

MINISTERIO DAS OBRAS PÚBLICAS

LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

COLABORAÇÃO NO CONTROLE DOS MACIÇOS
TERROSOS DA BARRAGEM DO MIRA

12.º RELATÓRIO

(Relatório final sobre o controle da permeabilidade)

Estudo realizado para a DIRECÇÃO-GERAL
DOS SERVIÇOS HIDRÁULICOS

Lisboa, Janeiro de 1969



MINISTÉRIO DAS OBRAS PÚBLICAS
LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL

SERVIÇO DE GEOTECNIA
DIVISÃO DE FUNDAÇÕES

Proc. 53/1/2235

COLABORAÇÃO NO CONTROLE DOS MACIÇOS
TERROSOS DA BARRAGEM DO MIRA

12º. RELATÓRIO

(Relatório final sobre o controle da permeabilidade)

Estudo realizado para a DIRECÇÃO-GERAL
DOS SERVIÇOS HIDRÁULICOS

Lisboa, Janeiro de 1969

Copyright © LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL, I. P.
AV DO BRASIL 101 • 1700-066 LISBOA
e-mail: lnec@lnec.pt
www.lnec.pt

Digitalizado no Setor de Divulgação Científica e Técnica do LNEC

2022

ÍNDICE

INTRODUÇÃO	1
1 - REGISTO E ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS DE CAMPO OBTIDOS NA ZONA DO NÚCLEO CENTRAL COMPREENDIDO ENTRE AS COTAS 107,5 e 131,2 METROS (SOLOS ARGILOSOS)	1
2 - REGISTO DOS RESULTADOS OBTIDOS EM LABORATÓRIO SOBRE AMOSTRAS COLHIDAS NAS ZONAS DE MONTANTE E JUSANTE COMPREENDIDAS ENTRE AS COTAS 106,6 E 110,6 METROS (SOLOS XISTOSOS)	2
3 - CONSIDERAÇÕES FINAIS	2
3.1 - Ensaio para medição da permeabilidade "in situ" e em laboratório	3
3.2 - Estudo global com base numa análise estatística dos resultados obtidos na caracterização, do ponto de vista da permeabilidade, dos terrenos compactados	7
3.3 - Influência do controle de permeabilidade nas decisões de alteração ao projecto inicial	11
3.4 - Conclusões	13

ÍNDICE DE QUADROS

QUADRO I - ENSAIOS "IN SITU" (NÚCLEO CENTRAL)

QUADRO II - RESULTADOS DE ENSAIOS LABORATORIAIS EM AMOSTRAS COLHIDAS NAS
ZONAS XISTOSAS DE MONTANTE E JUSANTE

ÍNDICE DE FIGURAS

- Fig. 1 - Solos argilosos - Núcleo central - Ensaios de campo. Análise estatística dos resultados obtidos para o valor de k
- " 2 - Solos xistosos. Análise estatística comparativa dos resultados obtidos para o valor de k em ensaios de campo e em ensaios de laboratório
- " 3 - Solos xistosos - Medição do coeficiente de permeabilidade em amostras intactas. Possível influência da pressão de confinamento no valor de grandeza a medir
- " 4 - Solos xistosos - Furos das sondagens P_1 , P_2 e P_3
- " 5 - Solos argilosos - Núcleo central. Análise estatística comparativa dos resultados obtidos para o valor de k em ensaios de campo e em ensaios de laboratório
- " 6 - Solos argilosos - Medição do coeficiente de permeabilidade em amostras intactas. Possível influência da pressão de confinamento no valor de grandeza a medir
- " 7 - Solos argilosos - Furos das sondagens P_4 e P_5

COLABORAÇÃO NO CONTROLE DOS MACIÇOS
TERROSOS DA BARRAGEM DO MIRA

(Relatório final sobre o controle de permeabilidade)

INTRODUÇÃO

Na primeira parte deste relatório transcrevem-se os resultados dos últimos ensaios efectuados no campo e em laboratório.

Numa segunda parte fazem-se as seguintes considerações:

- a) revisão das técnicas utilizadas na medição da permeabilidade.
- b) estudo global com base numa análise estatística de todos os resultados obtidos na caracterização, do ponto de vista da permeabilidade, dos terrenos compactados.
- c) influência do controle da permeabilidade nas decisões de altera -
ção ao projecto inicial.
- d) tendo presente os tipos de solo e processo de compactação empregados e na previsão de condições análogas em futuras barragens, apontam-se, com base na experiência agora adquirida, algumas conclusões de interesse para projecto, construção e técnica de controle.

1 - REGISTO E ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS DE CAMPO OBTIDOS NA ZO -
NA DO NÚCLEO CENTRAL COMPREENDIDA ENTRE AS COTAS 107,5 e 131,2 ME -
TROS (SOLOS ARGILOSOS)

No quadro I transcrevem-se os resultados obtidos. Na figura 1 a cur -
va b) apresenta, em percentagem, as frequências distribuídas da grandeza
medida. Comparando com a curva a) correspondente ao conjunto dos resulta
dos anteriores verifica-se uma melhoria dos aterros no que respeita à sua
permeabilidade, isto é, pode considerar-se uma diminuição estatística da

permeabilidade. Um estudo final englobando todos os ensaios dá origem à curva c) à qual se fará referência detalhada mais à frente.

2 - REGISTO DOS RESULTADOS OBTIDOS EM LABORATÓRIO SOBRE AMOSTRAS COLHIDAS NAS ZONAS DE MONTANTE E JUSANTE COMPREENDIDAS ENTRE AS COTAS 106,6 E 110,6 METROS (SOLOS XISTOSOS)

No quadro II transcrevem-se os resultados obtidos. Dado o reduzido número de ensaios efectuados não se fará qualquer referência especial a este grupo de resultados os quais, conjuntamente com todos os anteriores, serão objecto de análise nas considerações finais.

3 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Terminados os ensaios para medição de permeabilidade dos aterros da barragem do Mira, quer por via laboratorial quer a partir de ensaios "in situ", julga-se oportuno uma revisão de todo o trabalho realizado e resultados obtidos. Toda a acção desenvolvida não resultou dum plano previamente traçado com a finalidade de controlar a permeabilidade dos aterros da barragem. Pelo contrário, foi-se desenvolvendo de acordo com as várias fases de construção da obra e sofrendo as modificações que a realidade mostrou serem convenientes. Uma descrição pormenorizada pode encontrar-se nos quatro relatórios parcelares anteriormente publicados a saber:

- 1 - Colaboração no controle dos maciços terrosos da barragem do Mira.
3º Relatório. Dezembro de 1964
- 2 - Colaboração no controle dos maciços terrosos da barragem do Mira.
4º relatório. Maio de 1965
- 3 - Colaboração no controle dos maciços terrosos da barragem do Mira.
7º relatório. Março de 1966

4 - Controle de compactação da barragem do Mira. 10º relatório. Maio de 1967.

3.1 - Ensaios para medição da permeabilidade "in situ" e em laboratório

Os ensaios para determinação da permeabilidade "in situ" durante a construção do aterro foram realizados por medição do caudal de água absorvido em furos não revestidos. Os furos foram abertos a trado tendo 20 cm de diâmetro e 100 cm de comprimento. Inicialmente foram previstas as modalidades de ensaio "de carga variável" e de "carga constante". No entanto, embora alguns ensaios tivessem sido realizados mantendo constante a carga dentro do furo e medindo o caudal necessário para manter essa condição de estacionaridade, os resultados apresentados referem-se a ensaios em que se mediu o rebaixamento do nível de água dentro do furo durante um certo intervalo de tempo. Os resultados destes ensaios traduzidos em termos de k (lei de Darcy) foram obtidos por aplicação da seguinte expressão

$$k = \frac{10 Q}{h^2}$$

em que Q é o caudal que atravessa a superfície cilíndrica do furo considerando o fluxo radial (despreza-se a contribuição do fundo do furo) e h é o comprimento do furo.

