

**BIBLIOTECA DIGITAL DE TESES E DISSERTAÇÕES
UNESP**

RESSALVA

Alertamos para ausência das Figuras 7 e 8 não incluídas pelo autor no arquivo original.

**Escoamentos em Meios Porosos;
Uma Análise Teórica e Experimental dos Efeitos
dos Esforços Capilares Provocados por Percolação
de Água em Elementos de Alvenaria**

ANTONIO CARLOS FRANÇA

**Dissertação apresentada à
Faculdade de Engenharia de
Guaratinguetá da Universidade
Estadual Paulista, para obtenção
do título de Mestre em Engenharia
Mecânica.**

Orientador: Prof. Dr. Luiz Roberto Carrocci

GUARATINGUETÁ – SP

BRASIL

DADOS CURRICULARES

ANTONIO CARLOS FRANÇA

NASCIMENTO	25.07.1956 – CAÇAPAVA / SP
FILIAÇÃO	Dionísio da Silva França Maria Piedade de Oliveira França
1971/1977	Curso de Graduação Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá – UNESP
1983/1983	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Econômica, nível de Especialização “Lato Sensu”, na Faculdade de Ciências Econômicas e Administrativas de Guaratinguetá.

DEDICATÓRIA

A meu pai (*in memorium*) e a minha mãe pelas vidas dedicadas a minha educação e formação.

A minha esposa Silvia e filhos, Marcelo, Elaine e Rodrigo que me apoiam e ajudam a cumprir, com muito orgulho, minha divina missão crescer e multiplicar-me.

AGRADECIMENTOS

A Deus, o Grande Arquiteto do Universo, que me dirige, orienta e ilumina os caminhos da vida.

Ao Prof. Dr. Luiz Roberto Carrocci, que me aceitou como seu orientado, pela colaboração para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores, Carrocci, Paulo Magalhães, José Luz e Perrella pela dedicação e amizade.

Aos colegas de estudo pela agradável convivência, amizade e colaboração.

Aos colegas de trabalho da FAENQUIL pela paciência e apoio nos meus afastamentos.

A minha esposa e filhos, pela compreensão nas horas ausentes do lar.

Ao amigo Avelar e aos irmãos Fernandinho e Rodrigo pelo apoio material.

**“ESCOAMENTOS EM MEIOS POROSOS;
UMA ANÁLISE TEÓRICA E EXPERIMENTAL DOS EFEITOS DOS ESFORÇOS
CAPILARES PROVOCADOS POR PERCOLAÇÃO DE ÁGUA EM ELEMENTOS DE
ALVENARIA”**

ANTONIO CARLOS FRANÇA

**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA”**

ESPECIALIDADE: ENGENHARIA MECÂNICA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: TRANSMISSÃO E CONVERSÃO DE ENERGIA

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. José Luz Silveira
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


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


Prof. Dr. JOSÉ LUZ SILVEIRA
Unesp-Feg


Prof. Dr. MAURO PEREIRA OTERO
FAENQUIL

Janeiro 2000

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SÍMBOLOS

Resumo

Abstract

1- INTRODUÇÃO	01
1.1- Meios porosos	01
1.2- Tipos de águas presentes nos meios porosos	04
1.3- Escoamento em meios porosos	06
1.4- O mecanismo da percolação de água em elementos de construção civil e seus efeitos	10
2- MODELAGEM TEÓRICA PARA CÁLCULO – PROPOSTA	15
2.1- Considerações iniciais	15
2.2- Formulação para os cálculos da vazão e velocidade	17
2.2.1- Formulação para o cálculo da vazão	17
2.2.2- Formulação para o cálculo da vazão – uso do termo de Darcy	20
3- METODOLOGIA E PROCEDIMENTOS	24
3.1- Seleção dos materiais para experimentação	24
3.2- Procedimento	24
3.3- Descrição dos equipamentos utilizados	25
3.4- Seleção dos corpos de prova	26
3.5- Secagem	27
3.6- Peso seco	27
3.7- Deformação	27
3.8- Determinação da deformação na parede	30
3.9- Determinação do volume sólido dos tijolos	30
3.10- Determinação da velocidade média de absorção da água	30

4- CÁLCULOS	32
4.1- Determinação do gradiente de pressão	32
4.2- Cálculo da vazão pela equação diferencial	32
4.3- Determinação da tensão de deformação	34
4.4- Determinação da força capilar	34
5- APRESENTAÇÃO E COMENTÁRIOS DOS RESULTADOS	36
5.1- Resultados experimentais	36
5.1.1- Determinação dos pesos seco e úmido, volume de vazios e deformações	36
5.1.2- Determinação dos pesos seco e úmido, volume de vazios e deformações da parede	36
5.1.3- Determinação do volume sólido dos tijolos	37
5.1.4- Determinação da vazão e da velocidade inicial de percolação	37
5.1.5- Determinação da vazão e da velocidade média de percolação	38
5.2- Comentários sobre os resultados experimentais	38
5.3- Resultados teóricos	41
5.3.1- Determinação dos gradientes de pressão e velocidade através da formulação diferencial	41
5.3.2- Resultados teóricos	42
5.4- Comentários sobre os resultados teóricos	43
6- CONCLUSÕES	45
ANEXO	48
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49

LISTA DE FIGURAS

Figura 01- Partícula metálica porosa, ampliada 100 vezes.	01
Figura 02- Arranjos físicos de partículas consideradas esféricas e uniformes.	02
Figura 03- Exemplos de meios porosos (10x).	02
Figura 04- Classificação das águas em um corpo poroso.	06
Figura 05- Seção transversal de um corpo poroso.	08
Figura 06- Tubo capilar de diâmetro “d”.	12
Figura 07- Trincas horizontais na alvenaria de tijolos.	12
Figura 08- Trincas na parte superior de muros de alvenaria.	13
Figura 09- Trincas em peças estruturais; a expansão da alvenaria solicita o concreto à tração.	13
Figura 10- Seção transversal de um meio poroso.	16
Figura 11- Arranjo das partículas de forma cúbica de passagem livre.	17
Figura 12- Arranjo das partículas de forma ortorrômbica de passagem livre.	17
Figura 13- Esquema do elemento que pode representar um poro.	18
Figura 14- Elemento poroso (tijolo).	22
Figura 15- Confinamento dos lados do corpo de prova e posição do apalpador	28
Figura 16- Parede, corpo de prova nº. 10.	30
Figura 17- Corpos de prova para medição da velocidade de absorção.	32
Figura 18- Esquema de definição das seções Transversal, Horizontal e Longitudinal.	40
Figura 19- Trinca em estrutura e janelas de edifícios.	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 01- Diâmetro médio e coeficiente de permeabilidade de alguns materiais.	09
Tabela 02- Velocidades críticas em materiais porosos com granulometria uniforme.	10
Tabela 03- Deformação por percolação de água em alguns materiais de construção civil.	13
Tabela 04- Pesos seco e úmido, volume de vazios e deformações.	37
Tabela 05- Pesos seco e úmido, volume de vazios e deformações da parede.	37
Tabela 06- Pesos seco e úmido e volume sólido e de vazios dos corpos de prova n ^{os} . 4,5 e 6.	38
Tabela 07- Valores da vazão e velocidade inicial de percolação.	38
Tabela 08- Valores de vazão e velocidade média de percolação.	39
Tabela 09- Índice de deformação linear dos corpos de prova.	40

LISTA DE FOTOS

Foto 01- Confinamento do corpo de prova na bancada de testes.	26
Foto 02- Aspecto da bureta de gotejamento de água sobre a bancada de testes.	27
Foto 03- Parede posicionada na bancada para teste.	30
Foto 04- Corpos de prova 4, 5 e 6 pintados para determinação dos volumes sólidos.	31
Foto 05- Visão da frente de percolação dos corpos de prova 7, 8 e 9, para determinação da velocidade de umidificação.	32

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Seção, área	mm ²
A ₁ , A ₂ ,	Constantes de integração	[-]
A _E	Área do quadrado envolvente	mm ²
A _◇	Área do paralelogramo envolvente	mm ²
A _P	Área da seção transversal da partícula	mm ²
A _Q	Área do quadrado envolvente	mm ²
A _V	Área de vazios	mm ²
a, b	Constantes de integração	[-]
d, D _P	Diâmetro médio da partícula	mm
D _{MA}	Diâmetro médio da partícula argila	mm
E	Módulo de deformação	kgf/mm ²
e	Largura da fissura	mm
F _C	Força capilar	kgf
F _{Re}	Coefficiente de correção do N°. Reynolds [1]	
h	Comprimento	[L]
i	Perda de carga por unidade de comprimento	atm/cm
J	Relação piosométrica	[-]
K	Coefficiente de permeabilidade	mm/s
L, l	Comprimento	mm
P	Pressão	kgf/mm ²
Q, q	Vazão	ml/s ou cm ³ /s
Re, Re'	Número de Reynolds	[-]
t	Tempo	s
T _S	Tensão superficial	mg/mm ²
U ₀	Velocidade inicial	mm/s
V _{med}	Velocidade média	mm/s
V	Velocidade adimensional	[-]
V _C	Velocidade crítica	mm/s

\vec{V}	Vetor velocidade	[-]
u, v, w	Componentes ortogonais	[-]
x_1, z_1	coordenadas ortogonais adimensionais	[-]
x, y, z	coordenadas ortogonais	[-]

SÍMBOLOS GREGOS

α	Ângulo	graus
μ	Viscosidade dinâmica	kg/mm.s
ν	Viscosidade cinemática	centipoise
ρ	Massa específica	[-]
Ψ	Esfericidade	[-]
ϕ	Coefficiente de porosidade	[-]
σ	Tensão de deformação	kgf/mm ²
ΔL	Deformação	mm

SUB / SOBREÍNDICES

\perp	Perpendicular
\parallel	Paralelo
T	Transversal
L	Longitudinal
H	Horizontal
0, 1, 2, ...	Índice de variáveis

RESUMO

ORIGEM E FUNDAMENTOS DO TRABALHO

É comum serem identificadas trincas em alvenaria de tijolos, não somente depois de um certo tempo da construção mas também por vezes aparecem estas trincas desagradáveis durante a própria construção. Depois de alguns estudos é possível verificar que, dentre outros fatores, um deles é devido à umidade absorvida pelos elementos da parede (tijolos e argamassa). Essa umidade pode vir do ar (dia úmido), de chuvas, do solo e até do excesso da quantidade de água contida na argamassa de assentamento. Ela em contato com os elementos da parede, porosos, concorrerá para a percolação capilar dando origem a esforços internos consideráveis, que virão provocar deslocamentos, que via de regra são diferentes para o tijolo e para a argamassa ($\Delta L_{\text{Tijolo}} \neq \Delta L_{\text{Argamassa}}$), daí então o aparecimento de trincas.

