

MUROS DE TERRA ARMADA SUJEITOS A CARGAS LINEARES VERTICAIS

Reinforced Earth Retaining Walls Under Vertical Strip Loading

ANTÓNIO SILVA CARDOSO*
CARLOS FÉLIX**

RESUMO — Estuda-se a questão do comportamento e do dimensionamento dos muros de terra armada sujeitos a cargas lineares verticais. Para tal usa-se um modelo numérico não-linear e analisam-se os resultados obtidos em experiências com modelos reduzidos e na observação de obras à escala natural.

SYNOPSIS — The behaviour and the design of reinforced earth retaining walls under vertical strip loading are studied. It is used a non-linear numerical model and the results of model and field experimental studies are analysed and discussed.

1 — INTRODUÇÃO

Por vezes uma estrutura em terra armada serve de encontro a um viaduto ou desempenha a função de cais. Importa nestes casos analisar o seu comportamento sob a acção de cargas aplicadas no terraplano. Diversos autores (Corté, 1977, LCPC-SETRA, 1979, Laba e Kennedy, 1986, Bastick *et al.*, 1991, etc.) estudaram este assunto analisando o comportamento do maciço armado, sujeito a cargas lineares e concentradas, nomeadamente no que respeita às tracções nas armaduras e ao posicionamento do valor máximo destas.

Usando um modelo de cálculo baseado no Método dos Elementos Finitos estuda-se o comportamento de um muro de terra armada sujeito a uma carga vertical linear e uniforme, orientada na direcção normal à secção em análise, localizada em diferentes posições. Como se verá, às distintas distâncias ao paramento correspondem comportamentos diversos do maciço armado. Os resultados obtidos são comparados com os previstos por outros autores e pelos métodos correntes de dimensionamento. Esses resultados são também comparados com os observados em obras reais.

* Engenheiro Civil, Professor Auxiliar da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

** Engenheiro Civil, Assistente do Instituto Superior de Engenharia do Instituto Politécnico do Porto e colaborador do GEG - Gabinete de Estruturas e Geotecnia, Ld^ª.

2 — APLICAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO BASEADO NO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

2.1 – Características gerais do modelo numérico

Admitindo como válidas as condições associadas ao estado plano de deformação, na análise do comportamento do muro de terra armada usou-se um modelo numérico bidimensional, baseado no Método dos Elementos Finitos, que foi originalmente desenvolvido por Clough e Duncan (1971) e, posteriormente, modificado por Cardoso (1987). Este programa utiliza elementos finitos subparamétricos quadrangulares de 5 nós (Doherty, Wilson e Taylor, 1969) e permite a simulação da construção do maciço armado por incrementos assim como da aplicação de cargas distribuídas.

O comportamento não-linear dos materiais (aterro e maciço de fundação) é simulado através da formulação hiperbólica desenvolvida por Duncan e Chang (1970).

Para a simulação das interfaces entre os distintos materiais usam-se elementos de junta formulados por Goodman, Taylor e Brekke (1968). A caracterização do comportamento mecânico dessas interfaces baseia-se na hipótese de uma relação hiperbólica entre as tensões tangenciais e os deslocamentos, originalmente introduzida por Clough e Duncan (1971).

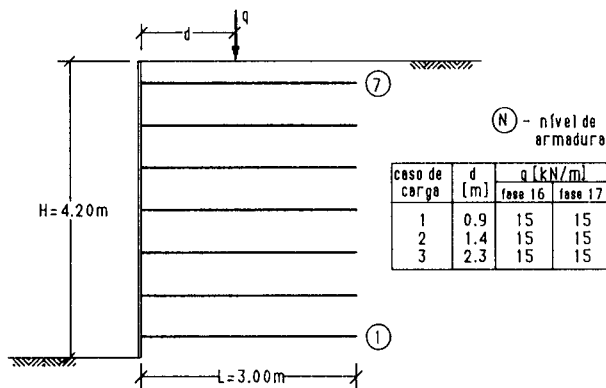


Fig. 1 — Geometria do muro de terra armada e localização da sobrecarga linear vertical

2.2 – Características do muro adoptado

Para o estudo que se segue considera-se o muro de terra armada com a forma e dimensões especificadas na Fig. 1. Em planta as armaduras estão afastadas de $e_h = 0.76m$. Pela sua geometria e dimensões o muro considerado respeita as premissas dos métodos correntes de dimensionamento.

As características dos materiais e interfaces adoptadas nos cálculos são as correspondentes a uma areia compacta e a armaduras metálicas e estão descritas em Félix (1991) e Félix e Cardoso (1992). Simula-se o processo construtivo por colocação sucessiva de camadas de aterro e de armaduras, num total de 15 fases construtivas. A estas fases sucede-se a aplicação da carga vertical linear, também por fases.

2.3 – Metodologia do estudo

Optou-se por um carregamento faseado para evitar eventuais efeitos locais de aumento ou diminuição brusca da deformabilidade dos elementos contíguos ao ponto de aplicação da carga linear, os quais podem dificultar o processo iterativo do modelo numérico não-linear. Por outro lado, obtém-se deste modo mais informação acerca da evolução do estado de tensão e de deformação no maciço armado e solo envolvente.

Assim dividiu-se a carga em dois incrementos (fases 16 e 17 do cálculo) de 15kN/m cada, totalizando uma carga linear $q = 30\text{kN/m}$.

No que respeita à posição da carga consideraram-se os três casos indicados na Fig. 1. Para cada posicionamento da carga obtiveram-se os resultados, concernentes aos estados de tensão e de deformação induzidos nas armaduras e no maciço envolvente, que se passam a descrever.

2.4 – Tracções máximas nas armaduras

Para analisar convenientemente as tracções máximas nas armaduras, convirá começar por averiguar quais são os acréscimos de impulso no paramento devidos apenas à solicitação aplicada. Nesse sentido, indicam-se no Quadro I as resultantes, R , dos acréscimos de impulso actuantes no paramento devidos apenas à acção da sobrecarga linear $q=30\text{kN/m}$, bem como as profundidades a que se encontram os respectivos pontos de aplicação.

