

# UM CASO DE ESCORREGAMENTO DE CAIXÕES DE BETÃO SOBRE UM LEITO DE ENROCAMENTO

## A case of sliding of concrete caissons on a rock fill foundation

por  
CAMPOS E MATOS A  
ALVES PAULA J.A.

RESUMO: Com referência a um caso de escorregamento de caixões de betão armado sobre um leito de enrocamento faz-se uma análise das possíveis causas do acidente e descrevem-se os ensaios realizados para a medição directa do coeficiente de atrito entre um caixão e a sua fundação.

SYNOPSIS: Concerning to sliding of concrete caissons on a rock fill foundation, the possible causes of the accident are analysed and the tests carried on to estimate directly the friction value between a caisson and its foundations are also described.

### 1 - INTRODUÇÃO

Para a construção de um cais acostável nos estaleiros da LISNAVE, na Margueira, projectou a empresa CONSTRUÇÕES TÉCNICAS, SARL, uma obra de retenção contínua, formada por uma cortina de 34 caixões cilíndricos de betão armado, cujo esquema geral e dimensões se apresentam nas fig. 1 e 2.

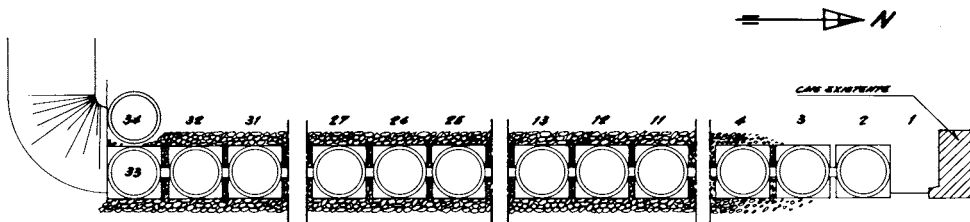


Figura 1 - Planta geral do cais

Na construção dos caixões utilizou-se a técnica dos moldes deslizantes, fazendo-se cerca de 70% do deslizamento com o caixão em flutuação. O esquema geral da construção era o seguinte:

\*Eng.º Civil Prof. da Faculdade de Engenharia da U.P.

\*\*Eng.º Civil de Construções Técnicas, SARL

- a) construção da sapata em estaleiro previamente preparado;
- b) montagem do molde deslizante;
- c) betonagem deslizada das paredes até uma altura de cerca de 4 m (altura limitada superiormente pelo peso do conjunto -máx. 100- e inferiormente por condições de estabilidade de flutuação);
- d) colocação do caixão em flutuação, por intermédio duma grua flutuante com capacidade máxima de carga de 100 t;
- e) conclusão da betonagem deslizada das paredes, com o caixão em flutuação, acompanhada de lastragem;
- f) desmontagem do molde;
- g) reboque do caixão para o local de implantação e afundamento do mesmo sobre a base de enrocamento previamente preparada.

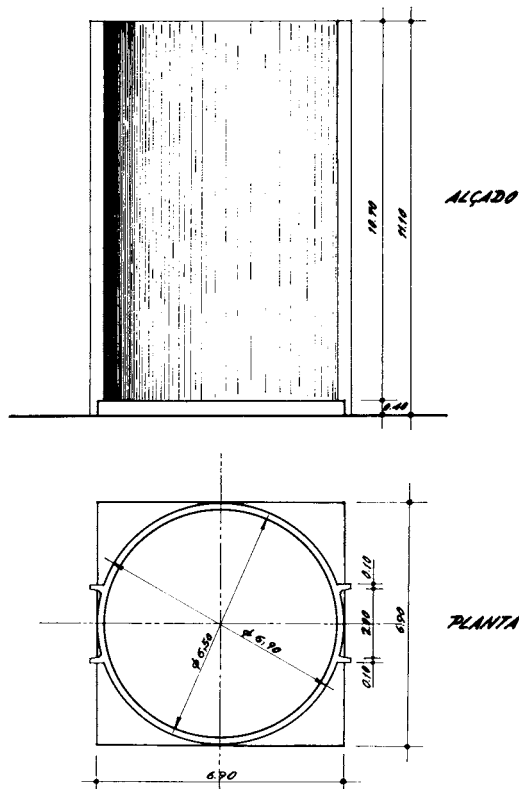


Figura 2 - Dimensões dos caixões

No decorrer da obra, durante a fase de execução dos aterros, verificaram-se deslocamentos dos caixões, no sentido do mar que atingiram valores da ordem dos 50-60 cm.