Para que se tenham presentes as condições admitidas na dedução da fórmula transcreve-se essa mesma dedução do relatório de Dezembro de 1964. O caudal Q pode ser expresso da seguinte maneira

$$Q = 2 \pi r h k \frac{dp}{dr} \dots\dots\dots (1)$$

em que $\frac{dp}{dr}$ é o gradiente hidráulico na proximidade da superfície considerada, h , como atrás se referiu, o comprimento do furo e k , o coeficiente

de permeabilidade. Integrando a expressão (1) vem

$$h k p = \frac{Q}{2\pi} \log r + C \dots\dots\dots (2)$$

Referindo os ensaios a um intervalo de tempo em que a variação de carga se pode considerar desprezível, vem portanto que, em cada ponto, se pode considerar a carga hidráulica como constante.

Para valores de r muito grandes p é sensivelmente igual a zero. Admitindo um valor de $r = e^{10} r_0$ pode considerar-se satisfeita a condição anterior. Então

$$\frac{Q}{2\pi} (10 + \log r_0) + C = 0 \dots\dots\dots (3)$$

sendo r_0 o raio do furo.

Substituindo em (2)

$$h k p = \frac{Q}{2\pi} \log r - \frac{Q}{2\pi} (10 + \log r_0) \dots (4)$$

e tomando valores na superfície imediatamente adjacente à parede do furo ($r = r_0$), vem

$$h k p_0 = \frac{Q}{2\pi} \log r_0 - \frac{Q}{2\pi} (10 + \log r_0) \dots (5)$$

$$k = \frac{5 Q}{\pi h p_0} \dots\dots\dots (6)$$

Tomando $p_0 = \frac{h}{2}$ virá

$$k = \frac{10 Q}{h^2} \dots\dots\dots (7)$$

A determinação da permeabilidade em laboratório foi efectuada a partir de amostras intactas colhidas no aterro com amostrador de superfície de 20 cm de diâmetro e 60 cm de altura. As amostras foram montadas em câ

mara triaxial e submetidas a uma dada pressão de confinamento σ_3 . A partir duma ligação ao topo da amostra provocou-se a percolação desta sendo a água recolhida a partir duma ligação à base. Nos ensaios com material xistoso estas determinações efectuaram-se na fase consolidação-saturação dos ensaios de compressão triaxial do tipo consolidado - não drenado.

Optou-se por medições do coeficiente de permeabilidade em câmaras triaxiais e não em permeâmetros por razões que são óbvias no caso de xistos em que se pretendia também caracterizar o material do aterro do ponto de vista resistência ao corte; nos solos argilosos do núcleo foram determinantes a maior altura da amostra e a melhor garantia de evitar zonas de percolação preferencial entre a amostra e as paredes que garantem o confinamento lateral.

Além destes ensaios são de referir as determinações de campo efectuadas a partir de sondagens profundas executadas, segundo programação da D.G.S.H., e do L.N.E.C., pela firma Ródio.

Uma primeira série de três furos foi realizada no maciço xistoso de montante quando este se encontrava à cota 78 m e numa zona próxima da enseadeira argilosa. Os ensaios decorreram entre 11 e 26 de Março de 1965. Os furos foram feitos com sondagens à percussão ficando revestidos com tubos de 6" (152 mm) até à cota superior da camada a ensaiar que se estabeleceu ser de espessura 1,00m. A camada foi perfurada com a limpadeira após se ter fixado o revestimento na posição anteriormente referida. O diâmetro do furo na zona não revestida era de 124 mm. O furo P_1 atingiu uma profundidade de 20 m e tanto o furo P_2 como P_3 chegaram aos 15 m. Os ensaios de permeabilidade foram efectuados pelo método de medição do rebaixamento de uma coluna de água em determinados intervalos de tempo. Fizeram-se algumas determinações a nível constante com a finalidade de comparar resultados. Do relatório da Ródio verifica-se que o coeficiente de permeabilidade foi calculado por aplicação da fórmula

$$k = \frac{\Delta h}{\Delta t} \cdot \frac{d_o^2}{8 h_o \sqrt{d_l}} \dots\dots\dots (8)$$

em que

- l - comprimento da parte não revestida do furo
- Δh - rebaixamento do nível da água
- Δt - intervalo de tempo durante o qual se processou o rebaixamento
- d_o - diâmetro interno do furo revestido
- d_l - diâmetro da ponta não revestida do furo
- h_o - distância entre o centro da parte não revestida e o nível inicial da água

Nenhum dos furos atingiu o nível freático (na altura a cota do nível da água na albufeira era sensivelmente igual à cota do coroamento da ensecadeira argilosa - 64,00 m).

Posteriormente mais duas sondagens profundas foram realizadas pela firma Ródio no núcleo central (furos P_4 e P_5).

Os ensaios decorreram entre 1 de Setembro e 13 de Outubro de 1966. O furo P_4 iniciou-se à cota 195,5 m e prolongou-se até à cota 46,30 m sendo as cotas correspondentes para P_5 respectivamente 197,5 e 47,8 m. No relatório parcelar de Maio de 1967, nas figuras 5 e 6, apresenta-se a localização em planta e em perfil destes ensaios.

Duma maneira geral as sondagens e os ensaios foram conduzidos numa maneira análoga à utilizada nos furos realizados nos xistos. Como a cota do nível da água na albufeira se mantinha nos 65 m era de admitir que a ensecadeira argilosa impedisse que os furos de sondagem encontrassem a linha freática. Do relatório da Ródio constata-se que, embora esta hipótese fosse tida em conta, se fizeram alguns cálculos do coeficiente de permeabilidade nas zonas mais profundas admitindo que o nível freático se encontrava alguns metros acima. Nesse caso a fórmula empregue foi

$$k = \frac{d_o^2}{4h_m \left[\frac{2l}{6,2} + d \right]} \times \frac{Ah}{At} \dots\dots\dots (9)$$

em que h_m representa o valor médio da altura da água, no decurso do ensaio, em relação ao nível freático. Os valores obtidos foram comparados com os cálculos para hipótese de não existência de linha freática (fórmula (8)). Verificou-se que eram sensivelmente iguais. Quando se realizaram determinações a carga constante o valor de k obteve-se a partir de

$$k = \frac{Q}{Ch_m}$$

em que Q é o caudal de infiltração e C um coeficiente de forma.

Os valores de k obtidos em todos estes ensaios (xistos e solos argilosos) serão mais à frente objecto de algumas considerações.