Portanto, com vistas a esses fenômenos, resolveu-se estudar este assunto de forma inicial, sem grandes e sofisticados equipamentos de medição do escoamento capilar, mas conduzindo a análise para obtenção de valores médios de pressão e velocidade de fluido, medindo as deformações gerais dos elementos, tijolos.

CONTRIBUIÇÃO DO TRABALHO

Como originalidade o presente trabalho traz o equacionamento algébrico, juntamente com uma bancada de testes, para prever e estimar valores médios de velocidades e esforços que aparecem eventualmente em elementos cerâmicos de construção civil, no caso particular, tijolos com características especificadas.

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

ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho se apresenta em 6 capítulos, sendo que na introdução, capítulo 1, são apresentadas características do Meio Poroso e tipos de águas retidas numa estrutura porosa. Também são abordados aspectos do escoamento em meios porosos e finalmente o escoamento em elementos cerâmicos de construção civil.

No capítulo 2 o trabalho apresenta a base onde foi colocada a proposta de modelagem para efetuar as estimativas dos valores de Velocidades e Esforços devido ao escoamento nos poros de tijolos.

Seguindo, no capítulo 3 são apresentados os detalhes da metodologia e procedimentos utilizados para a escolha dos corpos de prova, medições e descrição dos instrumentos utilizados na bancada de testes.

No capítulo 4, são traçados os comentários e as observações na apresentação dos resultados, por vezes em forma de tabelas e gráficos para dar uma boa idéia daquilo que foi observado nos experimentos.

Em seguida é aplicado a modelagem estruturada no capítulo 2, obtendo portanto resultados importantes sobre os dois parâmetros básicos do trabalho, velocidade de percolação e esforços oriundos do escoamento através dos poros.

Para finalizar são apresentadas as conclusões de tudo aquilo que foi desenvolvido e observado durante o trabalho, acompanhadas de algumas sugestões sobre cuidados a serem tomados com os elementos de alvenaria e propostas para trabalhos futuros.

ABSTRACT

ORIGIN AND FOUNDATIONS OF THE WORK.

It is common to find cracks in bricks masonry not just after some time of the construction but, the appearance of these unpleasant cracks, are also common during the construction work. After some research it is possible to verify that, among other factors, one of its cause is due to the humidity absorbed by the elements of the wall (bricks and mortar). Now, this humidity may come from the air (e. g. a humid day), from rain, from the ground and from an exaggerated amount of the water mixed in the mortar laying. These when in contact with the porous elements of the wall will induce a capillary percolation that creates considerable internal stress that will give origin to displacements. These displacement are usually different for the brick and for de mortar ($\Delta L_{\text{Brick}} \neq \Delta L_{\text{Mortar}}$) and because of that cracks will appear.

With that in mind, it was decided to study this subject initially without bulky and sophisticated equipment for the measurement of capillary flow. Our approach was to make the analysis by obtaining medium values for the pressure and fluid speed, measuring the general deformations of the bricks.

WORK CONTRIBUTION

As a original contribution the present work brings the algebraic treatment along with a handful of experimental tests to foresee and to estimate

medium values of speeds and strains that appear eventually in ceramic elements of the civil architecture, in this case, bricks.

Key Words: porous medium, masonry bricks percolation, hygroscopia.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 – MEIOS POROSOS

Meios porosos são materiais sintéticos ou naturais que possuem um conjunto de poros, vazios entre os elementos sólidos de sua composição, por onde pode passar um volume expressivo de fluido. Como por exemplo podemos citar as areias, certas formações rochosas, algumas cerâmicas, fígado humano e outros. Ao atravessar um meio poroso o fluido o faz através dos vazios existentes entre as partículas. As dimensões dos espaços vazios, ou poros, seguidos pelos fluidos em escoamentos dependem de fatores variáveis entre os quais: tamanho da partícula, sua esfericidade ou forma geométrica e da rugosidade de sua superfície (FRANCIS, 1980).



Figura 01- Partícula metálica porosa, ampliada 100 vezes (PAULA, 1966).

A velocidade linear do fluido através dos vazios é muito difícil de ser diretamente determinada. Porém pode ser expressa em função da velocidade linear superficial do trecho percorrido, como a de um fluido através de uma seção transversal total não obstruída, imaginando o corpo como se constituído por diversas seções de espessura infinitamente pequenas e paralelas, como se fossem fatias e pelos fatores variáveis acima mencionados, do mesmo modo

que a distância percorrida. Essa dificuldade se prende ao fato de a grande maioria dos meios porosos serem formados por arranjos aleatórios das partículas e ainda dependerem dos já citados fatores. A figura 02 representa graficamente arranjos possíveis quando consideradas as partículas de forma esférica (9) e de tamanhos uniformes.

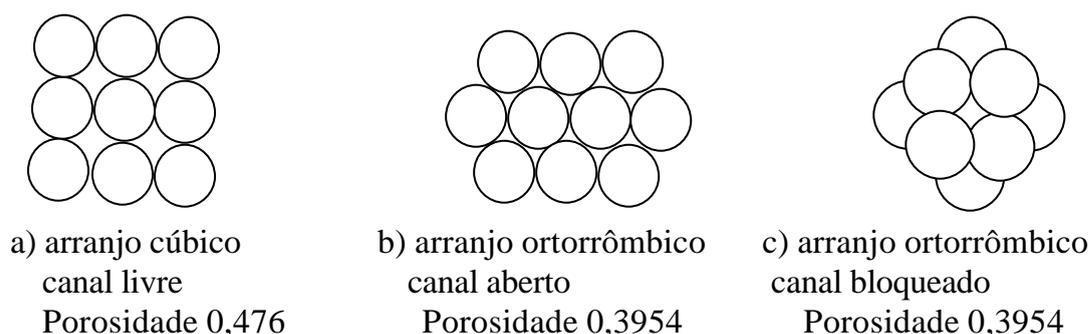


Figura 02 – Arranjos físicos de partículas consideradas esféricas e uniformes.

Neste trabalho será considerado o arranjo cúbico de canal livre (Figura 02 a), em decorrência do fator esfericidade e do tamanho da partícula de argila ser muito pequena (diâmetro médio inferior a 0,005 mm), fazendo com que os valores de porosidade quando considerados como espaço de vazios em uma

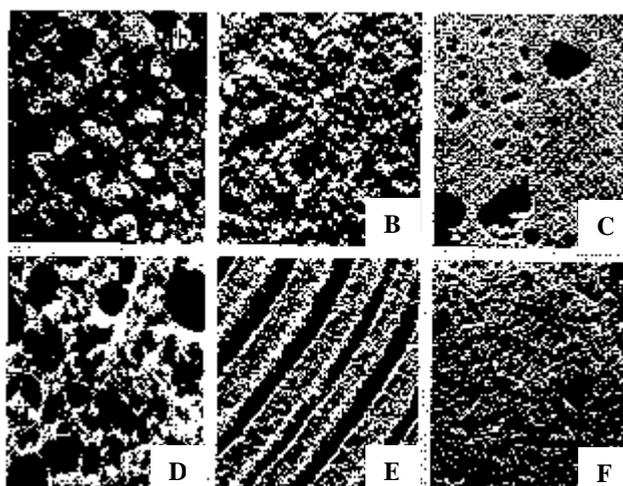


Figura 03- Exemplos de meios porosos (10X): (a) areia de praia, (b) areia de pedra, (c) calcário, (d) pão de centeio, (e) madeira e (f) pulmão humano. (PAULA, 1966).

seção reta do meio poroso, por onde o fluido escoar, sejam praticamente um o dobro do outro, como será mostrado na modelagem teórica para cálculo da superfície de vazios, no Capítulo 02.

Ao considerar-se 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 sendo o quociente entre a superfície de uma esfera, cujo volume seja igual ao da partícula, e a área superficial da partícula. Desta forma faz-se com que a porosidade de um meio guarde estreita relação com a esfericidade da partícula.

A esfericidade 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 esperados então, diferentes porosidades para meios compostos por partículas uniformes bem como para os meios de partículas não uniformes.

Para a determinação dos vazios, *Coefficiente de Porosidade* (ϕ), 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 este 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 (NEVES, 1982; BROWN, 1963).

O *Coefficiente de Permeabilidade* (K), que exprime a capacidade de percolação do meio, que é determinado, medindo-se a vazão, volume de água que atravessa um meio poroso e dividindo-a pela seção transversal do meio. O coeficiente de permeabilidade também é função da perda de carga, da espessura da camada de meio poroso a atravessar e da temperatura do meio. Para Darcy, o valor da permeabilidade para uma dada temperatura pode ser determinado pela expressão:

$$K = \frac{Q}{A} \cdot \frac{e}{\Delta_p} \quad (1)$$

$$\text{ou } Q = KiA \quad (2)$$

sendo $i = \Delta h / L$ (perda de carga por unidade de comprimento)

onde, Q é a vazão, A a seção transversal, e a espessura do meio e Δ_p a perda de carga.

Dentre outras, Allen Hazen sugere outra fórmula que condiciona o meio e a temperatura. Nela, a granulometria do meio é representada pelo diâmetro das partículas que correspondem a 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 é a seguinte:

$$K = cd_{10}^2(0,7 + 0,03t) \quad [\text{m/dia}] \quad (3)$$

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

A Tabela 01 mostra valores de permeabilidade para alguns meios porosos (NEVES, 1982).

1.2 – ÁGUAS PRESENTES NOS MEIOS POROSOS

Ao escoamento da água através de um sistema permeável, meio poroso, denominam-se percolação e infiltração. 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 três 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 de maneira natural quando submetido a condições como chuva, neve, umidade do ar ambiente e por capilaridade quando submerso. Também pode ser umedecido nos processos de beneficiamento na produção industrial ou manufatura. Na produção de componentes construtivos a base de ligantes hidráulicos empregam-se regularmente quantidades de água superior à necessária para que ocorra as reações de hidratação, permanecendo no material a excedente. Os componentes de alvenaria, tijolos, elementos cerâmicos, argamassas, etc, têm seu umedecimento no processo de assentamento, prática comum que visa impedir a retirada brusca de água das argamassas, o que viria prejudicar a aderência com os elementos da obra. A quantidade de água absorvida por um material depende basicamente de dois fatores: porosidade e capilaridade. A porosidade é função do tamanho das partículas sólidas, de sua forma geométrica e dos espaços vazios entre elas. 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, 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).

As águas que são contidas nos corpos porosos podem ser classificadas, ver Figura 04, como:

- *Água livre*, é a que se encontra em abundância no corpo nela emergido, preenchendo todos os espaços vazios até o seu nível livre.
- *Água capilar*, é aquela que sobe 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.