Dado que as geratrizes dos cilindros se mantiveram perfeitamente verticais, pôde concluir-se, sem qualquer dúvida, que se tratava dum escorregamento dos caixões sobre o leito de enrocamento.

Este movimento podia, em princípio, ser consequência duma (ou várias) das seguintes causas:

- a) impulso horizontal actuante sobre os caixões muito superior ao previsto nos cálculos;
- b) peso efectivo dos caixões muito inferior ao calculado;
- c) coeficiente de atrito entre o betão da sapata dos caixões e o enrocamento muito inferior ao admitido;
- d) coeficiente de segurança insuficiente.

Uma análise de todas estas possíveis causas de escorregamento dos caixões consta dos números que seguem.

## 2 - ANÁLISE DAS CAUSAS DO ESCORREGAMENTO

2.1 - Estava previsto que o aterro do terrapleno seria realizado com areia, para a qual se admitiu nos cálculos um ângulo de atrito interno de  $30^{\circ}$ , mas razões de circunstância levaram à utilização de areolas provenientes de escavações efectuadas nas proximidades.

As areolas utilizadas, embora apresentassem uma grande coesão no estado natural (seco), dada a sua apreciável permeabilidade liquefaziam-se rapidamente, em contacto com a água, ao serem basculadas para a bacia a aterrar. No estado saturado, apresentavam uma coesão nula e um ângulo de atrito interno da ordem de  $20^{\circ}$ .

O aumento do impulso correspondente a esta modificação de condições é da mesma ordem de grandeza do coeficiente de segurança admitido, pelo que se concluiu imediatamente que o acidente resultou da substituição do material de aterro.

Embora esta conclusão esclareça as condições em que se deu o acidente, entendeu-se que continuava a justificar-se o exame das restantes possíveis causas anteriormente referidas.

2.2 - Em relação ao peso efectivo dos caixões, embora bem avaliado no projecto, cabe fazer uma observação.

Entende-se que este peso não pode deixar de ser considerado uma grandeza aleatória e por isso deve, no cálculo da estabilidade ao escorregamento, ser

afectado dum conveniente coeficiente de redução, coeficiente que poderá estar im  
plícito no valor do coeficiente global de segurança a adoptar.

Note-se, com efeito, que se trata dum cilindro ôco cujo peso é obtido  
pela diferença entre o peso emerso (P) e a impulsão da água (I), grandezas que  
podem variar independentemente. Deste modo, um erro de valor  $\alpha$  em cada uma das  
duas grandezas pode conduzir, na diferença, a um erro de valor:

$$\alpha' = \frac{P + I}{P - I} \cdot \alpha$$

E, para valores de I não muito diferentes de P,  $\alpha'$  pode ser substancialmente  
maior que  $\alpha$

Justifica-se admitir para  $\alpha$  um valor da ordem de 5%, o que conduz, nas  
condições do problema em estudo, a valores de  $\alpha'$  superiores a 10%. Parece pois  
indispensável, quando se trabalhe com coeficientes globais de segurança ao escor  
regamento pequenos, afectar o peso dos caixões dum coeficiente de redução a jus-  
tificar de acordo com a expressão anterior, mas não maior que 0,90.

2.3 - Os valores habitualmente admitidos para o ângulo de atrito entre o betão e  
enrocamento situam-se entre 0,6 e 0,7.

