser semelhantes, mas apenas quando na filtração os poros se tornarem barreiras preenchidas por partículas, que imponham perdas de carga ao deslocamento do fluido, ou seja quando a permeabilidade do meio K tender a zero, tanto quanto a somatórias da pressão ambiente, com a gravidade e com as forças de coesão superficial se opõe à percolação capilar natural aqui estudada.

REFERÊNCIAS

AQUINO, A. M. S. **Escoamento em Meios Porosos Entre Superfícies Oscilantes - Uma Análise do Ponto de Vista da Tribologia**. 1998. Tese de Doutorado - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, UNESP, Guaratinguetá, 1998

BROWN, G. G. **Operaciones Basicas dela Ingenieria Quimica**. Barcelona: Marim S. A., 1963. 629p.

BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT. **Estimation of Thermal and Measure Movements and Stress**. Garston: 1979. 228p.

CARROCCI, L. R. **Escoamento de Coette Entre Duas Placas com Parte do Escoamento Preenchido Com Meio Poroso**. 1982. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP. Campinas.1982.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos Sólidos e Suas Aplicações**. 5.ed. Rio de Janeiro: L.T.C., 1987. 242p.

CRUZ, T. G.. **Caracterização Microestrutural de Cerâmicas de TiO₂ por Microscopia óptica e Processamento de Imagens**. 2003. 123f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica – Projeto e Materiais) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá – UNESP. Guaratinguetá. 2003.

FRANÇA, A..C..**Escoamento em Meios Porosos; Uma Análise Teórica e Experimental dos Efeitos dos Esforços Capilares Provocados por Percolação de Água em Elementos de Alvenaria**. 2000. 65f. Dissertação (mestrado em Engenharia Mecânica – Transmissão e conversão de Energia) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, UNESP, Guaratingueta, 2000

FRANCIS, F. O. **Hidráulica de Meios Permeáveis; Escoamento em Meios Porosos**. Rio de Janeiro: Interciências, 1980. 169p.

FREIRE, J. T.; GUBULIN, J. C. **Tópicos Especiais de Sistemas Particulados**. Universidade Federal de São Carlos. São Carlos: Ed. UFSCar, 1982. 313p.

GARCEZ, L. N. **Elementos de Mecânica dos Fluidos**. São Paulo: E. Blücher, 1970. 449p.

HOUPEURT, A. **Elementos de Mecanique des dans les Milieus Poreux**. Paris: Tchgnip, 1975.

LONGWELL, P. A. **Mechanics of Fluid Folw**. LCCCN 6527777. New York: Mc Graw Hill, 1966. 433p.

MUSKAT, M. **Flow of Homogeneous Fluids through Porous Media**. New York: Mc Graw Hill, 1937. 362p.

NEVES, E. T. **Curso de Hidráulica**. Porto Alegre: Globo, 1982. 578p.

OLIVEIRA, L. A. P.. **Influence du Microbeton de Remplissage et des Systemes Constructifs sur le Comportement des Maçonneries Armees**. Leige: Universite de Liege: 1992. 243p.

PAPANASTOSIOUS T. C.. **Applied Fluid Mechanics**. N. Jersey: Printece Hall, 1994, 532 pg. ISBN 0-13-060799-1.

SISSON, L. E.; PITTS, D. R.. Escoamento através de meios permeáveis. In: _____. **Fenômenos de Transporte**. Rio de Janeiro: Guanabara, 1988. Cap. 20, p.673-704. 765p.

PFEFFERMANN, O.. **Les Fissures Dans Les Constructions**. Bruxelles: Institut Technique Du Bâtiment Et Des Travaux Publics, 1968. 250p.

SCHILINGTING, H. H.. **Browndary Lay Theory**. New York: Mc Graw Hill, 1972.

STREETER, V. L. **Handbook of Fluid Dynamics**. New York: Mc Graw Hill, 1961. 1197p.

TOMAZ, E. **Trincas em Edifícios: Causas, Prevenção e Recuperação**. São Paulo: Pini, 1989. 194p. ISBN 85-09-00047-6

TAN, C. W. (Ed.) Journal of Fluid Mechanics. **The Drag of a Cloud Spherical Particle in Low Reynolds Nambers**. N. York: V.38. 1967. p. 537 - 546.

WHIFAKER, S. A Theoretical Derivation of Darcy's Law. Transport in Porous Media. In: _____. **Flow in Porous Media I**. 1986, V.1. p.3-25.

ZANARDI, M. A. **Escoamento em Cilindros Concêntricos com Parte Porosa**. 1986. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica).- Universidade de Campinas. Campinas: UNICAMP. 1986

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

BIRD, R. B., STEWART, W. E.; LIGTFEET, E.. **Fenómenos de Transporte**. Barcelona: Editorial Reverté. 1982. 570p.

BENNEEIT, C. O.; Meyer, J. E.. **Momentum, Heat and Mass Transfer**. Singapore: Mc Graw Hill. 1983. 831p.

COX, S. M. **Analyses of Steady Flow in a Channel with One Porous Wall, or with Accelerating Walls**. 1986, V.1. Cap. 1 p.3-25

HANSEN, A. G.. Foundation of Fluid Mechanics and Fluid Statics. In:____. **Fluid Mechanics**. New York: 1965, WIE. p. 1965.

INNOCENTINI, M. D. C.; STUDART, A. R.; PILEGGI, R. G.; PANDOLFELLI, V. C.. **Perfil de permeabilidade em concretos refratários**. Permeability gradient in refractory castables. São Carlos: Departamento de Engenharia de materiais, UFSCar, 2001, 11p. Disponível em <http://www.scielo.br> . Acesso em 22 ago. 2004

INNOCENTINI, M. D. C.; STUDART, A. R.; PILEGGI, R. G.; PANDOLFELLI, V. C.. **Perfil de permeabilidade em concretos multifuncionais**. Permeability gradient in refractory castables. São Carlos: Departamento de Engenharia de materiais, UFSCar, 2001, 11p. Disponível em <http://www.scielo.br> . Acesso em 26 ago. 2004

KIRILOS, J. P. Desenvolvimento de Um Método para Determinação de Índice de Infiltração de Água sob Pressão em Argamassa ou Concreto Portland em Laboratório e Obras. **Revista IBRACON**, São Paulo. nº 28, Janeiro / março, Ano IX, P. 3 - 10. 2002

NORTON, F. H.. **Cerâmica Fina: Tecnologia y Aplicaciones**. 1 ed. Barcelona: Omega S. A. 1975. p. 1-18

OLIVEIRA, L. A. P.. **Estudo de Desempenho dos Grautes com Adições para Enchimento de Alvenaria Estrutural**. 1986. 100f. Dissertação (Mestrado)-Politécnica da Universidade de São Paulo. USP. São Paulo. 1986

QUINTELA, A. C.. Escoamento em Meios Porosos. In:____. **Hidráulica**. Lisboa: F. C. Gulbenkian, 1981. cap. 13. p. 351-371.