Como seria de esperar, quanto mais próximo do paramento se situa a carga mais importantes são os acréscimos de impulso nos níveis superiores de armaduras. À medida que d aumenta, aqueles acréscimos máximos não só diminuem de valor, como também vão ocupar profundidades sucessivamente crescentes. Este facto é evidenciado pelo decréscimo do valor da resultante bem como pela evolução do seu ponto de aplicação.

Os acréscimos de impulso sobre o paramento são naturalmente equilibrados por aumentos das tracções nas armaduras junto das suas ligações àquele; estes acréscimos seguem padrões semelhantes aos ilustrados no Quadro I.

QUADRO I

Caso de Carga	d (m)	Incremento dos impulsos junto ao paramento devido apenas à aplicação da sobrecarga	
		Valor da resultante (kN/m)	Distância do ponto de aplicação ao topo do muro (m)
1	0,9	23,9	1,96
2	1,4	18,2	2,13
3	2,3	13,9	2,60

Por outro lado, a evolução das tracções máximas nas armaduras, embora também esteja ligada à variação dos impulsos sobre o paramento, depende ainda das deformabilidades do solo e das interfaces entre este e as armaduras, as quais variam com a profundidade e com o nível de tensão. Apresentam-se na Fig. 2 as tracções máximas nas armaduras no final da construção do maciço armado (fase 15 do cálculo) e após a aplicação da totalidade da sobrecarga linear $q=30\text{kN/m}$ (fase 17 do cálculo) a diversas distâncias do paramento (d igual a 0,9m, 1,4m e 2,3m). As variações das tracções máximas nas armaduras para os diferentes casos de carga são dadas, em cada caso, pelas diferenças entre a curva respectiva na fase 17 do cálculo e a correspondente ao final da construção (fase 15 do cálculo).

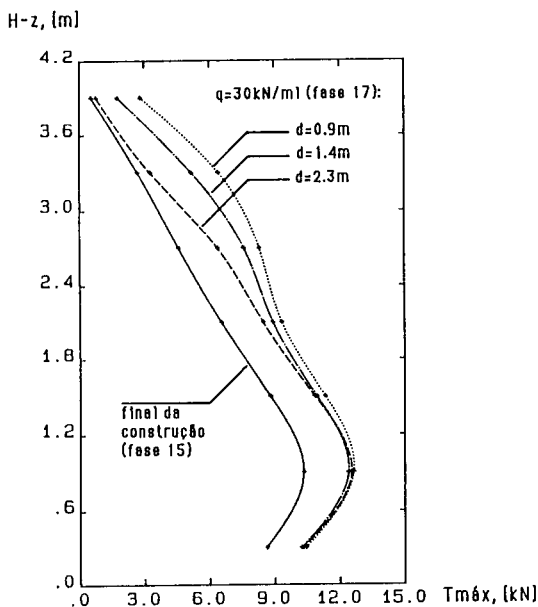


Fig. 2 — Tracções máximas nas armaduras no final da construção e após a aplicação da sobrecarga linear vertical

A observação da Fig. 2 permite constatar o seguinte: i) — nos níveis superiores de armaduras a tracção máxima aumenta quando d diminui; ii) — nos níveis inferiores a tracção máxima varia pouco com d ; iii) — ainda no que respeita aos níveis inferiores, verifica-se um ligeiro aumento da máxima tracção para $d=2,3\text{m}$, invertendo-se, embora muito pouco significativamente, o comportamento relativamente às cotas mais elevadas.

Pode, então, concluir-se que, para o dimensionamento de um muro de terra armada sujeito a solicitações idênticas à simulada, e no que respeita às armaduras dos níveis inferiores, mais importante que o posicionamento da carga, é determinante o seu valor. Em contrapartida, para os níveis superiores, além do valor da carga, importa o seu posicionamento, surgindo tracções máximas mais importantes quanto mais perto do paramento a carga for aplicada.

Note-se, por outro lado, que os resultados obtidos mostram que, mesmo quando a carga é aplicada muito próximo do paramento, a maior variação das tracções máximas não ocorre nas armaduras mais próximas da superfície. Tal deve resultar do facto de essa zona do maciço ser

a mais deformável bem como ser aquela onde as rigidezes das interfaces entre o solo e as armaduras são menores. O compromisso entre os impulsos actuantes no paramento e as rigidezes dos vários componentes do maciço armado faz com que as maiores variações das tracções máximas ocorram nos níveis de armaduras localizados a uma certa distância da superfície do terrapleno.

Fica assim clara, mais uma vez, a necessidade de, na simulação dos maciços reforçados, considerar adequadamente os efeitos da profundidade e do nível de tensão sobre as deformabilidades do solo e das suas interfaces com as armaduras.

Na Fig. 3 apresentam-se as evoluções das posições dos valores máximos das tracções nas armaduras, para as três distâncias ao paramento consideradas. A posição inicial, isto é, no final da construção (fase 15 do cálculo), da superfície que passa pelas secções das armaduras onde são máximas as tracções está representada a cheio; as superfícies correspondentes às fases em que se aplicam metade e a totalidade da sobrecarga linear estão representadas, respectivamente, a traço-ponto e a tracejado.