3.2 - Estudo global com base numa análise estatística dos resultados obtidos na caracterização, do ponto de vista da permeabilidade, dos terrenos compactados

Na figura 2 estão apresentadas as frequências distribuídas dos coeficientes de permeabilidade medidos nos solos xistosos. A curva a) refere-se aos ensaios de campo e a curva b) aos ensaios de laboratório. Os primeiros têm como valor mais frequente sensivelmente 5×10^{-3} cm/s. Nos ensaios de laboratório esse valor é cerca de 5×10^{-6} cm/s o que equivale à obtenção de permeabilidade 1000 vezes maior no ensaio de campo. Atendendo às características dos dois tipos de ensaio (referidas pormenorizadamente em 3.1) verifica-se que os resultados do ensaio de campo traduzem uma permeabilidade horizontal enquanto que no caso das determinações laboratoriais se mede uma permeabilidade vertical. Os aterros xistosos, do ponto de vista permeabilidade, seriam anisotrópicos com uma relação entre permeabilidades horizontal e vertical sensivelmente igual a 1000. Es

ta anisotropia pode fãcilmente relacionar-se com os processos construtivos adoptados. Na realidade os aterros xistosos foram compactados por camadas de grande espessura (0,60 m) e utilizado como equipamento compactador, cilindros vibradores de oito toneladas. Em todos os relat6rios relativos ao controle de compacta7ão tem sido assinalada uma certa estratifica7ão horizontal proveniente do grau de compacta7ão atingido em cada camada ser diferente ao longo da sua altura. A compacta7ão relativa obtida atinge um valor m3ximo no topo da camada e decresce at6 à sua base. Logo que tal facto foi verificado estatisticamente apontou-se essa anisotropia do aterro como sendo inconveniente do ponto de vista da permeabilidade. Deste modo a característica dominante da percola7ão da 3gua atrav6s dos maciços de montante e jusante ser3 a de estabelecimento de linhas de corrente quasi horizontais. E muito embora elas sofram, por efeito do n3cleo, uma inflex3o favor3vel do ponto de vista da estabilidade, ao imergirem dessa zona para os xistos de jusante novamente se aproximam da horizontalidade. Pode acrescentar-se que os elementos colhidos na observa7ão da barragem, muito embora a albufeira n3o se encontre ainda na fase de pleno armazenamento, n3o contrariam a hip3tese deste comportamento.

Quanto 3 rela7ão entre as permeabilidades vertical e horizontal, deduzida da an3lise estatística representada na figura 2, deve frizar-se que a curva b) se baseia apenas em vinte e tr6s ensaios. Existe tamb6m a possibilidade de nos ensaios de laborat3rio a press3o lateral aplicada na c3mara influenciar o valor de k. Na figura 3, muito embora o n3mero de ensaios possa considerar-se insuficiente, 6 nítida a tend6ncia para obter resultados indicativos de solos menos perme3veis quando a press3o de confinamento aumenta. Os ensaios que serviram de base a esta conclus3o s3o os mesmos que determinaram a curva b) da figura 2. As tens3es aplicadas, se por um lado s3o uma contrapartida real do estado de tens3o em determinadas zonas do maciço e portanto d3o uma maior verosimelhança aos resul-

tados, têm o inconveniente de muito provavelmente, diferirem das tensões instaladas numa camada recentemente compactada, situação essa correspondente aos ensaios de campo. Deve portanto ter-se estes factos presentes ao estabelecer-se em definitivo o valor de k_h/k_v .

Resta fazer referência aos ensaios realizados a partir dos furos de sondagem (furos P_1 , P_2 e P_3). Na figura ~~A~~⁴ a curva representada indica como valor mais frequente de k o de 10^{-3} cm/s. A curva de distribuição das frequências não difere [?] sensivelmente da curva a) da figura 2. Esta semelhança é de salientar pois embora ambos os tipos de ensaio correspondam a medição de k para fluxos predominantemente horizontais os cálculos foram efectuados a partir de fórmulas diferentes (expressões (7) e (8) apresentados em 3.1) e ensaios conduzidos de acordo com o exposto anteriormente. No relatório da Ródio é apresentado para cada furo um diagrama que indica a profundidade da camada ensaiada e permeabilidade medida (desenho nº 5459). Os diagramas não dão indicação de qualquer relação entre a profundidade e o valor de k , ou seja, uma influência do estado de tensão (neste caso suposto em primeira aproximação directamente proporcional à distância da zona considerada à superfície) na permeabilidade. Portanto estes resultados não confirmam a hipótese que se adiantou a propósito dos resultados dos ensaios em laboratório (ver figura 3). Os diagramas permitiram no entanto assinalar cotas diferentes para as zonas mais permeáveis detectadas em cada furo, levando à conclusão que se trata de bolsadas resultantes de qualquer anomalia local durante a compactação. Afasta-se pois a possibilidade duma "camada" de elevada permeabilidade desenvolvendo-se em toda a largura do maciço, sempre de evitar por razões evidentes.

Todas as referências feitas até aqui em 3.2 dizem respeito a solos xistosos. Quanto aos solos argilosos colocados no núcleo, a figura 5 permite uma análise estatística dos resultados obtidos já que nela se apresentam as frequências distribuídas (em percentagem) dos valores de k me-

dados quer em ensaios de campo (curva a) baseada em 107 ensaios) quer de laboratório (curva b) traçada a partir de 43 ensaios).

Sendo o núcleo um órgão de estanqueidade, embora o volume de aterro seja muito menor que o correspondente aos maciços de montante e jusante, nele se realizaram maior número de ensaios. As técnicas de ensaio foram análogas às empregues nos xistos e estão de acordo com o descrito em 3.1. Comparando as curvas a) e b) da figura 5 pode verificar-se que, estatisticamente, os valores de k obtidos em campo são cerca de 30 vezes maiores que os obtidos em laboratório. Idênticas considerações às que foram feitas a propósito da figura 2 tem neste caso perfeito cabimento. Só que quantitativamente o grau de anisotropia traduzido pelo valor da relação k_h/k_v é inferior ao então citado (30 no caso das argilas e 1000 no caso dos xistos). Esta verificação parece estar de acordo com o que seria de esperar porque o núcleo além de ser construído com um material que exhibe menor ortotropia foi compactado em camadas menos espessas (40cm) o que, não evitando um certo zonamento horizontal (detectado aliás no estudo estatístico dos resultados do controle de compactação), deu origem a uma menor dispersão de valores.

Considerando agora isoladamente as curvas a) e b) parece pertinente, no que diz respeito à primeira, salientar a influência durante a condução dos ensaios, da parcela do gradiente hidráulico devido às tensões neutras negativas instaladas no meio em que se dá a percolação. Tentou-se minimizar esse efeito desprezando as leituras iniciais. No entanto é de crer que a curva estará ligeiramente deslocada para a esquerda relativamente aos valores reais de k . Por outras palavras a anisotropia não será tão pronunciada como a deduzida das curvas traçadas.

Quanto aos ensaios traduzidos pela curva b) procurou-se, de modo análogo ao indicado para os xistos, detectar uma influência da pressão de confinamento no valor de k medido. No entanto a observação da figura 6 não

permite, como foi o caso de xistos, confirmar essa interdependência entre k e o valor da pressão hidrostática reinante na câmara de ensaio.

Como foi referido em 3.1 também no núcleo central foram realizadas medições da permeabilidade dos aterros compactados a partir de ensaios em furos de sondagens profundas (furos P_4 e P_5). Ao todo foram ensaiadas 86 camadas e é interessante verificar como a curva de frequências distribuídas dos valores de k representada na figura 7 se ajusta relativamente bem à curva a) da figura 5. Têm pois aqui perfeito cabimento as considerações atrás feitas a propósito de estudo semelhante para os xistos. Das figuras 5 e 6 do relatório do L.N.E.C. de Maio de 1967 elaboradas a partir dum desenho do relatório da Ródio de Novembro de 1966 pode ainda verificar-se que o valor de k não é função da profundidade da camada nem tão pouco as maiores permeabilidades assinaladas em cada um dos furos correspondem nos dois furos a camadas à mesma cota. O mesmo havia sido constatado nos ensaios dos xistos.

