



ESCOAMENTO 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

FAENQUIL - Faculdade de Engenharia Química de Lorena - Rodovia Lorena – Itajubá, km 74,5 -
Cep 12600-000 - Lorena - SP – e-mail franca@debas.fauenquil.br

Luiz Roberto Carrocci

FEG- UNESP - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá - Av. Ariberto Pereira da Cunha, 333 –
Cep 12500-000 – Guaratinguetá – SP – e-mail: carrocci@unesp.br

Resumo. *É comum serem identificadas trincas em alvenaria de tijolos, não somente depois de um certo tempo da construção mas também durante a própria construção. Dentre os fatores responsáveis, um deles é devido à umidade absorvida pelos elementos da parede (tijolos e argamassa). Essa umidade é oriunda do ar, de chuvas, absorção do solo e até do excesso de água contida na argamassa de assentamento. Ela, em contato com os elementos porosos da parede, concorrerá para a percolação capilar originando esforços internos consideráveis, que irão provocar deslocamentos estruturais, que via de regra são diferentes para o tijolo e para a argamassa, causando o aparecimento de trincas. O estudo deste assunto conduz a análise para obtenção de valores médios de pressão e velocidade do fluido, medindo as deformações dos elementos. O trabalho traz o equacionamento para prever e estimar valores médios de velocidades e esforços nos elementos cerâmicos. Aborda o escoamento em elementos porosos e apresenta a proposta de modelagem para efetuar as estimativas dos valores de Velocidades e Esforços.*

Palavras-chave: *Meios porosos, Percolação de água, Higroscopia, Elementos cerâmicos de alvenaria.*

1. INTRODUÇÃO

Meios porosos são materiais sintéticos ou naturais que possuem um conjunto de poros, por onde pode passar um volume expressivo de fluido. Como por exemplo podemos ter areia, certas formações rochosas, algumas cerâmicas e o fígado humano. 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 escoamento dependem de fatores variáveis como: tamanho da partícula, sua esfericidade e da rugosidade de sua superfície. 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. Essa dificuldade se prende ao fato de a grande maioria dos meios porosos ser formada por arranjos aleatórios das partículas. A fig. 1 representa graficamente arranjos possíveis e teóricos quando consideradas as partículas de forma esférica e de tamanhos uniformes.

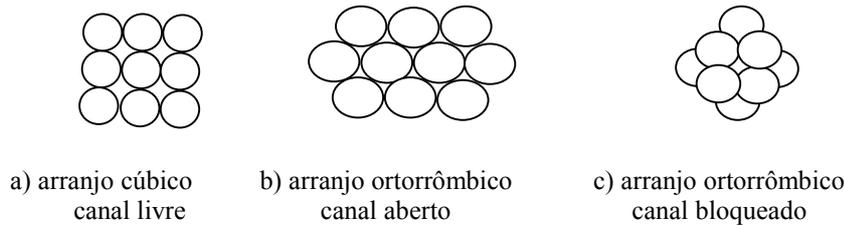


Figura 1. Arranjos físicos de partículas consideradas esféricas e uniformes.

Neste trabalho será considerado o arranjo cúbico de canal livre (Fig.1a), em decorrência do fator esfericidade e do tamanho da partícula de argila ser muito pequena (diâmetro médio < 0,005 mm), fazendo com que os valores de porosidade quando considerados como espaço de vazios em uma seção reta do meio poroso, sejam praticamente um o dobro do outro, como será mostrado na modelagem teórica para cálculo na Seção 2.

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. Essa poderia ser utilizada como um caminho de determinação da porosidade do meio se as partículas fossem de tamanho uniforme. Mas, isto não é o que ocorre na prática. 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 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 ortorrômica, 0,3019 se da forma tetragonal e ainda 0,2595 da forma romboédrica (Brown, 1963).