VIANNA, M. R. **Mecânica dos Fluidos para Engenheiros**. 4ªed. Belo Horizonte. Imprimatur, 2001. 582p.

ANEXOS

ANEXOS A

Os dados obtidos nas medições experimentais nos equipamentos, porosímetro, picnômetro, termobalança e processamento de imagens, são mostrados a seguir, na forma de tabela e gráficos, para melhor elucidação dos parâmetros adotados nos equacionamentos

A 1 – RESULTADOS DA MEDIÇÃO DO TAMANHO DOS POROS NO POROSÍMETRO AUSCAN – 33 QUANTACHROME

Os resultados obtidos no porosímetro a mercúrio em que se mediu o tamanho dos poros, as distribuições de volume de vazios e volume específico das amostras estão compilados nas Tabelas 12 e 13 cujos dados foram obtidos das Tabelas 20 a 24 do Anexo B.

Tabela 12 – Diâmetro dos poros, volume específico de vazios e massa das amostras.

AMOSTRA	RESUMO DOS DADOS DO POROSÍMETRO				
	DIÂMETRO DOS POROS (Å)			VOLUME DE VAZIOS TOTAL (cm ³ /g)	MASSA DA AMOSTRA (g)
	MENOR	MAIOR	MÉDIO		
A	150	60000	5310	0,226	0,44717
B	100	60000	-	0,151	0,53001
C	150	60000	-	0,155	0,59481
D	100	60000	-	0,166	0,56873
MÉDIAS	125	60000	5310	0,1745	0,53518
ARGAMASSA	100	60000	-	0,070	0,35872

Obs.: 1) Os diâmetros menor e maior são limitados pela capacidade do Porosímetro
 2) Compilação das Tabelas 20 a 24
 3) Porosímetro Autoscan-33 Quantachrome de propriedade do INPE
 4) Nas médias, não está considerado a Argamassa que entra na tabela como informação complementar.

Tabela 13 – Volume ocupado por material, pelos poros e volume total

VOLUME DE MATERIAL, VOLUME DOS POROS E VOLUME TOTAL					
AMOSTRA	VOL. DE MATERIAL		VOL. DOS POROS		VOL.TOTAL
	cm ³	%	cm ³	%	cm ³
A	1,212725	92,3	0,1010604	7,7	1,3137854
B	1,5126485	95,0	0,0800315	5,0	1,5926800
C	1,5869531	94,51	0,0921955	5,49	1,6791486
D	1,5241964	95,85	0,0659726	4,15	1,5901690
MÉDIA	1,4591308		0,0845159		1,5439458
ARGAMASSA	1,590169	98,45	0,0251104	1,55	1,6152794

Obs.: 1) Compilação das tabelas 20 a 24
 2) Porosímetro Autoscan-33 Quantachrome de propriedade do INPE
 3) Nas médias, não está considerado a Argamassa que entra na tabela como informação complementar.

Nas Tabela 12 e 13 são mantidas as unidades das grandezas como apresentadas pelo equipamento respeitando a originalidade e o modelo de determinação dos valores da máquina, como descrito em 2.2.1 e anexos A1 a A5.

A 2 – RESULTADOS DA ANÁLISE DA MASSA ESPECÍFICA REAL - PICNÔMETRO MULTIVOLUME 1305 – MICROMERITIC

Resultados obtidos das medições realizadas no picnômetro para a determinação da massa específica das amostras.

Na Tabela 14 também são mantidas as unidades das grandezas, como apresentadas pelo equipamento, respeitando a originalidade e o modelo de determinação dos valores da máquina. Os dados originais que compuseram a Tabela 14 encontram-se nos Tabelas 25 a 29.

Tabela 14 – Resumo dos dados das tabelas 25 a 29

MASSA ESPECÍFICA - DADOS OBTIDOS DO PICNÔMETRO			
AMOSTRA	MASSA ESPECÍFICA (g/cm ³)	MASSA DA AMOSTRA (g)	VOLUME MÉDIO DA AMOSTRA (cm ³)
A	2,712	1,38456	0,5106
B	2,854	1,13067	0,3962
C	2,668	1,00052	0,3751
D	2,680	1,41107	0,5265
MÉDIAS	2,7285	1,231705	0,4521
CON	2,6700	1,79664	0,6729
Obs.: 1) Compilação das tabelas 25 a 29 2) Picnômetro Multivolume 1305 de propriedade do INPE 3) Nas médias, não está considerado a Argamassa que entra na tabela como informação complementar.			

A 3 - CURVAS DE SECAGEM - TERMOBALANÇA SHIMADZU TGA-50H

As curvas de secagem a seguir apresentadas, Figuras 41 a 44, mostram o comportamento das amostras quando colocadas para secar na Termobalança Shimadzu TGA-50, como descrito em 3.4.

São observados nas figuras:

- 1) Curva de secagem real e curva média do comportamento das amostras quando submetidas a variações de temperatura de 20°C/h.
- 2) A curva média traçada mostra as dispersões de comportamento da perda de umidade em relação ao comportamento real pelo período em que a amostra foi submetida até não haver mais variação de massa.
- 3) A secagem das amostras não apresentou comportamento linear de perda de umidade, mostrando, inclusive, ganho de umidade em faixas de altas temperaturas nas quais não se esperava a presença de água. Este fenômeno é explicado pela presença de bolhas de umidade confinadas, que eclodiram sob alta pressão de

vapor ou pela liberação de água em reações químicas de componentes catalisados pela alta temperatura.