3.3 - Influência do controle de permeabilidade nas decisões de alteração ao projecto inicial

Quando se iniciaram os estudos de terras para eventual utilização na barragem do Mira não se encarava a hipótese de utilização do material xistoso que constitui hoje os maciços designados de montante e jusante. As permeabilidades medidas em laboratório a partir de terras das manchas de empréstimo prospectadas rondavam o valor de 10^{-8} cm/s. O projecto foi elaborado com base num perfil homogéneo não havendo problemas no respeitante ao comportamento dos aterros do ponto de vista permeabilidade.

No entanto, uma vez adjudicada a obra, propôs-se o empreiteiro construir a barragem com material xistoso empregando como equipamento compactador cilindros vibradores de 8 t. Previa-se ainda a possibilidade de compactar camadas bastante mais espessas que as normalmente tratadas por ci

lindros de pés de carneiro (≈ 20 cm).

Modificadas assim as condições que levaram à solução adoptada no projecto inicial deu-se início a um estudo em que se procurou avaliar as repercussões desta nova situação e definir eventuais modificações. Este estudo teve por base a realização de três aterros experimentais e focou principalmente a influência do equipamento compactador nas características mecânicas do material compactado. Alguns ensaios de permeabilidade em laboratório (realizados em permeâmetros) se bem que dessem valores de k maiores do que 10^{-8} cm/s não eram de molde a suscitar problema já que se situavam entre 10^{-7} e 10^{-6} cm/s. Como resultado destes estudos a barragem manteve o seu perfil homogêneo, agora de material xistoso, com a inclusão no pé de montante duma ensecadeira argilosa. Este material foi o adoptado por permitir uma construção rápida durante o Verão pois a falta de experiência de construção de aterros com xisto aconselhava, neste caso, a um controle minucioso. Tão pouco a sua localização no pé de montante foi julgada perigosa na situação de esvaziamento brusco da albufeira já que a cota do coroamento da ensecadeira é sensivelmente a da descarga de fundo, na altura funcionando como galeria de desvio.

Iniciada a construção dos aterros a jusante da ensecadeira o primeiro material colocado, embora tratando-se de xisto, continha elevada percentagem de argila. No entanto, logo que a mancha relativamente pequena donde provinham esses materiais se esgotou, pareceu conveniente a realização de ensaios de permeabilidade em campo e laboratório. Verificou-se que existiam elevadas permeabilidades horizontais apesar de todos os cuidados postos na compactação dos xistos. Foi então decidido o estabelecimento dum núcleo de solos argilosos (relatório de Março de 1966) adicionando-se ao controle habitual da compactação relativa e afastamento da humidade relativamente ao óptimo, determinação da permeabilidade "in situ" e em laboratório. Dos resultados obtidos fez-se pormenorizada análise em

3.2 onde igualmente se focam os resultados dos ensaios em furos de sondagens que se julgou conveniente realizar.

3.4 - Conclusões

Em Portugal a barragem do Mira representa a primeira obra de envergadura desse tipo em que se empregaram xistos na construção dos seus maciços terrosos. Sendo a ocorrência deste material relativamente frequente no Sul de Portugal, onde um vasto plano de obras para irrigação prevê numerosas barragens de terra, parece, com base na experiência adquirida, ser de interesse salientar os principais aspectos decorrentes do emprego desse material. Esses aspectos confinar-se-ão neste relatório aos problemas de permeabilidade, sendo os restantes objecto de outros relatórios.

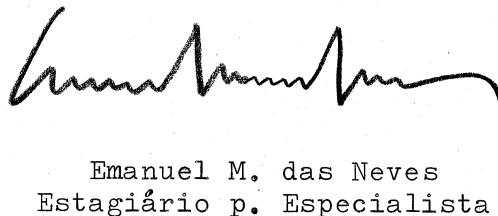
A utilização de cilindros vibradores de 8 t, tendo permitido um ritmo mais rápido de colocação, é de prever para obras futuras tanto mais que são muito elevados os volumes de terras a colocar.

A experiência do Mira mostra no entanto que a permeabilidade dos aterros xistosos dificilmente levará a barragens não zonadas. A razão deste comportamento pareceu repartir-se pelas características intrínsecas do material e pelo modo como é compactado. A primeira determinava já de si um valor não muito baixo para a permeabilidade mas associada com a segunda conduz a uma situação de anisotropia com predominância da permeabilidade horizontal. Esta anisotropia determina linhas de corrente próximas da horizontal o que implica cuidados no dimensionamento do núcleo de molde a que, numa situação de pleno represamento, não possa haver intersecção do paramento de jusante pela superfície freática.

Quanto ao núcleo, de material diferente (argiloso) para assegurar grau de impermeabilidade necessário, a compactação com cilindros vibradores introduz no maciço um certo grau de anisotropia embora de valor bastante inferior ao dos maciços xistosos. No caso do Mira estimam-se

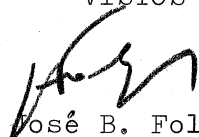
permeabilidades horizontais nos aterros xistosos cerca de 1000 vezes maio
res que as verticais. Para o núcleo, essa relação está compreendida en -
tre 15 e 30.

Lisboa e Laboratório Nacional de Engenharia Civil, em Janeiro de 1969



Emanuel M. das Neves
Estagiário p. Especialista


VISTOS



José B. Folque
Eng^o Chefe da Divisão de Fundações



Ulpio Nascimento
Eng^o Chefe do Serviço de Geotecnia



Manuel Rocha
Engenheiro Director

MN/LMR

Q U A D R O S

QUADRO I - ENSAIOS "IN SITU" (NÚCLEO CENTRAL)

Nº do furo	Cota de boca (m)	Carga variável	
		Carga inicial (cm)	Coefficiente de permeabilidade (cm/s)
212	106,60	100	$5,03 \times 10^{-4}$
213	109,20	100	$2,53 \times 10^{-5}$
214	108,49	100	$3,33 \times 10^{-5}$
215	107,91	100	$3,16 \times 10^{-5}$
216	107,81	100	$4,72 \times 10^{-5}$
218	109,44	100	$6,37 \times 10^{-6}$
219	110,11	100	$1,19 \times 10^{-6}$
220	109,20	100	$1,65 \times 10^{-5}$
221	110,82	100	$8,36 \times 10^{-6}$
222	110,82	100	$8,36 \times 10^{-6}$
223	111,30	100	$1,67 \times 10^{-4}$
224	113,24	100	$1,29 \times 10^{-5}$
225	112,44	100	$1,02 \times 10^{-5}$
226	112,55	100	$8,32 \times 10^{-5}$
227	114,23	100	$5,88 \times 10^{-5}$
228	113,77	100	$2,40 \times 10^{-5}$
229	114,08	100	$4,99 \times 10^{-5}$
230	115,83	100	$8,17 \times 10^{-5}$
231	115,54	100	$2,97 \times 10^{-5}$
232	115,60	100	$8,14 \times 10^{-5}$
233	117,83	100	$1,82 \times 10^{-5}$
234	117,22	100	$6,24 \times 10^{-5}$
235	117,19	100	$5,78 \times 10^{-5}$
236	119,10	100	$3,44 \times 10^{-5}$