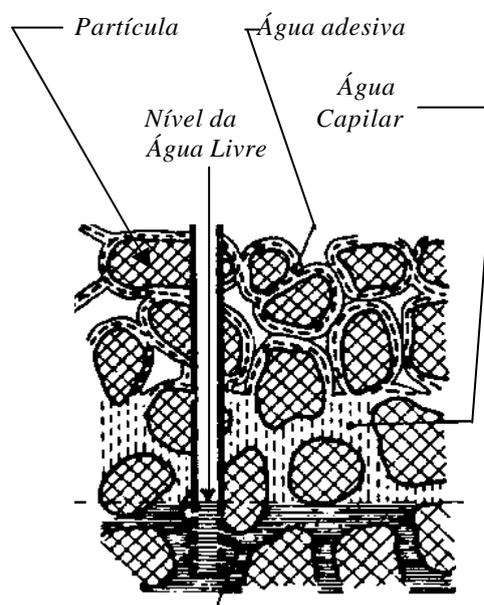


Figura 04- Classificação das águas em um corpo poroso.

- *Água higroscópica*, é aquela que permanece no corpo seco, em presença do ar ambiente decorrente de sua umidade.
- *Água de constituição*, aquela que faz parte da estrutura molecular da partícula sólida.

Destas águas, higroscópica, livre e capilar são as que podem ser totalmente evaporadas pelo efeito do calor, quando submetidas a temperaturas superiores a 100°C. Na fase gasosa, também preenchem os poros, vapores de água e carbono combinados.

1.3- ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS

A análise dos escoamentos em meios porosos têm importantes aplicações no ramo da hidrologia, prospeção de petróleo, engenharia agrícola, lubrificação e sobretudo na engenharia civil.

Os escoamentos de vários tipos de fluidos em diferentes meios porosos podem ser estudados pela Lei de Darcy na sua forma clássica, que diz respeito a velocidade do fluido no meio e uma função direta do gradiente de pressão.

As condições de escoamento em meios porosos são 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 estes parâmetros naturais através de comparações ao escoamento em tubos capilares. E, sendo os poros de dimensões variáveis em função do tamanho das partículas, Muskat propõe para uma analogia segura pelas suas experiências, que o regime seja laminar e que a velocidade crítica da água corresponda ao valor 1 do número de Reynolds, isto é ,

$$\text{Re} = \frac{V_c \cdot d}{\mathbf{u}} = 1 , \quad (4)$$

onde d é o valor do diâmetro médio das partículas, \mathbf{u} o coeficiente de viscosidade cinemática da água e V_c a velocidade crítica. Para temperatura de 20°C, sendo $\mathbf{u} = 0,01 \text{ cm}^2/\text{s}$, a velocidade crítica é $V_c = 0,01/d$. Para meios porosos com diâmetro médio de partícula de 1 mm (areia grossa), a velocidade crítica é cerca de 0,1 mm/s. Pode-se atingir velocidades críticas da ordem de 0,3 a 0,4 mm/s (2,5 a 3,8 m/dia) sem sair do regime laminar (NEVES, 1982).

O número de Reynolds baseado no diâmetro médio da partícula e dependente de fatores como: esfericidade, rugosidade e orientação ou arranjo das partículas pode ser calculado pela expressão a seguir:

$$\text{Re}' = \frac{D_p F_{\text{Re}} V r}{\mathbf{u}} , \quad (5)$$

onde D_p é o diâmetro médio da partícula, V a velocidade calculada como se o trecho do escoamento não fosse poroso, r a massa específica do fluido, \mathbf{u} a viscosidade cinemática do fluido e F_{Re} um coeficiente que leva em consideração a esfericidade da partícula e a porosidade do meio (STRETER, 1961).

Os estudos pioneiros do movimento da água em meios porosos são atribuídos a Darcy (França, 1856), e Dupuit (França, 1865), que propuseram modelos matemáticos onde a velocidade em meios porosos é proporcional à perda de carga unitária oferecida pelos poros do meio. Segundo Dupuit, $v = kJ$, onde k é um coeficiente dependente da resistência oferecida pelo meio e $J = dh/ds$ a relação piezométrica em qualquer ponto “s” 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 $v = Q/A$ onde “Q” é a vazão e “A” a seção total do meio poroso. A seção de vazios no meio é $A_v = \gamma A$ em que γ corresponde a uma razão percentual da seção total. Portanto,

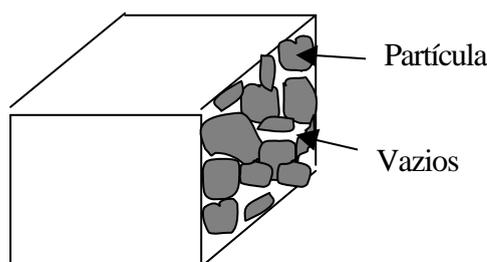


Figura 05- Seção transversal de um corpo poroso.

$$Q = v \times A = k J \times \gamma A \quad (6)$$

Denominando-se de u, v, w a componentes ortogonais de velocidade nos três eixos cartesianos e levando à equação da continuidade temos:

$$u = -k \frac{dh}{dx}, \quad v = -k \frac{dh}{dy}, \quad w = -k \frac{dh}{dz} \quad \text{e} \quad \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (7)$$

o que mostra que o movimento é irrotacional, já que existe um potencial de velocidade representado pela altura piezométrica e as superfícies isopiezométricas são linhas de fluxo.

A determinação dos vazios existentes na seção transversal total do meio poroso fornece o coeficiente de porosidade volumétrica, que é a relação entre o volume de vazios existentes no meio poroso e o volume total deste meio.

Experimentalmente, o coeficiente de porosidade pode variar de 25% a 55% dos materiais graúdos aos mais finos, valendo em média 40% para a areia uniforme e 30% para as mais compactas (NEVES,1982).

Determina-se também o Coeficiente de Permeabilidade do meio como sendo a razão entre a vazão de água que atravessa uma seção transversal no sentido do fluxo, isto é $K = Q/Ai$. A seguir mostra-se na Tabela 01 a relação entre o diâmetro médio de alguns materiais e o Coeficiente de Permeabilidade respectivos. O escoamento através do meio poroso é usualmente estudado pela lei clássica de Darcy e em alguns casos há necessidade de usá-la de forma generalizada.

Diâmetro Médio e Coeficiente de Permeabilidade de Alguns Materiais		
Meio Poroso	Diâmetro Médio da Partícula (mm)	Coeficiente de Permeabilidade K (mm/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

Tabela 01- Diâmetro Médio e Coeficiente de Permeabilidade de alguns materiais (3).

Há de considerar-se também que o escoamento por caminhos irregulares depende da constituição física da partícula, se de 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 elas. Outra dificuldade ocorre na determinação com exatidão da velocidade real efetiva de escoamento em uma canícula individual. Sabe-se que ao considerar-se 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), daí considerar-se sempre uma velocidade média. A Tabela 02 a seguir, apresenta valores de Porosidade e Velocidades médias críticas da água, a temperatura de 20°C, através de materiais de granulometria uniforme.

Velocidades médias (mm/s)								
Porosidade %	Diâmetro médio da partícula (mm)							
	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

Tabela 02 – Velocidades críticas em materiais porosos com granulometria uniforme (GARCEZ, 1970).

1.4– O MECANISMO DA PERCOLAÇÃO DE ÁGUA EM ELEMENTOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL 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 escoar através de materiais porosos de que são constituídas. Entre estes, destacamos a trinca estrutural em paredes e suas consequências estéticas como fissuramento da argamassa de revestimento, bem como da pintura. Outros aspectos indesejáveis decorrente da umidade infiltrada, como manchas, bolores, desenvolvimento de bolsas e desagregação também são observados. O fator estrutural tem importância

relevante quando se considera o risco a que a estrutura fica submetida, onde trincas provocam o deslocamento de esforços e suas reações, além do fator econômico por conta do custo dos materiais e da mão de obra aplicada.

À preocupação quanto a resistência das paredes, deve-se acrescentar a sensação desagradável da coexistência com um ambiente visivelmente antiestético e provocante de um desconforto em termos de segurança.

Este trabalho 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 de alvenaria.

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

O escoamento de águas por capilaridade se destaca neste trabalho pois é através dele que se pretende dimensionar os esforços que ele provoca em materiais porosos, como consequência da Força Capilar gerada. 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 teoria do tubo capilar (tubo de diâmetro reduzido, comparados ao diâmetro dos fios de cabelo, do latim capillus), como se sabe, a água sobe dentro do 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 06.

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

T_s = tensão superficial da água $\cong 0,076\text{g/cm} = 8 \text{ mg/mm}$ (Building R. Establishment, 1979).

O equilíbrio é atingido quando α (ângulo de contato) = 0, daí a expressão

$$h_c \text{ max.} = \frac{4T_s}{d g_a}, \quad (9)$$

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

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

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 30 cm ou mais.

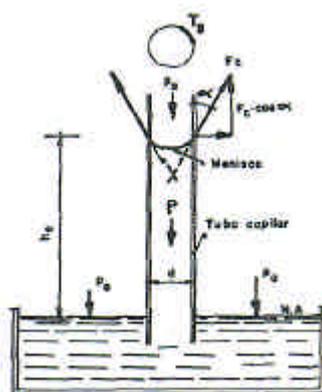


Figura 06- Tubo Capilar de diâmetro “d”, (CAPUTO,1987).

Esta é uma condição suficiente para geração de esforços capilares que provocam trincas pela água que percola, decorrente da umidade do solo.

Em sua obra “Trincas em Edifícios”, Ercio Tomaz, 1989, mostra sob forma de figuras e tabelas, algumas a seguir reproduzidas para ilustração, os efeitos reais provocados pela percolação de água em paredes de edifícios.

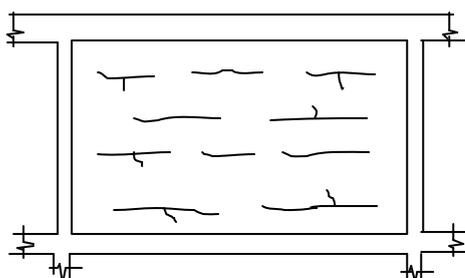


Figura 07- Trincas horizontais na alvenaria de tijolos.

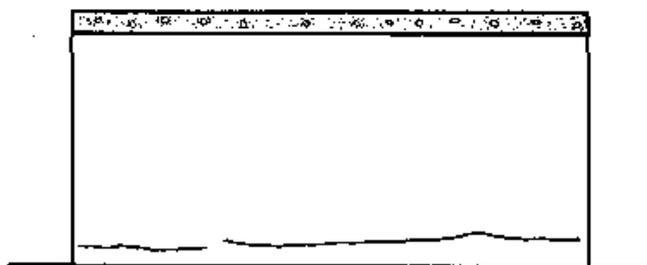


Figura 08 - Trincas na parte inferior de muros de alvenaria



Figura 09 - Trincas em peças estruturais; a expansão da alvenaria solicita o concreto à tração.

