

INFLUÊNCIA DO TEMPO NA POROSIDADE E NA PER-
MEABILIDADE DE TORTAS DE FILTRAÇÃO

TOGO NOGUEIRA DE PAULA



Uma tese submetida ao Corpo Docente do Instituto de Química da Universidade do Brasil, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Grau de Mestre em Ciência (M.Sc.)

Aprovado por

[Handwritten Signature]
[Handwritten Signature]
[Handwritten Signature]

308714		abril - 1965	
COPPE			

AGRADECIMENTOS

Desejamos expressar os nossos agradecimentos ao Professor Giulio Massarani que sugeriu e orientou êste trabalho.

Desejamos agradecer ao Conselho Nacional de Pesquisas cujo suporte financeiro nos possibilitou a realização do Curso de Pós-Graduação.

Agradecemos também aos demais professores e colegas que sempre procuraram nos auxiliar e estimular.

SUMÁRIO

Nêste trabalho, analisamos experimentalmente a influência do tempo na porosidade e na permeabilidade de tortas de filtração.

Para tal, montamos a aparelhagem esquematizada na figura 8 e fizemos a pressão aplicada variar continuamente como uma função linear do tempo.

Resultados surpreendentes foram obtidos indicando que para diferentes tortas, os efeitos da variação da pressão aplicada podem ser completamente diferentes. Para tortas de talco de densidade $2,55 \text{ g/cm}^3$ e granulometria 350 meshes, quanto mais lenta a variação da pressão aplicada, menor a porosidade final para uma dada pressão, como mostra a figura 10. Para tortas de carbonato de cálcio de densidade $2,036 \text{ g/cm}^3$, obtivemos o contrário, ou seja, quanto maior a taxa de variação da pressão aplicada, menor a porosidade final para uma mesma pressão, como indicado na figura 11. Este último resultado, também foi obtido para tortas de talco de densidade $2,356 \text{ g/cm}^3$ e granulometria 30 meshes, como mostra a figura 12.

Este fenômeno é explicado por Tschebotarioff (14); um resumo de sua teoria está no capítulo IV dêste trabalho.

Na literatura de Mecânica dos Solos (9, 14), encontramos uma explicação física para a influência do tempo na porosidade. Uma explanação desta teoria está no capítulo II.

Não nos foi possível medir a permeabilidade com a nossa aparelhagem. No final dêste trabalho, apresentamos como sugestão um aparelho para medir a permeabilidade como função da pressão e do tempo.

Encontramos uma equação do tipo

$$(1 - \varepsilon) = a (p)^b + c$$

para representar a porosidade como função do tempo e da pressão aplicada. Os coeficientes a, b, e c, são funções da taxa de variação da pressão aplicada.

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Na filtração, uma mistura heterogênea de fluido e partículas sólidas, é separada por um meio filtrante que retém o sólido, permitindo a passagem do fluido.

Em todos os tipos de filtração, a mistura ou lama, escoa devido a um gradiente de pressão aplicado. As partículas sólidas, suportadas pelo meio filtrante, formam uma camada porosa, a torta. A torta, retém na sua superfície, as partículas sólidas contidas na lama. Desta maneira, camadas sucessivas de partículas vão se depositando à medida que o filtrado escoa através da torta.

A filtração envolve, portanto, primariamente, o escoamento de fluidos através de leitos porosos.

As tortas de filtração, são geralmente compressíveis, a porosidade, ou seja, a relação do volume dos espaços vazios da torta para o volume total da torta, varia com a pressão aplicada.

A equação usada para descrever o fenômeno do escoamento em leitos porosos, é a equação de Darcy (1)

$$\vec{q} = - \frac{K}{\mu} (\text{grad } P_h - \rho \vec{g}) \quad (1-1)$$

onde \vec{q} = taxa de fluxo local, m/seg

K = permeabilidade da torta, m^2

μ = viscosidade do líquido, kg/m-seg

P_h = pressão hidráulica, N/m^2

ρ = densidade do fluido, kg/m^3

\vec{g} = aceleração da gravidade, m/seg^2

Na filtração, o escoamento, a menos de irregularidades de pequena monta, deve se dar numa direção preferencial.

Considerando-se o leito filtrante horizontal

$$q = - \frac{\kappa}{\mu} \frac{\partial P_h}{\partial x} \quad (1-2)$$

A equação da continuidade, aplicada a torta, fica (2)

$$\frac{\partial}{\partial x} (\rho q) + \frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) = 0 \quad (1-3)$$

onde ε = porosidade da torta, adimensional
 q = vazão volumétrica por unidade de área
 m^3/m^2 -seg
 t = tempo, seg
 para fluido incompressível

$$\frac{\partial q}{\partial x} = - \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \quad (1-4)$$

para torta incompressível

$$\frac{\partial q}{\partial x} = 0 \quad (1-5)$$

A filtração com deposição de sólidos, é um problema de condições de contorno móveis. Uma expressão para a fração de sólidos depositada, é apresentada por Tiller e Cooper (3).

É fundamental ao conhecimento do escoamento através das tortas de filtração, um estudo da porosidade (ε) e da permeabilidade (κ). Não existe, na literatura, nenhuma relação digna de confiança entre a porosidade e a permeabilidade (4).

A teoria moderna da filtração, considera que a

porosidade e a permeabilidade da torta, são funções das características específicas da torta e da pressão de compressão (P_s) que atua sobre os sólidos (3). Experiências com célula de adensamento mostram, no entanto, que a porosidade é também função do tempo (5). Sendo a permeabilidade intrinsecamente relacionada à porosidade, é de se esperar que ela também seja função do tempo.

Não se conhecem dados completos sobre a influência do tempo na porosidade. Desconhece-se qualquer dado sobre a influência do tempo na permeabilidade.

Coimbra(5), obteve curvas experimentais para a variação da porosidade como função do tempo e da pressão de compressão, para vários tipos de tortas. As medidas foram feitas em uma célula de compactação-permeabilidade. O processo usado foi o seguinte: aplica-se um incremento de pressão sobre a torta, e mede-se a variação da porosidade com o correr do tempo. Alcançada a porosidade de equilíbrio para aquele incremento, adiciona-se outro e mede-se a variação da porosidade com o tempo, e assim sucessivamente. Estas experiências evidenciaram que a porosidade, sob uma pressão de compressão constante, tem uma taxa de variação muito alta no início da compressão, diminuindo gradativamente até se anular; pode mesmo, em certos casos, levar dias para alcançar o equilíbrio.

Na literatura de Mecânica dos Solos (9, 14), a influência do tempo na compactação de argilas, é um fenômeno muito estudado.

O método experimental usado, é o mesmo utilizado por Coimbra(5). Existem teorias com formulações matemáticas para descrever o fenômeno (9, 14).

Tiller e Cooper(3), mostraram que a influência do tempo na porosidade, pode ser de grande importância nas filtrações rápidas em filtros rotativos.

Nas filtrações rápidas em filtros rotativos, sendo o tempo de filtração muito pequeno, trabalha-se sempre na faixa onde a sua influência mais se faz sentir na porosidade e na permeabilidade.

O nosso trabalho, visa estabelecer, através de testes com células de compactação-permeabilidade, a influência do tempo e da pressão de compressão na porosidade e na permeabilidade de tortas de filtração.

$$\varepsilon = \varepsilon_0 (P_s, t) \quad (1-6)$$

$$K = K (P_s, t) \quad (1-7)$$

Fôrça de arraste:

Quando se observa uma torta de filtração, nota-se que a parte adjacente ao meio filtrante, é mais sêca e mais compacta que a parte situada nas camadas mais próximas da superfície, como indicado na figura 1. Isto se deve ao seguinte: consideremos uma partícula qualquer a uma distância x do meio filtrante. O líquido em seu escoamento, produzirá sobre ela uma fôrça que tende a arrastá-la para o meio filtrante. As partículas situadas a jusante, reagirão com uma fôrça igual e oposta. As partículas a montante, também transmitirão suas fôrças de arraste à camada imediatamente a jusante. A fôrça de arraste age então, acumulativamente através da torta. Cada camada sofre a ação de uma fôrça igual a soma das fôrças agindo sobre tôdas as camadas situadas entre ela e a superfície da torta. Estas fôrças, podem ser convertidas em pressões, dividindo-se pela área A , da seção transversal da torta. Isto só será verdadeiro, se houver contato de ponto entre as partículas. Neste caso, a pressão será efetiva em tôda a seção.

É pouco provável existir contato de ponto entre

as partículas, principalmente para materiais macios e deformáveis, onde contatos de área devem existir.

Por um balanço de forças em um elemento de volume da torta, Δx , considerando-se contato de ponto entre as partículas, chega-se a (4)

$$p = p_s + p_h \quad (1-8)$$

onde p = pressão de filtração aplicada, N/m^2
 p_s = pressão de compressão do sólido, N/m^2
 p_h = pressão hidráulica, N/m^2

A pressão hidráulica em um ponto, age igualmente em todas as direções. A pressão de compressão, porém, atua na direção paralela ao escoamento, e tende a expelir as partículas e a deformá-las, como indicado na figura 2. A partícula sólida, em linha cheia, pode ser deformada como mostra a linha pontilhada. Este efeito, também causa uma variação na porosidade e na permeabilidade da torta (6). A intensidade da deformação depende da forma e das características das partículas da torta.

Relação pressão de compressão-porosidade:

A porosidade de um leito poroso, pode ser determinada como uma função da pressão aplicada, em uma célula de compactação-permeabilidade, ou em uma célula de adensamento (4).

Para sólidos moderadamente compressíveis, e para pressões acima de 100 p.s.i., a porosidade pode ser representada pela função exponencial (11)

$$\varepsilon = \varepsilon_0 p_s^{-\lambda} \quad \text{para } p_s > p_i \quad (1-9)$$

onde p_s = pressão de compressão, N/m^2

ε_0 = porosidade determinada a uma pressão
 $p_s = 1 \text{ p.s.i.}$, adimen.

λ = coeficiente empírico, sem significado dimensional

p_i = pressão baixa, variando de 0,1 a 1,0
 p.s.i. (3)

Quando p_s se aproxima de zero, na equação (1-9), a porosidade tende para infinito. Entretanto, para pressões muito baixas, pode-se considerar ε como constante.

Para se relacionar a porosidade e a permeabilidade de da torta de um filtro, com a porosidade e a permeabilidade de obtidos na célula de compactação-permeabilidade, postula-se que a porosidade e a permeabilidade na torta e na célula, são iguais, quando a pressão de compressão no filtro, calculada pela expressão (1-8).

$$p = p_s + p_h \quad (1-8)$$

é igual a pressão de compressão na célula.

A equação (1-9), não leva em consideração a influência do tempo. O estudo da porosidade na teoria da filtração, está quase todo baseado na equação (1-9). Considera-se que a porosidade alcança seu valor final instantaneamente, para uma dada pressão de compressão (4).

Como vimos, a porosidade é também função do tempo. Então, para tortas muito compressíveis, onde a influência do tempo é grande (9), a equação (1-9), não pode ser utilizada com segurança.

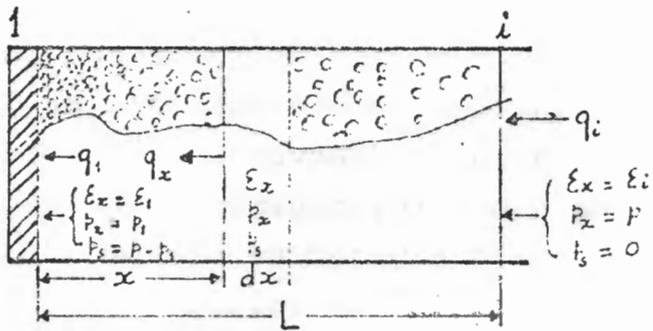


FIGURA 1

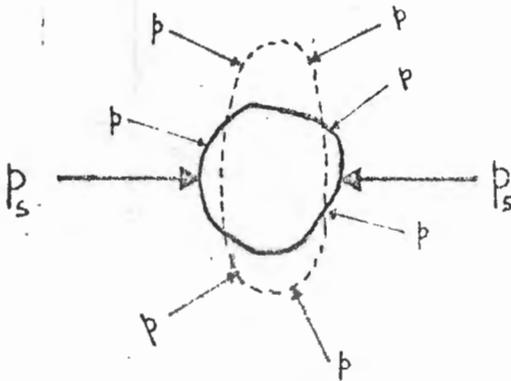


FIGURA 2

CAPÍTULO II

INFLUÊNCIA DO TEMPO NA POROSIDADE E NA PERMEABILIDADE

Na teoria da filtração, pouca ênfase tem sido dada à variação da porosidade e da permeabilidade com o tempo. Na mecânica dos solos, a variação da taxa de compactação de argilas, é um fenômeno bem conhecido, existindo inclusive tratamento matemático avançado sôbre o assunto (9). As argilas requerem um considerável tempo para alcançar sua porosidade final, quando submetidas a um incremento de carga. Nas fundações de edifícios, verifica-se que a compactação continua por longos períodos de tempo, com taxas decrescentes; pode haver compactação apreciável depois de muitos anos (9).

