

# **GEOTECNIA NAS INFRA-ESTRUTURAS DE TRANSPORTES. DESAFIOS DO FUTURO**

## ***GEOTECHNICS IN TRANSPORTATION INFRASTRUCTURES. FUTURE CHALLENGES***

GOMES CORREIA, ANTÓNIO \*

### **RESUMO**

Os engenheiros geotécnicos com actividade nas infra-estruturas de transporte tratam os diferentes aspectos ligados à exploração e classificação dos terrenos, à modelação e dimensionamento das estruturas, à construção e à gestão das obras, que contemplam as estradas, os caminhos de ferro, os aeroportos e os túneis. Estes aspectos abrangem ainda a compactação, a estabilidade dos taludes, os aterros e respectiva estabilidade, as técnicas de melhoramento de terrenos, as camadas de base e de balastro. Esta comunicação trata sobre os desafios do futuro ligados a alguns destes aspectos, nomeadamente : a caracterização dos terrenos, com enfoque nas tecnologias de informação e comunicação (geomédia), a implementação de novas tecnologias na construção e no controlo da construção, as infra-estruturas para comboios de alta velocidade e a gestão da conservação das infra-estruturas em serviço.

### **ABSTRACT**

Geotechnical engineers in transportation are concerned with all matters related with methods of exploring and classifying earth materials, design, construction and management for railroads, roadways and tunnels. This includes the compaction, the behaviour and stability of earth and rock embankments and their foundations, soil improvement techniques, base and ballast courses. This paper highlights the future challenges in laboratory and in situ investigations, including geomedia, in the implementation of new technologies in construction and in the quality management, as well in infrastructures for high speed trains and the managing of the existing infrastructures.

(\* ) *Instituto Superior Técnico/DECivil – Centro de Geotecnia, [acorreia@civil.ist.utl.pt](mailto:acorreia@civil.ist.utl.pt)*

## **1. INTRODUÇÃO**

A geotecnia tem um papel de relevo nas grandes obras de infra-estruturas de transporte. Esta comunicação pretende dissertar sobre alguns desenvolvimentos futuros que muito contribuirão para uma melhor qualidade do património construído, bem como para uma redução dos custos globais da exploração desse património.

Os temas que serão abordados dizem respeito : à caracterização geotécnica com o recurso às novas tecnologias de informação e comunicação (geomédia), estendidas aos meios de controlo da construção; à construção dos aterros com aplicação de novas tecnologias a nível dos equipamentos e dos meios de operação dos mesmos, bem como de especificações mais apropriadas aos fins em vista (verificação dos pressupostos do projecto, e comportamento adequado na fase de exploração); ao melhoramento dos terrenos e ao recurso de materiais não tradicionais, às infra-estruturas para comboios de alta velocidade e finalmente à necessidade de sistemas de gestão para garantir uma exploração do património construído.

## **2. MELHORAR A CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA A NÍVEL DO PROJECTO E GEOMÉDIA**

### **2.1. Estudos geológico-geotécnicos**

As obras rodoviárias e ferroviárias têm desenvolvimento essencialmente linear, interessando conseqüentemente diferentes tipos de terrenos, cobrindo materiais que podem variar desde solos a rochas. Estas obras envolvem quantidades importantes de movimentação de terras, com a execução de escavações e construção de aterros. Estes últimos são realizados, por razões de ordem ambiental e económica, praticamente com a totalidade dos materiais provenientes das escavações. Os estudos geológico-geotécnicos devem, por isso, fazer uma identificação e caracterização dos terrenos na perspectiva de definir as técnicas de desmonte e condições de execução das escavações, bem como a sua utilização, quer como terreno de fundação de estruturas (aterros, pavimento ou via férrea, obras de arte), quer como material de construção a ser utilizado nos aterros ou mesmo na constituição das camadas das estruturas. Além disso, essa caracterização deve permitir, quer através de ensaios de campo, quer de laboratório, obter parâmetros geotécnicos para o dimensionamento das estruturas.