Dado que são raras as referências a este assunto na bibliografia técni  
ca, pareceu de interesse a realização dum ensaio de medição directa, provocando o  
escorregamento dum cilindro colocado sobre o seu leito de enrocamentos e medin  
do a força aplicada. Acontecia ainda, no caso em estudo, que, por terem esta-  
do alguns cilindros a flutuar em águas mortas durante dois a três meses, se ti-  
nha acumulado apreciável quantidade de limos no fundo e não era possível ava-  
liar em que medida este facto afectava o atrito.

Os ensaios efectuados e os resultados obtidos são pormenorizadamente des  
critos no próximo capítulo, mas pode registar-se desde já que os valores do coe  
ficiente de atrito medidos são da ordem de grandeza de 0,5, portanto significati-  
vamente inferiores aos valores habitualmente admitidos. E cabe ainda fazer a obser  
vação seguinte: dado que o ângulo de atrito interno dos maciços de enrocamento

é sempre maior que o ângulo de atrito entre betão e enrocamento, justifica-se que o fundo dos caixões, em vez de ser plano, como é habitualmente, apresente uma forma tal que, impedindo os escorregamentos ao longo do seu plano, obrigue a que qualquer escorregamento, a dar-se, mobilize a resistência do maciço de enrocamento.

2.4 - A justificação do valor do coeficiente de segurança num caso de escorregamento dum caixão sobre a sua fundação é problema muito complexo a que aqui não podemos fazer senão uma ligeira referência.

O valor a adoptar dependerá, fundamentalmente, da definição estatística das grandezas que condicionam a estabilidade ao escorregamento:

- impulso do aterro, função das características das terras e do estado de equilíbrio atingido;
- atrito entre o fundo do caixão e a fundação;
- peso efectivo do caixão.

Se nos cálculos de estabilidade se fazem intervir valores destas grandezas cuja probabilidade de se verificarem (no sentido desfavorável) seja suficientemente pequena, pode justificar-se um coeficiente de segurança de 1,5. Entende-se no entanto que, nas condições em que é feita habitualmente a definição das referidas grandezas, é indispensável trabalhar com um coeficiente de segurança de valor compreendido entre 2 e 3 ou seja, em termos médios, 2,5.

### 3 - ENSAIOS REALIZADOS

3.1 - Escolheu-se para realizar o ensaio o cilindro n.º 33, situado no extremo sul do cais (fig. 1).

Este cilindro foi posicionado a uma distância de cerca de 1 metro do cilindro n.º 32, no alinhamento do paramento do cais (fig. 3).

Decidiu-se que o esforço -e, por consequência, o movimento- se fariam nessa direcção e no sentido sul, perpendicularmente, portanto, ao esforço resultante do impulso de terras.

Tal direcção foi escolhida por ser aquela a que correspondia maior facilidade de execução do ensaio (por ser imediata a obtenção de reacção para os macacos) e por se manterem muito aproximadamente as condições de trabalho do cais, dada a quase simetria circular dos caixões.