A figura 3, mostra a ação do tempo sôbre a porosidade.

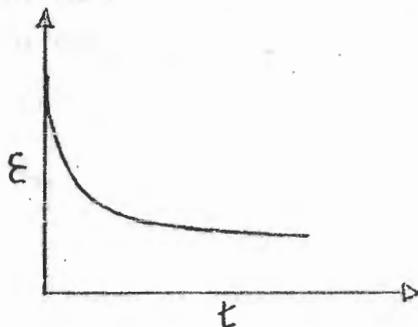


Figura 3

Explicação física para a influência do tempo:

Dois fenômenos contribuem para o atraso em alcançar a porosidade de equilíbrio.

O primeiro, já bem estudado e conhecido (9), é devido ao tempo requerido para o escape da água contida nos poros do material, quando êste é comprimido. É denominado por Taylor (9), atraso hidrodinâmico. É devido, basicamente, à permeabilidade que controla o escoamento da água contida nos poros.

O segundo fator, é muito complexo. Foi denominado por Taylor (9), atraso plástico. O fenômeno não está ainda bem esclarecido. Deve-se a ação plástica na água adsorvida perto dos contatos entre os grãos, ou nos pontos que mais se aproximam dos contatos (9). Tschebotarioff (14), denomina este efeito por "efeito secundário do tempo".

A seguir, daremos um resumo da teoria da compactação de Therzaghi, e uma análise qualitativa do atraso plástico (9).

A teoria de Therzaghi, não leva em consideração o atraso plástico, sendo então, uma aproximação da verdadeira ação de compactação.

Mecanismo da Compactação

Para o perfeito entendimento desta teoria, desenvolvida por Therzaghi a quatro décadas atrás, vamos fazer algumas suposições (9).

Suponhamos que a figura 4, represente uma porção da curva pressão contra porosidade, para um incremento de pressão ($P_2 - P_1$).

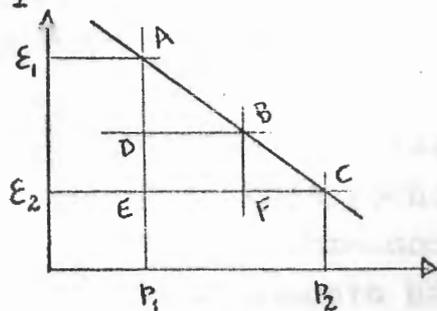


Figura 4

Suponhamos que esta curva seja reta para cada incremento. Despreza-se o efeito do tempo. Se não houver plasticidade nem atraso plástico, esta suposição será razoavelmente correta (9).

Antes de ser aplicado o incremento de pressão, a amostra está nas condições A da figura 4. A pressão intergranular é P_1 , e a porosidade ϵ_1 . Um instante depois de

aplicado o incremento de carga, a pressão total agindo sobre a amostra será p_2 , mas a porosidade é ainda ϵ_1 . A pressão p_2 , não será efetiva, enquanto a porosidade não alcançar o valor ϵ_2 .

Consequentemente, a pressão agindo sobre o esqueleto sólido do material poroso, deve ser ainda p_1 . Este conceito é fundamental e deve ser bem entendido. Devido ao atraso hidrodinâmico, a deformação não pode ser instantânea.

Entretanto, a pressão suportada pelo esqueleto sólido, deve atingir o valor p_2 .

Há somente uma possibilidade: toda a pressão aplicada, é suportada, no início, pela água contida nos poros do material. Isto porque a água é praticamente incompressível em relação ao esqueleto sólido. No instante de aplicação do incremento de carga, a pressão sobre o material sólido, é ainda p_1 ; a pressão $(p_2 - p_1)$, estando toda absorvida pela água dos poros, de modo que a pressão total sobre a amostra é p_2 .

A tensão existente na água dos poros, quando produzida por condições transientes, como a exposta acima, é denominada excesso de pressão hidrostática, e designada por u (9).

O valor inicial de u é máximo e igual a $(p_2 - p_1)$. Se a amostra for herméticamente fechada, não permitindo a saída da água, esta situação permanecerá infinitamente. Entretanto, na célula de adensamento há uma rápida eliminação da água em excesso, através dos discos porosos, na parte superior e na parte inferior da célula. Na superfície da amostra, um instante depois de aplicada a carga, a pressão atuando sobre a água é nula, enquanto que a uma pequena distância da superfície esta pressão é ainda $(p_2 - p_1)$.

Este rápido gradiente na superfície, é causado pela drenagem da água, contida nos poros, perto da superfície. Gradualmente a porosidade diminui, e o excesso de pres

são hidrostática diminui, e a pressão intergranular aumenta; êste processo, sendo mais rápido no tampo e no fundo da célula. No centro da célula, o processo é mais lento. Esta ação continua até que a amostra atinja uma porosidade ϵ_2 em todos os pontos.

O excesso de pressão hidrostática torna-se nulo, teóricamente, nenhuma quantidade de água é mais forçada a sair; a pressão agindo sobre o esqueleto sólido é p_2 ; e a amostra está completamente compactada.

O processo de compactação, pode ser melhor entendido por uma analogia mecânica (9).

Na figura 5 de (a) até (e), são mostrados os vários comprimentos assumidos por uma mola, sob a ação de várias cargas diferentes.

Abaixo, de (f) a (l), vê-se a mesma mola imersa n'água, dentro de um cilindro com um êmbolo. Adaptado ao êmbolo, tem-se uma pequena válvula. Em (g), com a válvula fechada, coloca-se sobre o êmbolo uma carga de 20 kg. O êmbolo não pode descer pois, a água não tem por onde escapar. A compressibilidade da mola é muito grande em relação à da água. Assim, a pressão é praticamente t'oda absorvida pela água e pelas paredes do cilindro. A válvula do êmbolo estando aberta, a água escapará, pois ela está pressionada. A medida que a água escapa, o êmbolo desce mais e mais comprimindo a mola. Esta começa a suportar parte da pressão aplicada, e a se "compactar". Em (i), o comprimento da mola é o mesmo que em (b). A mola deve suportar então 5 kg, a água 15 kg, e a "compactação", é de 25%. Em (j), o comprimento da mola é o mesmo que em (c), em (k) o mesmo que em (d), e em (l) o mesmo que em (e). O estado final é o mesmo para a mola no ar e imersa n'água. Porém, o tempo gasto para alcançar êste estado final é bem diferente nos dois casos.

O tempo necessário para a mola passar do estado

sem carga



(a)



(b)



(c)

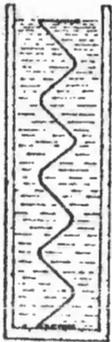


(d)



(e)

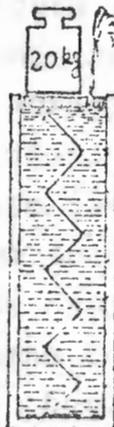
sem carga



(f)



(g)



(h)



(i)



(j)



(k)



(l)

FIGURA 5

	(f)	(g)	(h)	(i)	(j)	(k)	(l)
Carga suportada pela água(kg)	0	20	20	15	10	5	0
Carga suportada pela mola(kg)	0	0	0	5	10	15	20
de consolidação	0	0	0	25	50	75	100

(h) ao estado (1), depende, obviamente, da taxa de escape da água, isto é, da abertura da válvula do êmbolo.

Quanto mais compressível a mola, mais água deverá escapar para permitir a "compactação" total. Conseqüentemente, um tempo maior decorrerá.

Na analogia mecânica apresentada, a mola representa o esqueleto sólido compressível de uma massa porosa saturada de água; a água no cilindro representa a água nos poros da massa; a válvula, ou melhor a abertura da válvula, é análoga à permeabilidade; a compressibilidade da mola, à compressibilidade da massa porosa.

Quanto mais compressível o material poroso, maior o tempo gasto para sua compactação.

Esta analogia falha em um ponto. As condições de pressão, são as mesmas ao longo de toda a altura do cilindro, ao passo que a compactação de um material poroso, começa no topo e no fundo da célula de compactação-permeabilidade, progredindo gradualmente para o interior da amostra.

A primeira solução rigorosa para o problema da taxa de compactação de argilas foi apresentada por Terzaghi, dando início a moderna teoria da Mecânica dos Solos (9).

Terzaghi chegou a seguinte expressão representativa do fenômeno:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (2-1)$$

onde $C_v = \frac{K}{m_v \gamma_w} =$ coeficiente de compactação, m^2/min .

$K =$ coeficiente de permeabilidade, m/min .

$m_v =$ módulo de variação do volume, m^2/g .

$m_v = a_v(1 - \varepsilon)$

a_v = coeficiente de compressibilidade, m^2/g

γ_w = peso da água/volume da água

A equação (2-1), relaciona a taxa de variação do excesso de pressão u , com a quantidade de água que é expelida dos poros da amostra de argila.

A solução da equação (2-1), para uma amostra de altura $2H$, H sendo o maior comprimento do percurso de drenagem, considerando-se a compactação unidimensional, é apresentada por Taylor (9) para as seguintes condições de contorno:

para $x = 0$, $u = 0$ (Há drenagem completa no topo da amostra)

para $x = 2H$, $u = 0$ (Há drenagem completa no fundo da amostra)

para $t = 0$, $u = u_i$ (o excesso de pressão hidrostática inicial u_i , é igual ao incremento de pressão $(p_2 - p_1)$)

Para o caso do excesso de pressão hidrostática inicial, u_0 , constante êle obteve

$$U = 1 - \sum_{m=0}^{n=\infty} \frac{2}{M^2} \epsilon^{-M^2 T} \quad (2-2)$$

onde

$$M = \frac{\pi}{2} (2m+1), \text{ m sendo nº inteiro}$$

$$T = C_v t / H^2, \text{ nº adimensional denominado fator de tempo}$$

U = razão média de compactação

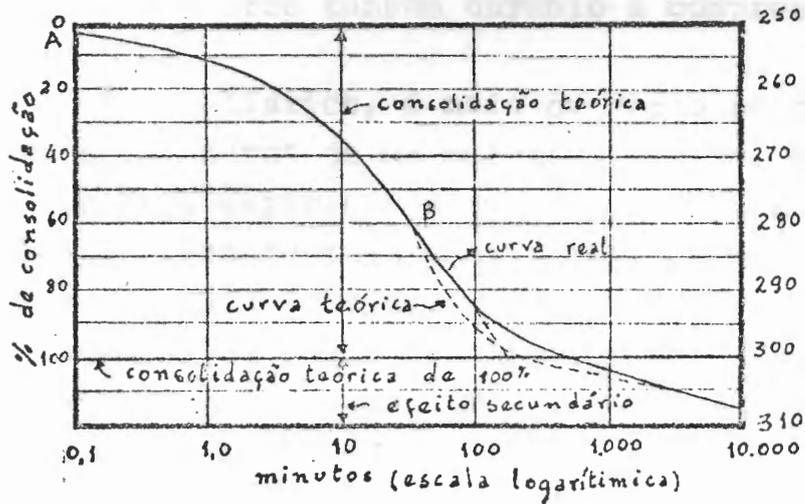


FIGURA 6

Análise gráfica da curva comprido-contrato, obtida pelo método do diafragma de compressão para um tipo de argila, quando se trata de consolidação.

(Prokhorovskiy, "Soil Mechanics Foundations and Earth Structures", Mac Graw-Hill)

Atraso Plástico ou Efeito secundário do tempo

Este efeito, denominado por Taylor (9) "Atraso plástico" e por Tschebotarioff (14) "Efeito Secundário do Tempo", não é considerado na teoria de Terzaghi.

Os desvios apresentados entre as curvas teóricas e experimentais de tempo contra porcentagem de compactação, evidenciam o atraso plástico, que ocorre depois da compressão primária, como indicado na fig. 6.

O atraso plástico ocorre também durante a compressão primária.

O atraso plástico, é mais ou menos semelhante ao fenômeno de "escoamento" de um material rígido, quando submetido a um esforço superior ao seu limite de elasticidade (14). Um lento e progressivo deslissamento entre os grãos, enquanto as partículas se ajustam as condições mais densas, parece ser responsável por êstes efeitos secundários.

Possivelmente, alguma modificação na posição relativa das partículas individuais, pode ser um fator contribuinte.

Quando a taxa de deformação plástica das partículas individuais, ou de seus deslissamentos umas sôbre as outras, é mais lenta que a taxa de expulsão da água em excesso contida nos poros do material, os efeitos secundários predominam.