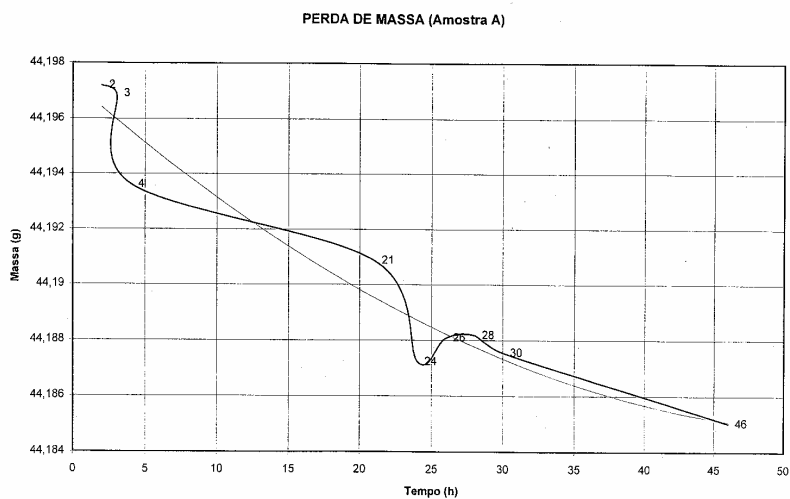


Figura 41 – Curva de secagem do tijolo A

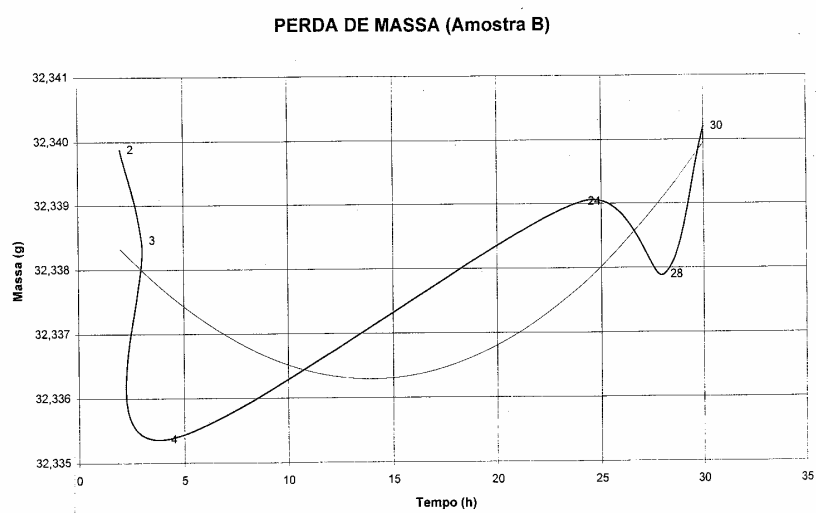


Figura 42 – Curva de secagem do tijolo B

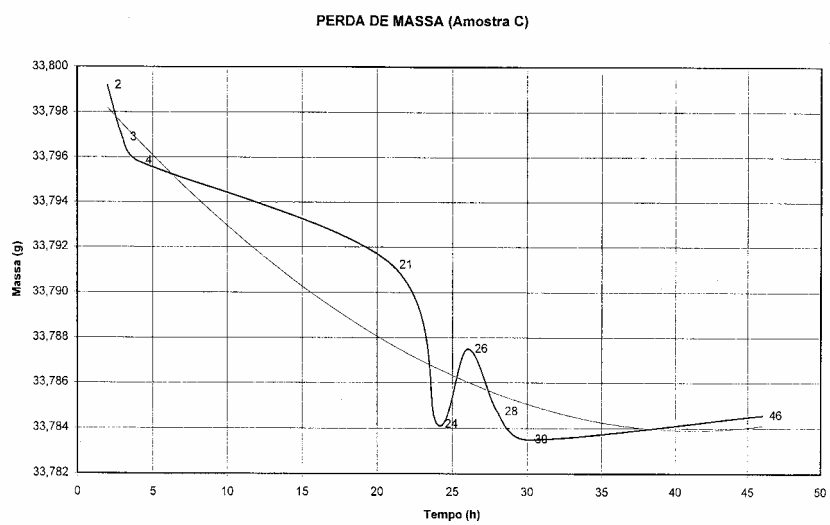


Figura 43 - Curva de secagem do tijolo C

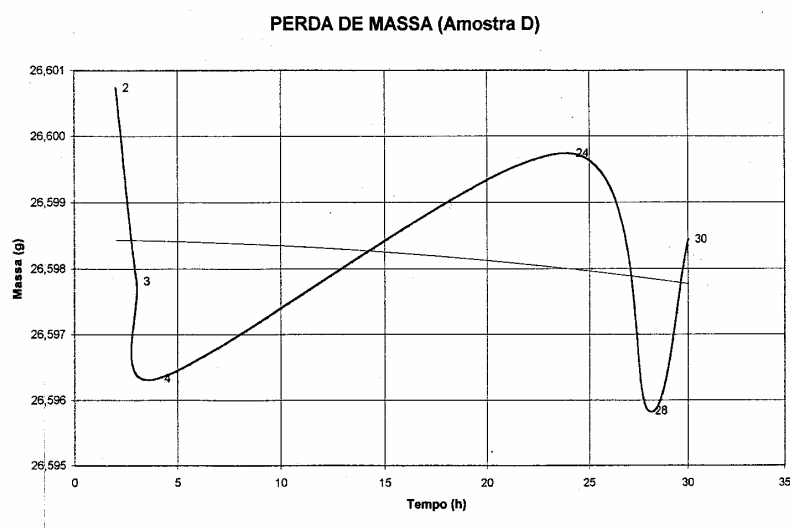


Figura 44 – Curva de secagem do tijolo D

A 4 - DISTRIBUIÇÃO DE DADOS OBTIDOS PELO MÉTODO DE PROCESSAMENTO_DE IMAGENS

Na composição das figuras 23 a 26 mostradas em 1.6 foram utilizados os dados a seguir das Tabela 15 a 19 e Figuras 45 a 49 obtidos pelo processador de imagens.

Tabela 15 – Distribuição das Áreas dos poros na amostra

DISTRIBUIÇÃO DAS ÁREAS DOS POROS (μm)					
INTERVALO (cm^2)	FREQUÊNCIA	%	INTERVALO (cm^2)	FREQUÊNCIA	%
0			110	0	0
10	229	38,16	120	2	0,33
20	185	30,82	130	0	0
30	71	11,82	140	1	0,22
40	34	5,66	150	0	0
50	19	3,17	160	0	0
60	16	2,67	170	0	0
70	5	0,83	180	3	0,50
80	11	1,83	190	0	0
90	5	0,83	200	3	0,50
100	3	0,50	250	13	2,16

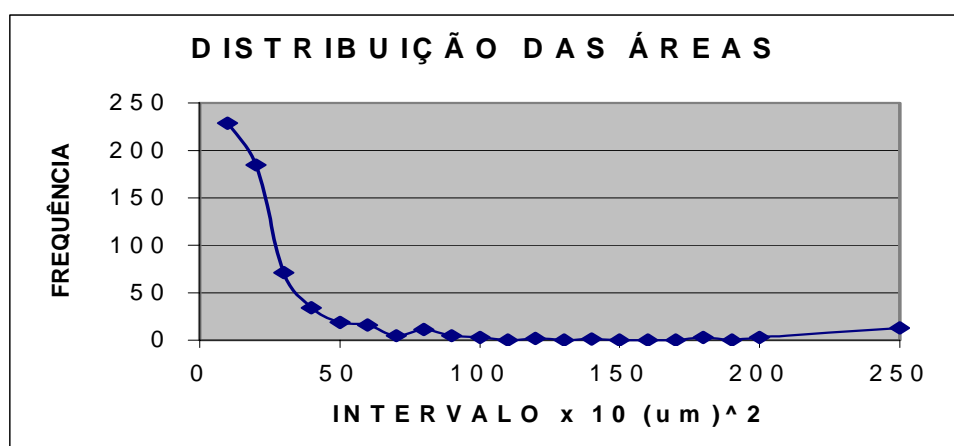


Figura 45 – Distribuição das Áreas dos poros na amostra

Tabela 16 – Distribuição dos valores da circularidade dos poros na amostra

DISTRIBUIÇÃO DA CIRCULARIDADE					
INTERVALO	FREQUÊNCIA	%	INTERVALO	FREQUÊNCIA	%
0			0,6	107	18,36
0,1	8	10,37	0,7	83	14,24
0,2	36	6,18	0,8	42	7,2
0,3	59	10,12	0,9	51	8,74
0,4	87	14,92	1,0	24	4,12
0,5	86	14,75			