QUADRO I

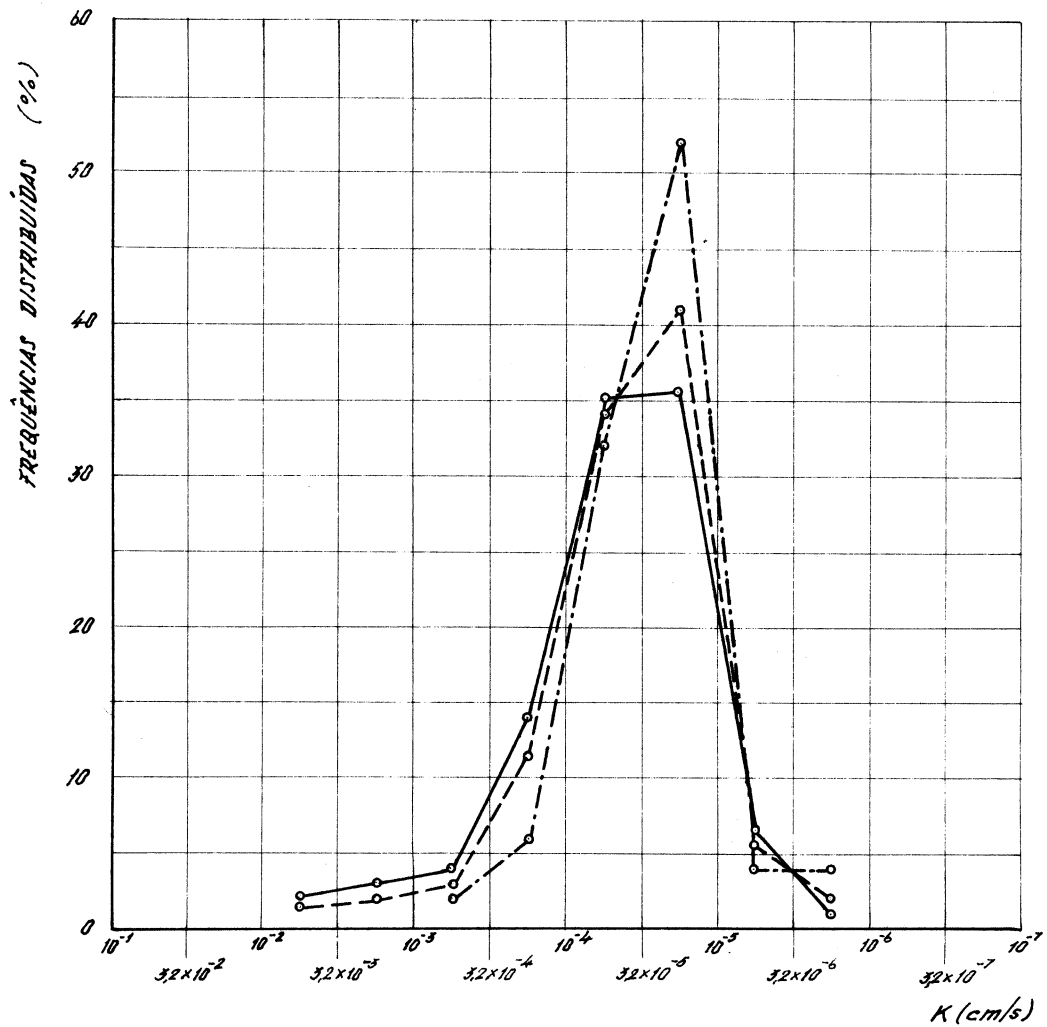
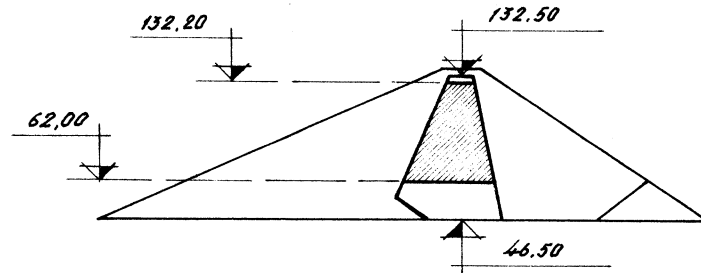
(Continuação)

Nº do furo	Cota de boca (m)	Carga variável	
		Carga inicial (cm)	Coefficiente de permeabilidade (cm/s)
237	118,45	100	$2,38 \times 10^{-5}$
238	118,50	100	$1,80 \times 10^{-5}$
239	121,31	100	$1,26 \times 10^{-4}$
240	120,59	100	$4,96 \times 10^{-5}$
241	119,80	100	$1,80 \times 10^{-5}$
242	122,66	100	$1,54 \times 10^{-5}$
243	122,00	100	$2,34 \times 10^{-5}$
244	121,85	100	$1,31 \times 10^{-5}$
245	123,97	100	$3,47 \times 10^{-5}$
246	123,80	100	$2,43 \times 10^{-5}$
247	124,00	100	$1,10 \times 10^{-4}$
248	126,33	100	$8,23 \times 10^{-5}$
249	125,71	100	$3,16 \times 10^{-5}$
250	125,50	100	$2,16 \times 10^{-5}$
251	127,84	100	$1,51 \times 10^{-5}$
252	127,06	100	$4,02 \times 10^{-5}$
253	126,53	100	$6,36 \times 10^{-5}$
254	129,52	100	$1,55 \times 10^{-5}$
255	128,38	100	$2,09 \times 10^{-5}$
256	127,91	100	$1,14 \times 10^{-5}$
257	131,11	100	$2,09 \times 10^{-6}$
258	129,00	100	$2,69 \times 10^{-5}$
259	129,90	100	$2,60 \times 10^{-5}$
260	132,32	100	$2,06 \times 10^{-5}$
261	131,56	100	$5,95 \times 10^{-5}$
262	131,20	100	$1,80 \times 10^{-5}$

QUADRO II - RESULTADOS DE ENSAIOS LABORATORIAIS EM AMOSTRAS COLHIDAS NAS ZONAS XISTOSAS DE MONTANTE E JUSANTE

Nº Amostra	Cota (m)	X (m)	Y (m)	Tensão aplicada (kg/cm ²)		K Coeficiente de permeabilidade (cm/s)
				Câmara	Base	
L.N.E.C. D.G.S.H.						
6197	106,60	552,71	220,86	2,0	1,0	$1,15 \times 10^{-6}$
6199	"	"	"	2,0	1,0	$2,70 \times 10^{-6}$
6497	110,54	527,26	167,63	1,0	0,5	$1,40 \times 10^{-5}$
6498	"	"	"	2,0	0,75	$3,40 \times 10^{-6}$
6499	"	"	"	3,0	1,00	$1,70 \times 10^{-6}$
6500	"	"	"	2,5	0,60	$1,70 \times 10^{-6}$