Material	Movimentação devido à umidade (%)		Módulo de Deformação $\times 10^3$ (kgf/mm ²)
	Reversível	Irreversível (+) expansão (-) contração	
Rochas Naturais			
- Calcário	0,01		1,02 ~8,16
- Arenito	0,07		0,30 ~8,16
Compostos de Cimento			
Argamassa	0,02 – 0,06	0,04 – 0,10 (-)	2,00 ~3,57
Concreto-seixo rolado	0,02 – 0,06	0,03 – 0,08 (-)	1,50 ~3,67
Concreto-brita	0,03 – 0,10	0,03 – 0,08 (-)	1,50 ~3,67
Concreto celular	0,02 – 0,03	0,07 – 0,09 (-)	0,14 ~0,32
Cimento-fibra de vidro	0,15 – 0,25	0,07 (-)	2,00 ~3,47
Cimento-amianto	0,10 – 0,25	0,08 (-)	1,43 ~2,65
Tijolo ou Bloco vazado			
Concreto	0,02 – 0,04	0,02 – 0,06 (-)	1,02 ~2,55
Concreto celular	0,02 – 0,03	0,05 – 0,09 (-)	0,30 ~0,81
Sílico-calcário	0,01 – 0,05	0,01 – 0,04 (-)	1,43 ~1,83
Barro cozido	0,02	0,02 – 0,07 (+)	0,41 ~2,65

Tabela 03 – Deformação por percolação de água em alguns materiais de construção civil (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).

CAPÍTULO 2

MODELAGEM TEÓRICA PARA CÁLCULO - PROPOSTA

2.1- CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Para a determinação da composição, volume ocupado por vazios e volume de partículas sólidas, de um meio poroso, em especial neste trabalho para um corpo de prova composto de argila, tijolo comum de barro cozido, vamos considerar uma seção transversal, cuja constituição é apresentada na Figura 10 abaixo.

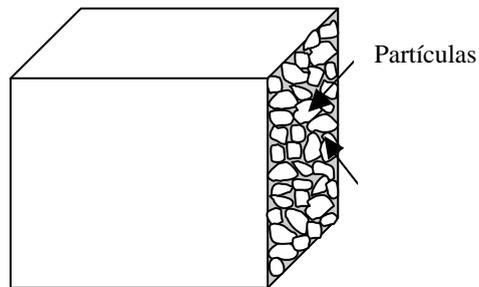


Figura 10- Seção transversal de um meio poroso.

Para melhor entendimento vamos desconsiderar a forma irregular da partícula de argila considerando-a esférica, e conseqüentemente entender o arranjo físico de distribuição entre elas como cúbico de passagens livres. Isto porque para partículas com diâmetro médio $< 0,005$ mm, como é o caso da argila, podemos considerar os espaços vazios como capilares. Desta forma, vamos dispor as partículas arranjadas como na Figura 11 abaixo, onde:

D_{MA} é o diâmetro médio da partícula de argila,

$A_P = \frac{\pi}{4} D_{MA}^2$ é a área da seção transversal da partícula,

$A_Q = D_{MA}^2$ a área do quadrado envolvente da partícula e

$A_V = (A_Q - A_P) = (1 - \pi/4)D_{MA}^2 = 0,214(D_{MA}^2)$ a área de vazios na seção transversal arranjada

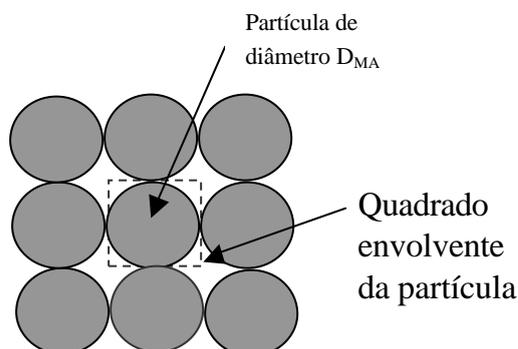


Figura 11- Arranjo das partículas de forma cúbica de passagem livre.

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

- Área do quadrado envolvente da partícula, $A_Q = 2,5 \times 10^{-5} \text{ mm}^2$.
- Área da seção reta da partícula $A_P = 1,965 \times 10^{-5} \text{ mm}^2$, o que corresponde a 78,6% em área de ocupação da seção transversal total mostrada.
- Área de vazios entre partículas $A_V = 0,535 \times 10^{-5} \text{ mm}^2$, o que corresponde a 21,4% em área de ocupação da seção transversal mostrada.

Portanto, para tijolos de argila, 78,6% em área é ocupada por partículas e 21,4% em área de espaços vazios por onde a água fluirá, em função da configuração escolhida na Figura 11.

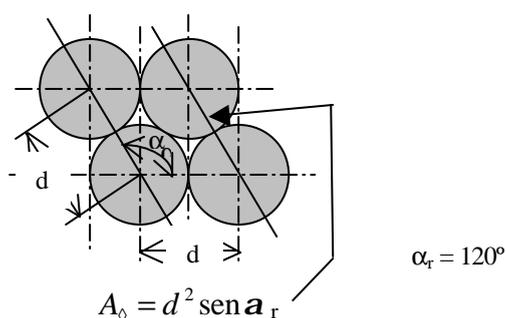


Figura 12- Arranjo das partículas de forma ortorrômbica de passagem livre

Com o mesmo raciocínio podemos calcular a área de vazios para uma distribuição ortorrômbica conforme mostrado na Figura 12. Nesta condição temos:

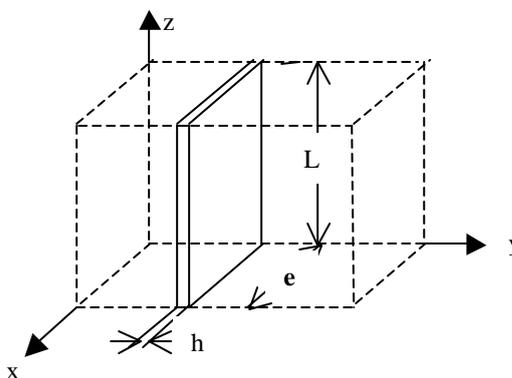
- Área do paralelogramo envolvente igual a $A_E = 2,165 \times 10^{-5} \text{ mm}^2$.
- Área da seção reta da partícula igual a $A_P = 1,965 \times 10^{-5} \text{ mm}^2$.
- Área de vazios entre partículas igual a $A_V = 0,202 \times 10^{-5} \text{ mm}^2$, correspondente a 10,29% da seção reta do meio poroso.

Nota-se que entre as duas configurações teóricas, cúbica e ortorrômbica, existe uma relação de aproximadamente 2 vezes mais espaços vazios para a primeira. Se aliarmos a esse fato ao tamanho aleatório das partículas, podemos verificar a grande diversificação de resultados a serem esperados. Basta uma pequena alteração no arranjo das partículas consideradas para obtermos valores completamente diferentes de porosidade, em distribuição de vazios nos corpos.

2.2- FORMULAÇÃO PARA OS CÁLCULOS DA VAZÃO E VELOCIDADE.

2.2.1- Formulação para cálculo da Vazão.

Segundo HOUPEURT (1975), STRETER (1961) e PFEFFERMANN (1968), pode-se formular uma expressão para estimar valores de vazão em meio poroso, considerando uma fissura muito pequena (forma plana) ao longo de um eixo conforme mostrado na Figura 13 a seguir.



Obs.: O perfil será considerado independente de y (menor espessura)

Condições de contorno:

Para $Z = 0 \Rightarrow P = P_0$

$Z = L \Rightarrow P = P_2 \quad (P_2 < P_0)$

onde

P_0 = pressão no plano xy

P_2 = pressão no topo da figura.

Figura 13- Esquema de um elemento que pode representar um poro.

Considerando a equação de NAVIER-STOKES na sua forma geral, e procedendo uma análise de ordem de grandeza nos termos, pode-se obter a equação que responde, de forma satisfatória, aos valores de vazão numa fissura com as características indicadas na Figura 13.

$$\mathbf{r} \frac{D\vec{V}}{Dt} + \mathbf{r} \vec{V} \left(\nabla \vec{V} \right) = \mathbf{r} \vec{g} - \nabla P + \mu \nabla^2 \vec{V} \quad (11)$$

Fazendo as considerações de análise dos termos pode-se chegar à equação abaixo:

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \mu \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} \quad (12)$$

Fazendo, para efeito de solução:

$$\frac{\partial P}{\partial z} = A \quad \text{e} \quad \mu \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = A \quad (13)$$

Pode ser encontrado:

$$P = P_0 - \frac{P_1 - P_2}{L} z \quad \text{e} \quad V = \frac{1}{\mu} A \frac{x^2}{2} + Bx + C \quad (14)$$

Portanto tem-se:

$$V = \frac{1}{2\mu} \frac{P_0 - P_2}{L} \left(\frac{e^2}{4} - x^2 \right) \quad (15)$$

que trata do perfil de velocidade variando em x na fissura.

Calculando agora a vazão que atravessa a fissura ao longo de z:

$$q = \int V dA \Rightarrow q = 2 \int_0^{\frac{e}{2}} b V dx \Rightarrow q = be \frac{e^2}{12} \cdot \frac{1}{\mathbf{u}} \cdot \frac{(P_1 - P_2)}{L} \quad (16)$$

A equação (15) é também chamada de equação de NAVIER-POISSON.

Se agora for considerado uma fissura circular pode-se ter a mesma formulação envolvendo o raio. Mas o mais importante é para o caso em que o corpo (elemento poroso) possui “n” fissuras, isto é, a vazão que atravessará o corpo será:

$$Q = nq \quad (17)$$

Tem-se então que Q será diretamente proporcional a área de passagem A, ao gradiente de pressão $(P_1 - P_2)/L$ e inversamente proporcional à viscosidade \mathbf{u} do fluido. Mas o corpo com n fissuras, nada mais é que o elemento poroso com permeabilidade “K”. Fazendo ainda a adaptação da viscosidade cinemática \mathbf{u} para a viscosidade dinâmica μ , tem-se a fórmula que considera o efeito global da porosidade.

$$Q = \frac{KA}{m} \frac{dP}{dz} \quad (18)$$

onde: Q = vazão

K = permeabilidade

A = área transversal ao escoamento

μ = viscosidade cinemática

dP/dz = gradiente de pressão que empurra o escoamento

Esta equação servirá para calcular um campo de pressão que por sua vez servirá para alimentar a equação mais completa.

2.2.2- Formulação para cálculo da vazão – uso do termo de Darcy.