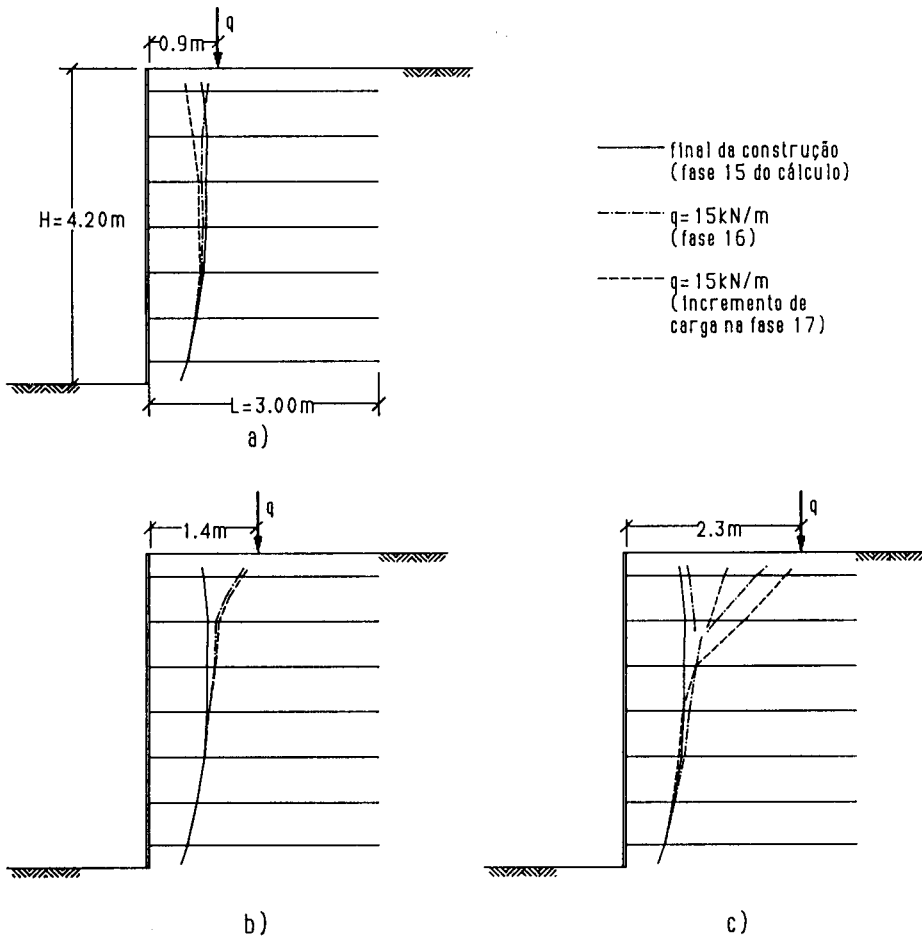


Fig. 3 — Evolução da superfície lugar geométrico das secções onde ocorrem as tracções máximas nas armaduras

Da observação dessa figura, conjuntamente com a Fig. 2 e com o Quadro I, surgem de uma forma clara os seguintes aspectos:

- i) Nas armaduras dos níveis inferiores a posição das tracções máximas é pouco sensível ao valor da carga bem como à distância do seu ponto de aplicação ao paramento, confundindo-se a superfície das tracções máximas com a obtida no final da construção.
- ii) Para valores de d pequenos ($d = 0,9m$) são importantes os impulsos aplicados na parte superior do paramento. Sendo nesta zona baixa a rigidez das interfaces solo-armaduras, o diagrama dos acréscimos de tracção tende a ser triangular, com valor máximo junto ao paramento e nulo na extremidade livre. Este diagrama, sobreposto com o já instalado no final da construção, acarreta por consequência a aproximação das tracções máximas para junto do paramento.
- iii) Para valores intermédios de d ($d = 1,4m$), e para os níveis superiores, o diagrama dos acréscimos de tracção a sobrepor tem já valor máximo na direcção do ponto de aplicação da carga, sendo menores as tracções nas ligações ao paramento. Surge assim uma linha de posicionamento das tracções máximas que, para os níveis superiores, se alinha sensivelmente na direcção do ponto de aplicação da sobrecarga.
- iv) Para valores elevados de d ($d = 2,3m$) e ainda para os níveis superiores, o diagrama dos acréscimos de tracção a sobrepor ao já instalado no final da construção, tende a ser triangular, com um máximo na direcção do ponto de aplicação da sobrecarga e com valores nulos ou muito reduzidos em ambas as extremidades. O posicionamento deste máximo, devido apenas à sobrecarga, numa zona onde inicialmente as tracções devidas ao peso próprio são reduzidas dá origem a um máximo local. Por outro lado, mantém-se um outro valor máximo numa zona mais próxima do paramento devido ao peso próprio do maciço armado, agora sucessivamente arrastada para o seu interior à medida que aumenta o valor da sobrecarga.

Resultados referentes à posição das tracções máximas qualitativamente idênticos aos descritos foram obtidos, por exemplo, por Corté (1977).

3 — DISCUSSÃO SOBRE OS ACRÉSCIMOS DE TRACÇÃO NAS ARMADURAS PROVOCADOS POR SOBRECARGAS VERTICAIS LINEARES

3.1 – Introdução

Com o objectivo de melhor compreender o efeito das sobrecargas sobre os esforços nas armaduras revêm-se em seguida alguns resultados, experimentais e analíticos, publicados na bibliografia. Em primeiro lugar resumem-se alguns resultados experimentais obtidos em ensaios com modelos reduzidos e na observação de obras à escala natural. Referem-se depois os resultados obtidos em análises por elementos finitos procurando fazer sobressair a influência das condições de modelação nas conclusões que se retiram desses estudos.

3.2 – Resultados experimentais

Laba e Kennedy (1986) realizaram vários ensaios em modelo reduzido com os quais procuraram estudar o efeito das sobrecargas sobre as tracções nas armaduras. A Fig. 4a ilustra a montagem utilizada nos ensaios; nessa figura indicam-se também as posições das sobrecargas consideradas nos ensaios.

Na Fig. 4b representam-se os resultados dos ensaios, ou seja, as tracções máximas induzidas nas armaduras pelas sobrecargas aplicadas. Esses resultados mostram muito claramente que:

- i) as tracções máximas dependem da posição da sobrecarga, sendo, naturalmente, tanto maiores quanto mais próxima do paramento se localizar aquela; porém a influência da posição da sobrecarga é muito mais marcada nas armaduras superiores do que nas inferiores;
- ii) para uma dada posição da sobrecarga, a mais elevada das tracções máximas nunca aparece nos níveis da armaduras superiores; com efeito, essa tracção instala-se em níveis localizados a uma certa profundidade em relação à superfície do terraplano (onde estão aplicadas as sobrecargas), em regra, tanto maior quanto mais afastada do paramento estiver aplicada a sobrecarga.