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

$$K = \frac{Q}{A} \cdot \frac{e}{\Delta_p} \quad \text{ou} \quad Q = KiA \quad (1) \quad (2)$$

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. 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:

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

onde, c é um coeficiente que depende do meio, variando desde 700 a 1 000 para a areia limpa e uniforme, 400 para a areia suja, d_{10} o talhe efetivo (granulometria) em mm e t a temperatura em °C. A Tab. (1) mostra valores de permeabilidade para alguns meios porosos (Neves, 1982).

1.1. Tipos de água presentes nos meios porosos.

Ao escoamento da água através de um sistema permeável, meio poroso, denomina-se Percolação ou Infiltração A dispersão da umidade no meio poroso ocorre nas três fases, sólida,

líquida e gasosa. Estas três fases podem existir simultaneamente. A fase líquida é a que mais comumente se apresenta. 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. Os componentes de alvenaria (tijolos, elementos cerâmicos, argamassas, etc) têm seu umedecimento também no processo de assentamento. A quantidade de água absorvida por um material depende basicamente de dois fatores: porosidade e capilaridade.

As águas que são contidas nos corpos porosos podem ser classificadas, como: Água livre, Água capilar, Água adesiva, Água higroscópica e Água de constituição. Destas águas, higroscópica, livre e capilar são as que podem ser evaporadas por calor, quando submetidas a temperaturas superiores à 100°C. Na fase gasosa, também preenchem os poros, vapores de água e carbono combinados.

Tabela (1) Diâmetro Médio e Coeficiente de Permeabilidade de alguns materiais.

Meio Poroso	Dia. Médio da Partícula (mm)	Coef. 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

1.2. Escoamento em Meios Porosos

Os escoamentos 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, 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 ,

$$Re = \frac{V_c \cdot d}{\nu} = 1 \quad \text{e} \quad Re' = \frac{D_p F_{Re} V \rho}{\nu} \quad (4) \quad (5)$$

onde d é o valor do diâmetro médio das partículas, ν o coeficiente de viscosidade cinemática da água e V_c a velocidade crítica. Para temperatura de 20°C, sendo $\nu = 0,01 \text{ cm}^2/\text{s}$, 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 (5) onde 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 F_{Re} um coeficiente que leva em consideração a esfericidade da partícula e a porosidade do meio (Streeter, 1961). Segundo Dupuit (1865), $v = kJ$, 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 $A_v = \psi A$ em que ψ corresponde a uma razão percentual da seção total. Portanto,

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

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 iso-piezométricas, são linhas de fluxo. A determinação dos vazios existentes na seção transversal total do meio poroso fornece o coeficiente de porosidade volumétrico. 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). O Coeficiente de Permeabilidade do meio é a razão entre a vazão de água que atravessa uma seção transversal no sentido do fluxo, isto é $K = Q/Ai$. A Tab. 1 mostra a relação entre o diâmetro médio de alguns materiais e o Coeficiente de Permeabilidade respectivo. A determinação da porosidade não é suficiente pois existem também a variação granulométrica e o arranjo físico entre elas. 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_{\parallel}) à direção do fluxo (Freire, 1982), daí considerar-se sempre uma velocidade média. A Tab. (2), apresenta valores de Porosidade e Velocidades médias críticas da água, a temperatura de 20°C, através de materiais de granulometria uniforme.

Tabela 2. Velocidades Médias Críticas (mm/s) em materiais porosos com granulometria uniforme (Garcez, 1970).

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

2. O MECANISMO DA PERCOLAÇÃO DE ÁGUA E SEUS EFEITOS.

São observadas trincas 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. 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. 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. O escoamento de águas por capilaridade se destaca neste trabalho pois é através dele que se buscou dimensionar os esforços que ele provoca em materiais porosos, como consequência da Força Capilar gerada. 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.