O mecanismo do atraso plástico ainda não é bem conhecido.

Taylor (9), dá a seguinte explicação para êste fenômeno:

Suponhamos que a linha AB da figura 7, representa a relação pressão versus porosidade. Curva determinada por testes convencionais de laboratório, cada incremento de carga permanecendo por um dia. Em papel semi-log., tem-se uma reta (9).

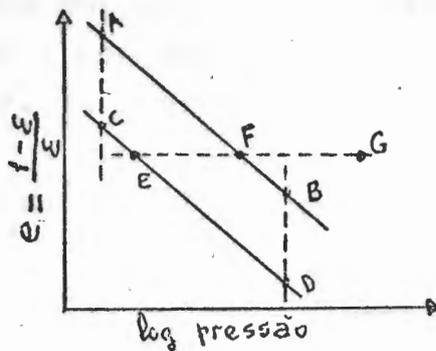


Figura 7

Seja a linha CD, para cada incremento permanecendo por dez anos.

Esta curva coincide com a curva de equilíbrio, ou aproxima-se dela.

Se a porosidade é a indicada pelo ponto F da figura 7, a pressão intergranular não é um valor fixo, como suposto por Terzaghi, mas depende da taxa com a qual a compressão está ocorrendo.

Se a amostra está nos primeiros estágios da compressão, a taxa de compactação é muito elevada. A pressão intergranular é dada por um ponto tal como G da figura 7. Se a amostra está no fim da compressão para um intervalo de um dia, a taxa de compactação é muito menor, e a pressão é representada pelo ponto F da figura 7. Se a amostra já estiver por vários anos com a mesma porosidade, a taxa de compactação é praticamente nula, e a pressão intergranular é a do ponto E, da figura 7.

Podemos considerar, então, a pressão intergranular como constituindo-se de duas partes; a parte estática representada pela linha CD, e a pressão requerida para vencer a resistência plástica à compressão.

Esta segunda parte, é denominada resistência plástica (9), e suas magnitudes nos três casos indicados, são respectivamente EG, EF e zero. A magnitude da resistência plástica, depende principalmente da taxa de compactação. Ou

tras variáveis, no entanto, podem alterar o seu valor.

Durante a compressão primária, as taxas de compactação são grandes. A resistência plástica é também razoavelmente grande. O excesso de pressão hidrostática, deve ser então, menor que o valor indicado pela teoria de Terzaghi (9).

A quantidade de tempo adicional requerida para a ocorrência da compressão, é o atraso plástico.

Na mecânica dos solos, as medidas da variação da porosidade com o tempo são feitas em células de adensamento. O processo adotado é o de cargas estáticas, tal como o empregado por Coimbra (5).

Nêste trabalho, faremos a pressão variar continuamente como uma função linear do tempo, e mediremos o adensamento em intervalos de tempo determinados. Obteremos assim, a porosidade como função do tempo e da pressão de compressão.

$$\xi = \xi (p_s, t) \quad (2-4)$$

Determinada a porosidade como função do tempo e da pressão de compressão, poderemos por um método que exporemos mais adiante, determinar a permeabilidade como função do tempo e da pressão de compressão

$$K = K (p_s, t) \quad (2-5)$$

CAPÍTULO III

PARTE EXPERIMENTAL

3-1. Equipamento:

No processo geralmente usado para determinação experimental da porosidade como função do tempo (5, 9, 14), coloca-se uma determinada carga na prensa e mede-se a variação da espessura da torta com o tempo. Alcançada a porosidade final para aquela carga, coloca-se outra e mede-se o adensamento com o tempo, e assim sucessivamente. Usaremos em nossas experiências, uma variação contínua das cargas com o tempo.

O equipamento utilizado, como esquematizado na figura 8, consta essencialmente de:

1 - Uma célula de compactação-permeabilidade, B, com seus equipamentos acessórios que são: sistema de carregamento contínuo C, e estensômetro D.

O sistema de carregamento contínuo, fornece a pressão de compressão e o estensômetro permite determinar a espessura da torta.

Para obtermos uma variação contínua da pressão, em lugar de pesos colocamos no braço de balança da prensa, figura 8, um recipiente onde fizemos verter água. Mantivemos esta vazão constante, obtendo uma variação linear da pressão com o tempo.

2 - Um depósito d'água A, com um vertedouro para manter a altura da coluna de líquido constante. A pressão na entrada da célula B, e a vazão para o recipiente C, são mantidos constantes desta maneira.

3 - Um rotâmetro F, para medir a vazão através da torta.

4 - Um manômetro G, para medir a pressão na entrada da célula.

5 - Uma válvula H, para ajustar a vazão para o recipiente C, ao valor desejado.

Aparêlhos utilizados:

1 - Célula de compactação-permeabilidade: Célula do tipo usado em Mecânica dos Solos, com as seguintes características: prensa de adensamento de plataforma, Walker, nº 525, série F, de fabricação da Walker Mfg. Co., Racine, Wis., U.S.A., com capacidade para 1,5 toneladas. A figura 9, mostra os detalhes do anel e do suporte do estensômetro. As dimensões do anel são:

diâmetro - $D = 10,68$ cm

altura - $H = 3,70$ cm

área - $A = 90,21$ cm

volume - $V = 333,78$ cm

Relação carga-pressão

$p = \text{carga} \cdot 100/A = \text{carga} \cdot 1,108 = v_p \cdot t \cdot \rho \cdot 1,108$,
kgf/cm² onde v_p , é a vazão para o recipiente C.

2 - Estensômetro: Dá o adensamento da torta com uma precisão de milésimo da polegada. Características: estensômetro Federal, modelo C818, para testes de solos, de fabricação da Federal Products Corporation, Providence, R.I., U.S.A..

3 - Rotâmetro: Para medir vazões entre 0,4 e 3,0 cm³/min. Deve ser instalado em um painel, tendo cuidado de mantê-lo sempre na posição vertical, e onde não haja vibrações. Características: rotâmetro de tubo de vidro e flutuador de safira. Tubo - OSF-1/16-16-4, flutuador SA-16. Fabricação da Fischer & Porter Company, Hatboro, Pennsylvania, U.S.A.. As leituras devem ser feitas sempre no centro da bola flutuadora. As curvas de calibração são fornecidas

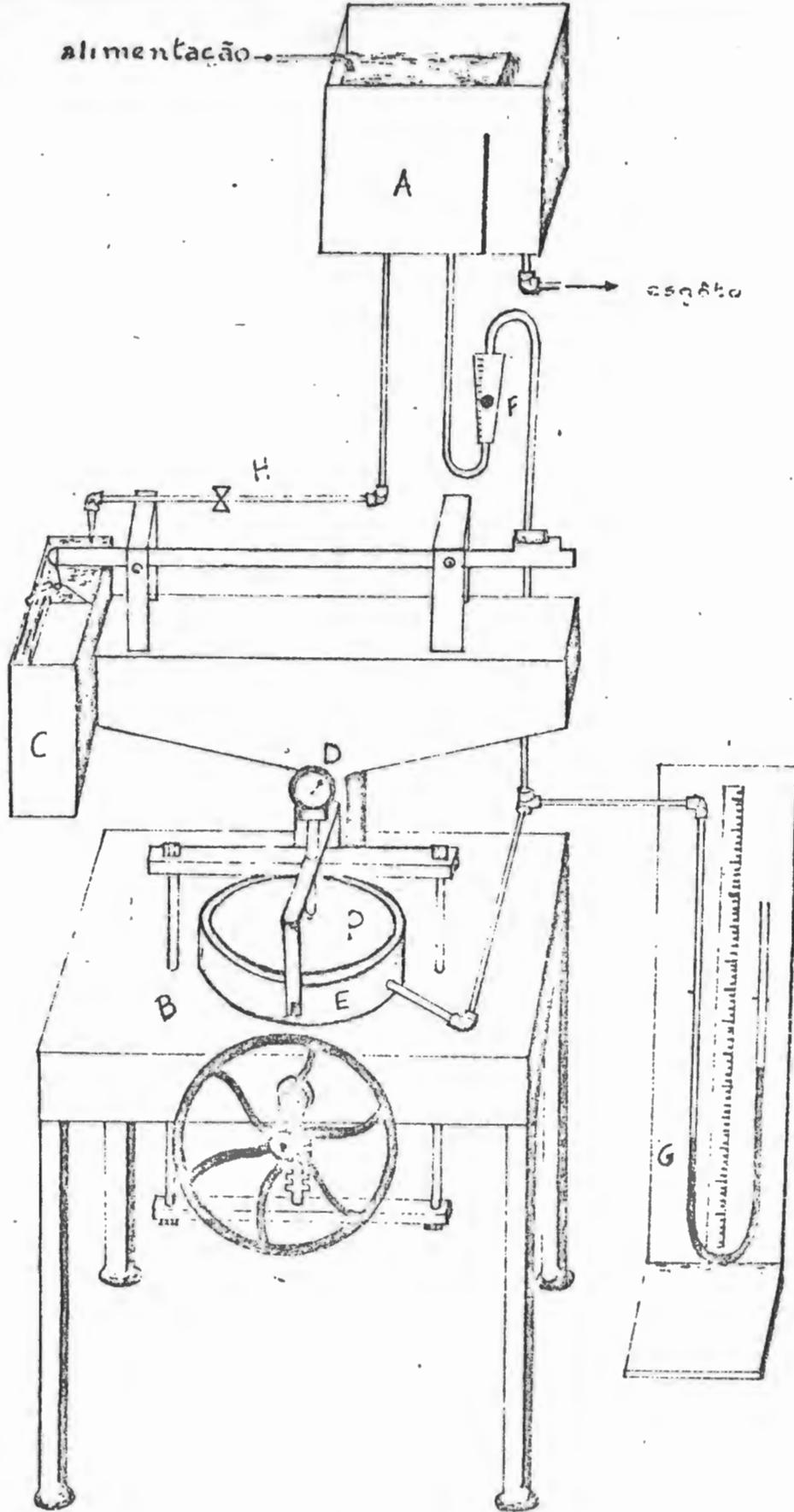


FIGURA 8

EQUIPAMENTO

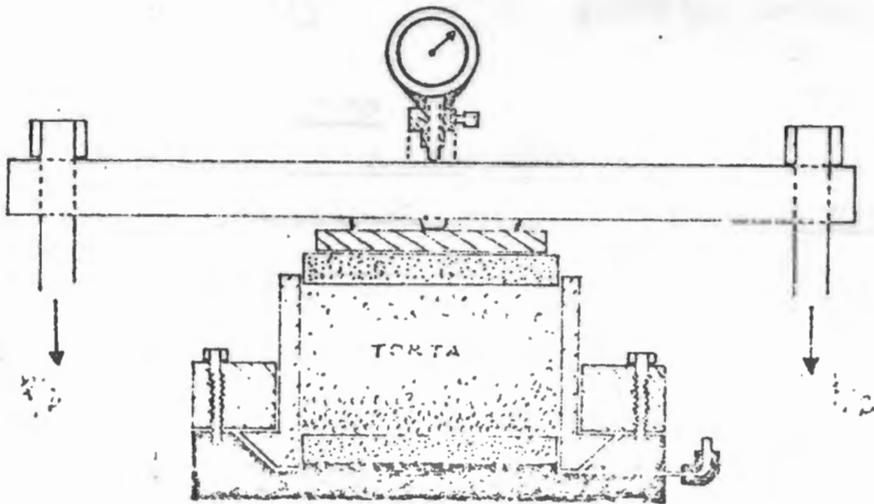


FIGURA 9

anel de adensamento

pelo fabricante.

4 - Depósito d'água com vertedouro: Recipiente comum com vertedouro para manter a coluna de líquido constante. Tem duas saídas do lado da barragem; uma para o anel (célula), outra para o recipiente de carregamento da prensa. No outro lado, tem uma saída para a água extravasada.

5 - Manômetro: manômetro de mercúrio, tubo em U.

6 - Cronômetro

7 - Válvula

8 - Estufa

9 - Picnômetro

10 - Balança de precisão

11 - Tubos de borracha e conexões de vidro

12 - Cápsulas de porcelana

Os aparelhos 8, 9, 10, 11 e 12 são usados na determinação da densidade e na secagem do sólido.

3-2. Processo:

1 - Determinar a densidade do material sólido pelo picnômetro.

2 - Preparar uma torta saturada de água.

3 - Introduzir a torta no anel fazendo com que ela ocupe todo o volume dêste. Evitar bôlhas de ar na torta. Umidecer a placa porosa antes de colocar a torta.

4 - Colocar o anel na prensa. Colocar o disco poroso superior, tendo o cuidado de umidecê-lo antes.

5 - Ajustar a barra de compressão de modo que a placa metálica, P, ajuste-se ao disco poroso.