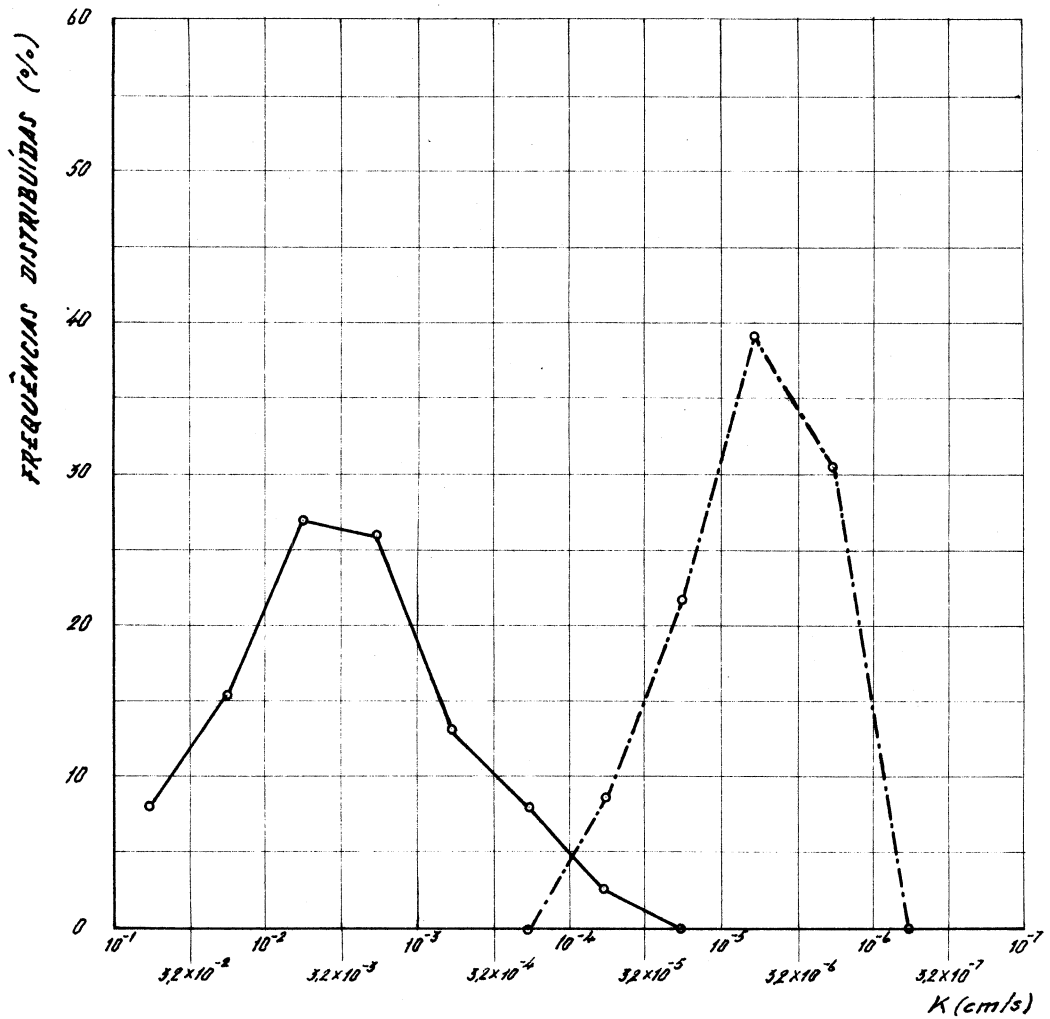
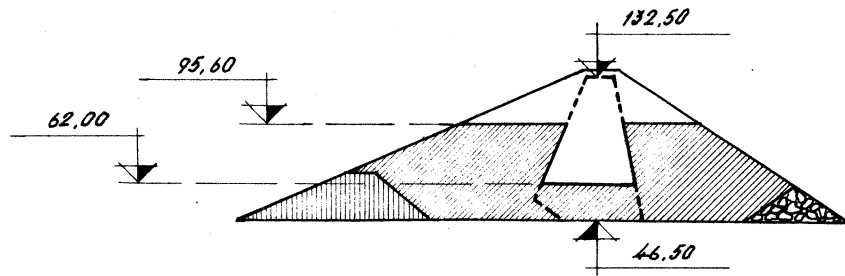
F I G U R A S



L E G E N D A

- | | | | | |
|----|---------|------------------------------|-------|----------|
| a) | —○—○— | FUROS 70 A 211 (107 ENSAIOS) | FUROS | COTAS |
| b) | -○-○-○- | FUROS 212 A 262 (50 ENSAIOS) | 70 | 62,00 m |
| c) | -○-○-○- | FUROS 70 A 262 (157 ENSAIOS) | 211 | 107,50 m |
| | | | 262 | 131,20 m |
- ESPESSURA DA CAMADA A COMPACTAR - 0,40 m

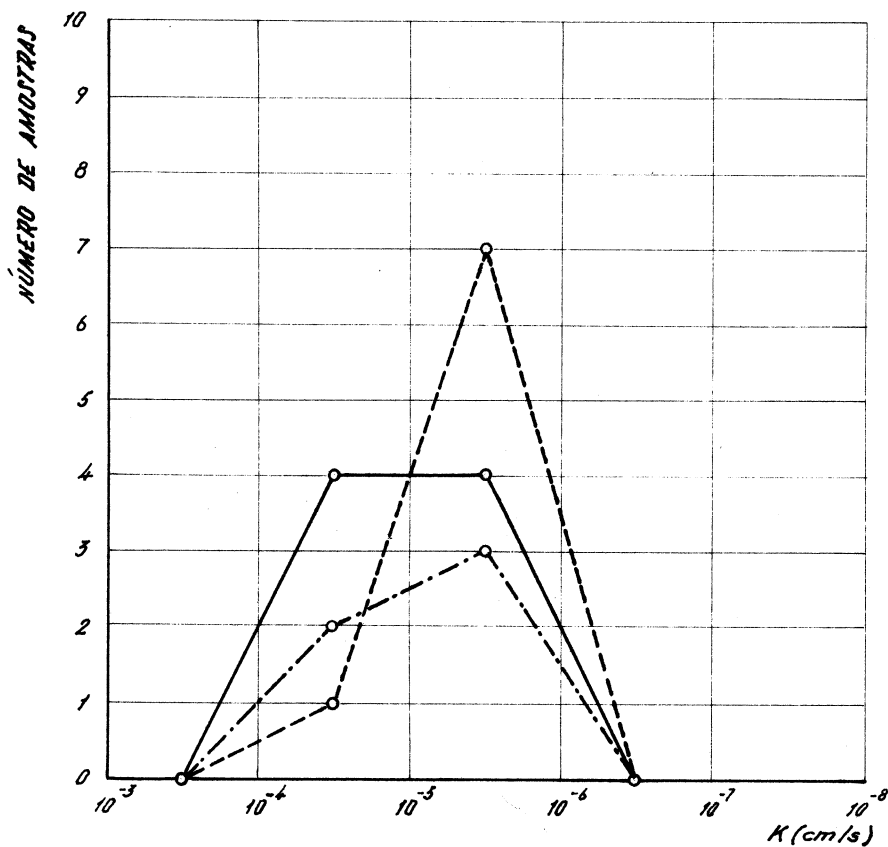
FIG.1 - SOLOS ARGILOSOS - NÚCLEO CENTRAL - ENSAIOS DE CAMPO - ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS OBTIDOS PARA O VALOR DE K



L E G E N D A

- a) —○— ENSAIOS DE CAMPO (77 ENSAIOS)
 b) - -○- - ENSAIOS DE LABORATÓRIO (23 ENSAIOS)
 ESPESSURA DA CAMADA A COMPACTAR - 0,60 m

FIG. 2 - SOLOS XISTOSOS. ANÁLISE ESTATÍSTICA COMPARATIVA DOS RESULTADOS OBTIDOS PARA O VALOR DE K EM ENSAIOS DE CAMPO E EM ENSAIOS DE LABORATÓRIO