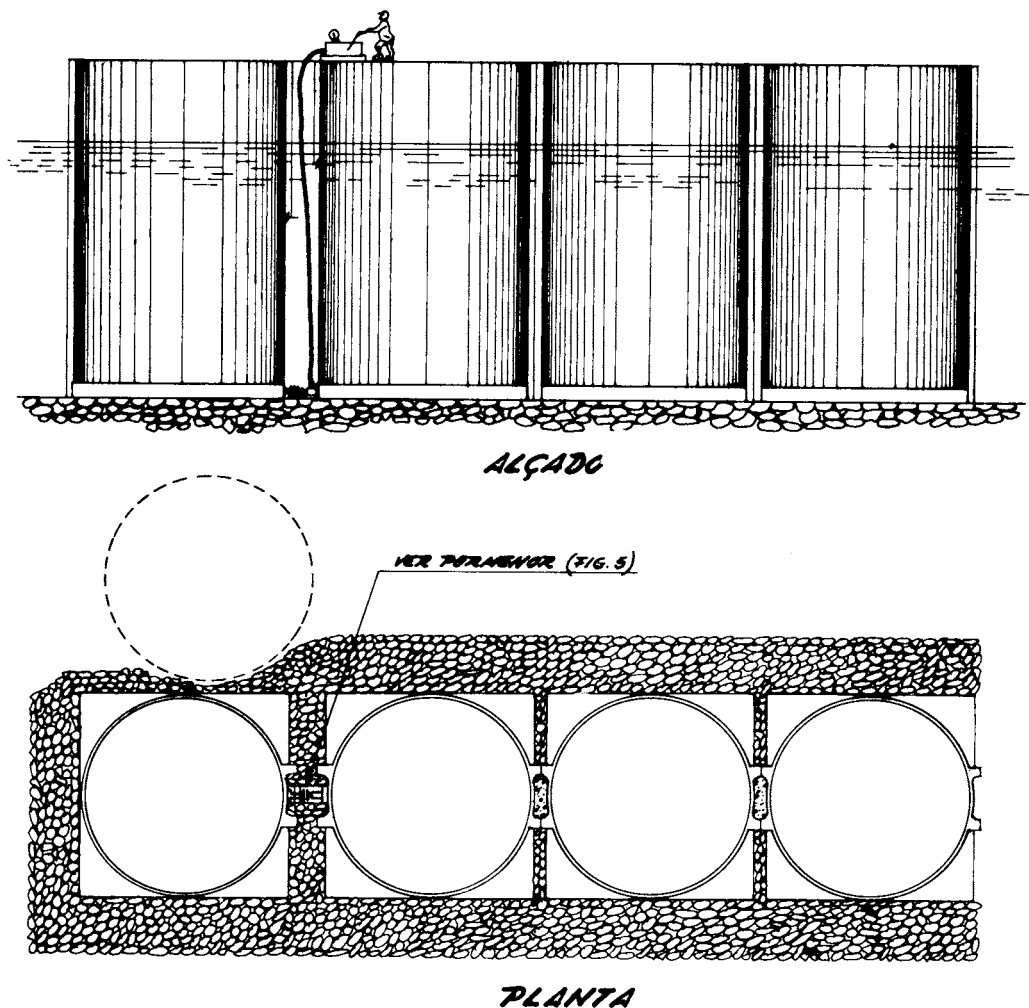


Figura 3 - Local do ensaio

3.2 - Conhecidas as características geométricas do caixão de ensaio, colocou-se o mesmo em flutuação, lastrando-o com areia e água de forma a obter estabilidade de flutuação e verticalidade das geratrizes do cilindro.

Mediu-se o calado C, o bordo livre B e a altura livre de água dentro do caixão, h.

A partir do calado, calculou-se o peso real  $P_r$  do cilindro nas condições de lastragem referidas (fig 4 a).

Afundou-se seguidamente o caixão, por adição de água. A nova medida de altura hi no interior do caixão permitiu calcular o peso real  $P_{ri}$  do cilindro afundado.

A medição da altura de água  $B_i$ , no exterior do cilindro, permitiu determinar a impulsão  $I_i$ . O peso efectivo  $P_i$  do cilindro é:

$$P_i = P_{ri} - I_i$$

Fazendo variar h (por adição ou retirada de água) e B (por variação da altura da maré) obtiveram-se diversos valores para  $P_r$  e para  $I$  e, consequentemente, para o peso  $P_i$  (fig. 4 b).

3.3 - Para aplicação do esforço horizontal recorreu-se a um macaco hidráulico accionado por bomba de óleo, manual, tendo acoplado um manómetro.

Todo este equipamento foi aferido antes dos ensaios.

Para a colocação do macaco na posição indicada na fig. 3 foi projectada e executada uma estrutura de suporte, capaz de garantir que o macaco se não movesse durante a operação, que a linha de acção da força se mantivesse o mais fixa possível e que dificultasse a tendência de rotação que o caixão pudesse apresentar durante o movimento.