6 - Equilibrar a prensa.

7 - Ajustar a leitura do dial do estensômetro.

8 - Retirar todo o ar contido nos condutos.

9 - Colocar o manômetro no circuito.

10 - Ajustar a vasão para o recipiente de carrega-

mento, ao valor desejado antes de verter no recipiente C.

11 - Conectar os tubos ao anel da célula.

12 - Marcar o tempo e verter a água no recipiente de carregamento.

13 - Fazer as leituras em tempos determinados, e simultaneamente no estensômetro, no rotâmetro e no manômetro. Manter o braço de balança da prensa sempre equilibrado.

14 - Terminada a experiência, retirar cuidadosamente a torta úmida do anel, pesar, secar na estufa, e pesar novamente.

3-3. Metódo de Cálculo da Porosidade e da Permeabilidade

Porosidade: A relação entre a porosidade (ε) e o adensamento (ℓ), é dada por (veja apêndice 1)

$$\varepsilon = 1 - C/(H-1) \quad (3-1)$$

onde

$$C = M/\rho_s A, \text{ cm}$$

ε = porosidade, adimensional

H = altura do anel, cm

ℓ = adensamento da torta, cm

M = massa do sólido da torta, g

ρ_s = densidade do sólido, g/cm³

A = área do anel, cm²

Permeabilidade: A permeabilidade, é a propriedade do material poroso, que caracteriza a facilidade com a qual o fluido pode escoar através do material, por um gradiente de pressão aplicado. A permeabilidade é a "condutividade fluida" do material poroso (1).

A equação que define a permeabilidade em função de termos mensuráveis, é a chamada equação de Darcy.

$$q = -\frac{\kappa}{\mu} \frac{\partial p_h}{\partial x} \quad (1-2)$$

Derivando-se a equação (1-2) em relação a x

$$\frac{\partial q}{\partial x} = -\frac{\partial^2 p_h}{\partial x^2} \frac{\kappa}{\mu} \quad (3-2)$$

combinando-se as equações (3-2) e (1-4)

$$\frac{\partial q}{\partial x} = -\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \quad (1-4)$$

temos

$$\frac{\kappa}{\mu} \frac{\partial^2 p_h}{\partial x^2} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \quad (3-3)$$

rearranjando

$$\frac{\partial^2 p_h}{\partial x^2} = \frac{\mu}{\kappa} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \quad (3-4)$$

Para o caso da célula de adensamento, o termo $\frac{\mu}{\kappa} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t}$, não é função de x . Podemos então integrar

$$p_h = \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \frac{\mu}{\kappa} \frac{x^2}{2} + g(t)x + h(t) \quad (3-5)$$

Condições de contorno:

- 1 - para $x = 0$, $p_h = H$ (a pressão na entrada da célula)
- 2 - para $x = L(t)$, $p_h = p_a$ (a pressão em $x=L(t)$, é a pressão atmosférica)

relação c.c.1-

$$H = h(t) \quad (3-6)$$

relação c.c.2-

$$P_a = \frac{\mu}{k} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \frac{L^2}{2} + g(t)L + H \quad (3-7)$$

$$g(t) = (P_a - \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \frac{\mu}{k} \frac{L^2}{2} - H) \frac{1}{L} \quad (3-8)$$

substituindo em (3-5)

$$P_h = \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \frac{\mu}{k} \frac{x^2}{2} + (P_a - \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \frac{\mu}{k} \frac{L^2}{2} - H) \frac{x}{L} + H \quad (3-9)$$

derivando a expressão (3-9) em relação a x

$$\frac{\partial P_h}{\partial x} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \frac{\mu}{k} x + (P_a - H - \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \frac{\mu}{k} \frac{L^2}{2}) / L \quad (3-10)$$

rearranjando

$$\frac{\partial P_h}{\partial x} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \frac{\mu}{k} (x - \frac{L^2}{2}) + (P_a - H) / L \quad (3-11)$$

substituindo na equação (1-2)

$$q = \frac{k}{\mu} \left[\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \frac{\mu}{k} \left(\frac{L^2}{2} - x \right) + (H - P_a) / L \right] \quad (3-12)$$

Quando $x = 0$, temos $q = q_1$, então,

$$q_1 = \frac{\kappa}{\mu} \left[\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \frac{\mu}{\kappa} \frac{L}{2} + (H - p_a)/L \right] \text{ donde}$$

$$q_1 = \frac{L}{2} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\kappa}{\mu} \frac{H - p_a}{L} \quad (3-13)$$

$$e \quad \kappa = \frac{\mu L}{(H - p_a)} \left(q_1 - \frac{L}{2} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \right) \quad (3-14)$$

A equação (3-14) nos dá a permeabilidade como função da pressão e do tempo, desde que conheçamos a porosidade como função do tempo.

A vazão na entrada da torta pode ser medida experimentalmente.

Em condições estáticas, temos

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = 0 \quad (3-15)$$

$$\kappa = \frac{\mu L}{H - p_a} q_1 = \frac{\mu L}{\Delta p H} q_1 \quad (3-16)$$

3-4. Resultados:

Os resultados obtidos são apresentados a seguir. Os gráficos porosidade contra pressão, seguem às tabelas para cada torta.

Não conseguimos medir a permeabilidade; os motivos são expostos no capítulo seguinte.

Apresentamos, no apêndice 2, equações empíricas para a torta de talco de densidade 2,550 g/cm³ e de granulometria 350 meshes. Encontramos uma equação do tipo

$$(1 - \varepsilon) = a (p_s)^b + c \quad (3-17)$$

onde a , b , e c são funções da taxa de variação da pressão aplicada.

O tempo não aparece explicitamente nestas equações.

Experiência Nº 1

Material: talco

Densidade: 2,550 g/cm³

Granulometria: 350 meshes

Massa (M) = 288,50 g

$v_b = 1,07 \text{ cm}^3/\text{seg}$

$C = M/\rho_s$ A = 1,254

t (seg)	l (cm)	P_s (kgf/cm ²)	V (cm ³ /min)	P_h (kgf/cm ²)	ϵ (adimensional)
0,00	0,0	0,0	2,74	0,054	0,666
60	0,046	0,071	1,94	0,112	0,657
120	0,086	0,142	1,40	0,136	0,653
180	0,165	0,213	0,25	0,159	0,645
240	0,246	0,284	-	0,167	0,637
300	0,320	0,356	-	0,164	0,629
420	0,422	0,498	-	0,149	0,618
480	0,460	0,569	-	0,143	0,613
540	0,493	0,640	-	0,136	0,609
600	0,521	0,711	-	0,136	0,606
900	0,650	1,067	-	0,133	0,589
1200	0,742	1,423	-	0,133	0,576
1500	0,813	1,778	0,03	0,125	0,566
1800	0,879	2,134	0,06	0,125	0,556
2100	0,942	2,490	0,06	0,125	0,545
2400	0,998	2,845	0,06	0,125	0,536
2520	1,018	2,988	0,06	0,125	0,533
3270	-	3,878	0,06	-	-

Experiência Nº 2

Material: talco

Densidade: 2,550 g/cm³

Granulometria: 350 meshes

Massa (M) = 288,0 g

$v_b = 0,474 \text{ cm}^3/\text{seg}$

$C = M/\rho_s \quad A = 1,2506$

t (seg)	l (cm)	P_s (kgf/cm ²)	v (cm ³ /min)	P_h (kgf/cm ²)	Σ (adimens.)
0	0,0	0,0	1,15	0,128	0,662
60	0,053	0,001	0,24	0,130	0,657
120	0,109	0,063	0,07	0,130	0,651
180	0,145	0,095	0,05	0,130	0,648
240	0,190	0,126	0,00	0,133	0,643
300	0,234	0,158	0,00	0,136	0,639
360	0,274	0,189	-	0,138	0,636
420	0,317	0,221	-	0,138	0,630
480	0,361	0,251	-	0,143	0,625
540	0,399	0,284	-	0,141	0,621
600	0,432	0,315	-	0,138	0,617
900	0,541	0,473	-	0,136	0,604
1200	0,615	0,631	0,07	0,128	0,594
1500	0,673	0,788	0,07	0,128	0,585
1800	0,724	0,945	0,10	0,128	0,579
2100	0,770	1,103	0,11	0,128	0,573
2400	0,810	1,261	0,08	0,128	0,567
2700	0,848	1,419	0,08	0,128	0,561
3000	0,884	1,576	0,08	0,128	0,555
3300	0,917	1,734	0,08	0,128	0,550
3600	0,945	1,892	0,08	0,128	0,546
3900	0,973	2,049	0,08	0,128	0,541

Experiência Nº 2 (continuação)

4200	1,001	2,207	0,08	0,128	0,536
4500	1,029	2,365	0,08	0,128	0,531
7350	-	-	-	-	-

Experiência Nº 3

Material: talco

Densidade: 2,550 g/cm³

Granulometria: 350 meshes

Massa (M) = 276,5 g

$v_b = 1,057 \text{ cm}^3/\text{seg}$

$C = M/\rho_s$ A = 1,236

t (seg.)	l (cm)	P_s (kgf/cm ²)	V (cm ³ /min.)	P_h (kgf/cm ²)	ϵ (adimen.)
0	0,0	0,0	1,70	0,041	0,666
60	0,046	0,070	0,08	0,115	0,662
120	0,160	0,140	0,00	0,164	0,651
180	0,254	0,211	0,00	0,151	0,641
240	0,335	0,281	"	0,125	0,632
300	0,394	0,351	"	0,125	0,625
360	0,442	0,421	"	0,123	0,619
420	0,480	0,492	"	0,117	0,615
480	0,513	0,562	"	0,115	0,604
540	-	0,632	"	0,112	-
600	0,571	0,703	"	0,109	0,603
900	0,683	1,054	"	0,109	0,588
1200	0,772	1,405	"	0,109	0,575
1500	0,848	1,756	"	0,109	0,563
1800	0,912	2,103	"	0,109	0,553
2100	0,965	2,459	"	0,109	0,544
2400	1,016	2,810	"	0,109	0,535
3310	-	3,876	"	0,109	-

Experiência Nº 4

Material: talco

Densidade: $2,550 \text{ g/cm}^3$

Cranulometria: 350-meshes

Massa (M) = 284,0 g

$v_b = 0,181 \text{ cm}^3/\text{seg}$

$C = M/\rho_s \quad \Lambda = 1,269$

t (seg)	l (cm)	P_s (kgf/cm ²)	V (cm ³ /min)	P_h (kgf/cm ²)	ξ adimens.
0	0,000	0,000	1,70	0,041	0,657
60	0,025	0,012	0,07	0,057	0,655
120	0,053	0,024	0,00	0,073	0,652
180	0,076	0,036	0,00	0,091	0,650
240	0,104	0,048	0,00	0,112	0,647
300	0,132	0,060	0,00	0,125	0,644
420	0,193	0,084	0,00	0,159	0,638
600	0,274	0,121	0,00	0,173	0,629
900	0,371	0,181	0,07	0,138	0,618
1200	0,432	0,241	0,10	0,117	0,610
1500	0,480	0,301	0,27	0,117	0,604
1800	0,521	0,403	0,31	0,117	0,599
2100	0,554	0,422	0,33	0,115	0,595
2400	0,587	0,482	0,33	0,112	0,590
2700	0,617	0,543	0,33	0,123	0,585
3000	0,645	0,603	0,33	0,123	0,582
3600	0,693	0,724	0,33	0,123	0,575
4200	0,737	0,844	0,33	0,123	0,569
4800	0,777	0,965	0,33	0,123	0,563
5400	0,813	1,085	0,33	0,123	0,557
6000	0,846	1,206	0,33	0,123	0,552
7200	0,909	1,447	0,33	0,123	0,541
7800	0,935	1,568	0,33	0,123	0,537

Experiência Nº 4 (continuação)

8400	0,960	1,688	0,33	0,123	0,532
9000	0,985	1,809	0,20	0,123	0,528
9600	1,008	1,930	0,16	0,123	0,524
10200	1,031	2,050	0,14	0,123	0,519
19320	-	-	-	0,123	-