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

T_s = tensão superficial da água $\cong 0,076\text{g/cm} = 8 \text{ mg/mm}$ (Building R. Establishment, 1979) ou para fins práticos, considerando T_s e γ_a da água, tem-se:

$$h_h \text{ max.} = \frac{0,306}{d} \text{ (d em cm)}. \quad (9)$$

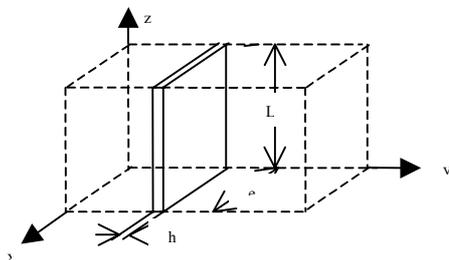
Assim, em corpos argilosos (paredes de tijolos comuns), com partículas sólidas de diâmetro inferior a 0,005 mm, $h_c \text{ max.}$ pode atingir alturas de 30 cm ou mais. Esta é uma condição suficiente para geração de esforços capilares que provocam trincas pela água que percola, decorrente da umidade do solo. As deformações 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).

3. MODELAGEM TEÓRICA PARA CÁLCULO – PROPOSTA

Para a determinação da composição, volume ocupado por vazios e volume de partículas sólidas de um meio poroso, 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 $< 0,005 \text{ mm}$, como é o caso da argila, podemos considerar os espaços vazios como capilares. Desta forma, vamos dispor as partículas arranjadas como na Fig. 1. 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.

Formulação para os Cálculos da Vazão e Velocidade.

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 ao longo de um eixo conforme mostrado na Fig. 3 a seguir.



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

Condições de contorno:

Para $Z = 0 \Rightarrow P = P_0$

onde $P_0 =$ pressão no plano xy

$P_2 =$ pressão no topo da figura.

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

Figura 2. 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 Fig. 2.

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} + \rho \vec{V} \left(\nabla \vec{V} \right) = \rho \vec{g} - \nabla P + \mu \nabla^2 \vec{V} \quad (10)$$

Fazendo as considerações de análise dos termos pode-se chegar às equações para efeito de solução:

$$\frac{\partial P}{\partial z} = v \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} \quad ; \quad \frac{\partial P}{\partial z} = A \quad ; \quad v \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = A \quad ; \quad P = P_0 - \frac{P_1 - P_2}{L} z \quad ; \quad V = \frac{1}{v} A \frac{x^2}{2} + Bx + C \quad (11)$$

Portanto, tem-se: $V = \frac{1}{2v} \frac{P_0 - P_2}{L} \left(\frac{e^2}{4} - x^2 \right)$ (também chamada de eq. de Navier-Poisson) (12)

que trata do perfil de velocidade variando em x na fissura. Calculando agora a vazão que atravessa a fissura ao longo de z:

$$q = \int V dA \Rightarrow q = 2 \int_0^{\frac{e}{2}} b V dx \Rightarrow q = b e \frac{e^2}{12} \cdot \frac{1}{v} \cdot \frac{(P_1 - P_2)}{L} \quad (13)$$

Considerando 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: $Q = nq$. 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 v 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 v para a viscosidade dinâmica μ , tem-se a fórmula que considera o efeito global da porosidade:

$$Q = \frac{KA}{\mu} \frac{dP}{dz} \quad (14)$$

onde: Q = vazão; K = permeabilidade; A = área transversal ao escoamento; μ = viscosidade cinemática e dP/dz = gradiente de pressão que empurra o escoamento.