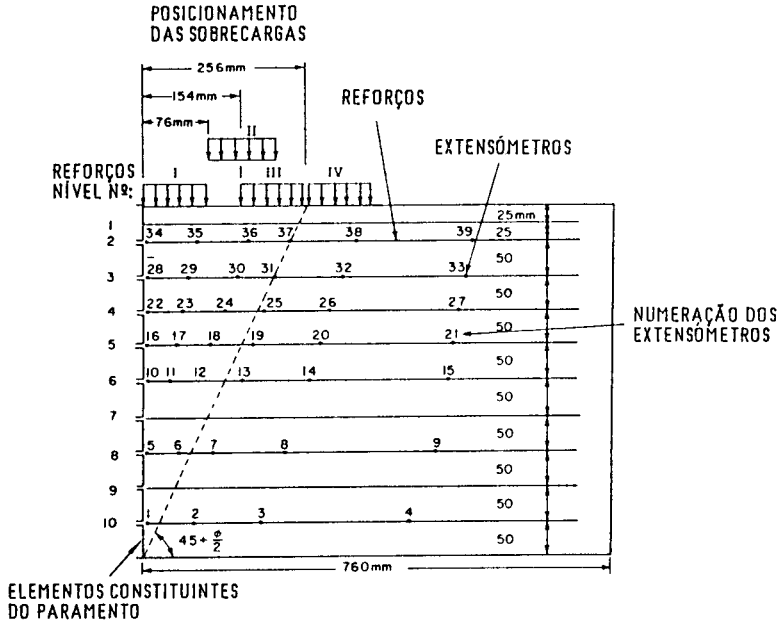
É de realçar que, como se pode ver na Fig. 4a, as armaduras dos modelos reduzidos são muito compridas, aproximadamente iguais a 1,2 a altura do muro. Em consequência os troços das armaduras que penetram nas zonas resistentes têm comprimentos elevados, garantindo assim uma boa amarração das armaduras. Se esses comprimentos fossem menores, obrigando a maiores deslizamentos das armaduras em relação ao solo envolvente para equilibrar as mesmas tracções máximas, seria previsível que:

- i) as tracções máximas nas armaduras fossem menores do que as apresentadas na Fig. 4b;
- ii) ocorressem redistribuições de tensões no interior do maciço reforçado, conduzindo essas redistribuições a uma maior uniformização das tracções máximas instaladas nos diversos níveis de armaduras.

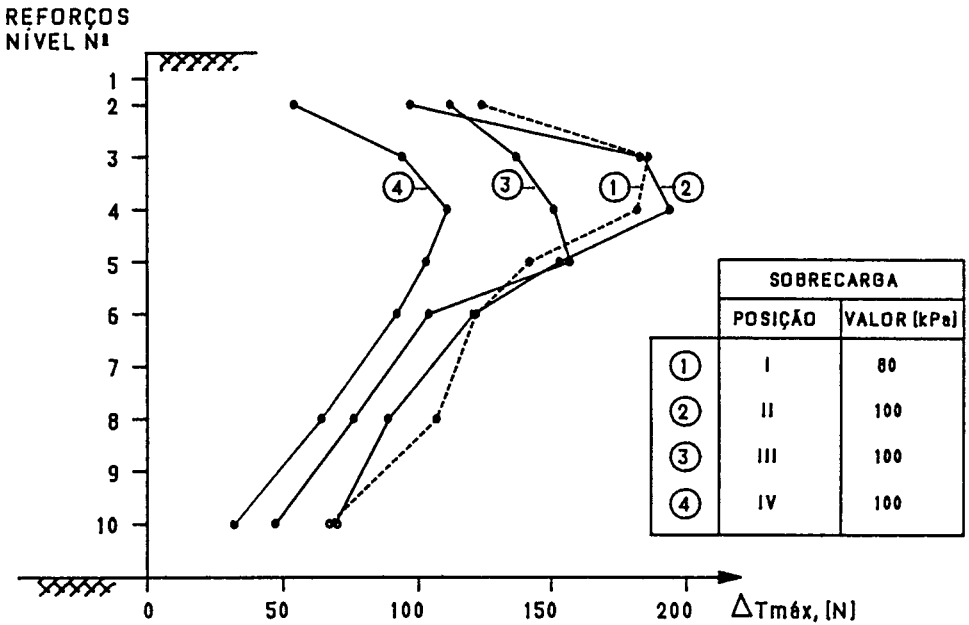
Vêm estas considerações a propósito do facto de as análises numéricas realizadas adoptando armaduras muito mais curtas (comprimentos aproximadamente iguais a 0,7 da altura do muro) conduzirem a conclusões genericamente semelhantes às duas acima indicadas mas que também apontam no sentido das considerações tecidas. Voltar-se-á a esta questão mais adiante.

Examinem-se agora os resultados da observação de um muro construído em Dunkerque e devidamente instrumentado. Na Fig. 5 indicam-se as características e posição da sobrecarga aplicada no terraplano e os valores dos máximos acréscimos de tracção induzidos por essa sobrecarga nas diversas armaduras situadas em três perfis instrumentados distintos. De um modo geral, os resultados obtidos nos três perfis são razoavelmente semelhantes, verificando-se em todos eles uma diminuição em profundidade dos valores máximos dos acréscimos de tracção.

De um ponto de vista qualitativo, a maior discrepância que estes resultados exibem em relação aos obtidos nos ensaios em modelo reduzido refere-se à posição do nível de armaduras



a)



b)

Fig. 4 — Ensaio em modelo reduzido (Laba e Kennedy, 1986):
a) geometria do modelo e posicionamento das sobrecargas e dos extensômetros;
b) máximos incrementos de tração nas armaduras devidos às sobrecargas