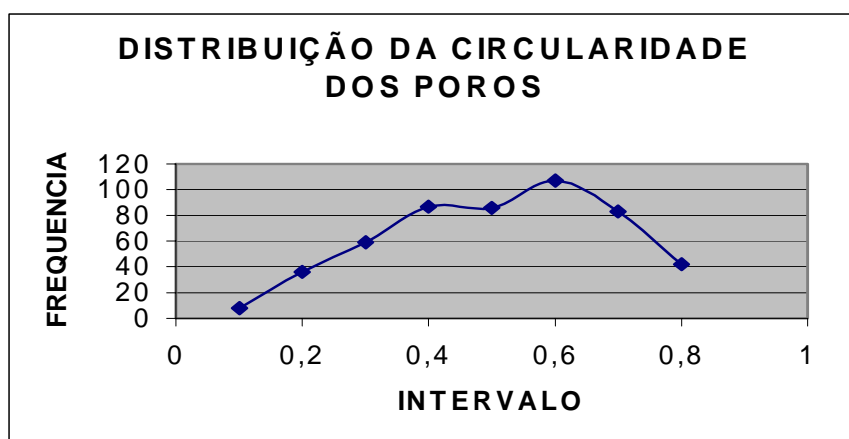


Figura 46 – Distribuição dos valores da circularidade dos poros na amostra

Tabela 17 – Distribuição do tamanho dos perímetros dos poros na amostra

DISTRIBUIÇÃO DO TAMANHO DOS PERÍMETROS DOS POROS (μm)					
INTERVALO (μm)	FREQUÊNCIA	%	INTERVALO (μm)	FREQUÊNCIA	%
0			110	2	0,33
10	36	6,00	120	1	0,16
20	330	55,00	130	0	0,00
30	95	15,84	140	5	0,84
40	53	8,84	150	1	0,16
50	24	4,00	160	0	0,00
60	14	2,34	170	0	0,00
70	11	1,83	180	0	0,00
80	12	2,00	190	0	0,00
90	3	0,50	200	9	1,50
100	4	0,66			

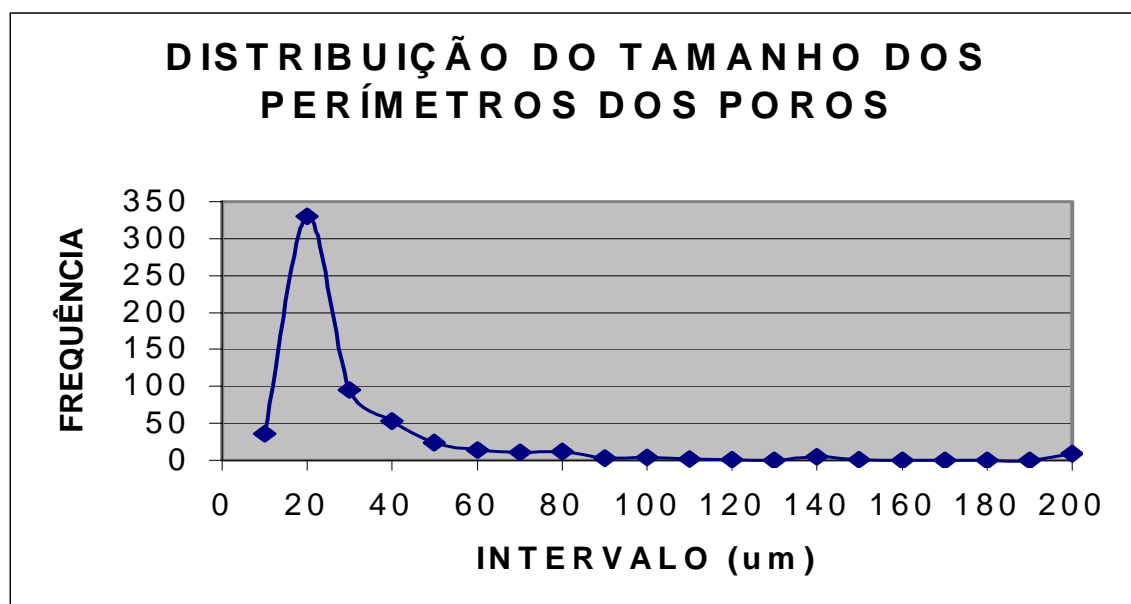


Figura 47 – Distribuição do tamanho dos perímetros dos poros na amostra

Tabela 18– Distribuição do Diâmetro Maior na amostra

DISTRIBUIÇÃO DO DIÂMETRO MAIOR [μm]					
INTERVALO	FREQUÊNCIA	%	INTERVALO	FREQUÊNCIA	%
0	0		35	3	0,30
5	241	40,17	40	1	0,16
10	262	43,66	45	1	0,16
15	58	9,66	50	0	0
20	23	3,83	55	2	0,32
25	6	1,00	60	0	0
30	3	0,30			