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 Fig. (4).

$$\frac{\mu W}{\rho K} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} \quad \rightarrow \quad W = -\frac{K}{\mu} \frac{\partial P}{\partial z} \quad WA = -\frac{KA}{\mu} \frac{\partial P}{\partial z} \quad \rightarrow \quad Q = -\frac{KA}{\mu} \frac{\partial P}{\partial z} \quad (16)$$

Escrevendo a equação de Navier-Stokes com o termo de Darcy, isto é, $\frac{\mu W}{\rho K}$, tem-se, segundo Carrocci (14), Zanardi (15) e Aquino (16):

$$\frac{\partial W}{\partial t} + u \frac{\partial W}{\partial x} + v \frac{\partial W}{\partial y} + w \frac{\partial W}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + v \left[\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} \right] - \frac{\mu W}{\rho K} \quad (16)$$

Considerações: 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: $v \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} - \frac{\mu W}{\rho K} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z}$ (17)

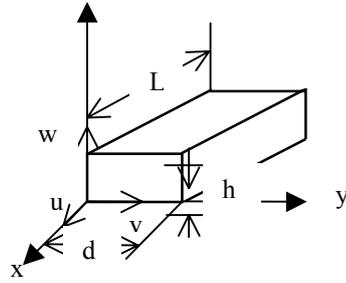


Figura 4. Elemento poroso (tijolo).

Considerando as condições de contorno em $x = 0 \Rightarrow W = U_0 = Q/A_v$ e $P = P_0$ e $x = L \Rightarrow W = U_0 = Q/A_v$, admitindo as variáveis adimensionais abaixo, segundo Schlichting, Eq. (15),

$$V = \frac{W}{U_0} \quad x_1 = \frac{x}{L} \quad z_1 = \frac{z}{L} \quad P_1 = \frac{P}{\rho U_0^2} \quad (18)$$

onde U_0 é a velocidade de referência em $z = 0$. Portanto a equação (18) torna:

$$v \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} - \frac{\mu W}{\rho K} = \frac{\partial P}{\partial z} \quad (\text{multiplicando por } \rho) \rightarrow v \rho \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} - \frac{\mu W}{K} = \frac{\partial P}{\partial z} \rho \quad (19)$$

e substituindo em (18) tem-se: $\mu \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} - \frac{\mu W}{K} = \frac{\partial P}{\partial z}$ que multiplicando por L^2 , dividindo por μ , rearranjando, e somando U_0 ficamos com :

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x_1^2} - \frac{L^2}{K} V = \frac{\rho U_0 L}{\mu} \frac{\partial P_1}{\partial z_1} \quad (20)$$

A Eq. (20) mostra o perfil da Variação da Velocidade num campo adimensionalizado e alguns parâmetros importante para o escoamento no meio poroso, como:

$$a^2 = \frac{L^2}{K} = \text{parâmetro de porosidade} \quad \text{e} \quad b = \frac{\rho U_0 L}{\mu} \frac{\partial P_1}{\partial z_1} = \text{parâmetro de pressão}$$

Condições de contorno adimensionalizadas: para $x_1 = 0 \Rightarrow V = 1$ e para $x_1 = 1 \Rightarrow V = 1$
Portanto a eq. (21) pode ser escrita da seguinte forma:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x_1^2} - a^2 V = b \quad \text{cuja solução analítica é:} \quad V = A_1 e^{ax_1} + A_2 e^{-ax_1} - \frac{b}{a^2} \quad (21)$$

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

$$A_1 = \frac{\left[1 + \frac{b}{a^2}\right]}{\left[1 + \frac{(1 - e^{aL})}{(e^{-aL} - 1)}\right]} \quad ; \quad A_2 = \left[\frac{1 + \frac{b}{a^2}}{1 + \frac{(1 - e^{aL})}{(e^{-aL} - 1)}} \right] \cdot \left[\frac{(1 - e^{aL})}{(e^{-aL} - 1)} \right] \quad (22)$$

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS E TEÓRICOS

4.1. Resultados Experimentais

Foram medidas deformações em corpos de prova (tijolo comum, parede de tijolos e bloco de argamassa) nas três dimensões, longitudinal, transversal e horizontal, quando submetidos à umidificação por gotejamento de água, de forma lenta e contínua. Nos cálculos e nos arredondamentos foram considerados precisão na casa dos centésimos. Para determinação das deformações, construiu-se uma bancada de testes de modo a permitir o confinamento do corpo de prova em três de seus lados. Desta forma, toda deformação a que o corpo de prova foi submetido, foi 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. Para a umidificação do corpo de prova foi utilizado uma bureta graduada de vidro, com gotejamento de água regulado para que toda a absorção se desse por capilaridade. Os resultados dos experimentos realizados são apresentados a seguir sob forma de tabelas.