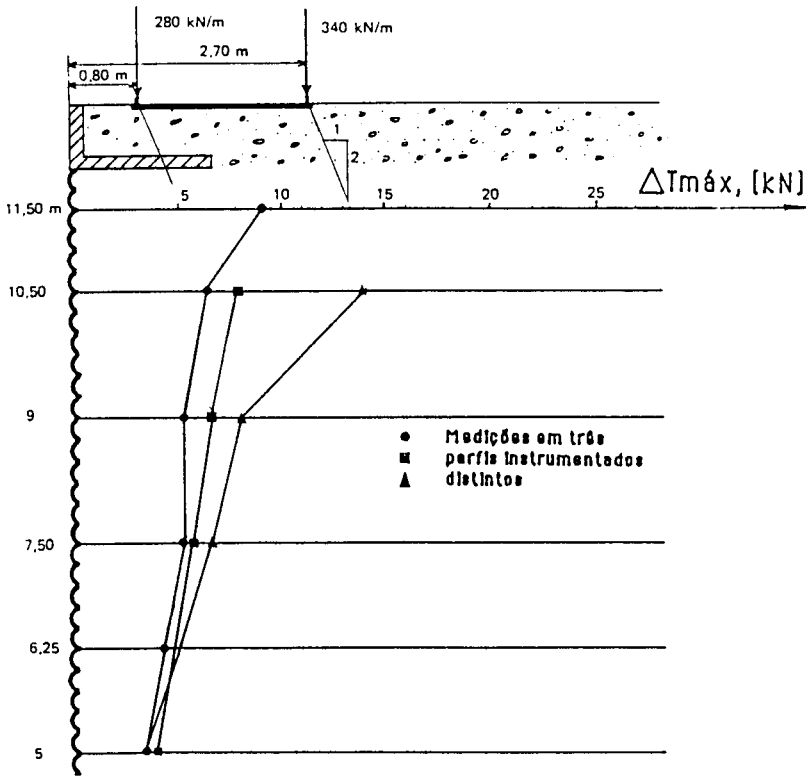


Fig. 5 — Muro de Dunkerque (Corté, 1977): máximos incrementos de tracção nas armaduras devidos à sobrecarga

em que se instala o maior dos acréscimos de tracção. Com efeito, os resultados da observação do comportamento do muro de Dunkerque mostram que esta tracção ocorre no nível mais próximo da superfície enquanto aqueles ensaios indicam que tal ocorre a maior profundidade. Note-se, no entanto, que o muro de Dunkerque é um muro duplo com dois paramentos paralelos (afastados entre si de 15,0 m), estando as armaduras ligadas nas suas extremidades a um e a outro dos paramentos. Este facto reduz a possibilidade de um dos paramentos se deslocar horizontalmente por efeito das sobrecargas aplicadas na superfície e nas suas proximidades, o que faz com que os impulsos induzidos no paramento sejam mais elevados do que num muro corrente, muito particularmente na parte superior pois é naturalmente aí que, em muros deste último tipo, os deslocamentos são mais elevados. Assim sendo, é previsível, e as observações confirmam, que o maior dos acréscimos de tracção se instale nas armaduras do nível superior.

Finalmente, atente-se nos resultados obtidos por Bastick *et al* (1991) no muro experimental de Bourron Marlotte. Na Fig. 6a mostra-se uma vista geral desse muro enquanto na Fig. 6b se apresentam os acréscimos de tracção medidos nas armaduras quando se aplicaram as sobrecargas.

Tal como no muro de Dunkerque, também neste caso os acréscimos de tracção mais elevados se instalam nas armaduras do nível superior, contradizendo assim os resultados obtidos nos ensaios com modelos reduzidos. Há contudo uma diferença assinalável entre as geometrias do muro experimental e dos modelos reduzidos. Com efeito, enquanto nestes últimos não existe nenhuma sobrecarga uniforme actuando na superfície do maciço armado,

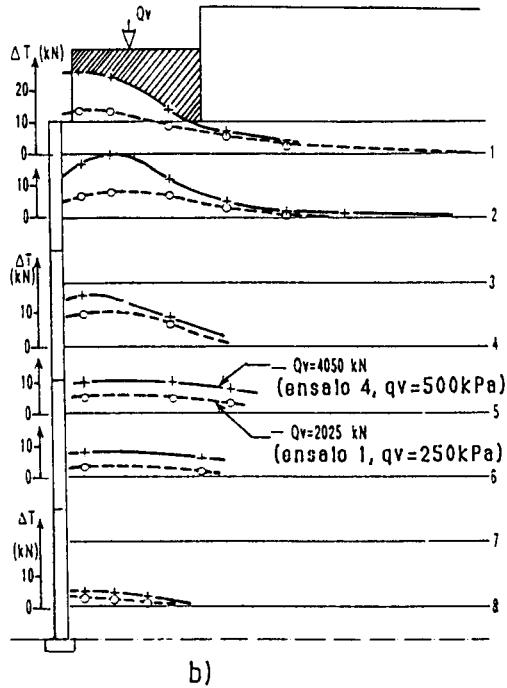
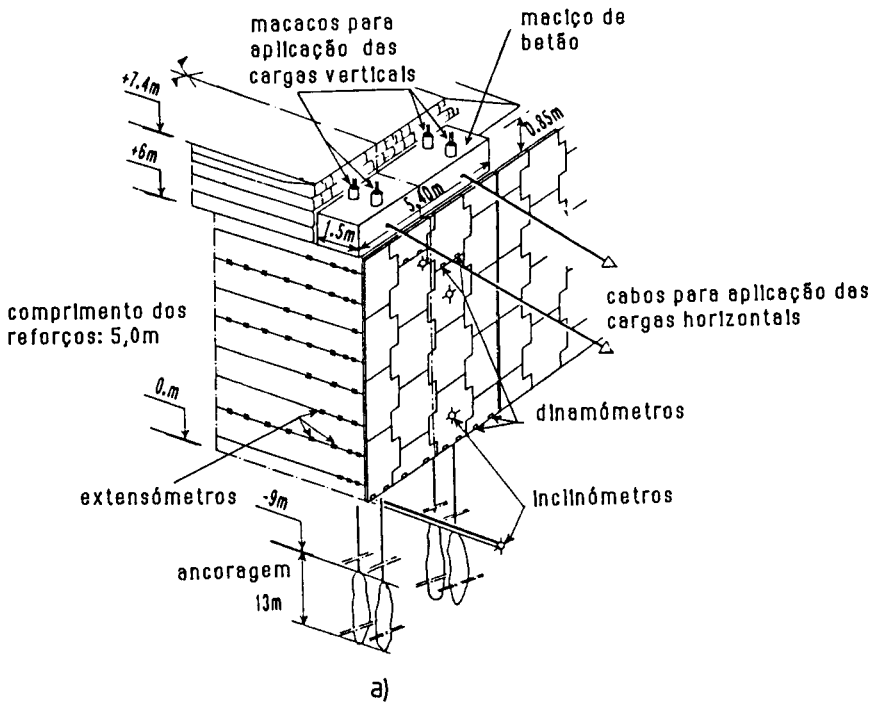