Entretanto, torna se importante preparar um modelo, onde o efeito porosidade possa ser considerado já no princípio, isto é, na equação diferencial de partida (FRANCIS,1980), (WHIFAKER, 1982). Para isso é preciso considerar a seguinte equação, considerando o mesmo eixo da Figura (14).

$$\frac{mW}{rK} = -\frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial z} \quad (19)$$

que pode ser escrita da seguinte forma:

$$W = -\frac{K}{m} \frac{\partial P}{\partial z} \quad (20)$$

Como se deseja calcular a vazão, deve-se multiplicar pela área transversal ao escoamento;

$$WA = -\frac{KA}{m} \frac{\partial P}{\partial z} \quad (21)$$

$$Q = -\frac{KA}{m} \frac{\partial P}{\partial z} \quad (22)$$

Escrevendo a equação de Navier-Stokes com o termo de Darcy, isto é, $\frac{mW}{rK}$, tem-se, segundo CARROCCI (14), ZANARDI (15) e AQUINO (16):

$$\frac{\partial W}{\partial t} + u \frac{\partial W}{\partial x} + v \frac{\partial W}{\partial y} + w \frac{\partial W}{\partial z} = -\frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial z} + \mathbf{u} \left[\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} \right] - \frac{mW}{rK} \quad (23)$$

Considerações para o escoamento:

- escoamento permanente: $\frac{\partial}{\partial t} = 0$
- escoamento unidimensional: $u = v = 0$
- escoamento incompressível: $\rho = \text{cte.}$
- escoamento completamente desenvolvido: $\frac{\partial W}{\partial z} = \frac{\partial W}{\partial y} = 0$ (muito pequeno).

Portanto,

$$\mathbf{u} \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} - \frac{\mathbf{m}W}{\mathbf{r}K} = \frac{1}{\mathbf{r}} \frac{\partial P}{\partial z} \quad (24)$$

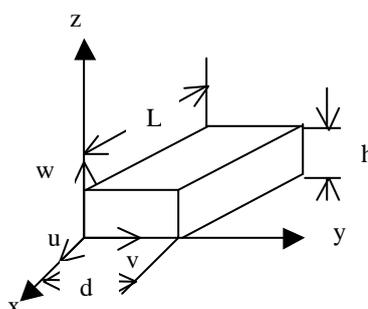


Figura 14- Elemento poroso (tijolo).

Considerando então as condições de contorno:

$$\text{Para } x = 0 \Rightarrow W = U_0 = Q/A_v \quad \text{e} \quad P = P_0$$

$$x = L \Rightarrow W = U_0 = Q/A_v$$

Admitindo as variáveis adimensionais consideradas abaixo, segundo SCHLICHTING (17),

$$V = \frac{W}{U_0} \quad x_1 = \frac{x}{L} \quad z_1 = \frac{z}{L} \quad P_1 = \frac{P}{\mathbf{r}U_0^2} \quad (25)$$

onde U_0 é a velocidade de referência em $z = 0$.

Portanto a equação (24) torna-se:

$$\mathbf{u} \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} - \frac{\mathbf{m}W}{\mathbf{r}K} = \frac{\partial P}{\partial z} \quad (\text{multiplicando por } \mathbf{r})$$

$$\mathbf{ur} \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} - \frac{\mathbf{m}W}{K} = \frac{\partial P}{\partial z} \rho \quad (26)$$

e substituindo em (25) tem-se:

$$\mathbf{m} \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} - \frac{\mathbf{m}W}{K} = \frac{\partial P}{\partial z} \quad (27)$$

$$\frac{\mathbf{m}U_0}{L^2} \frac{\partial^2 V}{\partial x_1^2} - \frac{\mathbf{m}}{K} U_0 V = \frac{\mathbf{r}U_0^2}{L} \frac{\partial P_1}{\partial z_1} \quad (\text{multiplicando por } L^2)$$

$$\mathbf{m}U_0 \frac{\partial^2 V}{\partial x_1^2} - \frac{\mathbf{m}}{K} U_0 V L^2 = \mathbf{r}U_0^2 L \frac{\partial P_1}{\partial z_1} \quad (\text{dividindo por } \mathbf{m}) \text{ e rearranjando,}$$

$$U_0 \frac{\partial^2 V}{\partial x_1^2} - \frac{L^2}{K} U_0 V = \frac{\mathbf{r}U_0^2 L}{\mathbf{m}} \frac{\partial P_1}{\partial z_1} \quad (\text{somando } U_0)$$

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x_1^2} - \frac{L^2}{K} V = \frac{\mathbf{r}U_0 L}{\mathbf{m}} \frac{\partial P_1}{\partial z_1} \quad (28)$$

A equação (28) mostra o perfil da Variação da Velocidade num campo adimensionalizado e alguns parâmetros importante paras o escoamento no meio poroso, como:

$$a^2 = \frac{L^2}{K} = \text{parâmetro de porosidade}$$

$$b = \frac{rU_0 L}{m} \frac{\partial P_1}{\partial z_1} = \text{parâmetro de pressão}$$

Condições de contorno adimensionalizadas:

$$\text{Para } x_1 = 0 \Rightarrow V = 1$$

$$x_1 = 1 \Rightarrow V = 1$$

Protanto a equação (28) pode ser escrita da seguinte forma:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x_1^2} - a^2 V = b \quad (29)$$

cuja solução analítica é:

$$V = A_1 e^{ax_1} + A_2 e^{-ax_1} - \frac{b}{a^2} \quad (30)$$

Deve-se fazer um cálculo iterativo, isto é corrigir o campo de pressão, fator b (TAN, 1969) e em seguida voltar a calcular V, até que o valor de $V_{\text{médio}}$ seja próximo de 1.

Sendo que:

$$A_1 = \frac{\left[1 + \frac{b}{a^2}\right]}{\left[1 + \frac{(1 - e^{aL})}{(e^{-aL} - 1)}\right]} \quad (31)$$

$$A_2 = \left[\frac{1 + \frac{b}{a^2}}{1 + \frac{(1 - e^{aL})}{(e^{-aL} - 1)}} \right] \cdot \left[\frac{(1 - e^{aL})}{(e^{-aL} - 1)} \right] \quad (32)$$

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA E PROCEDIMENTOS

3.1– SELEÇÃO DO MATERIAL PARA ESPERIMENTAÇÃO.

A metodologia aplicada a este trabalho consiste 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 ensaios tijolos comuns de barro cozido (argila), de procedência da Olaria NM de Nelson Medeiros, produzidos com argila do município de Paraibuna, no Vale do Paraíba, (SP). Tais tijolos são de composição argilosa homogênea de boa qualidade (sem areia), conformação artesanal, queima uniforme em fornos típicos a óleo, dimensões constantes e muito pouca deformação estrutural. Foram selecionados aleatoriamente em um empilhamento por mais de 30 dias, protegido contra chuvas e de mesma fornada.

Para a determinação dos esforços em questão foi planejada e construída uma bancada de testes (ver desenho no anexo 01) que propiciasse, em um ambiente de laboratório, condições de execução e reprodução dos ensaios, com boa confiabilidade dos resultados.

3.2- PROCEDIMENTO.

O procedimento constou da medição da deformação dos corpos de prova (tijolos) em três de suas 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 nas literaturas pertinentes, 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 da condições desta.

Para chegar nos resultados obtidos foram também levantados dados que permitisse confronto com informações buscadas em textos especializados, tais como porosidade e velocidade de permeabilidade da água em meios porosos.

Foram utilizados instrumentos de medição com grau de precisão adequada e de boa procedência. Nos cálculos foram considerados precisão na casa dos centésimos e nos arredondamentos desconsiderados os valores imensuráveis que uma obra de alvenaria requer.

3.3- DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS UTILIZADOS.

Para determinação das deformações provocadas pela percolação de água, construiu-se uma bancada de testes, conforme o desenho constante do anexo 01, em chapa de aço carbono (SAE 1020) de modo a permitir o confinamento do corpo de prova (c.p.) em três de seus lados, vide foto 01.



Foto 01- Confinamento do corpo de prova na bancada de testes.

Desta forma, toda deformação a que o c.p. estivesse submetida, poderia ser medida nas faces opostas às fixas, 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 à das faces do c.p. e não somente da região em contato com o apalpador. As chapas se apoiaram na base da bancada sobre um filme de graxa para inibir o atrito.

Para a umidificação do c.p. foi utilizado uma bureta graduada de vidro, com registro para regulagem da vazão da água, apoiada e suspensa por um suporte vertical, ver Foto 02. O gotejamento de água foi regulado para que toda a umidificação do c.p. se desse por absorção capilar e sem a ocorrência de transbordamento.



Foto 02- Aspecto da bureta de gotejamento de água, sobre a bancada de testes.

3.4- SELEÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Foram selecionados três (de um lote de 12) tijolos comuns de formato regular, com mínimo de distorções entre as superfícies laterais, de dimensões 200 x 100 x 50 mm, de mesma corrida de produção e estocados sob as mesmas

condições ambientais. A eles foram dados números de identificação de 1 a 3, ou seja, corpos de prova nº 1, nº 2 e nº 3.

3.5- SECAGEM

Os c.p. de n^{os}. 1, 2 e 3 foram colocados a secar em Estufa de secagem FANEM Mod. 315 S6, a temperatura de 105 a 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% (8)), capilar e livre, absorvidas do ambiente em que estiveram armazenados.

3.6- PESO SECO

Os c.p. n^{os}. 1, 2 e 3, após a secagem, foram pesados em Balança eletrônica digital Mettler PE 2000 – 0.1 g , conforme dados da coluna 1 da Tabela 05 .

3.7- DEFORMAÇÃO (corpos de prova 1, 2 e 3)

Os c.p. foram levados à bancada de testes e confinados rigidamente três dos seus lados, conforme mostra a Figura 07 e Foto 01.

Figura 07- Esquema de definição das deformações dos corpos de prova.

A leitura da deformação ocorreu após cada c.p. absorver 300ml de água, valor este estabelecido pela média determinada com os c.p. de números 1, 2, 3, 4,5 e 6 conforme coluna 3 da tabela 05.

Observou-se que ao atingir o volume cotejado de 300ml, os c.p. passara a descartar a unidade excedente sobre a bancada de testes e não mais apresentar deformação. O tempo decorrido entre o início do gotejamento de água (aproximadamente de 1ml/min.) foi em torno de 4h. e 30 min. para cada um deles.

Os valores das deformações medidas pelos relógios comparadores (coluna 4 da tabela 04) se mantiveram inalterados por mais de 24h, quando o experimento foi encerrado, (coluna 4 da tabela 05).

Após o encerramento da experiência, os c.p. foram novamente pesados para confirmação do volume de umidade absorvida (coluna 2 da tabela 05).

3.8- DETERMINAÇÃO DA DEFORMAÇÃO NA PAREDE (corpo de prova nº. 10)

Os procedimentos para este experimento foram semelhantes aos aplicados no item 3.4 para os c.p. n^{os}. 1, 2 e 3, exceto quanto:

- a) A parede foi construída com três camadas de tijolos no comprimento e três na altura, com amarramento entre eles, assentados com argamassa 3:1, cimento Portland composto Montes Claros, CP II – F – 32 e areia média lavada de procedência do rio Paraíba.
- b) As pesagens seca e úmida foram realizadas em balança Filisola Mod. BR 20kg – 20gr.
- c) O Volume de água absorvido foi de 3000 ml.
- d) Foram utilizadas 3 buretas para gotejamento, uma para cada tijolo da face superior da parede.