Esta estrutura, representada esquemáticamente na fig.5, foi colocada no local do ensaio por meio de mergulhadores.

3.4 - O ensaio consistiu fundamentalmente em aplicar a um caixão isolado (n.º33), de peso  $P_i$  conhecido, uma força horizontal crescente até se verificar o seu es-corregamento sobre a fundação.

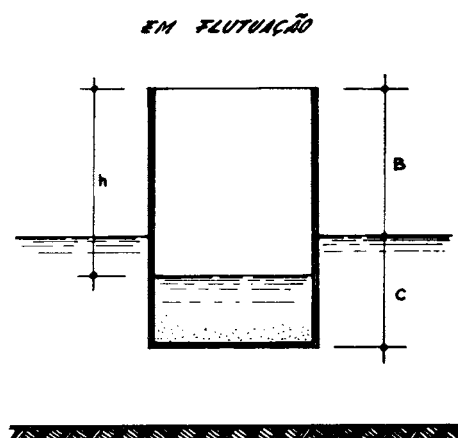


FIG 4 a

$$P_r = V = f(c)$$

$$I = P_r = f(c)$$

$$P = P_r - I = 0$$

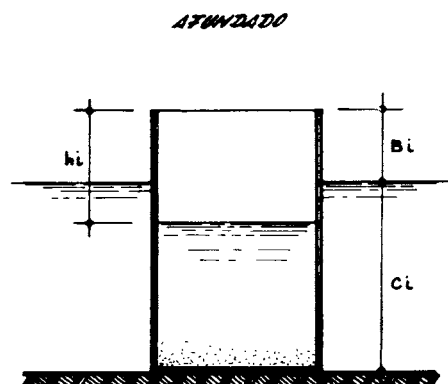


FIG 4 b

$$P_{r_i} = P_r + k(h - h_i)$$

$$I_i = f(c_i)$$

$$P_i = P_{r_i} - I_i$$

Figura 4 - Determinação do peso do caixão

Referências previamente fixadas entre o caixão móvel e um caixão fixo, permitiram detectar esse movimento.

Verificou-se, no decorrer dos ensaios, que, iniciando-se o deslocamento do cilindro quando a força aplicada atingia um certo valor, era necessário, para manter a continuidade do deslocamento, aplicar forças de valor superior. Registraram-se, por isso, em todos os ensaios, os seguintes valores da força horizontal:

- a) a força  $H_0$  para a qual se notou o início do movimento. Corresponde-lhe um valor do coeficiente de atrito em repouso

$$f_0 = \frac{H_0}{P_i}$$



Para os diversos ensaios realizados, com excepção do primeiro, este valor do coeficiente manteve-se praticamente constante e da ordem de 0,50. No gráfico anexo,  $H_0 (P_1)$ , os pontos representativos deste valor de  $f_0$  aparecem quase colineares, sobre uma recta que passa pela origem;

- b) a força  $H$  que não era necessário exceder para manter a continuidade do deslocamento. A representação gráfica dos valores do coeficiente de atrito correspondente a esta força,  $f = \frac{H}{P_1}$ , mostra uma série de pontos quase colineares, definindo uma recta aproximadamente paralela à referente ao atrito em repouso, mas não passando pela origem.