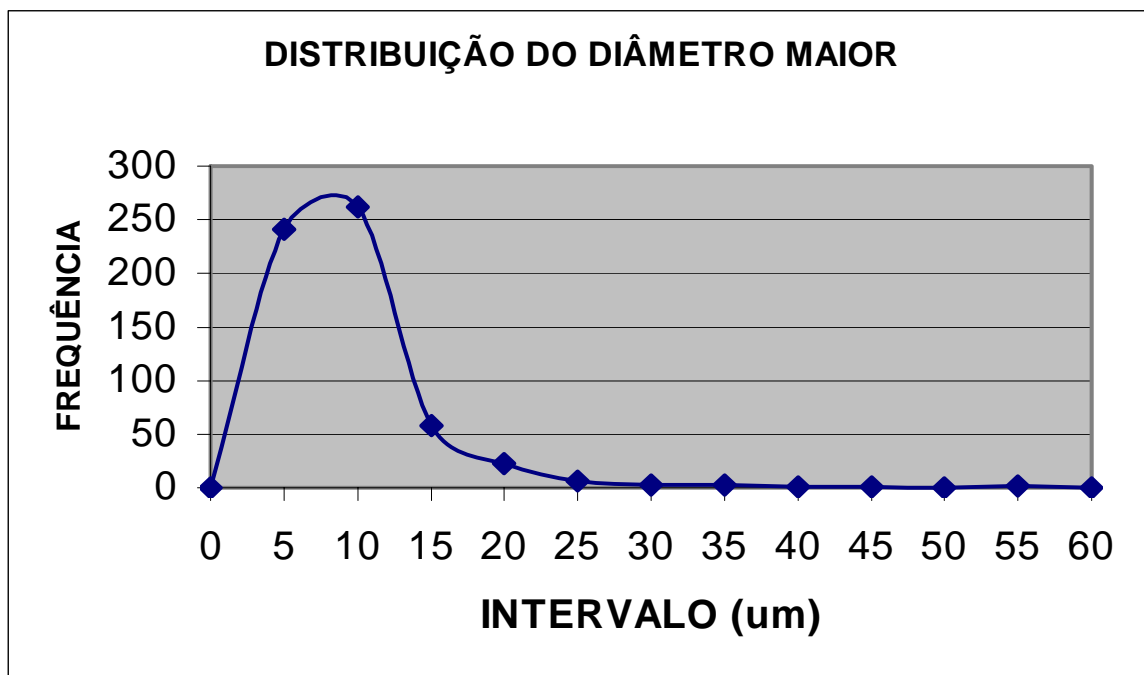


Figura 48 – Distribuição do Diâmetro Maior da amostra

Tabela 19 – Distribuição do Diâmetro Menor na amostra

DISTRIBUIÇÃO DO DIÂMETRO MENOR (μm)					
INTERVALO	FREQUÊNCIA	%	INTERVALO	FREQUÊNCIA	%
0			11	7	1,16
1	0	0	12	1	0,16
2	80	13,20	13	3	0,50
3	231	38,40	14	1	0,16
4	132	22,40	15	3	0,50
5	60	10,00	16	0	0,00
6	40	6,56	17	2	0,33
7	14	2,33	18	1	0,16
8	11	1,83	19	1	0,16
9	7	1,16	20	1	0,16
10	2	0,33	30	3	0,50

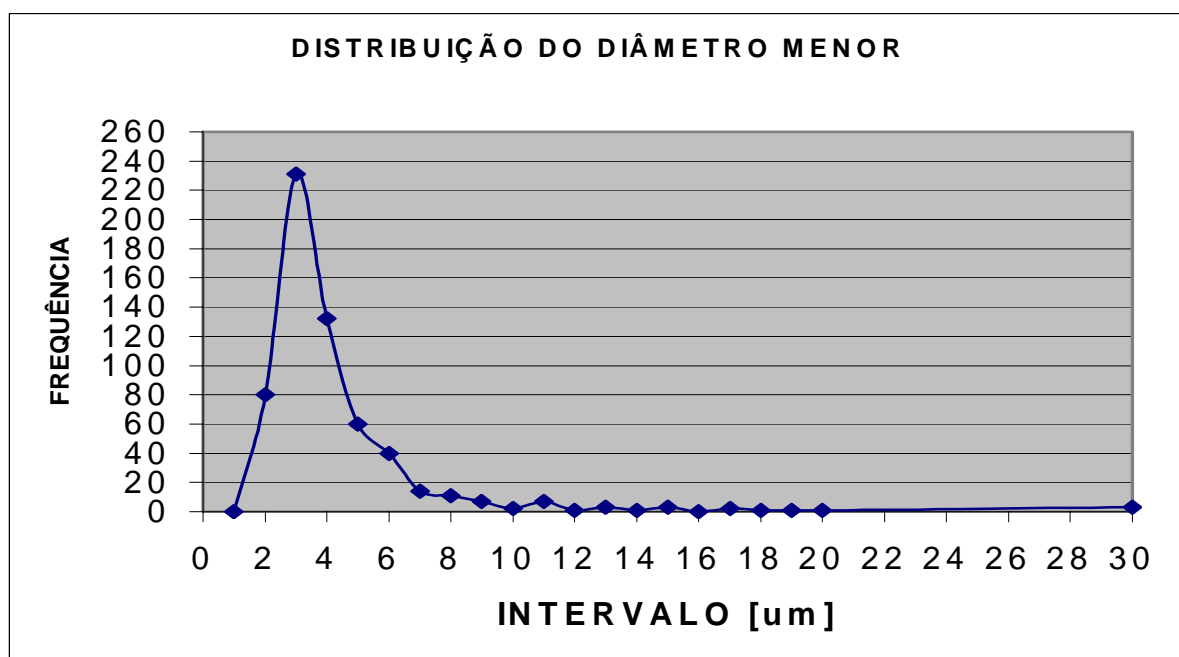


Figura 49 – Distribuição do Diâmetro Menor na amostra

ANEXOS B – POROSÍMETRO AUTOSCAN – 33 QUANTACHROME

Tabela 20 - Análise de distribuição de meso e macroporos

Análise de distribuição de meso e macroporos							
Porosímetro Austocan-33 Quantachrome							
Análise n°: 33/2002 Data: 05.12.02		Célula: 08		Código: A			
Amostra: TIJOLO		Massa: 0,44717 g		Pré-tratamento: 120°C/24h			
Forma: Pastilha		Vol. Calibrado: 349		Ângulo Contato: 140°			
Pressão		Volume		Pressão		Volume	
P(psia)	D _P (Å)	cm ³	cm ³ /g	P(psia)	D _P (Å)	cm ³	cm ³ /g
<35,55	>6,0x10 ⁴	0,008	0,018	1067	2,0x10 ³	0,025	0,056
35,55	6,0x10 ⁴	0,000	0,000	2134	1,0x10 ³	0,049	0,110
42,86	5,0x10 ⁴	0,003	0,007	3201	7,5x10 ²	0,070	0,157
53,35	4,0x10 ⁴	0,004	0,009	4268	5,0x10 ²	0,083	0,186
71,13	3,0x10 ⁴	0,006	0,013	4802	4,5x10 ²	0,088	0,197
106,7	2,0x10 ⁴	0,008	0,018	5335	4,0x10 ²	0,090	0,201
121,9	1,75x10 ⁴	0,009	0,020	6224	3,5x10 ²	0,095	0,212
142,3	1,5x10 ⁴	0,010	0,022	7113	3,0x10 ²	0,095	0,212
170,7	1,25x10 ⁴	0,011	0,025	8892	2,5x10 ²	0,097	0,217
213,4	1,0x10 ⁴	0,013	0,029	10670	2,0x10 ²	0,099	0,221
237,1	9,0x10 ³	0,013	0,029	16005	1,5x10 ²	0,101	0,226
266,1	8,0x10 ³	0,014	0,031	21340	1,0x10 ²	0,101	0,226
304,8	7,0x10 ³	0,015	0,034	23711	9,0x10 ¹	0,101	0,226
355,7	6,0x10 ³	0,016	0,036	26675	8,0x10 ¹	0,101	0,226
426,8	5,0x10 ³	0,017	0,038	30486	7,0x10 ¹	0,101	0,226
533,5	4,0x10 ³	0,018	0,040	33000	6,4x10 ¹	0,101	0,226
711,3	3,0x10 ³	0,021	0,047				
<i>Dados estatísticos</i>				Distribuição porosa		Volume específico (cm³ / g)	
100<D _P <60,000Å		D _P (Å)		10 ² <D _P <10 ³ Å		0,116	
Moda		155		10 ³ <D _P <10 ⁴ Å		0,081	
Média		5310		10 ⁴ <D _P <2x10 ⁴ Å		0,011	
Mediana		863		2x10 ⁴ <D _P <3x10 ⁴ Å		0,004	
Nota: 1-Os valores preenchidos com cor cinza representam o aumento de pressão sem a correspondente penetração de mercúrio em poros. Limite do equipamento. 2- Equipamento de propriedade dos Laboratórios Associados de Combustão e Propulsão do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE				3x10 ⁴ <D _P <4x10 ⁴ Å		0,004	
				4x10 ⁴ <D _P <5x10 ⁴ Å		0,002	
				5x10 ⁴ <D _P <6x10 ⁴ Å		0,007	
				Total		0,226	