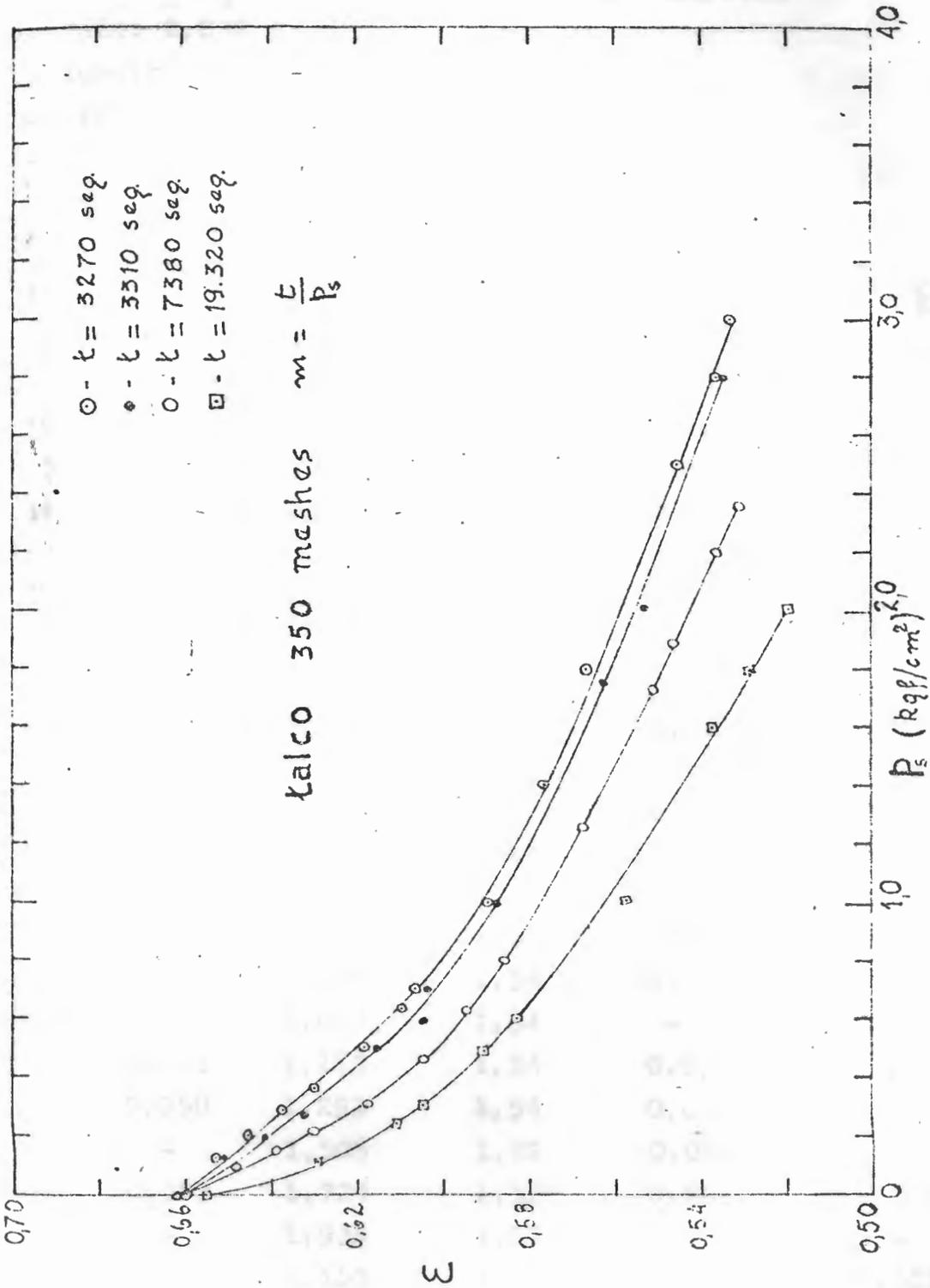


FIGURA 10

Experiência Nº 5

Material: CaCO_3 - carbonato de cálcio comercial

Densidade: $2,036 \text{ g/cm}^3$

Granulometria: -

Massa (M) = 252,9 g

$v_b = 0,324 \text{ cm}^3/\text{min}$

$C = M/\rho_s \quad \Lambda = 1,376$

t (seg.)	l (cm)	P_s (kgf/cm ²)	V (cm ³ /min)	P_h (kgf/cm ²)	ϵ (adimens.)
0	0,000	0,000	2,17	0,052	0,628
60	0,157	0,021	1,96	0,068	0,611
150	0,180	0,054	1,84	0,073	0,609
180	0,183	0,065	1,84	0,073	0,608
240	0,195	0,086	1,81	0,075	0,607
300	0,208	0,108	1,81	0,075	0,606
420	0,216	0,151	1,81	0,075	0,605
540	0,229	0,194	1,81	0,075	0,603
600	0,234	0,215	1,81	0,075	0,603
900	0,254	0,323	1,74	0,078	0,600
1200	0,269	0,431	1,66	0,081	0,599
1500	0,282	0,539	1,62	0,083	0,597
1800	0,295	0,646	1,58	-	0,596
2100	0,305	0,754	1,54	0,086	0,594
2700	0,325	0,969	1,54	0,088	0,592
3000	0,333	1,077	1,54	-	0,591
3300	0,343	1,185	1,54	0,092	0,590
3600	0,350	1,293	1,54	0,092	0,588
4200	-	1,508	1,52	0,092	-
4800	0,383	1,724	1,52	0,092	0,585
5400	-	1,939	1,52	-	-
6000	0,581	2,155	1,50	0,094	0,581
6600	-	2,730	1,50	-	-

Experiência Nº 5 (continuação)

7200	0,578	2,785	1,46	0,096	0,578
7800	-	2,800	1,46	0,096	-
8400	0,575	3,016	1,46	0,096	0,575
9000	-	3,232	1,46	0,096	-
9600	0,573	3,447	1,46	0,096	0,573
10200	-	3,663	1,46	0,096	-
10800	0,570	3,878	1,46	0,096	0,570

Experiência Nº 6 .

Material: carbonato de cálcio comercial (CaCO_3)densidade: $2,036 \text{ g/cm}^3$

Granulometria: -

Massa (M) = 253,7 g

 $v_b = 3,241 \text{ cm}^3/\text{seg}$ $C = M/\rho_s \quad \Lambda =$

t (seg)	l (cm)	P_s (kgf/cm ²)	V (cm ³ /min)	P_h (kgf/cm ²)	ϵ (adimen.)
0	0,000	0,000	2,00	-	0,627
60	0,423	0,215	1,00	0,135	0,577
120	0,528	0,431	1,80	0,091	0,565
180	0,559	0,646	1,80	-	0,560
240	0,582	0,862	1,74	0,094	0,557
300	0,602	1,077	1,70	-	0,554
360	0,622	1,293	1,70	-	0,551
420	0,640	1,508	1,58	0,099	0,549
480	0,653	1,724	1,52	-	0,547
600	0,83	2,155	1,50	0,099	0,542
660	0,696	2,370	1,46	-	0,540
720	0,711	2,585	1,44	0,102	0,538
840	0,731	3,016	1,44	0,102	0,535
960	0,754	3,447	1,44	0,104	0,531
1020	0,764	3,663	1,44	-	-
1080	0,775	3,878	1,44	0,104	0,528

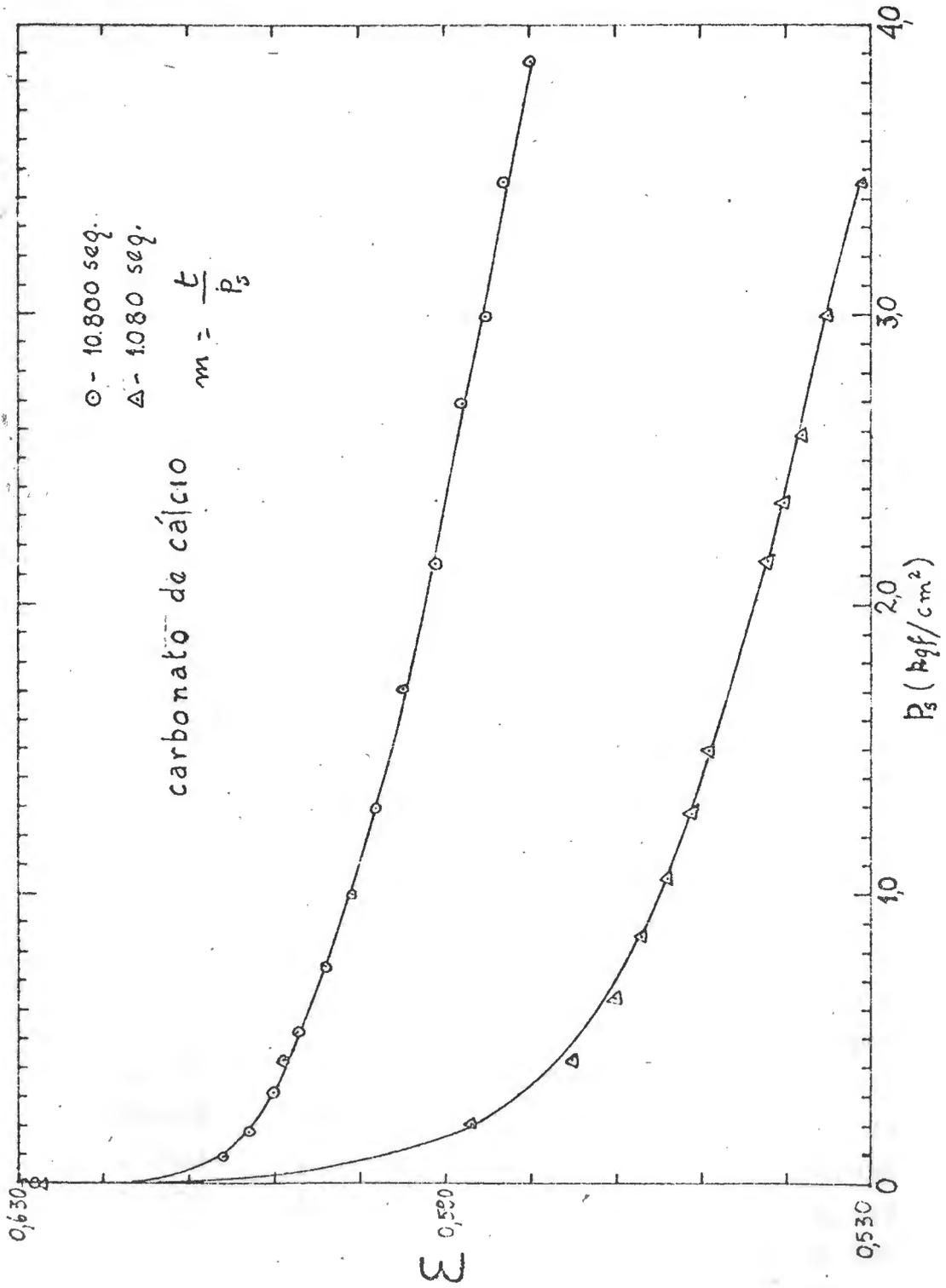


FIGURA 11

Experiência Nº 7

Material: Talco

Densidade: $2,352 \text{ g/cm}^3$

Granulometria: acima de 30 meskes

Massa (M) = 382,6 g

$v_b = 0,331 \text{ cm}^3/\text{seg}$

$C = M/\rho_s \quad \Lambda =$

t (seg)	l (cm)	P_s (kgf/cm^2)	V (cm^3/min)	P_h (kgf/cm^2)	ξ (adimens.)
0	0,0	0,0	1,78	0,081	0,513
30	0,025	0,011	1,70	0,083	0,509
60	0,056	0,022	1,58	0,088	0,505
120	0,104	0,044	1,46	0,091	0,501
180	0,168	0,066	1,36	0,099	0,489
240	0,206	0,088	1,13	0,104	0,484
300	0,231	0,110	0,82	0,112	0,480
360	0,246	0,132	-	0,112	0,478
420	0,264	0,154	0,84	0,112	0,475
480	0,292	0,176	0,90	0,112	0,471
540	0,297	0,198	0,96	0,109	0,470
600	0,310	0,220	0,96	0,112	0,468
900	0,335	0,330	0,96	0,112	0,464
1200	0,350	0,441	0,90	0,109	0,462
1500	0,414	0,551	0,86	0,107	0,461
1800	0,424	0,661	1,10	0,104	0,449
2400	0,470	0,881	1,23	0,096	0,442
3000	0,477	1,101	1,23	0,099	0,440
3600	0,493	1,322	0,96	0,120	0,438
4200	0,500	1,542	0,86	0,123	0,436
4800	0,508	1,762	1,44	0,115	0,435
5400	0,518	1,983	1,10	0,115	0,433
6000	0,546	2,203	1,44	0,115	0,428

Experiência Nº 7 (continuação)

6600	0,551	2,423	1,44	0,115	0,427
7200	0,556	2,644	1,10	0,120	0,426
7800	0,561	2,864	0,82	0,123	0,425
8400	0,566	3,084	0,80	0,123	0,424
9000	0,574	3,305	0,80	0,123	0,423
9600	0,582	3,525	0,78	0,123	0,432
10200	0,584	3,745	0,76	0,123	0,421
10560	0,589	3,878	0,74	0,123	0,420