Tabela 3. Determinação dos Pesos Seco e Úmido, Volume de Vazios e Deformações

Coluna Corpo Prova	(1)	(2)	(3)=(2)-(1)	(4) Deformação (mm)		
	Peso Seco (g)	Peso Úmido(g)	Volume de Vazios (ml)	Transversal ΔL_T	Longitudinal ΔL_L	Horizont al 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
Médias(*)	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 calculador levando em consideração apenas os c.p. n^{os}. 1, 2 e 3.

Tabela 4. Pesos Seco e Úmido, Volume de Vazios e Deformações da Parede.

Coluna Corpo Prova	(1)	(2)	(3)=(2)-(1)	Deformação (mm)		
	Peso Seco (g)	P. 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 5. Determinação do Volume Sólido e de Vazios dos Tijolos

Coluna	(1)	(2)	(3)	(4) = (2)-(1)
Corpo de Prova	Peso seco (g)	Peso úmido (g)	Vol. Sólido (ml)	Vol. 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 6. Determinação da Vazão e da Velocidade Inicial de Percolação

Coluna	1	2	3	4	5	6	7
Corpo de Prova	Superfície Percolação (mm ²)	Área de Vazios 21,4%(mm ²)	Vol. Água Absorvida (ml)	Tempo Absorção (s)	Vazão (3) ÷ (4) (ml/s)	Veloc. Inicial (5) ÷ (2) (mm/s)	Veloc.Média (6) (mm/s)
Tijolo 3	20 000	4 280	100	542	0,1845	4,30x10 ⁻⁵	4,14 x10 ⁻⁵
Tijolo 9	20 000	4 280	100	590	0,1695	3,96x10 ⁻⁵	
Bloco 7 de Massa	14 000	2 996	100	2 812	0,0452	1,50x10 ⁻⁵	
Tijolo 8 c/ Massa	20 000	4 280	250 (*)	4 477	0,0056	1,30x10 ⁻⁵	

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

Tabela 7 . Determinação da Vazão e Velocidade Média de Percolação

Coluna	1	2	3	4	5	6
Corpo de Prova	Peso Úmido Peso Seco (g)	Vol. Absorvido (ml)	Área de Vazios (mm ²)	Tempo de Absorção (s)	Vazão (2) ÷ (4) (ml/s)	Vel. Média (5) ÷ (3) (mm/s)
Bloco 7 de Massa	1289,8 1490,6	200,8	2 996	4 860	0,0413	1,378x10 ⁻⁵
Tijolo 8 c/ Massa	1815,6 2270,0	454,4	4 280	24 180	0,0188	0,446x10 ⁻⁵
Tijolo 9	1312,4 1640,3	327,9	4 280	30 660	0,0107	0,250x10 ⁻⁵

4.2. Resultados Teóricos

Determinação dos Gradientes de Pressão e Velocidade através da equação (22). Com o perfil V de velocidade pode-se ter então a velocidade média (V_{med}) e por fim calcular a vazão Q.