Tabela 21 - Análise de distribuição de meso e macroporos

Análise de distribuição de meso e macroporos							
Porosímetro Austocan-33 Quantachrome							
Análise nº: 33/2002 Data: 11.12.02		Célula: 08		Código: B			
Amostra: TIJOLO		Massa: 0,53001 g		Pré-tratamento: 120°C/24h			
Forma: Pastilha		Vol. Calibrado: 349		Ângulo Contato: 140°			
Pressão		Volume		Pressão		Volume	
P(psia)	D _P (Å)	cm ³	cm ³ /g	P(psia)	D _P (Å)	cm ³	cm ³ /g
<35,55	>6,0x10 ⁴	0,015	0,018	1067	2,0x10 ³	0,034	0,064
35,55	6,0x10 ⁴	0,000	0,000	2134	1,0x10 ³	0,053	0,100
42,86	5,0x10 ⁴	0,002	0,004	3201	7,5x10 ²	0,065	0,123
53,35	4,0x10 ⁴	0,003	0,006	4268	5,0x10 ²	0,070	0,132
71,13	3,0x10 ⁴	0,007	0,013	4802	4,5x10 ²	0,073	0,138
106,7	2,0x10 ⁴	0,010	0,019	5335	4,0x10 ²	0,075	0,142
121,9	1,75x10 ⁴	0,012	0,023	6224	3,5x10 ²	0,077	0,145
142,3	1,5x10 ⁴	0,012	0,023	7113	3,0x10 ²	0,080	0,151
170,7	1,25x10 ⁴	0,014	0,026	8892	2,5x10 ²	0,080	0,151
213,4	1,0x10 ⁴	0,015	0,028	10670	2,0x10 ²	0,080	0,151
237,1	9,0x10 ³	0,016	0,030	16005	1,5x10 ²	0,080	0,151
266,1	8,0x10 ³	0,017	0,032	21340	1,0x10 ²	0,080	0,151
304,8	7,0x10 ³	0,018	0,034	23711	9,0x10 ¹	0,080	0,151
355,7	6,0x10 ³	0,020	0,038	26675	8,0x10 ¹	0,080	0,151
426,8	5,0x10 ³	0,021	0,040	30486	7,0x10 ¹	0,080	0,151
533,5	4,0x10 ³	0,024	0,045	33000	6,4x10 ¹	0,080	0,151
711,3	3,0x10 ³	0,027	0,051				
Dados Estatísticos				Distribuição Porosa		Volume (cm ³ /g)	
100<D _P <60,000Å		D _P (Å)		10 ² <D _P <10 ³ Å		0,051	
Moda		-		10 ³ <D _P <10 ⁴ Å		0,072	
Média		-		10 ⁴ <D _P <2x10 ⁴ Å		0,009	
Mediana		-		2x10 ⁴ <D _P <3x10 ⁴ Å		0,006	
Nota: 1-Os valores preenchidos com cor cinza representam o aumento de pressão sem a correspondente penetração de mercúrio em poros. Limite do equipamento. 2- Equipamento de propriedade dos Laboratórios Associados de Combustão e Propulsão do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE				3x10 ⁴ <D _P <4x10 ⁴ Å		0,008	
				4x10 ⁴ <D _P <5x10 ⁴ Å		0,002	
				5x10 ⁴ <D _P <6x10 ⁴ Å		0,004	
				Total		0,151	

Tabela 22 - Análise de distribuição de meso e macroporos

Análise de distribuição de meso e macroporos							
Porosímetro Austocan-33 Quantachrome							
Análise nº: 33/2002 Data: 06.12.02		Célula: 08		Código: C			
Amostra: TIJOLO		Massa: 0,59481 g		Pré-tratamento: 120°C/24h			
Forma: Pastilha		Vol. Calibrado: 349		Ângulo Contato: 140°			
Pressão		Volume		Pressão		Volume	
P(psia)	D _P (Å)	cm ³	cm ³ /g	P(psia)	D _P (Å)	cm ³	cm ³ /g
<35,55	>6,0x10 ⁴	0,004	0,007	1067	2,0x10 ³	0,017	0,029
35,55	6,0x10 ⁴	0,000	0,000	2134	1,0x10 ³	0,024	0,040
42,86	5,0x10 ⁴	0,002	0,003	3201	7,5x10 ²	0,034	0,057
53,35	4,0x10 ⁴	0,004	0,007	4268	5,0x10 ²	0,047	0,079
71,13	3,0x10 ⁴	0,005	0,008	4802	4,5x10 ²	0,052	0,087
106,7	2,0x10 ⁴	0,007	0,012	5335	4,0x10 ²	0,058	0,098
121,9	1,75x10 ⁴	0,008	0,013	6224	3,5x10 ²	0,065	0,109
142,3	1,5x10 ⁴	0,008	0,013	7113	3,0x10 ²	0,069	0,116
170,7	1,25x10 ⁴	0,009	0,015	8892	2,5x10 ²	0,078	0,130
213,4	1,0x10 ⁴	0,010	0,017	10670	2,0x10 ²	0,083	0,140
237,1	9,0x10 ³	0,011	0,018	16005	1,5x10 ²	0,092	0,155
266,1	8,0x10 ³	0,011	0,018	21340	1,0x10 ²	0,095	0,160
304,8	7,0x10 ³	0,012	0,020	23711	9,0x10 ¹	0,096	0,161
355,7	6,0x10 ³	0,013	0,022	26675	8,0x10 ¹	0,096	0,161
426,8	5,0x10 ³	0,014	0,024	30486	7,0x10 ¹	0,097	0,163
533,5	4,0x10 ³	0,014	0,024	33000	6,4x10 ¹	0,098	0,165
711,3	3,0x10 ³	0,015	0,025				
Dados Estatísticos				Distribuição Porosa		Volume (cm ³ /g)	
100<D _P <60,000Å		D _P (Å)		10 ² <D _P <10 ³ Å		0,114	
Moda		-		10 ³ <D _P <10 ⁴ Å		0,024	
Média		-		10 ⁴ <D _P <2x10 ⁴ Å		0,005	
Mediana		-		2x10 ⁴ <D _P <3x10 ⁴ Å		0,003	
Nota: 1-Os valores preenchidos com cor cinza representam o aumento de pressão sem a correspondente penetração de mercúrio em poros. Limite do equipamento. 2- Equipamento de propriedade dos Laboratórios Associados de Combustão e Propulsão do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE				3x10 ⁴ <D _P <4x10 ⁴ Å		0,002	
				4x10 ⁴ <D _P <5x10 ⁴ Å		0,003	
				5x10 ⁴ <D _P <6x10 ⁴ Å		0,004	
				Total		0,155	