Fig. 6 — Muro experimental de Bourron Marlotte (Bastick et al, 1991):
a) vista geral do muro e localização da instrumentação;
b) incrementos de tração ao longo das armaduras provocados pelas sobrecargas verticais

naquele, em contrapartida, actua a sobrecarga correspondente ao peso de 1,4 m de terras. Esta sobrecarga faz aumentar a resistência ao arranque das armaduras, sobretudo das localizadas nos níveis superiores (para as armaduras do 1.º e 2.º níveis a resistência ao arranque com a sobrecarga é superior à resistência sem a sobrecarga cerca de 4 e 2 vezes, respectivamente). Seria então previsível que sem a sobrecarga as armaduras dos níveis superiores deslizassem em relação ao terreno, diminuindo concomitantemente as tracções nelas instaladas, ao mesmo tempo que, como salientam Laba e Kennedy (1986), ocorreriam transferências de tensões para os níveis inferiores. Nestas condições os maiores acréscimos de tracção já não ocorreriam nas armaduras dos níveis superiores.

As medições efectuadas no muro experimental permitem também constatar que, tal como se referiu atrás, ao estar a carga aplicada muito próximo do paramento, os acréscimos de tracção nas ligações das armaduras à face se não são máximos têm valores muito próximos destes.

3.3 – Resultados analíticos obtidos por aplicação do MEF

Corté (1977) usou um modelo analítico baseado no Método dos Elementos Finitos para calcular os acréscimos de tracção nas armaduras provocados pela aplicação de sobrecargas verticais. Na Fig. 7 resumem-se os resultados obtidos por esse autor referentes aos valores máximos daqueles acréscimos. Note-se que estes valores divergem acentuadamente dos medidos experimentalmente porque: *i*) — apresentam, na parte superior do maciço armado, uma muito acentuada variação dos acréscimos de tracção entre armaduras de níveis consecutivos, sendo máximo o acréscimo calculado para o 1.º nível; *ii*) — não são significativamente afectados pela posição da sobrecarga.

Crê-se que a irrazoabilidade destes resultados se fica a dever a uma deficiente modelação do maciço armado. Com efeito o modelo usado por aquele autor apresentava as seguintes características que se consideram ser inadequadas para simular maciços de terra armada: *i*) — o solo era suposto homogéneo e elástico, caracterizado por constantes elásticas independentes da profundidade; *ii*) — admitia a continuidade dos deslocamentos das armaduras e do solo envolvente o que não só pressupõe haver aderência perfeita entre aqueles materiais como não garante que as extremidades posteriores das armaduras sejam livres; *iii*) — não foi simulada a construção do aterro, sendo o peso do maciço aplicado de uma só vez.

Os resultados analíticos mostrados na Fig. 7 permitem, portanto, chamar a atenção para a necessidade de uma adequada modelação dos vários materiais e das respectivas interacções, bem como do processo construtivo do maciço armado.

Em 2 apresentaram-se e discutiram-se os resultados obtidos ao aplicar um modelo numérico não-linear ao estudo do comportamento dos muros de terra armada sujeitos a cargas verticais lineares. Na Fig. 8 resumem-se os resultados referentes aos valores máximos dos acréscimos de tracção nas armaduras induzidos por essas cargas.

É de salientar a boa concordância em termos qualitativos entre estes resultados analíticos e os obtidos por Laba e Kennedy (1986) em ensaios com modelos reduzidos. Efectivamente, os aspectos essenciais da evolução das tracções por efeito das sobrecargas, resumidas no início de 3.2, são claramente evidenciados pelos resultados analíticos.

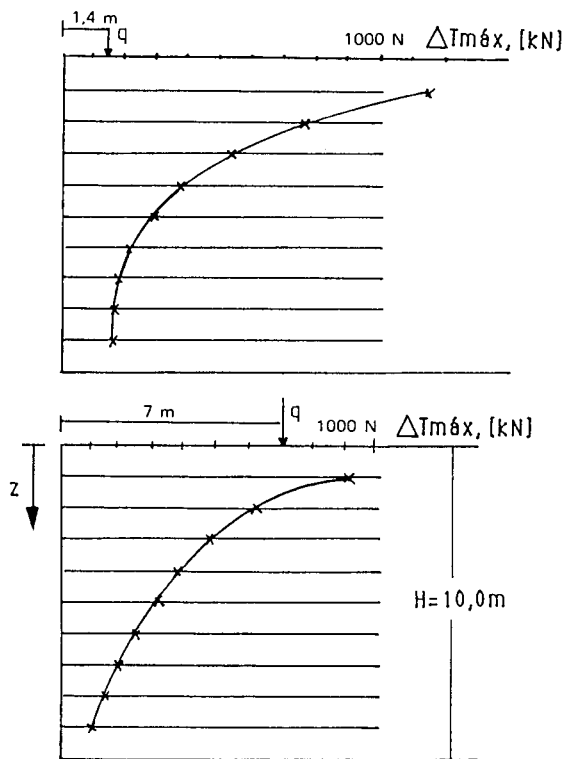


Fig. 7 — Acréscimos máximos de tracção nas armaduras devidos à sobrecarga (Corté, 1977)

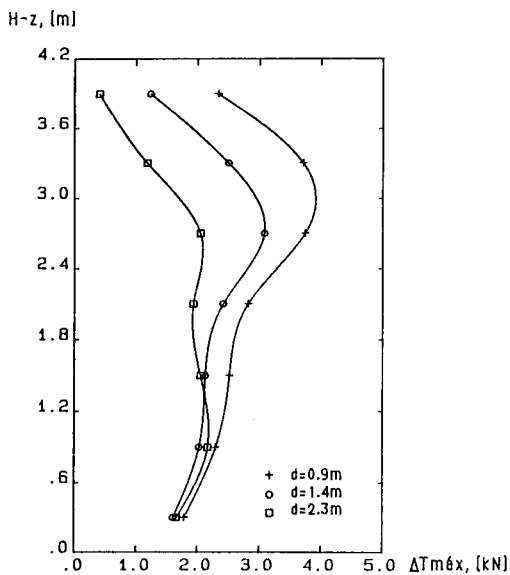


Fig. 8 — Acréscimos máximos de tracção nas armaduras devidos à sobrecarga, obtidos nos cálculos efectuados

4 — APRECIACÃO DAS HIPÓTESES DO MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO DO LCPC-SETRA

Para finalizar, neste parágrafo usam-se os resultados analíticos obtidos no presente trabalho para reflectir sobre o método proposto pelo LCPC-SETRA (1977) para a avaliação das tracções nas armaduras quando, além do peso, actuam também sobrecargas verticais lineares na superfície dos maciços armados.