Os resultados encontram-se na tabela 06.

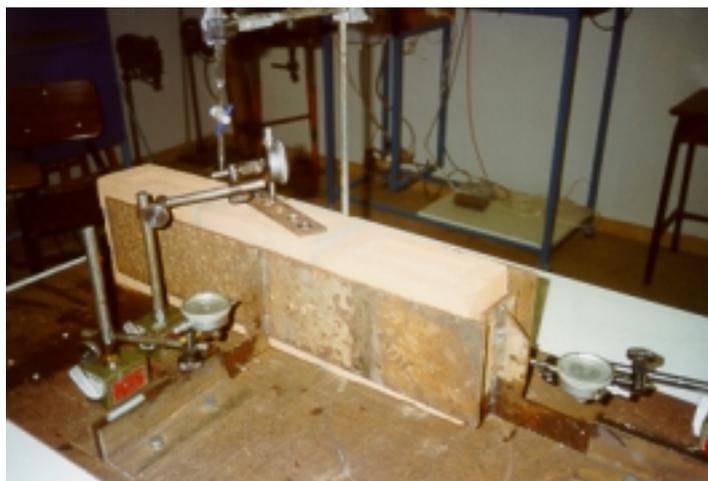


Foto 03- Parede, corpo de prova nº. 10

3.9- DETERMINAÇÃO DO VOLUME SÓLIDO DOS TIJOLOS (corpos de prova nºs. 4, 5 e 6)

Para a determinação do volume sólido dos tijolos, adotou-se o método por imersão total, cujo resultado foi obtido por diferença entre os volumes do recipiente e o deslocado quando da imersão. Para isso os c.p. 4, 5 e 6 foram totalmente pintados com uma fina camada de tinta a base de latex impermeabilizante, de modo a recobrir as superfícies externas, tornando as impermeáveis, ver Foto 03. Em seguida, após a secagem da tinta, foram mergulhados um a um em um recipiente de vidro graduado (fundo de escala – 1 ml) cheio de água, conforme resultados mostrados na Tabela 05.



Foto 04- Corpos de Prova 4, 5 e 6 pintados para determinação dos volumes sólidos.

3.10- DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DE ABSORÇÃO DA ÁGUA

Determinou-se a velocidade de absorção de água por percolação, submergindo os corpos de prova de nos. 7, 8 e 11 em uma bandeja contendo 10 mm de lâmina constante de água e neste instante, deu-se início à contagem do tempo, que só foi interrompida (individualmente) quando as superfícies superiores dos c.p. apresentaram-se totalmente umidecidas, ver Foto nº 05 .

Os corpos de prova (Figura 08) para este experimento foram preparados como abaixo:

- a) Um tijolo comum seco (c.p. nº. 11).
- b) Um tijolo comum com 10 mm de argamassa (*) assentada em sua base, seco.
- c) Um bloco de argamassa (*) medindo 200 x 70 x 50, seco.

(*) Argamassa conforme descrição no item 3.5-a

Figura 08 – Corpos de prova para medição da velocidade de absorção.



Foto 05- Visão da frente de percolação dos corpos de prova 7, 8 e 9, para determinação da velocidade de umidificação.

CAPÍTULO 4

CÁLCULOS

4.1- DETERMINAÇÃO DO GRADIENTE DE PRESSÃO

Cálculo do gradiente de pressão pela fórmula:

$$Q = \frac{kA}{m} \frac{dP}{dz}$$

Dados: $Q = 0,1770 \text{ cm}^3/\text{s}$ (valor medido experimentalmente)

$\mu = 1,008$ centipoise (tabelado – água)

$A_v = 42,80 \text{ cm}^2$ (medido)

$K = 7,14 \text{ cm}^2$ (valor médio tabelado – argila)

Portanto;

$$\frac{dP}{dz} = 0,0006 \text{ atm/cm}$$

$\frac{dP}{dz}$ é o gradiente de pressão é aquele que deve ser vencido para que o escoamento prossiga.

4.2- CÁLCULO DA VAZÃO PELA EQUAÇÃO DIFERENCIAL

Pela equação (30),

$$V = A_1 e^{ax_1} + A_2 e^{-ax_1} - \frac{b}{a^2}$$

Cálculos de a e b (casos medidos)

$$a^2 = \frac{L^2}{K} = \frac{(200)^2}{4280} = 9,34 \Rightarrow \boxed{a = 3,06}$$

$$b = \frac{rU_0L}{m} \cdot \frac{\partial P_1}{\partial z_1}$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \frac{rU_0^2}{L} \frac{\partial P_1}{\partial z_1} \Rightarrow \frac{\partial P_1}{\partial z_1} = \frac{L}{rU_0^2} \cdot \frac{\partial P}{\partial z}$$

$$U_0 = \frac{Q}{A_v} = 4,14 \times 10^{-5} \text{ mm/s} = 4,14 \times 10^{-8} \text{ m/s}$$

Portanto,

$$b = 5,72 \times 10^{-12}$$

$$A_1 = \frac{\left[1 + \frac{5,72 \times 10^{-12}}{56,02} \right]}{\left[1 + \frac{(1 - e^{-3,06 \times 0,20})}{(e^{-3,06 \times 0,20} - 1)} \right]} = \frac{\left[1 + 1,02 \times 10^{-12} \right]}{\left[1 + \frac{(-0,84)}{(-0,45)} \right]} = \frac{1,0}{2,87} \Rightarrow A_1 = 0,35$$

$$A_2 = \left[\frac{1,0}{2,87} \right] \cdot \left[\frac{-0,84}{-0,45} \right] \text{ D} \quad A_2 = 0,65$$

$$\frac{b}{a^2} = \frac{5,72 \times 10^{-12}}{9,34} \cong 10^{-12} \cong \text{ZERO}$$

por análise de ordem de grandeza dos demais termos da solução analítica (equação 30)

4.3- DETERMINAÇÃO DA TENSÃO DE DEFORMAÇÃO

Tomando-se o Módulo de Deformação (E) para tijolos de argila (barro cozido) igual a $(0,407 \sim 2,650) \times 10^3 \text{ kgf/mm}^2$ (TOMAZ, 1989) e as deformações médias medidas nos ensaios experimentais, constantes da Tabela 05 para os corpos de prova n^{os}. 1, 2 e 3 obtém-se:

- Tensão de deformação Transversal (τ_T)

$$t_T = E \frac{\Delta L_T}{L_T} = (0,407 \sim 2,650) \times 10^3 \text{ kgf} / \text{mm}^2 \times \frac{0,035 \text{ mm}}{200 \text{ mm}} = (0,071 \sim 0,464) \text{ kgf} / \text{mm}^2$$

- Tensão de deformação Longitudinal (τ_L)

$$t_L = E \frac{\Delta L_L}{L_L} = (0,407 \sim 2,650) \times 10^3 \text{ kgf} / \text{mm}^2 \times \frac{0,016 \text{ mm}}{50 \text{ mm}} = (0,130 \sim 0,848) \text{ kgf} / \text{mm}^2$$

- Tensão de deformação Horizontal (τ_H)

$$t_H = E \frac{\Delta L_H}{L_H} = (0,407 \sim 2,650) \times 10^3 \text{ kgf} / \text{mm}^2 \times \frac{0,016 \text{ mm}}{50 \text{ mm}} = (0,153 \sim 0,344) \text{ kgf} / \text{mm}^2$$

Valores que correspondes às tensões aplicadas nas seções transversal, longitudinal e horizontal dos corpos de prova causado pela umidade absorvida nos vazios pelo efeito capilares internos do meio poroso e responsáveis pela deformação do corpo de prova.

Observando a última linha da tabela 03, referente a tijolos de barro cozido, observa-se ser este elemento o único a possuir deformação positiva, isto é expansão irreversível. Os demais elementos ali citados apresentam deformação negativa, isto é contração irreversível. Destacamos esse fato como sendo mais um dos fatores que vem colaborar com o aparecimento de trincas, uma vez que o conjunto tijolo – argamassa se deformam diferentemente.

4.4- DETERMINAÇÃO DA FORÇA CAPILAR

Entendendo ser a deformação como um deslocamento de partículas provocadas pela força capilar (F_C) exercida pela água ao preencher os espaços vazios do corpo, pode ser ela comparada a uma pressão aplicada a cada uma das seções do corpo. Aplicando a essa deformação a proporcionalidade de área entre as partículas e os vazios, pode ser estudada de maneira simplificada a força capilar exercida nos corpos de prova experimentados.

- Força capilar Transversal (F_{CT})

$$F_{CT} = \tau_T \times A_V^T = (0,071 \sim 0,464)\text{kgf/mm}^2 \times 1070\text{mm}^2 = (75,97 \sim 496,48)\text{kgf}$$

- Força capilar Longitudinal (F_{CL})

$$F_{CL} = \tau_L \times A_V^L = (0,130 \sim 0,848)\text{kgf/mm}^2 \times 4280\text{mm}^2 = (556,40 \sim 3629,44)\text{kgf}$$

- Força capilar Horizontal (F_{CH})

$$F_{CH} = \tau_H \times A_V^H = (0,053 \sim 0,344)\text{kgf/mm}^2 \times 2140\text{mm}^2 = (113,42 \sim 736,16)\text{kgf}$$

CAPÍTULO 5

APRESENTAÇÃO E COMENTÁRIOS DOS RESULTADOS

5.1- RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os resultados dos experimentos realizados com os corpos de prova, tijolos, parede e bloco de argamassa são apresentados a seguir sob forma de tabelas.

5.1.1- Determinação dos Pesos Seco e Úmido, Volume de Vazios e Deformações (corpos de prova n^{os}. 1, 2, 3 e 7).

Coluna	(1)	(2)	(3)=(2)-(1)	(4) Deformação (mm)		
	Peso Seco (g)	Peso Úmido (g)	Volume de Vazios (ml)	Transversal ΔL_T	Longitudinal ΔL_L	Horizontal ΔL_H
1	1391,4	1702,6	311,2	0,040	0,020	0,010
2	1279,1	1595,4	316,3	0,030	0,010	0,010
3	1342,6	1625,3	282,7	0,035	0,020	0,020
Valores Médios (*)	1337,7	1641,1	303,4	0,035	0,016	0,013
7 (bloco)	1289,8	1490,6	200,8	0,050	0,030	0,010

(*) Os valores médios foram calculados levando em consideração apenas os c.p. n^{os}. 1, 2 e 3.

Tabela 04 – Pesos Seco e Úmido, Volume de Vazios e Deformações.