Tabela 23 - Análise de distribuição de meso e macroporos

Análise de distribuição de meso e macroporos							
Porosímetro Austocan-33 Quantachrome							
Análise nº: 33/2002 Data: 11.12.02		Célula: 08		Código: D			
Amostra: TIJOLO		Massa: 0,56873 g		Pré-tratamento: 120°C/24h			
Forma: Pastilha		Vol. Calibrado: 349		Ângulo Contato: 140°			
Pressão		Volume		Pressão		Volume	
P(psia)	D _P (Å)	cm ³	cm ³ /g	P(psia)	D _P (Å)	cm ³	cm ³ /g
<35,55	>6,0x10 ⁴	0,015	0,018	1067	2,0x10 ³	0,019	0,033
35,55	6,0x10 ⁴	0,000	0,000	2134	1,0x10 ³	0,028	0,049
42,86	5,0x10 ⁴	0,002	0,004	3201	7,5x10 ²	0,046	0,081
53,35	4,0x10 ⁴	0,003	0,005	4268	5,0x10 ²	0,062	0,109
71,13	3,0x10 ⁴	0,006	0,011	4802	4,5x10 ²	0,067	0,118
106,7	2,0x10 ⁴	0,007	0,012	5335	4,0x10 ²	0,071	0,125
121,9	1,75x10 ⁴	0,009	0,016	6224	3,5x10 ²	0,075	0,132
142,3	1,5x10 ⁴	0,010	0,018	7113	3,0x10 ²	0,082	0,144
170,7	1,25x10 ⁴	0,011	0,019	8892	2,5x10 ²	0,088	0,155
213,4	1,0x10 ⁴	0,011	0,019	10670	2,0x10 ²	0,090	0,158
237,1	9,0x10 ³	0,012	0,021	16005	1,5x10 ²	0,094	0,165
266,1	8,0x10 ³	0,012	0,021	21340	1,0x10 ²	0,095	0,167
304,8	7,0x10 ³	0,013	0,023	23711	9,0x10 ¹	0,095	0,167
355,7	6,0x10 ³	0,013	0,023	26675	8,0x10 ¹	0,095	0,167
426,8	5,0x10 ³	0,015	0,026	30486	7,0x10 ¹	0,095	0,167
533,5	4,0x10 ³	0,016	0,028	33000	6,4x10 ¹	0,095	0,167
711,3	3,0x10 ³	0,017	0,030				
Dados Estatísticos				Distribuição Porosa		Volume (cm ³ /g)	
100<D _P <60,000Å		D _P (Å)		10 ² <D _P <10 ³ Å		0,116	
Moda		-		10 ³ <D _P <10 ⁴ Å		0,030	
Média		-		10 ⁴ <D _P <2x10 ⁴ Å		0,007	
Mediana		-		2x10 ⁴ <D _P <3x10 ⁴ Å		0,002	
Nota: 1-Os valores preenchidos com cor cinza representam o aumento de pressão sem a correspondente penetração de mercúrio em poros. Limite do equipamento. 2- Equipamento de propriedade dos Laboratórios Associados de Combustão e Propulsão do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE				3x10 ⁴ <D _P <4x10 ⁴ Å		0,005	
				4x10 ⁴ <D _P <5x10 ⁴ Å		0,002	
				5x10 ⁴ <D _P <6x10 ⁴ Å		0,004	
				Total		0,166	

Tabela 24 - Análise de distribuição de meso e macroporos

Análise de distribuição de meso e macroporos							
Porosímetro Austocan-33 Quantachrome							
Análise n°: 06/2002 Data: 18.03.03		Célula: 08		Código: CON (Argamassa)			
Amostra: ARGAMASSA		Massa: 0,35872 g		Pré-tratamento: 120°C/24h			
Forma: Pastilha		Vol. Calibrado: 349		Ângulo Contato: 140°			
Pressão		Volume		Pressão		Volume	
P(psia)	D _P (Å)	cm ³	cm ³ /g	P(psia)	D _P (Å)	cm ³	cm ³ /g
<35,55	>6,0x10 ⁴	0,03	0,008	1067	2,0x10 ³	0,014	0,039
35,55	6,0x10 ⁴	0,000	0,000	2134	1,0x10 ³	0,017	0,047
42,86	5,0x10 ⁴	0,001	0,003	3201	7,5x10 ²	0,018	0,050
53,35	4,0x10 ⁴	0,002	0,006	4268	5,0x10 ²	0,019	0,053
71,13	3,0x10 ⁴	0,003	0,008	4802	4,5x10 ²	0,020	0,056
106,7	2,0x10 ⁴	0,004	0,011	5335	4,0x10 ²	0,020	0,056
121,9	1,75x10 ⁴	0,005	0,014	6224	3,5x10 ²	0,021	0,059
142,3	1,5x10 ⁴	0,005	0,014	7113	3,0x10 ²	0,022	0,061
170,7	1,25x10 ⁴	0,006	0,017	8892	2,5x10 ²	0,022	0,064
213,4	1,0x10 ⁴	0,007	0,020	10670	2,0x10 ²	0,026	0,070
237,1	9,0x10 ³	0,007	0,020	16005	1,5x10 ²	0,025	0,070
266,1	8,0x10 ³	0,007	0,020	21340	1,0x10 ²	0,025	0,070
304,8	7,0x10 ³	0,008	0,022	23711	9,0x10 ¹	0,025	0,070
355,7	6,0x10 ³	0,009	0,025	26675	8,0x10 ¹	0,025	0,070
426,8	5,0x10 ³	0,010	0,028	30486	7,0x10 ¹	0,025	0,070
533,5	4,0x10 ³	0,011	0,031	33000	6,4x10 ¹	0,025	0,070
711,3	3,0x10 ³	0,012	0,033				
Dados Estatísticos				Distribuição Porosa		Volume (cm ³ /g)	
100<D _P <60,000Å		D _P (Å)		10 ² <D _P <10 ³ Å		0,022	
Moda		-		10 ³ <D _P <10 ⁴ Å		0,028	
Média		-		10 ⁴ <D _P <2x10 ⁴ Å		0,009	
Mediana		-		2x10 ⁴ <D _P <3x10 ⁴ Å		0,003	
Nota: 1-Os valores preenchidos com cor cinza representam o aumento de pressão sem a correspondente penetração de mercúrio em poros. Limite do equipamento. 2- Equipamento de propriedade dos Laboratórios Associados de Combustão e Propulsão do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE				3x10 ⁴ <D _P <4x10 ⁴ Å		0,003	
				4x10 ⁴ <D _P <5x10 ⁴ Å		0,003	
				5x10 ⁴ <D _P <6x10 ⁴ Å		0,003	
				Total		0,070	

ANEXOS C – PICNÔMETRO MULTIVOLUME 1305 – MICROMERITIC

Tabela 25 - Análise da massa específica real Tijolo A.