Para aplicar a metodologia proposta pelo LCPC-SETRA supôs-se que a carga se distribua numa faixa de 0,40 m de largura; note-se, contudo, que o valor desta largura não afecta significativamente os resultados e, portanto, as principais conclusões obtidas.

Dois aspectos devem ser analisados: por um lado, o posicionamento das secções das armaduras onde se instalam as tracções máximas e, por outro, as grandezas destas tracções.

No que respeita ao primeiro aspecto, comparam-se na Fig. 9 as posições das superfícies das tracções máximas obtidas nos cálculos numéricos (ver Fig. 3), com as posições recomendadas pelo LCPC-SETRA. De um modo geral as hipóteses assumidas neste último método traduzem adequadamente as tendências de variação da posição da superfície das tracções máximas com a localização da sobrecarga, postas em evidência pelos resultados dos cálculos efectuados. Além disso, em todos os casos, aquelas hipóteses são genericamente conservativas, acarretando um menor comprimento resistente das armaduras do que o que revelam os cálculos; tal é considerado adequado para um método de dimensionamento relativamente simples e expedito.

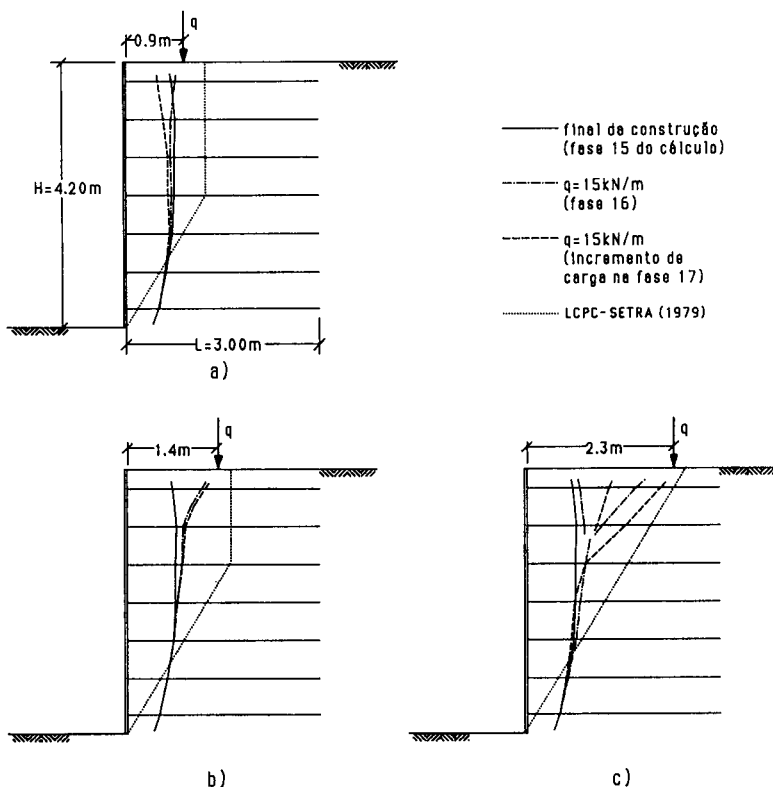


Fig. 9 — Posicionamento das secções das armaduras onde se instalam as tracções máximas

Os acréscimos máximos de tracção provocados pela actuação de sobrecargas verticais podem ser calculadas, segundo a metodologia do LCPC-SETRA, pela seguinte equação

$$\Delta T_{\text{máx}} = K \frac{Q_v}{x + \frac{l+z}{2}} e_v e_h \quad (1)$$

sendo

$$x = \begin{cases} \frac{l+z}{2} & \text{quando } z \leq 2\left(d - \frac{l}{2}\right) \\ d & \text{quando } z \geq 2\left(d - \frac{l}{2}\right) \end{cases} \quad (2)$$

em que K representa o coeficiente de impulso, e_v e e_h representam o afastamento entre armaduras na direcção vertical e horizontal, respectivamente, Q_v , d e l definem, respectivamente, a grandeza da força vertical, a distância do seu ponto de aplicação ao paramento e a largura da faixa pela qual se distribui, e z representa a posição da armadura em análise em relação à superfície onde é aplicada a força vertical.

Da análise daquelas equações conclui-se que:

- i) os máximos acréscimos de tracção diminuem monotonamente do topo para a base do maciço armado;
- ii) os máximos acréscimos de tracção induzidos nas armaduras dos níveis superiores são pouco sensíveis ou mesmo não variam com a posição da sobrecarga aplicada.

Estas consequências da aplicação das expressões (1) e (2) ao cálculo dos máximos acréscimos de tracção estão em claro desacordo com os resultados dos cálculos efectuados. Na Fig. 10 comparam-se os incrementos máximos de tracção nas armaduras obtidos nestes cálculos com os avaliados usando as mencionadas expressões. É interessante notar que embora na parte superior dos maciços se verifiquem as discrepâncias assinaladas, na parte inferior, em contrapartida, verifica-se uma assaz razoável concordância entre os valores dos acréscimos máximos obtidos pelos dois métodos. Observa-se, ainda, que a dimensão da zona em que essa concordância se manifesta é tanto maior quanto mais próxima do paramento estiver a sobrecarga aplicada.