$$V_{med.} = \frac{1}{A} \int_0^1 \left(A_1 e^{ax_1} + A_2 e^{-ax_1} - \frac{b}{a^2} \right) dA = \frac{1}{d \cdot L} \int_0^1 \left(A_1 e^{ax_1} + A_2 e^{-ax_1} - \frac{b}{a^2} \right) d \cdot dx_1 \quad (23)$$

$$\Rightarrow V_{med.} = A_1 e^a + A_2 e^{-a} - \frac{b}{a^2} \quad \begin{array}{l} \text{Com } x_1 \text{ variando de } 0 \sim 1 \\ \text{Velocidade média Adimensional} \end{array} \quad (24)$$

$$W_{med.} = \text{Velocidade média dimencional} = (V_{med.}) \cdot U_0 \quad (25)$$

$$Q = W_{med.} \cdot A_T, \text{ onde } A_T \text{ é a área transversal ao escoamento.} \quad (26)$$

$$V = 0,35e^{ax_1} + 0,65e^{-ax_1} - 0 = 0,35e^a + 0,65e^{-a} - 0 = 7,46 + 0,03 \Rightarrow V_{med.} = 7,49 \quad (27)$$

$$\text{Então, } W_{med.} = (V_{med.}) (V_0) = (7,49) (4,14 \times 10^{-5}) \Rightarrow W_{med.} = 31,0 \times 10^{-6} \text{ cm/s} \quad (28)$$

$$\text{Gradiente de Pressão} \Rightarrow \frac{dP}{dz} = 0,0006 \text{ atm/cm} \quad (29)$$

$$\text{Fatores: } a = 3,06 ; b = 5,72 \times 10^{-12} ; A_1 = 0,35 ; A_2 = 0,65 \quad (30)$$

5. CONCLUSÕES

Este trabalho buscou a determinação dos esforços, da velocidade e das pressões no meio poroso provenientes do escoamento de fluidos em meios porosos. Experimentalmente obteve-se valores dos esforços em tijolo de argila, da ordem de 80 a 3600 kgf, função da frente de percolação. Tais esforços provocaram deformações diferenciadas nas direções; comprimento, largura e altura do corpo de prova. 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. Além da confirmação dos resultados por literaturas especializadas buscou-se também um modelo matemático calcado nas equações de conservação da mecânica dos fluidos que exprimissem o fenômeno fisicamente. Tal procedimento demonstrou uma visualização do comportamento do perfil de velocidade do fluido no meio com sendo o de uma frente não plana, caminhando na 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. Entretanto, os valores medidos e calculados se apresentam de uma ordem de grandeza aceita, em função da simplicidade dos instrumentos utilizados nos ensaios.

6. REFERÊNCIAS

- 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.
- Carrocci, L. R. *Escoamento de Couette entre duas placas com parte do espaçamento preenchido com meio poroso*. Dissertação de Mestrado - UNICAMP, 1982. Interciência, 1980, 169 p.
- Houpeurt, A. *Elementos de Mecanique des Fluides dans les Milieus Poreux*. Paris: Tchnip, 1975.
- Pfeffermann, O. *Les Fissures Dans Les Constructions*. Annales de L'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics. Bruxelles, nº 250, 1968.
- Schlichting, H. H. *Boundary layer theory*. New York: McGraw-Hill, 1972.
- Streter, Victor L. *Handbook of Fluid Dynamics*. New York : Mc Graw-Hill. 1961, 1197 p.
- 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.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

TITLE: Flow of in Porous Elements; A Teorical and Experimental Analysis of the Capillary Flow Stress Effects by Water Percolation in Bricks Ceramic Elements of the Civil Architecture.

First Author's Name: Antonio Carlos França

FAENQUIL - Faculdade de Engenharia Química de Lorena - Rodovia Lorena – Itajubá, km 74,5 - Cep 12600-000 - Lorena - SP – e-mail franca@debas.faenquil.br

Second Author's Name: Luiz Roberto Carrocci

FEG- UNESP - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá - Av. Ariberto Pereira da Cunha, 333 – Cep 12500-000 – Guaratinguetá – SP – e-mail: carrocci@unesp.br

Abstract: It is common to find cracks in bricks masonry not just after sometime 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. With that in mind, it was decided to study this subject initially without bulky and sophisticated equipment for the measurement of capillary flow.

Keywords: porous medium, masonry bricks percolation, hygroscoopia.