Experiência Nº 8

Material: Talco

Densidade: $2,352 \text{ g/cm}^3$

Granulometria: acima de 30 meshes

Massa (M) = 387,3 g

$v_b = 1,006 \text{ cm}^3/\text{seg}$

$C = M/\rho_s$ $A =$

t (seg)	l (cm)	P_s (kgf/cm ²)	V (cm ³ /min)	P_h (kgf/cm ²)	ϵ (adimens.)
0	0,0	0,0	2,00	0,094	0,507
60	0,119	0,067	1,86	0,102	0,490
120	0,198	0,134	0,07	0,125	0,479
300	0,401	0,334	0,52	0,128	0,447
360	0,427	0,401	0,70	0,128	0,443
420	0,434	0,468	0,96	0,123	0,441
480	0,442	0,535	1,13	0,123	0,440
600	0,452	0,668	1,13	0,120	0,438
900	0,480	1,003	1,03	0,117	0,433
1200	0,503	1,337	0,96	0,117	0,429
1500	0,523	1,671	0,90	0,117	0,426
1800	0,538	2,006	0,86	0,117	0,423
2100	0,554	2,340	0,84	0,117	0,420
2400	0,566	2,674	0,80	0,117	0,418
2700	0,579	3,009	0,80	0,117	0,415
300	0,592	3,343	0,80	0,117	0,413
3300	0,602	3,677	0,80	0,117	0,411
3480	0,607	3,877	0,80	0,117	0,410

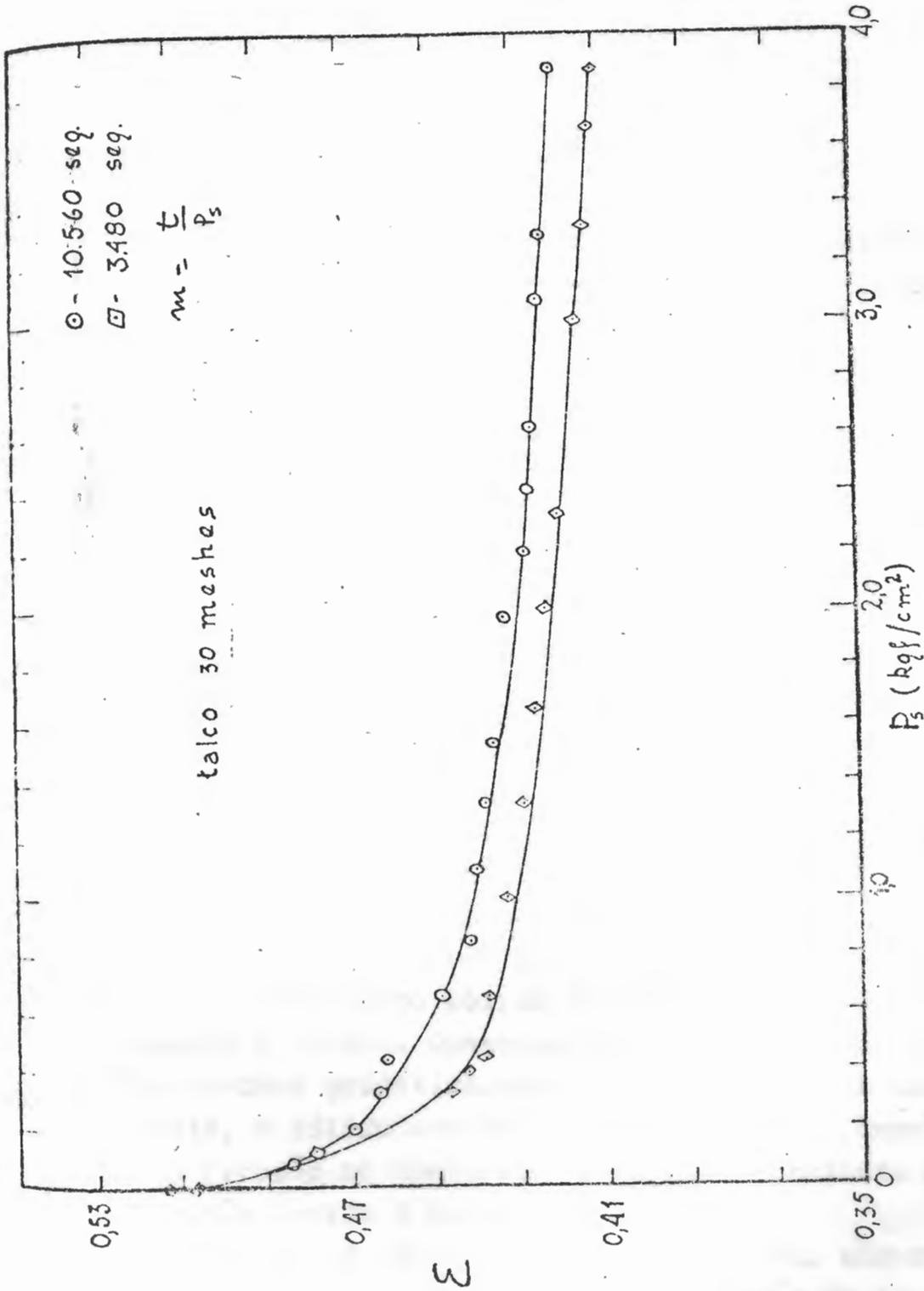


FIGURA 12

CAPÍTULO IV

DISCUSSÃO E SUGESTÕES

4-1. Análise da Operação do Sistema:

Um fenômeno interessante que pudemos verificar, durante a operação do sistema, foi a variação da pressão na entrada do anel. No início da compressão a pressão registrada pelo manômetro colocado na entrada do anel, como indicado na figura 8, sobe muito para depois cair lentamente. Quanto mais compressível a torta, mais acentuado é este fenômeno. Ocorre que no início da compressão, estando a amostra saturada de água, quase toda a pressão aplicada é suportada pela água (9, 14). A pressão suportada pela água é transmitida por esta através a torta e disco poroso até o manômetro. Quando a torta é comprimida, o volume de vazios diminui, a água contida nos poros é expelida. Isto faz com que haja um escoamento em sentido oposto fazendo a vasão indicada no rotâmetro cair a zero. O rotâmetro, caindo a zero, age como um selo impedindo este escoamento. Então, a pressão suportada pela água, vai agir diretamente no manômetro G, figura 8, elevando muito o valor indicado.

A medida que o tempo aumenta, a taxa de compactação diminui. O esqueleto sólido suporta cada vez maior parte da pressão aplicada. Conseqüentemente, a influência no manômetro diminui gradativamente. Quando a taxa de compactação for nula, o sólido estará suportando toda a pressão aplicada, a pressão no manômetro deverá ser constante e igual à pressão devido à coluna de água.

Devido aos fenômenos descritos acima, não conseguimos determinar a permeabilidade como função do tempo e da pressão. Para isso, precisávamos dos valores da vasão e

da pressão na entrada do anel cada instante.

Nosso equipamento não funcionou como esperávamos. Não conseguimos medir a vazão através da torta em todos os instantes, pois, esta caía a zero e demorava a se elevar.

4.2 - Análise dos Resultados:

No estudo da influência do tempo na porosidade e na permeabilidade de tortas de filtração, resultados aparentemente contraditórios foram obtidos.

Na figura 10, temos as curvas, obtidas experimentalmente, porosidade versus pressão, para torta de talco de densidade $2,550 \text{ g/cm}^3$, e granulometria 350 meshes. Elas mostram claramente, que para uma mesma pressão de compressão, a porosidade alcança um menor valor quanto mais lenta for a variação da pressão.

Nas figuras 11 e 12, porém, para tortas de carbonato de cálcio de densidade $2,036 \text{ g/cm}^3$ e de talco de densidade $2,352 \text{ g/cm}^3$ e granulometria acima de 30 meshes, vemos que o fenômeno inverso ocorreu. Para uma variação mais rápida da pressão aplicada, a porosidade final foi menor.

Na literatura de Mecânica dos Solos (14), encontramos uma explicação para este fenômeno que segundo / Tschebotarioff (14), pode ocorrer e ocorre frequentemente na compressão de argilas.

"Nos testes padrões de adensamento em Mecânica dos Solos, cada incremento sucessivo de carga é aplicado instantaneamente, sendo sempre igual ao incremento de carga aplicado anteriormente.

Em alguns solos, pequenos incrementos de carga, conseqüentemente, um maior número deles, podem diminuir o valor da compactação final. Isto se deve presumivelmente, às características dos contatos entre as partículas indivi-

duais. Estes contatos, parecem ser uma função do tempo e da carga aplicada. Quando a carga é aplicada muito lentamente, os contatos entre as partículas do esqueleto sólido, têm tempo de aumentar a sua área, oferecendo maior resistência ao novo incremento de carga do que ocorreria se o incremento total fosse aplicado de uma só vez.

Em testes de laboratório, alguns solos mostram uma grande resistência dos grãos e um decréscimo na compressibilidade quando a duração dos testes de consolidação aumenta dentro das condições possíveis de laboratório; outros tipos de solos, não se comportam dessa maneira."

Em nossas experiências, verificamos ser a taxa de aplicação da pressão extremamente importante.

Parece que a granulometria tem uma influência muito grande. Para tortas de talco de granulometria 350 meshes, e talco de granulometria acima de 30 meshes, ocorreu o fenômeno inverso. É bem verdade que as amostras de talco, são de procedências diferentes e de densidades diferentes, não servindo assim como comparação. As partículas maiores, devem estar sujeitas a maiores deformações que as menores.

Encontramos para representar a porosidade como função do tempo e da pressão, uma equação do tipo

$$(1 - \xi) = a(p_g)^b + c \quad (4-2)$$

onde a, b, e c são funções da taxa de variação da pressão aplicada. Como no nosso caso a variação da pressão foi linear com o tempo, temos a, b, e c como funções de m, sendo m o coeficiente angular da reta p_g contra t, ou seja

$$m = t/p_g \quad (4-3)$$

Estes coeficientes devem ser determinados para cada torta específica.

Verificamos também ser a porosidade inicial muito importante. Para uma mesma torta, mesma taxa de variação de pressão, começando-se com porosidade iniciais diferentes, as curvas vão se afastando a medida que a pressão de compressão aumenta, como indicado na figura 13

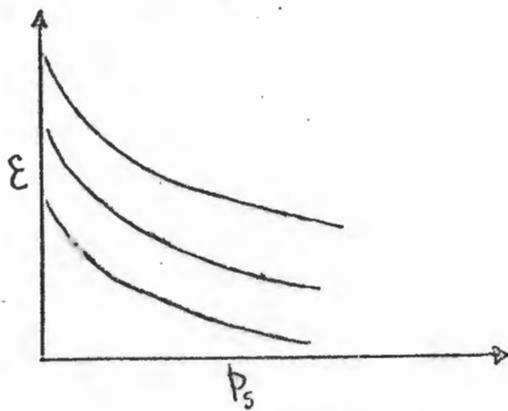


Figura 13

4-3. Sugestões:

Como mencionamos antes, este trabalho é a primeira tentativa para o estudo da porosidade e da permeabilidade e da permeabilidade de tortas de filtração como funções da pressão e do tempo, para uma variação contínua da pressão aplicada.

Seria interessante uma investigação mais completa destes fenômenos. Tal estudo, seria uma contribuição ao melhor conhecimento do comportamento das tortas de filtração. Experiências com maior número de tortas devem ser feitas. Nestas experiências observar:

- 1 - A influência do tamanho das partículas.
- 2 - A influência da porosidade inicial.
- 3 - A influência das paredes laterais da célula.
- 4 - Variar a pressão de forma não linear com o tempo. No apêndice 3, apresentamos para um caso simples o tipo de variação da pressão hidráulica com o tempo que deve

ocorrer no interior de uma torta de filtração.

Para medir a permeabilidade, o que não conseguimos com a nossa aparelhagem, sugerimos o aparelho esboçado na figura 14. Este aparelho pode medir também a porosidade. Consta essencialmente de:

Um cilindro metálico A, com dois tampões desmontáveis. O tampão T, da parte inferior, deve ter na sua parte interna, ranhuras para o escoamento do filtrado. O tampão H, superior tem um orifício central por onde passa o bastão I que é fixo ao disco poroso B_1 . O disco poroso B_1 funciona como um pistão e deve ter um anel envoltório para diminuir o atrito nas paredes do cilindro. Este anel deve ter a menor espessura possível para diminuir a área de contato com as paredes do cilindro. Adaptado ao tampão H, temos uma alça G, para suporte do estensômetro. A altura desta alça pode ser modificada por meio dos parafusos K_1 e K_2 .

Um manômetro M, para medir a pressão na água dentro do cilindro acima da placa porosa B_1 .

Uma câmara C, cheia até determinada altura com água, onde injetamos ar comprimido.