Análise da Massa Específica real			
Picnômetro Multivolume 1305 - Micromeritic			
Análise nº: 33/2002		Data: 05/12/02	Amostra: TIJOLO A
Cadinho carregado: 2,9341g		Cadinho vazio: 1,54960g	
Pré-tratamento: 120 °C/24 h		Massa da Amostra: 1,38456g	
Volume da Célula: 7,979cm ³		Célula: 5	
Variação compl. escala: 19,500		Minutos de purga: 30 minutos	
Vol. Expansão: 6,280 cm ³		Minutos de vácuo: 30 minutos	
Nº	P1	P2	Vol. Amostra
1	19,462	10,573	0,509
2	19,404	10,540	0,512
3	19,445	10,561	0,514
4	19,317	10,493	0,511
5	19,576	10,634	0,511
6	19,596	10,646	0,509
7	19,355	10,515	0,509
8	19,334	10,503	0,510
9	19,464	10,573	0,511
10	19,381	10,528	0,511
Vol.Amostra =		\sum 5,106	Massa Específica =
Vol.Célula - $\frac{\text{Vol.Expansão}}{(P1/P2) - 1}$		Média: 0,5106	Massa da Amostra
		Desvio: 0,0014	<hr/>
			Vol. Médio
			= 2,712 g/cm ³

Tabela 26 - Análise da massa específica real Tijolo .

Análise da Massa Específica real			
Picnômetro Multivolume 1305 - Micromeritic			
Análise nº: 33/2002		Data: 11/12/02	Amostra: TIJOLO B
Cadinho carregado: 2,68027g		Cadinho vazio: 1,54960g	
Pré-tratamento: 120 °C/24 h		Massa da Amostra: 1,13067g	
Volume da Célula: 7,979cm ³		Célula: 5	
Variação compl. escala: 19,500		Minutos de purga: 30 minutos	
Vol. Expansão: 6,280 cm ³		Minutos de vácuo: 30 minutos	
Nº	P1	P2	Vol. Amostra
1	19,602	10,718	0,403
2	19,310	10,561	0,401
3	19,342	10,580	0,396
4	19,576	10,705	0,401
5	19,494	10,665	0,393
6	19,525	10,680	0,396
7	19,517	10,675	0,397
8	19,401	10,613	0,395
9	19,351	10,587	0,393
10	19,570	10,710	0,388
Vol.Amostra =		\sum 3,962	Massa Específica =
Vol.Célula - $\frac{\text{Vol.Expansão}}{(P1/P2) - 1}$		Média: 0,3962 Desvio: 0,0045	$\frac{\text{Massa da Amostra}}{\text{Vol. Médio}}$ = 2,854 g/cm³

Tabela 27 - Análise da massa específica real Tijolo C.

Análise da Massa Específica real			
Picnômetro Multivolume 1305 - Micromeritic			
Análise nº: 33/2002		Data: 06/12/02	Amostra: TIJOLO C
Cadinho carregado: 2,5501g		Cadinho vazio: 1,54960g	
Pré-tratamento: 120 °C/24 h		Massa da Amostra: 1,00052g	
Volume da Célula: 7,979cm ³		Célula: 5	
Variação compl. escala: 19,500		Minutos de purga: 30 minutos	
Vol. Expansão: 6,280 cm ³		Minutos de vácuo: 30 minutos	
Nº	P1	P2	Vol. Amostra
1	19,402	10,626	0,375
2	19,446	10,648	0,378
3	19,460	10,656	0,378
4	19,666	10,770	0,376
5	19,385	10,616	0,376
6	19,353	10,600	0,374
7	19,481	10,671	0,372
8	19,532	10,700	0,371
9	19,638	10,755	0,376
10	19,598	10,734	0,374
Vol. Amostra =		\sum 3,751	Massa Específica =
Vol. Célula - $\frac{\text{Vol. Expansão}}{(P1/P2) - 1}$		Média: 0,3751 Desvio: 0,0024	$\frac{\text{Massa da Amostra}}{\text{Vol. Médio}}$ = 2,668 g/cm³

Tabela 28 - Análise da massa específica real Tijolo D.

Análise da Massa Específica real			
Picnômetro Multivolume 1305 - Micromeritic			
Análise nº: 33/2002		Data: 11/12/02	Amostra: TIJOLO D
Cadinho carregado: 2,96065g		Cadinho vazio: 1,54960g	
Pré-tratamento: 120 °C/24 h		Massa da Amostra: 1,41107g	
Volume da Célula: 7,979cm ³		Célula: 5	
Variação compl. escala: 19,500		Minutos de purga: 30 minutos	
Vol. Expansão: 6,280 cm ³		Minutos de vácuo: 30 minutos	
Nº	P1	P2	Vol. Amostra
1	19,424	10,541	0,527
2	19,587	10,627	0,531
3	19,416	10,535	0,529
4	19,657	10,668	0,526
5	19,495	10,579	0,528
6	19,405	10,533	0,523
7	19,525	10,596	0,527
8	19,536	10,604	0,523
9	19,305	10,477	0,526
10	19,417	10,538	0,526
Vol. Amostra =		\sum 5,265	Massa Específica =
Vol. Célula - $\frac{\text{Vol. Expansão}}{(P1/P2) - 1}$		Média: 0,5265 Desvio: 0,0023	$\frac{\text{Massa da Amostra}}{\text{Vol. Médio}}$ = 2,680 g/cm³

Tabela 29 - Análise da massa específica real Argamassa CON.

Análise da Massa Específica real			
Picnômetro Multivolume 1305 - Micromeritic			
Análise nº: 06/2003		Data: 20/03/03	Amostra: ARGAMASSA CON
Cadinho carregado: 3,34624g		Cadinho vazio: 1,54960g	
Pré-tratamento: 120 °C/24 h		Massa da Amostra: 1,79664g	
Volume da Célula: 7,979cm ³		Célula: 5	
Variação compl. escala: 19,500		Minutos de purga: 30 minutos	
Vol. Expansão: 6,280 cm ³		Minutos de vácuo: 30 minutos	
Nº	P1	P2	Vol. Amostra
1	19,587	10,532	0,675
2	19,302	10,375	0,680
3	19,422	10,444	0,674
4	19,487	10,481	0,670
5	19,493	10,483	0,672
6	19,582	10,530	0,674
7	19,496	10,486	0,670
8	19,338	10,401	0,670
9	19,694	10,592	0,671
10	19,348	10,405	0,672
Vol.Amostra =		\sum 6,729	Massa Específica =
Vol.Célula - $\frac{\text{Vol.Expansão}}{(P1/P2) - 1}$		Média: 0,6729 Desvio: 0,0031	$\frac{\text{Massa da Amostra}}{\text{Vol. Médio}}$ = 2,670 g/cm³