5.1.2- Determinação dos Pesos Seco e Úmido, Volume de Vazios e Deformações da Parede (corpo de prova n^o. 10).

Coluna	(1)	(2)	(3)=(2)-(1)	Deformação (mm)		
	Peso Seco (g)	Peso Úmido (g)	Volume de Vazios (ml)	Transversal ΔL_T	Longitudinal ΔL_L	Horizontal ΔL_H
10	16 580	19 410	2 830	0,180	0,025	0,050

Tabela 05- Pesos Seco e Úmido, Volume de Vazios e Deformações da Parede.

5.1.3- Determinação do Volume Sólido dos Tijolos

Coluna	(1)	(2)	(3)	(4) = (2)-(1)
Corpo de Prova	Peso seco (g)	Peso úmido (g)	Volume sólido (ml)	Volume de vazios (ml)
4	1321,6	1621,2	924,9	299,6
5	1301,7	1607,9	933,7	306,2
6	1341,0	1636,6	916,1	295,6
Valores Médios	1321,4	1621,9	924,9	300,5

Tabela 06- Pesos seco e úmido e volumes sólido e de vazios dos corpos de prova n^{os}. 4, 5 e 6.

5.1.4- Determinação da Vazão e da Velocidade Inicial de Percolação (condição de contorno)

Coluna	1	2	3	4	5	6	7
Corpo De Prova	Superfície de Percolação (mm ²)	Área de Vazios 21,4% (1) (mm ²)	Volume de Água Absorvida (ml)	Tempo de Absorção (s)	Vazão (3)÷ (4) (ml/s)	Velocidade Inicial (5)÷ (2) (mm/s)	Média (6) (mm/s)
TIJOLO 3	20 000	4 280	100	542	0,1845	4,30x10 ⁻⁵	4,14 x 10 ⁻⁵
TIJOLO 9	20 000	4 280	100	590	0,1695	3,96x10 ⁻⁵	
BLOCO DE MASSA 7	14 000	2 996	100	2 812	0,0452	1,50x10 ⁻⁵	
TIJOLO COM MASSA 8	20 000	4 280	250 (*)	4 477	0,0056	1,30x10 ⁻⁵	

(*) Maior quantidade de água para permitir medição no par tijolo-argamassa

Tabela 07- Valores da Vazão e Velocidade Inicial de Percolação.

5.1.5- Determinação da Vazão e Velocidade Média de Percolação

Coluna	1	2	3	4	5	6
Corpo de Prova	Peso Úmido X Peso Seco (g)	Volume Absorvido (ml)	Área de Vazios (mm ²)	Tempo de Absorção (s)	Vazão (2) ÷ (4) (ml/s)	Velocidade Média (5) ÷ (3) (mm/s)
Bloco de Massa 7	1289,8 1490,6	200,8	2 996	4 860	0,0413	1,378 x 10 ⁻⁵
Tijolo com Massa 8	1815,6 2270,0	454,4	4 280	24 180	0,0188	0,446 x 10 ⁻⁵
Tijolo 9	1312,4 1640,3	327,9	4 280	30 660	0,0107	0,250 x 10 ⁻⁵

Tabela 08- Valores da Vazão e Velocidade Média de Percolação.

5.2- COMENTÁRIOS SOBRE OS RESULTADOS
EXPERIMENTAIS

Para comparar os resultados experimentais das deformação medidas (Tabelas 04 e 05) , vamos introduzir um índice adimensional que os tornem independentes da dimensão do comprimento do corpo de prova e da direção onde se verificou a deformação. Considere a sigla Δ_L como sendo a deformação e L o comprimento do corpo de prova, na direção onde ocorreu esta deformação; as sub-siglas T, H e L como indicadora das três direções, transversal, horizontal e longitudinal. A relação;

$$\frac{\Delta_L}{L} \times 10^4$$

fornece um valor inteiro da ordem das dezenas, para melhor compreensão, e independente do comprimento do c.p. e da direção onde os esforços deformante agiram. A este índice chamamos de Índice de Deformação que é apresentado na Tabela 10, a seguir:

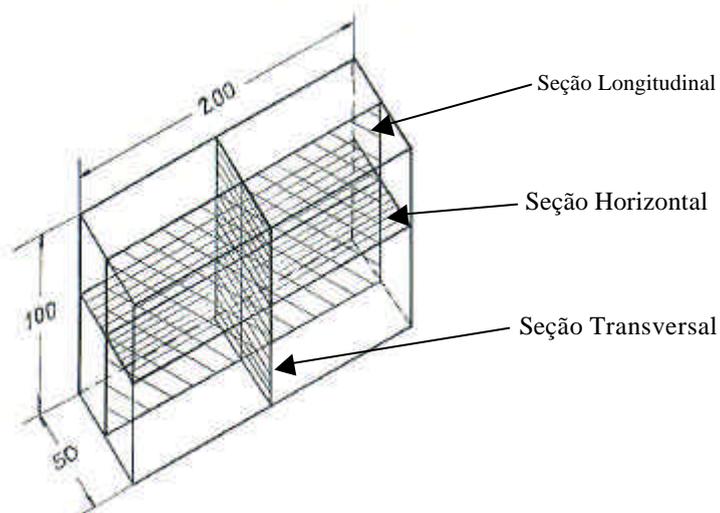


Figura 18- Esquema de definição das seções Transversal, Horizontal e Longitudinal.

Corpo de prova	Tijolo				Argamassa	Parede
	1	2	3	Média	7	10
Transversal $\frac{\Delta_{L_T}}{L_T}$	20	15	17,5	17,5	25	29
Horizontal $\frac{\Delta_{L_H}}{L_H}$	20	10	20	16,5	43	14,7
Longitudinal $\frac{\Delta_{L_L}}{L_L}$	20	20	40	26,7	20	50
Tijolo	$L_T = 200$	$L_H = 100$	$L_L = 50$			
Argamassa	$L_T = 200$	$L_H = 70$	$L_L = 50$			
Parede	$L_T = 620$	$L_H = 170$	$L_L = 100$			(valores em mm)

Tabela 09- Índice de Deformação Linear dos corpos de prova.

Observa-se que mesmo abstraindo-se o comprimento da direção de deformação, os valores destes índices tabelados se mostram diferentes para cada uma das direções. Da análise destes valores pode ser notado alguns aspectos importantes:

- 1- A deformação ocorre como se os esforços deslocantes estivessem aplicados em sucessivas seções, entendendo-as como se o c.p. fosse dividido em “n” fatias de espessura infinitamente pequena, deslocando-se em uma única direção.
- 2- Os índices quando comparados entre a média dos tijolos, o corpo de argamassa e a parede, são apreciavelmente diferentes, o que leva a mostrar a existência de esforços diferentes entre os tijolos e a argamassa aglomerante da parede, provocando deslocamentos de massas também diferentes e em consequência deformações diferentes. Isto leva a confirmar que as deformações observadas em edificações sob a forma de trincas com consequente comprometimento estrutural e visual. As Figuras 07, 08, 09, e 19 mostram esquematicamente como o fenômeno pode ser observado em edificações.

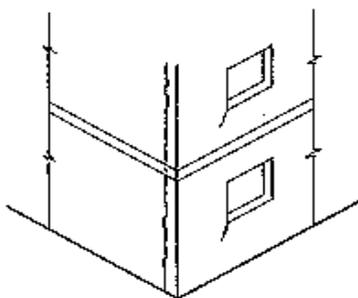


Figura 19- Trinca em estrutura e janelas de edifícios (tomas, 1989).

- 3- É importante notar que o fenômeno da percolação sujeita as edificações a deformações por todas as épocas do ano, submetidas a variações de umidade nas estações úmidas e secas, bem como a ocorrências de intempéries como chuvas, umidade do ar e do solo.
- 4- Também destaca-se a necessidade de controle da quantidade de água a ser adicionada nas argamassas, no ato da construção, bem como da previsão de tais esforços deformante com utilização de juntas de dilatação.

5.3- RESULTADOS TEÓRICOS

5.3.1- Determinação dos Gradientes de Pressão e Velocidade através da equação (30).

Com o perfil V de velocidade pode-se ter então a velocidade média ($V_{med.}$) e por fim calcular a vazão Q.

$$V_{med.} = \frac{1}{A} \int_0^{x_1} V dA \quad (33)$$

Portanto,

$$V_{med.} = \frac{1}{A} \int_0^1 \left(A_1 e^{ax_1} + A_2 e^{-ax_1} - \frac{b}{a^2} \right) dA = \frac{1}{d \cdot L} \int_0^1 \left(A_1 e^{ax_1} + A_2 e^{-ax_1} - \frac{b}{a^2} \right) d \cdot dx_1 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow V_{med.} = \frac{1}{d \cdot L} \left(A_1 e^{ax_1} + A_2 e^{-ax_1} - \frac{b}{a^2} \right) d \cdot x_1 \quad \text{com } x_1 \text{ variando de } 0 \sim 1$$

$$\boxed{V_{med.} = A_1 e^a + A_2 e^{-a} - \frac{b}{a^2}} \quad (34)$$

Velocidade média Adimensional

$$W_{med.} = (V_{med.}) \cdot U_0 \quad (35)$$

$W_{med.}$ = Velocidade média dimensional

$$Q = W_{\text{med.}} \cdot A_T \quad (36)$$

onde A_T é a área transversal ao escoamento.

$$V = 0,35e^{ax_1} + 0,65e^{-ax_1} - 0$$

Importante observar a importância do fator que envolve a porosidade (fator “a”). Portanto $V_{\text{med.}}$ é

$$V_{\text{med.}} = 0,35e^a + 0,65e^{-a} - 0 = 7,46 + 0,03 - 0$$

$$V_{\text{med.}} = 7,49$$

$$\text{Então, } W_{\text{med.}} = (V_{\text{med.}}) (V_0) = (7,49) (4,14 \times 10^{-5})$$

$$W_{\text{med.}} = 31,0 \times 10^{-5} \text{ mm/s}$$

5.3.2- Resultados Teóricos

- Gradiente de Pressão $\Rightarrow \frac{dP}{dz} = 0,0006 \text{ atm/cm}$

- Fatores: $a = 3,06$ $A_1 = 0,35$
 $b = 5,72 \times 10^{-12}$ $A_2 = 0,65$

- Perfil da Velocidade $\Rightarrow V = 0,35e^{ax_1} + 0,65e^{-ax_1} - 0$

- Velocidade Média $\Rightarrow V_{\text{med.}} = 7,49$

$$W_{\text{med.}} = 31,0 \times 10^{-5} \text{ mm/s}$$

5.4- COMENTÁRIOS SOBRE OS RESULTADOS TEÓRICOS

Analisando os valores, pode-se notar que os erros existem na medida dos valores de vazão e velocidade, pode-se perceber que ocorrem vários problemas quando se deseja medir a vazão inicial, a área tomada como passagem não é a verdadeira, existem espaços vazios no tijolo que não são tomados pela água, portanto ali não existe vazão, de forma que a vazão medida é menor que a calculada. Para este caso, a velocidade média é da ordem de 7,5 vezes a velocidade medida (Tabela 07), portanto a vazão Q será também da mesma ordem, pois se trata da mesma área transversal A_T considerada.