Pode então concluir-se que num maciço em que as armaduras tenham todas as mesmas características geométricas e mecânicas, os acréscimos de tracção previstos pelo método do LCPC-SETRA quando actuam sobrecargas serão maiores do que as que efectivamente se instalam, sobretudo nas armaduras dos níveis superiores. De facto, o mecanismo de interacção entre as armaduras e o solo envolvente não propicia a instalação de tracções elevadas nas armaduras da parte superior do maciço, onde a resistência ao arranque das armaduras é menor. Quer dizer, o equilíbrio que se estabelece no interior do maciço armado, influenciado pela deformabilidade do solo e das armaduras e pelas características das interfaces entre estes materiais, acarreta que nos níveis superiores os acréscimos de tracção nas armaduras induzidos pelas sobrecargas sejam significativamente menores do que os previstos pelo método do LCPC-SETRA, o qual obviamente não entra em linha de conta com a influência das deformabilidades dos materiais.

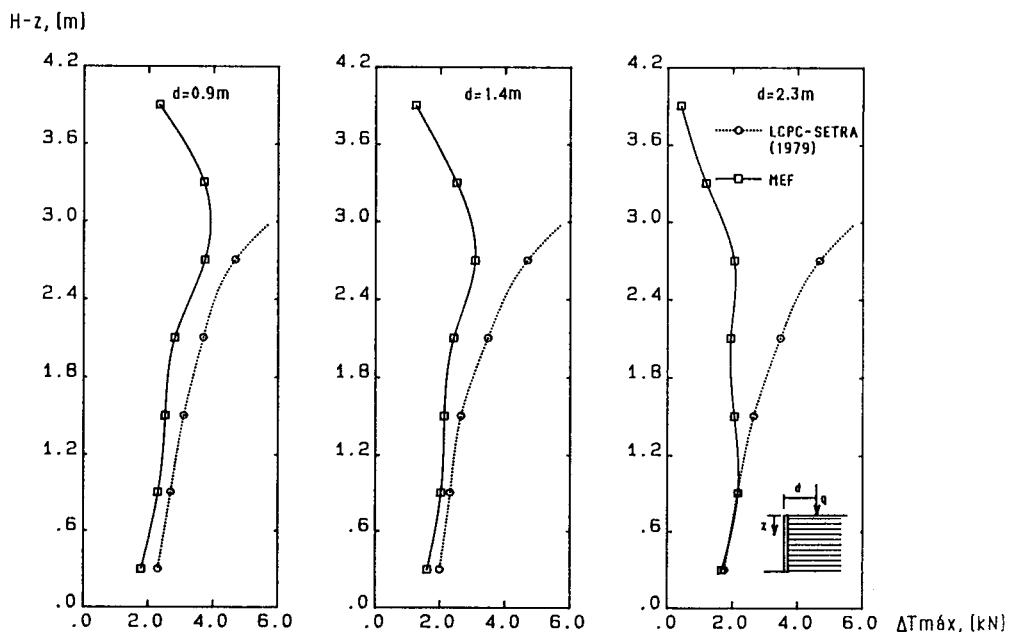


Fig. 10 — Acréscimos máximos de tração nas armaduras devidos apenas à sobrecarga linear

Ao usar o método do LCPC-SETRA no dimensionamento de muros de terra armada sujeitos a sobrecargas verticais obtêm-se, portanto, valores elevados para as trações das armaduras dos níveis superiores, o que, em muitos casos, faz com que as áreas das secções transversais e sobretudo os comprimentos dessas armaduras tenham que ser superiores às das instaladas nos níveis inferiores; em consequência, sendo elevada a resistência ao arranque e a rigidez dessas armaduras, os deslocamentos do topo do maciço serão pequenos. Em contrapartida, se as armaduras dos níveis superiores forem semelhantes às restantes (e com comprimentos correntes), como se admitiu nos cálculos efectuados, ainda que não haja risco de rotura local, pois desenvolvem-se as transferências de tensões necessárias para o evitar, os deslocamentos do topo do maciço não-de ser mais importantes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BASTICK, M., SCHLOSSER, F., AMAR, S. e CANEPA, Y. (1991) — *Efforts et déformations dans une culée expérimentale en terre armée*. Proc. of the 10th Eur. Conf. on Soil Mec. and Found. Eng., Vol. 2, Associazione Geotecnica Italiana, Firenze.
- CARDOSO, A. S. (1987) — *A técnica das pregagens em solos aplicada em escavações. Métodos de análise e dimensionamento*. Tese de Doutoramento, Universidade do Porto.
- CLOUGH, G. W. e DUNCAN, J. M. (1971) — *Finite element analysis of retaining wall behaviour*. Journal of the Soil Mec. and Found. Div., ASCE, Vol. 97, SM12.
- CORTÉ, J. F. (1977) — *La méthode des éléments finis appliquée aux ouvrages en terre armée*. Bull. Liaison Lab. Ponts et Chaussées, n° 90.

- DOHERTY, W. P., WILSON, E. L. e TAYLOR, R. L. (1969) — *Stress analysis of axisymmetric solids utilizing higher-order quadrilateral finite elements*. Report n.º S.E.S.M. 69-3, Structures and Materials Research, Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley.
- DUNCAN, J. M. e CHANG, C. Y. (1970) — *Nonlinear analysis of stress and strain in soils*. Journal of the Mec. and Found. Div., ASCE, Vol.. 96, SM5.
- FÉLIX, C. (1991) — *Comportamento dos muros de terra armada*. Tese de Mestrado, Universidade do Porto.
- FÉLIX, C. e CARDOSO, A. S. (1992) — *Estudo de um muro de terra armada*. Geotecnia, n.º 64.
- GOODMAN, R. E., TAYLOR, R. L. e BREKKE, T. L. (1968) — *A model for the mechanics of jointed rock*. Journal of the Soil Mec. and Found. Div., ASCE, Vol. 94, SM3.
- LABA, J. T. e KENNEDY, J. B. (1986) — *Reinforced earth retaining wall analysis and design*. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 23, n.º 3.
- LCPC-SETRA: LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSÉS — SERVICE D'ÉTUDES TECHNIQUES DES ROUTES ET AUTOROUTES (1979) - *Les ouvrages en terre armée. Recommandations et règles de l'art*. Ministère des Transports, France.