Uma válvula D, para controlar a pressão aplicada.

Um estensômetro E, para medir o adensamento da torta. O adensamento é medido pelo deslocamento do bastão I fixo ao disco poroso B_1 .

Um rotâmetro R, colocado na saída do cilindro, para medir a vazão no instante desejado.

Uma microbureta F, para aferir o rotâmetro em cada experiência.

A torta é colocada entre os discos porosos B_1 e B.

O cilindro deve ser desmontável para facilitar a retirada da torta terminada a experiência.

O tampão superior deve ter a menor espessura possível para diminuir o atrito.

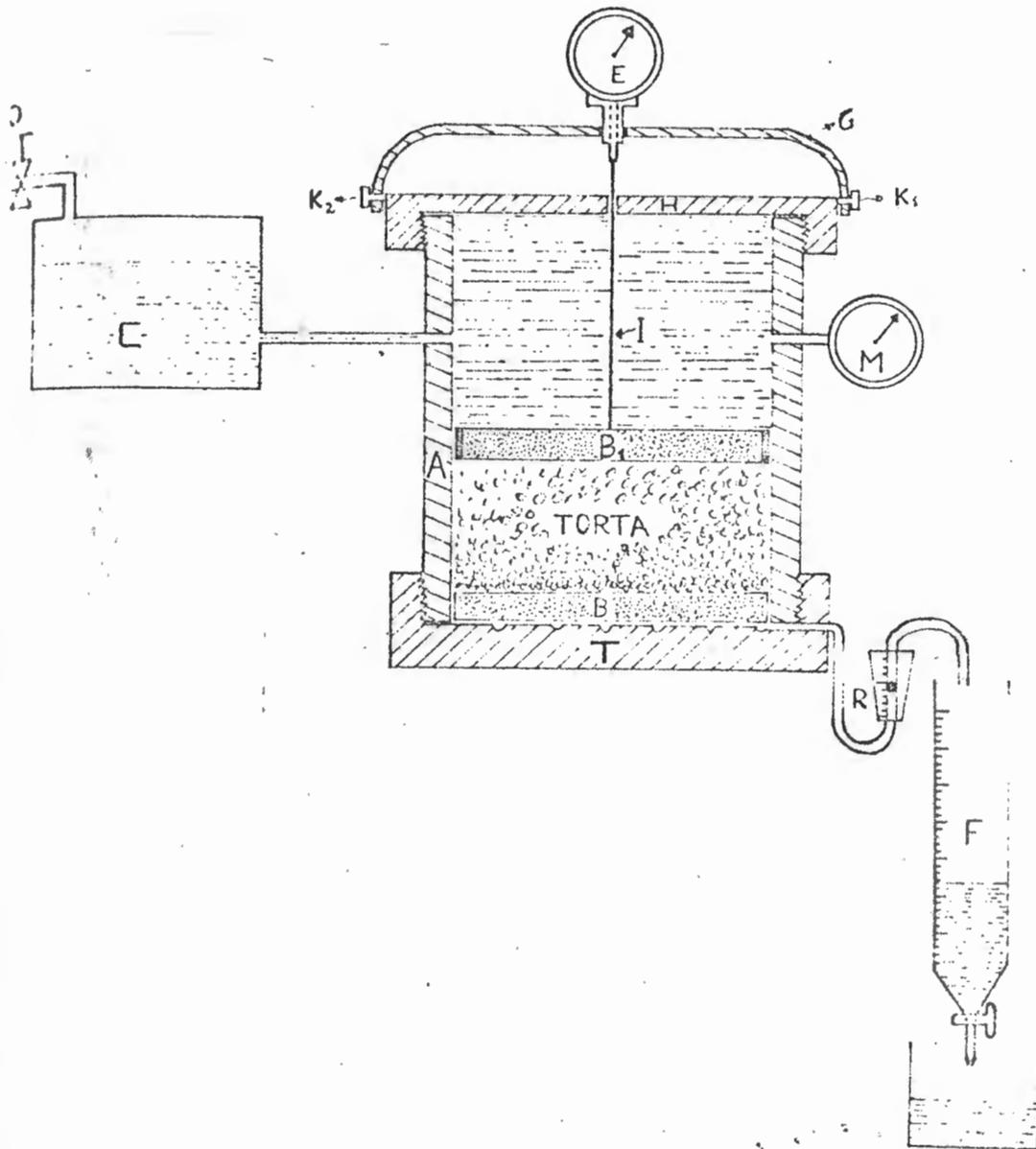


FIGURA 14

APÊNDICE 1

Redução da fórmula (3-1).

A porosidade por definição é a relação do volume de vazios para o volume total da amostra porosa.

$$\varepsilon = v_v / v_t \quad (1)$$

mas $v_t = v_s + v_v = A(H - 1)$
 onde v_s é o volume do sólido, A a área do anel, H a altura do anel e 1 o adensamento.

$$\varepsilon = v_v / v_t = (v_t - v_s) / v_t = 1 - v_s / v_t \quad (2)$$

mas, $v_s = M/\rho_s$ onde ρ_s é a densidade real do sólido, e M a mas sa do sólido. Substituindo-se em (2)

$$\varepsilon = 1 - M/\rho_s A(H - 1)$$

fazendo-se $M/\rho_s A = C = \text{constante}$, temos

$$\varepsilon = 1 - C/(H - 1)$$

APÊNDICE 2

Determinação das Equações das Curvas Experimentais

A curva obtida em papel log-log para $(1 - \xi)$ contra p , tem uma parte reta, sendo a outra extremidade ligeiramente curva. Então, se fizermos o gráfico $[(1 - \xi) - c]$ contra p , obteremos uma reta (10). A subtração de uma constante C , diminuirá o valor do logaritmo de uma maior quantidade quando $(1 - \xi)$ for pequeno do que quando $(1 - \xi)$ for grande.

Por conveniência, façamos $(1 - \xi) = Y$.

Determinação do valor c

Na curva cartesiana, escolhemos dois pontos bem nas extremidades; estes podem ou não serem valores obtidos experimentalmente.

O valor de p_3 é a raiz quadrada do produto $p_1 p_2$. Com o valor de p_3 entramos na curva traçada e tiramos o valor de Y_3 correspondente.

O valor de c é obtido pela fórmula

$$c = (Y_1 Y_2 - Y_3^2) / (Y_1 + Y_2 - 2 Y_3)$$

Como mostra a figura 15, o gráfico $(Y - c)$ contra p dá uma reta. Então, as variáveis são correlacionadas por uma equação do tipo

$$Y = (1 - \xi) = a (p)^b + c$$

pois, a equação de uma reta em log-log é

$$\log (Y - c) = \log a + b \log p$$

Cálculos:

Para as curvas de talco a 350 meshes, os cálculos feitos foram como se segue: para $m=13,81$, escolhemos os pontos extremos ($p_1=0,1$, $Y_1=0,342$) e ($p_2=2,0$, $Y_2=0,441$). O valor calculado para p_3 foi 0,448 e o de $Y_3 = 0,381$.

Encontramos para c o valor 0,286.

p	Y	$\ln (Y-0,286)$	$\ln p$	$Y_{\text{calc.}}$	%desvio
0,1	0,342	-2,88240	-2,30259	0,340	-0,58
0,2	0,353	-2,71810	-1,60944	0,355	+0,56
0,4	0,375	<u>-2,41912</u>	<u>-0,91629</u>	0,374	-0,27
0,6	0,389	-2,27303	-0,51033	0,388	-0,26
1,0	0,408	-2,10373	0,00000	0,408	0,00
2,0	0,441	<u>-1,86433</u>	<u>0,69315</u>	0,442	<u>0,23</u>
					d.n.=0,32

$$\begin{aligned}
 -2,88240 &= \ln a + (-2,30259) b \\
 -2,71810 &= \ln a + (-1,60944) b \\
 \underline{-2,41912} &= \underline{\ln a} + \underline{(-0,91629) b} \\
 -8,01962 &= 3 \ln a + (-4,82832) b \quad (1)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 -2,27303 &= \ln a - 0,51033 b \\
 -2,10373 &= \ln a + 0,00000 b \\
 \underline{-1,86433} &= \underline{\ln a} + \underline{0,69315 b} \\
 -6,24109 &= 3 \ln a + 0,18232 b \quad (2)
 \end{aligned}$$

Resolvendo o sistema de equações (1) e (2), encontramos

$$a = 0,122$$

$$b = 0,355$$

A equação da curva é

$$(1 - \xi) = 0,122 (p)^{0,355} + 0,286$$

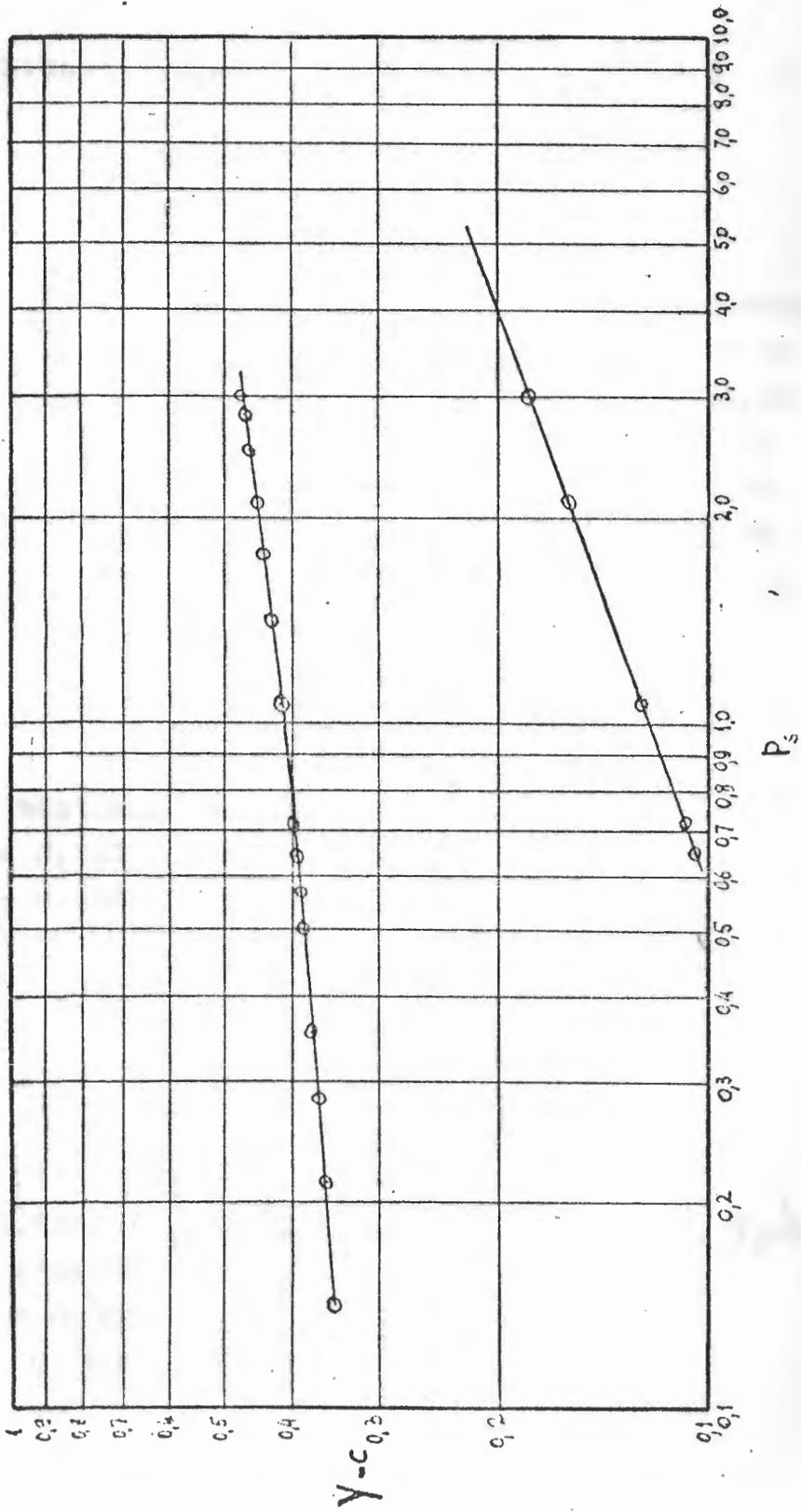


FIGURA 15

2. Para $m = t/p = 14,28 - t = 3\ 310$ seg

Pontos escolhidos: $(p_1=0,1, Y_1=0,347)$ e $(p_2=2,0, Y_2=0,444)$

$$p_3 = (p_1 p_2)^{0,5} = 0,448 \quad e \quad Y_3 = 0,383$$

$$c = 0,280$$

p	Y	$\ln(Y - 0,280)$	$\ln p$	$Y_{calc.}$	%desvio
0,1	0,347	-2,70306	-2,30259	0,345	-0,58
0,2	0,358	-2,55105	-1,60944	0,360	+0,56
0,4	0,379	<u>-2,31264</u>	<u>-0,91629</u>	0,379	0,00
0,6	0,391	-2,19823	-0,51083	0,392	0,26
1,0	0,410	-2,04022	0,00000	0,410	0,00
2,0	0,444	<u>-1,80789</u>	<u>0,69315</u>	0,441	<u>-0,67</u>