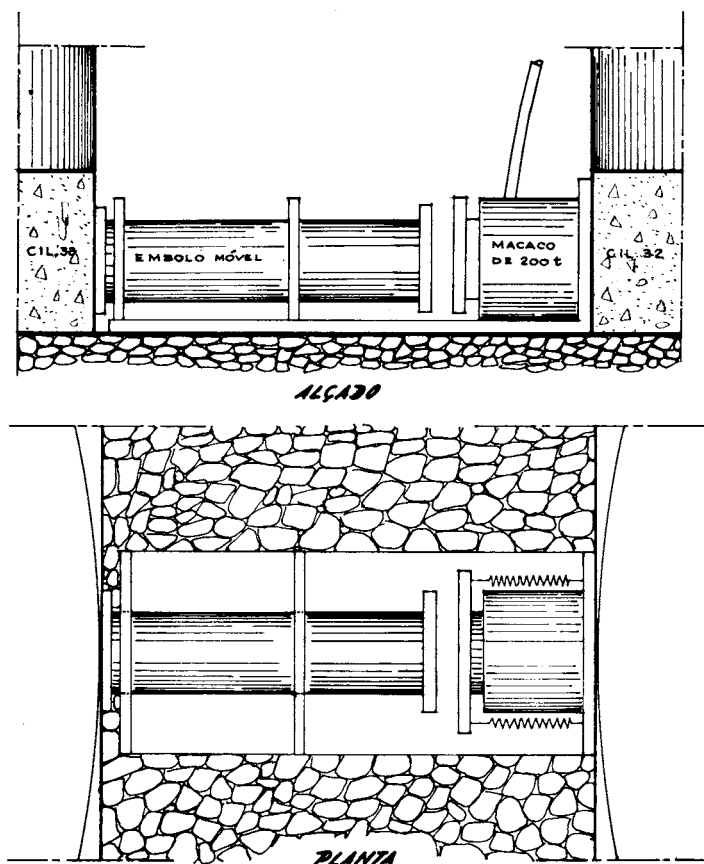


Figura 5 - Pormenor de montagem do macaco de 200 t

3.5 - O fenómeno observado não corresponde, em rigor, a um caso de atrito entre sólidos. Efectivamente, o deslocamento do caixão altera a estrutura do enrocamento, o que tem influência no valor do coeficiente de atrito.

Os resultados obtidos mostram, no entanto, que dentro das aproximações correntes no cálculo de estruturas pode admitir-se que o escorregamento dum caixão sobre uma fundação de enrocamento se processa com um coeficiente de atrito constante.

Os valores do coeficiente de atrito obtidos no primeiro ensaio (0,40-0,42) foram significativamente mais baixos que os restantes, o que se julga de ver atribuir-se a movimentos do enrocamento. Dado que o ensaio foi realizado pouco depois da colocação do caixão, sem que por isso se tivessem estabilizado os assentamentos do enrocamento (o que não corresponde ao que se passa em geral com a entrada das obras em serviço), parece que estes valores muito baixos não são de ter em conta.

Para os restantes ensaios obteve-se grande regularidade nos resultados, sendo o valor médio do coeficiente de atrito encontrado para o início do movimento do caixão de 0,50. Este valor aumentou com a progressão do deslocamento, o que parece dever atribuir-se a resistências ao movimento resultantes da elevação do enrocamento na frente do caixão, pelo que os resultados correspondentes também não são de ter em conta.

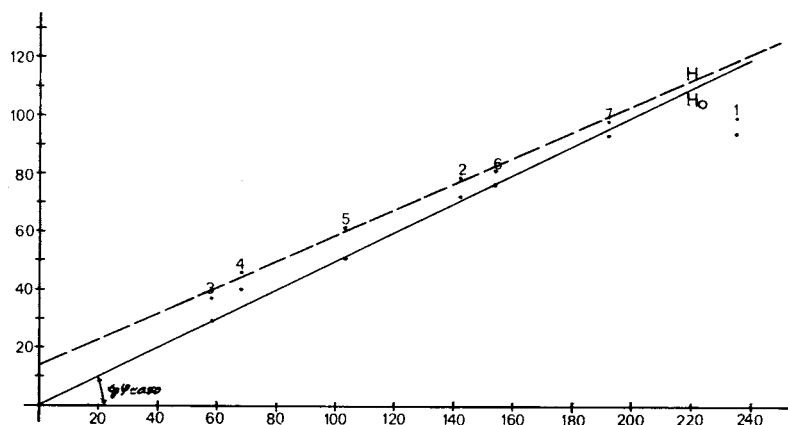


Figura 6 - Representação gráfica dos resultados dos ensaios