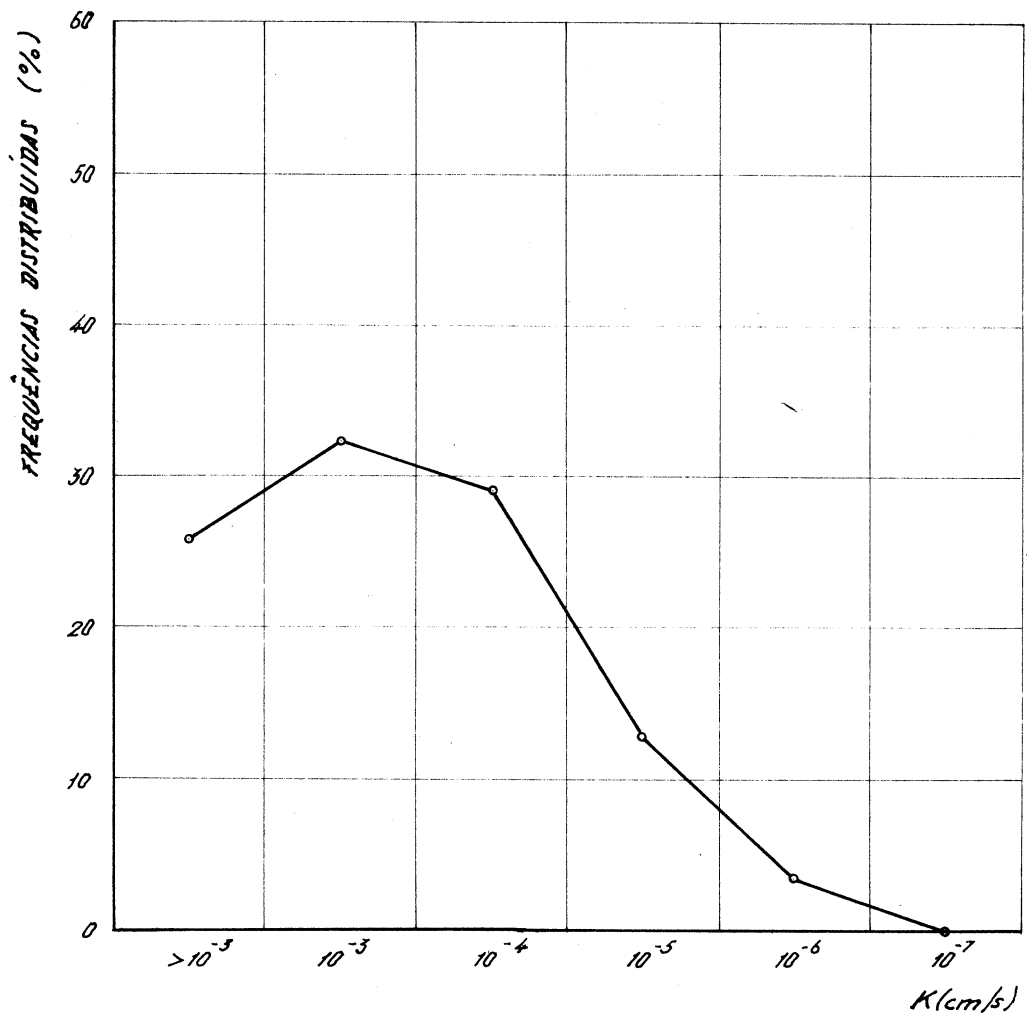


L E G E N D A

- a) —○—○— PRESSÃO DE CONFINAMENTO $1,0 \text{ kg/cm}^2$
- b) -○-○- PRESSÃO DE CONFINAMENTO $1,5 \text{ kg/cm}^2$
- c) --○--○-- PRESSÃO DE CONFINAMENTO $2,0 \text{ kg/cm}^2$

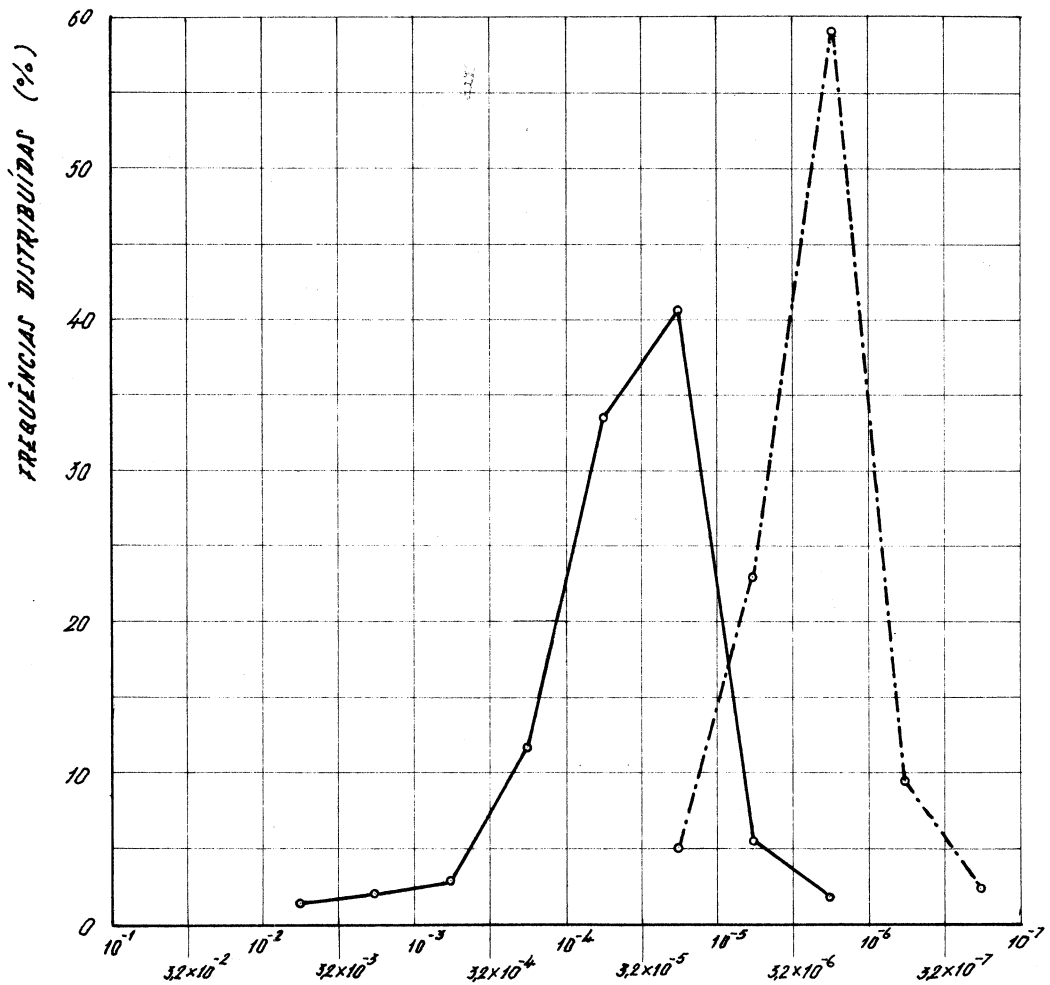
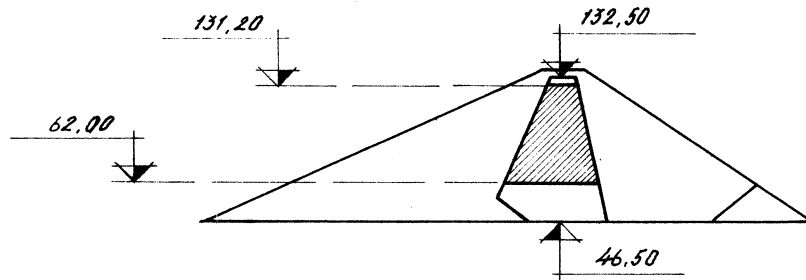
TOTAL DE AMOSTRAS ENSAIADAS - 21

FIG. 3 - SOLOS XISTOSOS - MEDIÇÃO DO COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE EM AMOSTRAS INTACTAS. POSSÍVEL INFLUÊNCIA DA PRESSÃO DE CONFINAMENTO NO VALOR DE GRANDEZA A MEDIR