$$-7,56675 = 3 \ln a - 4,82832 b \quad (1)$$

$$-6,04634 = 3 \ln a + 0,18232 b \quad (2)$$

Resolvendo o sistema, encontramos

$$a = 0,131$$

$$b = 0,303$$

A equação é

$$(1 - \xi) = 0,131 (p)^{0,303} + 0,280$$

3. Para $m=31,59 - t = 7\ 380$ seg

Pontos escolhidos: $(p_1=0,1, Y_1=0,352)$ e $(p_2=2,0, Y_2=0,457)$

$$p_3 = 0,448$$

$$Y_3 = 0,395$$

$$c = 0,263$$

p	Y	$\ln(Y - 0,263)$	$\ln p$	$Y_{calc.}$	%desvio
0,1	0,352	-2,41912	-2,30259	0,352	0,00
0,2	0,367	-2,26336	-1,60944	0,369	+0,54
0,4	0,392	<u>-2,04794</u>	<u>-0,91629</u>	0,390	-0,51
0,6	0,404	-1,95900	-0,51083	0,404	0,00
1,0	0,424	-1,83258	0,00000	0,422	0,24
2,0	0,457	<u>-1,63990</u>	<u>0,69314</u>	0,463	<u>1,31</u> d.m.=0,43

$$-6,73042 = 3 \ln a - 4,82832 b \quad (1)$$

$$-5,43148 = 3 \ln a + 0,18232 b \quad (2)$$

Resolvendo o sistema acima, encontramos

$$a = 0,161$$

$$b = 0,259$$

A equação é

$$(1 - \varepsilon) = 0,161 (p)^{0,259} + 0,263$$

4. Para $t=19\ 320 - m = 83,33$ seg

Pontos escolhidos:

$$(p_1 = 0,1, Y_1 = 0,367) \text{ e } (p_2 = 2,0, Y_2 = 0,478)$$

$$p_3 = 0,498$$

$$Y_3 = 0,411$$

$$c = 0,300$$

p	Y	$\ln(Y - 0,30)$	$\ln p$	$Y_{calc.}$	% desvio
0,1	0,367	-2,70307	-2,30259	0,377	2,54
0,2	0,385	-2,46510	-1,60944	0,384	-0,26
0,4	0,404	<u>-2,26336</u>	<u>-0,91629</u>	0,391	-1,24
0,6	0,416	-2,15415	-0,51083	0,396	-7,45
1,0	0,438	-2,98050	0,00000	0,401	-8,45
2,0	0,478	<u>-1,72597</u>	<u>0,69315</u>	0,410	<u>-14,22</u> d.m.= 5,67

$$-7,43152 = 3 \ln a - 4,82832 b \quad (1)$$

$$-6,86064 = 3 \ln a + 0,18232 b \quad (20)$$

resolvendo o sistema de equações (1) e (2), obtemos

$$a = 0,101$$

$$b = 0,114$$

A equação é

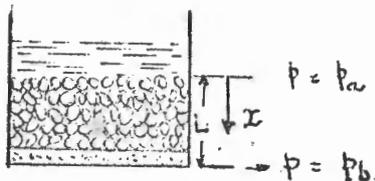
$$(1 - \xi) = 0,101 (p)^{0,114} + 0,300$$

Poderíamos correlacionar estas curvas, traçando gráficos de a contra m; b contra m; e c contra m. Obteríamos uma equação única para representar as quatro curvas. Os dados disponíveis são muito poucos e como para cada torta os resultados são diferentes, estas curvas foram determinadas apenas como ilustração.

APÊNDICE 3

Variacão da pressão com o tempo no interior
de uma torta de filtração.

Consideremos um modelo bem simples, para tortas incompressíveis. Na figura abaixo temos um esquema.



Pela equação de Darcy, temos

$$q = \frac{\kappa}{\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial x} - \rho g \right) \quad (1)$$

derivando a equação (1) em relação a x

$$\frac{\partial q}{\partial x} = - \frac{\kappa}{\mu} \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \quad (2)$$

Pela equação da continuidade para tortas incompressíveis (13), $\frac{\partial q}{\partial x} = 0$. Então,

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = 0 \quad (3)$$

integrando a equação (2), temos

$$p = a x + b \quad (4)$$

Condições de contorno:

1. para $x = 0$, $p = p_a$ (pressão na superfície da torta.
2. para $x = L$, $p = p_b$ (pressão junto ao meio filtrante)

pela c. c. 1

$$P_b = b$$

pela c. c. 2

$$P_a = a L + P_b \text{ donde}$$

$$a = (P_a - P_b) / L$$

Substituindo os valores de a e de b em (4)

$$p = (P_a - P_b) x/L + P_b = \frac{\Delta P}{L} x + P_b \quad (5)$$

Para tortas incompressíveis, a lei de deposição de sólidos é dada pela equação abaixo(1)

$$dL/dt = \frac{sv}{(1-\xi)(1-s)} \quad (6)$$

donde
$$L = \frac{s}{(1-\xi)(1-s)} \int v dt$$

Substituindo L em (5)

$$p = \frac{\Delta P(1-\xi)(1-s)}{s \int v dt} x + P_b$$

considerand-se v constante

$$p = \frac{\Delta P(1-\xi)(1-s)}{sv} x + P_b/vt \quad (7)$$

para $(P_a - P_b)$ constante e a fração de sólidos na lama (s) constantes, temos

$$p = (A x + B) / vt$$

como v é constante, em um ponto $x = 1$ por exemplo, temos

$$p = C/t$$

então, p é uma função linear do inverso do tempo.

39

BIBLIOGRAFIA

1. Collins, R.E. "Flow of Fluids Through Porous Materials" Reinhold Publishing Corporation, New York (1961).
2. Nelson, R.W., Tappi, 47, nº 12, 752 (1964).
3. Tiller, F.M. e Cooper, H., "The Role of Porosity in Filtration: IV - Constant Pressure Filtration"- A.I.Ch.E. Journal 6, 595, (1960).
4. Tiller, F.M. e Huang, C.J., "Theory of Filtration"- I.E.C. 53, 529 (1961).
5. Coimbra, A.L., Trabalhos Experimentais, I.Q.U.B.- não publicados.
6. Schreidegger, A.E., "The Physics of Flow Through Porous Media"- University of Toronto Press, (1960).
7. Tiller, F.M. e Shirato, M., "Flow Through Compressible / Porous Beds" July, 31, (1961).
8. Tiller, F.M. e Cooper, H., "The Role of Porosity in Filtration: V - Porosity Variation in Filter Cakes"- A. I. Ch. E. Journal, 8, 455, (1962).
9. Taylor, W.D., "Fundamentals of Soil Mechanics", John / Wiley & Sons Inc. (1948).
10. Davis, D.S., "Empirical Equations and Nomography" / Mac Graw-Hill, (1943).

11. Tiller, F.M., "The Role Of Porosity in Filtration: II
Chem. Eng. Prog., 51, 232, (1955).
12. Tiller, F.M., "The Role of Porosity in Filtration: III
Variable Pressure-Variable Rate Filtration", A. I. Ch. E.
Journal, 4, 170, (1958).
13. Gonçalves, W., Tese M. Sc.- I.Q.U.B.-Rio de Janeiro /
(1964)
14. Tschebotarioff, G. P., "Soil Mechanics, Foundations
and Earth Structures", Mac Graw-Hill (1951).

NOMENCLATURA

- A = área de uma seção transversal, L^2
 C = constante definida pela equação (3-1), L
 C_v = coeficiente de compactação, LT^{-1}
 D = diâmetro do anel, L
 H = altura do anel (pág. 20) e espessura da amostra (pág. 14)
 K = coeficiente de permeabilidade, L^2
 L = espessura da torta, L
 M = $(2n + 1)/2$ onde n é um número inteiro, adimensional
 T = fator de tempo, adimensional
 U = razão média de compactação, adimensional
 V = volume, L^3
 Y = $(1 - \xi)$, adimensional
 V_v = volume dos poros da torta, L^3
 V_s = volume do sólido da torta, L^3
 V_t = volume total da torta, L^3
 a = constante empírica definida pela equação (4-2)
 a_v = coeficiente de compressibilidade, LT^{-1}
 b = constante definida pela equação (4-2)
 c = constante definida pela equação (4-2)
 G = aceleração da gravidade, LT^{-2}
 l = adensamento da torta, L
 n = coeficiente angular da reta p_g contra t
 n_v = módulo de variação de volume, L^2M
 p = pressão, $ML^{-2}T^{-2}$
 p_g = pressão de compressão, $ML^{-2}T^{-2}$
 p_h = pressão hidráulica, $ML^{-2}T^{-2}$
 p_i = pressão baixa variando de 0,1 a 1,0 p.s.i.
 q = taxa de fluxo, $L T^{-1}$
 s = fração de sólidos na lama, adimensional
 t = tempo

u = excesso de pressão hidrostática, $ML^{-2}T^{-2}$

v = velocidade do escoamento, LT^{-1}

x = distância do meio filtrante, L

γ_w = peso da água/ volume da água, ML^{-3}

ε = porosidade, adimensional

ξ = constante na equação (1-9)

λ = coeficiente na equação (1-9), sem significado dimens.

μ = viscosidade do fluido, $ML^{-1}T^{-1}$

i = constante

ρ = densidade do fluido, ML^{-3}

ρ_s = densidade do sólido, ML^{-3}

V_b = vazão para o recipiente de carregamento, $L^3 T^{-1}$

ÍNDICE

	página
Apresentação.	i
Agradecimentos.	ii
sumário.	iii
CAPÍTULO I. INTRODUÇÃO.	1
Fôrça de arraste. Relação pressão de compressão porosidade.	
CAPÍTULO II. INFLUÊNCIA DO TEMPO NA POROSIDADE E NA PERMEABILIDADE.	8
Explicação física para a influência do tempo.	
Mecanismo da compactação. Analogia Mecânica com a compactação. Atraso Plástico ou Efeito secundário do tempo.	
CAPÍTULO III: PARTE EXPERIMENTAL	19.
3-1. Equipamento	19
3-2. Processo.	23
3-3. Método de cálculo da porosidade e da permeabilidade.	24
3-4. Resultados.	27
CAPÍTULO IV. DISCUSSÃO E SUGESTÕES.	44
4-1. Análise da operação do sistema.	44
4-2. Análise dos resultados.	45
4-3. Sugestões.	47

APÊNDICE 1. Dedução da fórmula (3-1)	50
APÊNDICE 2. Determinação das equações das curvas experimentais.	51
APÊNDICE 3. Variação da pressão com o tempo no interior da torta.	57
BIBLIOGRAFIA	59
NOMENCLATURA.	61

FIGURAS

	página
Figura 1. Diagrama esquemático da torta	7
Figura 2. Deformação de uma partícula <u>pe</u> la pressão de compressão.	7
Figura 3. Ilustração da variação da <u>poro</u> sidade com o tempo.	8
Figura 4. Curva hipotética porosidade - pressão para um incremento de carga.	9
Figura 5. Modelo de uma analogia mecânica para a compactação.	12
Figura 6. Análise gráfica da curva com - pressão-tempo obtida pela leitura do dial do esnsômetro <u>pa</u> ra uma única carga, durante um teste de consolidação / (Tschebotarioff, "Soil Mecha - nics Foundations and Earth Structures", Mac-Graw-Hill).	15

Figura 7. Representação hipotética pressão versus porosidade.	17
Figura 8. Equipamento Experimental.	21
Figura 9. Detalhe do anel de adensamento e do suporte do extensômetro.	22
Figura 10. Variação da porosidade como função da pressão e do tempo, para talco 350 meshes e $\rho_s = 2,55/\text{cm}^3$.	35
Figura 11. Variação da porosidade como função da pressão e do tempo, para carbonato de cálcio.	39
Figura 12. Variação da porosidade como função da pressão e do tempo, para talco 30 meshes e $\rho_s = 2,352 \text{ g/cm}^3$.	43
Figura 13. Ilustração da influência da porosidade inicial.	47
Figura 14. Esquema do aparelho proposto para a determinação experimental da porosidade e da permeabilidade de tortas de filtração.	49
Figura 15. Curva porosidade contra pressão para determinação das equações das curvas experimentais.	53