Esta diferença é atribuída a fatores experimentais tais como:

- Não homogeneidade do tamanho das partículas de argila do tijolo, influenciando diretamente no arranjo físico entre elas;
- Embora tijolos de boa qualidade, isto é de argila sem areia, ela está presente na sua constituição por não haver nas olarias critérios rigorosos para sua separação e ainda, por ela ser usada para untar as formas de conformação. O tamanho da partícula de areia é em média bem maior que a da argila, como mostrado na Tabela 01;
- As velocidades medidas são diretamente influenciadas pela heterogeneidade do tamanho das partículas e conseqüentemente pelo arranjo físico entre elas, criando desta forma regiões de um mesmo meio com mais ou menos espaços vazios, provocando frentes de vazões diferentes. Por esta razão as velocidades medidas foram adotadas como velocidades médias;

Outro ponto a salientar é que para efeito de hidrostática a pressão que reina em baixo de uma parede é a soma da pressão da coluna de líquido mais a pressão que será perdida por perda de carga ao longo de z , isto é:

$$P_{est.} = P_c = P_p \quad (37)$$

Portanto os esforços em baixo deverão ser maiores que em outros pontos.

Se desprezarmos o efeito da velocidade na equação, isto é, fazer o termo $\frac{\partial^2 W}{\partial x^2}$ da equação (25) se aproximar de zero teremos então que esta equação deverá ser :

$$-\frac{mW}{rK} = \frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial z} \quad (38)$$

que quando adimensionalizada ficará da forma:

$$-\frac{L^2}{K} W = \frac{rU_0 L}{m} \frac{\partial P_1}{\partial z_1} \quad (39)$$

ou seja,
$$V = \frac{-b}{a^2} \quad (40)$$

o que mostra que V também tenderá a zero, pois o termo b/a^2 é muito pequeno como já vimos. Ele depende muito da configuração e do arranjo das partículas do meio poroso (COX, 1991).

Portanto é de se esperar que existe uma frente de avanço de umidade com uma curvatura em x, que não pode ser desprezada.

O mesmo deve acontecer com y, mas como a dimensão em y é a metade da de x, procuramos desprezar o termo na equação para facilitar a solução, e só foi considerada na maior dimensão do tijolo, isto é, a frente de umidade deverá se apresentar de forma não plana.

Isto implica num estudo mais detalhado (trabalho futuro) do número de Reynolds, fator que multiplica o termo $\frac{\partial P_1}{\partial z_1}$, para se obter um valor de Reynolds mais real (TAN, 1969), (valor do número de Reynolds experimental igual a $0,2056 \times 10^{-8}$), aguardando, portanto, os valores da vazão “Q” ficarem mais próximos daqueles medidos e calculados.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

A expectativa inicial deste trabalho buscou a determinação dos esforços provocados pelo escoamento de fluidos em meios porosos, bem como de fatores decorrentes tais como a velocidade do escoamento e as pressões oriundas dos esforços no meio, composto por partículas sólidas e espaços vazios entre elas.

Experimentalmente obteve-se valores dos esforços provocados pela percolação de água em meio cerâmico como o tijolo de argila, da ordem de 80 a 3600 kgf, dependendo da direção da deformação provocada em função da frente de percolação, ou seja da direção em que a água caminha por entre os vazios no meio. Tais esforços provocam deformações diferenciadas nas direções; comprimento, largura e altura do corpo de prova, principalmente sendo elas de valores diferentes, como é o caso do tijolo. As deformações medidas, da ordem de 0,013 a 0,035 mm para o tijolo, de 0,010 a 0,050 mm para a argamassa e de 0,050 a 0,180 mm para a parede (conjunto tijolo e argamassa), demonstram serem além de valores diferentes como também em diferentes direções, o que vem colaborar para o aparecimento de trabalhos mecânicos diferenciados tanto em magnitude como em direções. Estes trabalhos decorrentes do escoamento de água por entre os poros de elementos de alvenaria, são responsáveis pelo aparecimento de trincas e fissuras nas estruturas de paredes, muros e vigas, tão desagradáveis ao aspecto visual como comprometedoras estruturalmente.

Além da confirmação dos resultados por literaturas especializadas e afins, buscou-se também um modelo matemático calcado nas equações de conservação da mecânica dos fluidos que exprimisse o fenômeno fisicamente. Tal procedimento demonstrou além de uma visualização do comportamento do perfil de velocidade do fluido no meio com sendo o de uma frente não

plana, caminhando com velocidade da ordem de 3 a 4 $\mu\text{m/s}$ (2,5 a 3,8 m/dia) na direção favorável ao escoamento livre, como também pressões internas que provocam elevadíssimas perdas de carga ao escoamento. Nos cálculos matemáticos verificou-se uma defasagem de valores da velocidade média calculada e da medida (em torno de 7,5 vezes) que foi analisada e atribuída aos instrumentos de medição utilizados não tão sofisticados quanto se desejaria que fossem. Entretanto, os valores medidos e calculados se apresentam de uma ordem de grandeza aceita, em função da simplicidade dos instrumentos utilizados nos ensaios.

A percolação da água no meio poroso pode provocar as deformações verificadas quando o escoamento se fizer pelo efeito da gravidade, bem como pelo fenômeno da capilaridade.

Dos experimentos práticos e desenvolvimentos teóricos apresentados neste trabalho e pelas maneiras nas quais uma estrutura de alvenaria pode se submeter à percolação de água, seja ela natural ou forçada, podemos tirar alguns ensinamentos que devem ser observados na prática da engenharia;

- 1- É real e mensurável os esforços deformantes provocados pelo fenômeno da percolação de água em elementos de alvenaria.
- 2- Sendo mensurável, é possível de ser previsto e equacionado meios de contorná-lo, tais como a aplicação de juntas de dilatação e impermeabilização de paredes quando sujeitas à condições de umidades desfavoráveis.
- 3- Conhecendo-se os principais meios pelos quais uma estrutura de alvenaria pode vir a se submeter à percolação, como submersão temporária em enchentes, permanência constante em solos de elevada umidade, sujeição periódica elevada a chuvas, vazamentos de encanamentos de água embutidos, ambientes com elevada umidade relativa, dentre outros, é recomendável aos projetistas e construtores de obras civis a previsão da percolação e seu ataque por meios de proteção e impermeabilização.

- 4- Podemos citar também como condições favoráveis à percolação de água o armazenamento inadequado, sujeito a intempéries, dos elementos de construção civil.
- 5- Na execução da obra, quando do preparo das diversas argamassas e no ato da edificação, ou seja no ato da junção argamassa e elementos estruturais, é comum a prática da umidificação desses para uma melhor aderência daquela, bem como no preparo da argamassa a colocação de água em excesso. Pode-se estar nestas operações inserindo umidade desnecessária que poderá a vir provocar a percolação.
- 6- Elementos filtrantes confeccionados em materiais cerâmicos também podem sofrer desse fenômeno, sendo necessário em alguns casos a previsão de juntas de dilatação que previnam trincas e conseqüente perda da eficiência da filtração.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS

Este trabalho deixa uma boa abertura para trabalhos futuros, tal como analisar a ordem de grandeza do N° . de Reynolds e sua influência na solução analítica. Também será possível estudar e calcular novos valores de parâmetros através da formulação proposta, apenas considerando as diferentes configurações do arranjo das partículas num meio poroso.

CONTRIBUIÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho embora se apresentando de uma maneira que o caracteriza, trata-se de uma análise inicial do escoamento de água por percolação em elementos cerâmicos, abre possibilidades para trabalhos futuros, sem deixar de apresentar métodos de cálculos e experimentação que auxiliam em muito os profissionais da área que procuram eliminar os efeitos desagradáveis de trincas em construção civil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AQUINO, A. M. S. *Escoamento em meios porosos entre superfícies oscilantes – Uma análise do ponto de vista da tribologia*. Tese de Doutorado – FEG-UNESP, 1998.

BROWN, George Granger. *Operaciones Básicas de la Ingeniería Química*. Barcelona: Gráficas Condal, 1963, 629 p.

BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT. *Estimation of Thermal and Muisure Movements and Stress*. Garston. Part 2, 1979, 228 p.

CAPUTO, Homero Pinto. *Mecânica dos Solos e suas aplicações*. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora. 1987. 241 p.

CARROCCI, L. R. *Escoamento de Couette entre duas placas com parte do espaçamento preenchido com meio poroso*. Dissertação de Mestrado - UNICAMP, 1982.

COX, S. M. *Analyses of steady flow in a channel with one porous wall, or wiht accelerating walls*. SIAM J. Appl. Moth. V.51(2), pp.429-438,1991

FRANCIS, F. O. *Hidráulica de Meios Permeáveis; Escoamento em meios porosos*. Rio de Janeiro: Interciência, 1980, 169 p.

FREIRE, José Teixeira, GUBULIN, José Carlos. *Tópicos Especiais de Sistemas Particulados*. São Carlos. UFSCar. 1982. Volume 1, 313 p.

- GARCEZ, Lucas Nogueira. *Elementos de Mecânica dos Fluidos*. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda. 1970, 449 p.
- HOUPEURT, A . *Elementos de Mecanique des Fluides dans les Milieus Poreux*. Paris: Tchnip, 1975.
- NEVES, Eurico Trindade. *Curso de Hidráulica*. Porto Alegre: Editora Globo. 1982, 578 p.
- PAULA, A. Longwell. *Mechanics of Fluid Flow*. New York: McGraw-Hill Book Company. 1966, 433 p.
- PFEFFERMANN, O. *Les Fissures Dans Les Constructions*. Annales de L'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics. Bruxelles, n° 250, 1968.
- SCHILICHTING, H. H. *Boundary layer theory*. New York: McGraw-Hill, 1972.
- STRETER, Victor L. *Handbook of Fluid Dynamics*. New York : McGraw-Hill. 1961, 1197 p.
- TAN, C. W. *The drag of a cloud spherical particles in low Reynolds number flow*. Journal of Fluid Mechanics. V. 38, pp.537-546, 1969.
- TOMAZ, Ercio. *Trincas em Edifícios: causas, prevenção e recuperação*. São Paulo: IPT, EPUSP, PINI. 1989, 194 p.

ZANARDI, M. A. *Escoamento entre cilindros concêntricos com parte porosa. Dissertação de Mestrado – UNICAMP, 1982.*

WHIFAKER, S. *Flow in porous media I; A theoretical derivation of Darcy's law. Transport in Porous Media. V. 1, pp.3-25, 1986.*