NÚMERO DE CAMADAS ENSAIADAS - 31

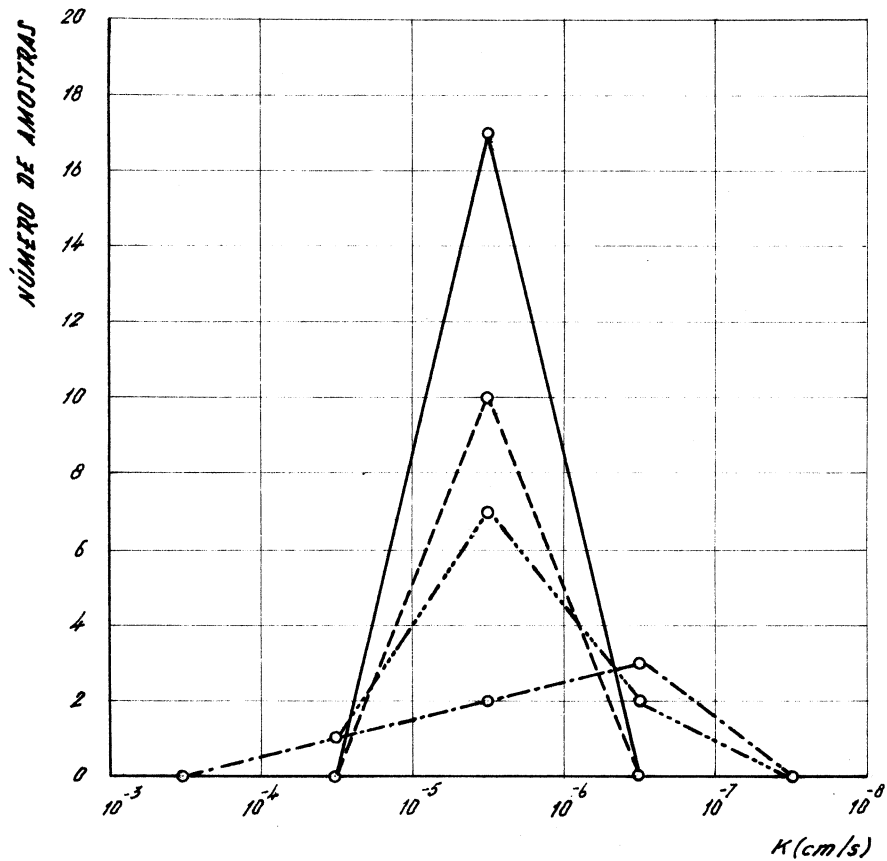
FIG. 4 - SOLOS XISTOSOS - FURROS DAS SONDAGENS P₁, P₂ E P₃



L E G E N D A

- a) —○—○— ENSAIOS DE CAMPO (107 ENSAIOS)
 - b) - -○- - -○- - ENSAIOS DE LABORATÓRIO (43 ENSAIOS)
- ESPESSURA DA CAMADA A COMPACTAR 0,40 m

FIG. 5 - SOLOS ARGILOSOS - NÚCLEO CENTRAL. ANÁLISE ESTATÍSTICA COMPARATIVA DOS RESULTADOS OBTIDOS PARA O VALOR DE K EM ENSAIOS DE CAMPO E EM ENSAIOS DE LABORATÓRIO

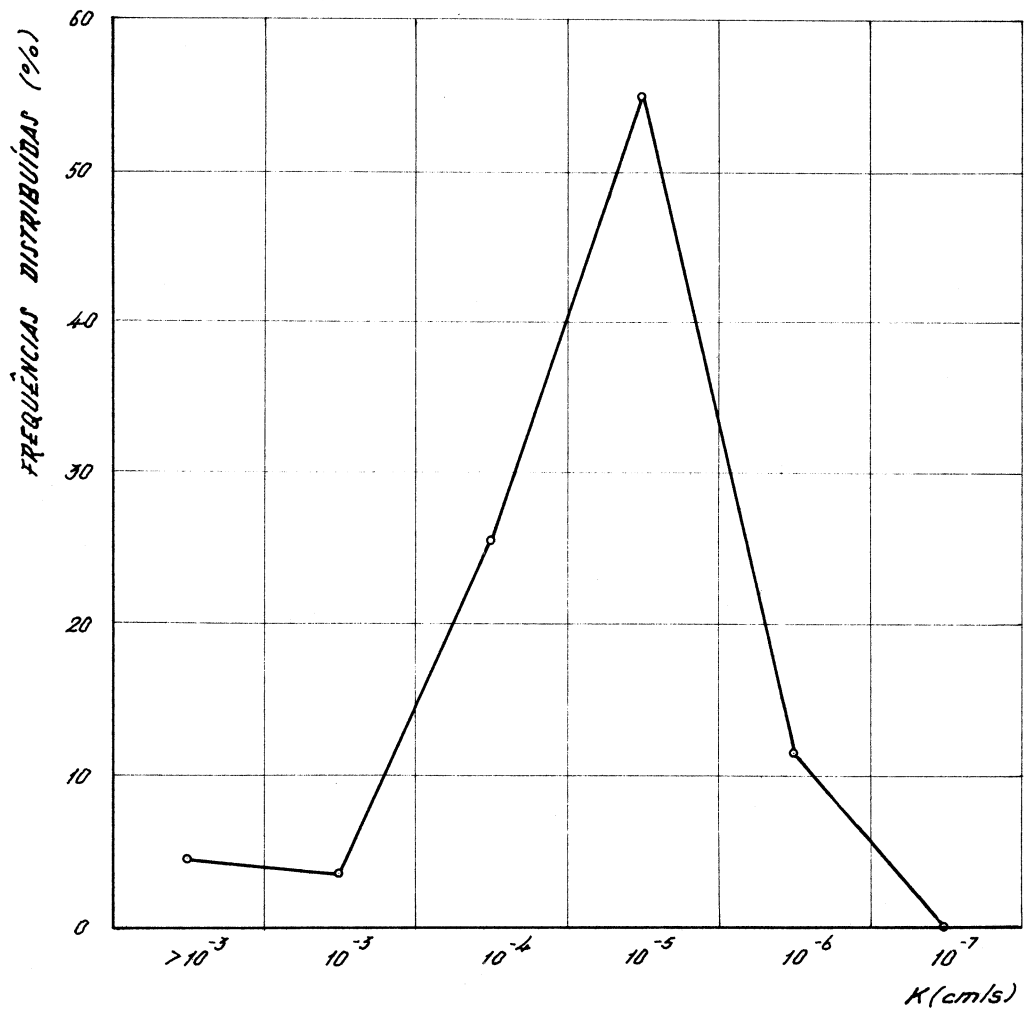


L E G E N D A

- a) —○—○— PRESSÃO DE CONFINAMENTO 1,0 kg/cm²
 b) - -○- - -○- PRESSÃO DE CONFINAMENTO 1,5 kg/cm²
 c) - -○- - -○- PRESSÃO DE CONFINAMENTO 2,0 kg/cm²
 d) - -○- - -○- PRESSÃO DE CONFINAMENTO 2,5 kg/cm²

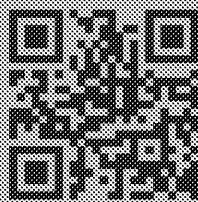
TOTAL DE AMOSTRAS ENSAIADAS - 45

FIG. 6 - SOLOS ARGILOSOS - MEDIÇÃO DO COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE EM AMOSTRAS INTACTAS. POSSÍVEL INFLUÊNCIA DA PRESSÃO DE CONFINAMENTO NO VALOR DE GRANDEZA A MEDIR



NÚMERO DE CAMADAS ENSAIADAS - 86

FIG. 7 - SOLOS ARGILOSOS - FUROS DAS SONDAGENS P₄ E P₅



www.lnec.pt

AV. DO BRASIL 101 • 1700-066 LISBOA • PORTUGAL
tel. (+351) 21 844 30 00
lnec@lnec.pt • www.lnec.pt