Em relação aos ensaios de campo perspectiva-se uma maior utilização dos ensaios geofísicos, visto serem dos poucos ensaios em que os parâmetros mecânicos (módulo de elasticidade) deduzidos da sua interpretação são directamente comparáveis aos resultados de ensaios de laboratório. Dentro desta família de ensaios o piezocone sísmico terá uma maior utilização nos estudos geotécnicos, muito particularmente na caracterização das baixas aluvionares [1]. Um outro ensaio que terá uma grande expansão na caracterização geodinâmica dos sítios, no controlo da construção e na determinação do módulo de elasticidade das camadas dos pavimentos, será o baseado na análise espectral das ondas de superfície – SASW (Spectral Analysis of Surface Waves). Informação de detalhe sobre esta técnica pode ser obtida em [2,3].

Em relação aos ensaios de campo considerados de rotina na caracterização geotécnica, julga-se que os diferentes tipos de ensaios pressiométricos continuarão a ter uma grande utilização, com desenvolvimento de técnicas de rectro-análise para interpretação dos respectivos resultados dos ensaios. Essas técnicas permitirão a dedução de parâmetros específicos aos modelos de comportamento utilizados nessa rectro-análise.

No que respeita aos ensaios de laboratório estes continuarão a ser complementares dos ensaios de campo, embora estejam sempre limitados à qualidade das amostras e à reconstituição do estado inicial de tensão no campo. O seu desenvolvimento será mais no âmbito das necessidades da modelação, merecendo neste contexto destaque o ensaio triaxial verdadeiro e de torção em cilindro oco. Nestes ensaios serão implementadas técnicas de medições directa das deformações no provete, bem como da medição da sucção. Este último parâmetro será indispensável para uma interpretação correcta dos solos ensaiados no estado não saturado [4].

## **2.2. Geomédia**

Os estudos geológico-geotécnicos devem contemplar um melhor uso das tecnologias de informação com o desenvolvimento de « geomédia ». De facto, a numerosa informação destes estudos tem sido produzida em suporte de papel organizada em dossiers que os torna muitas vezes inacessíveis a uma fácil consulta. Esta informação deve ser compilada em suporte informático criando bases de dados que possam ser facilmente utilizadas quer pelos projectistas, quer pelos construtores. Além disso, poderão também ser uma fonte preciosa para a elaboração de estudos estatísticos e de correlações entre propriedades geotécnicas para pessoal ligado ao sistema de ensino e de investigação. Este processo pode ser facilitado se os projectistas e empreiteiros foram encorajados pelo dono de obra e pelos organismos do Estado a prepararem e a submeterem uma versão informática – mini base de dados – de cada projecto, para além dos suportes em papel habituais. Assim, a informação de cada projecto poderá ser depois adicionada a uma base de dados central.

A implementação da base de dados requer a elaboração de especificações relativas à preparação da informação ao tipo de formato do armazenamento dos dados, que incluem dados de prospecção geotécnica, resultados de ensaios de laboratório e classificações.

Uma nova via de transmissão da informação é o recurso ao « Global Positioning System » (GPS) recorrendo à utilização de receptores de satélite para localização de sítios de observação de modo a que se possa proceder a um rápido processamento da informação através da manipulação de dados e de técnicas de representação recorrendo ao GIS « Geographic Information System » (GIS). É de esperar também um grande desenvolvimento na interpretação automatizada de dados resultantes da aquisição informática da sísmica de refração, bem como do georadar, para além dos perfis de resistividade eléctrica. O recurso a câmaras digitais facilitará igualmente o registo e transmissão informática da prospecção de superfície.

Destaca-se uma potencial aplicação desta tecnologia com a realização repetida de fotografias de de taludes, cujas diferenças entre fotografias poderão ser avaliadas quantitativamente com vista ao estudo de risco de deslizamentos de taludes. Prevê-se igualmente que as locomotivas possam ser equipadas com câmaras digitais ou com sensores multiespectrais para execução repetida de fotografias de taludes com vista ao mesmo tipo de análise da informação. As técnicas de

fotogrametria serão também utilizadas a taludes de rochas do mesmo modo que são aplicadas à fotografia aérea.

Prevê-se, assim, que no futuro o GIS, com recurso a programas de análise geoestatística e espacial, integrando os dados digitalizados da prospecção geotécnica (georadar, resistividade eléctrica, sísmica de refração e de reflexão, ondas de superfície, reconhecimento geológico digital de superfície), constitua a principal ferramenta de comunicação nos projectos de infra-estruturas de transportes.

Estas tecnologias de informação serão igualmente intensificadas no controlo remoto da estabilidade de taludes sob observação.

### **2.3. Caracterização de materiais das camadas dos pavimentos e das vias férreas**

A caracterização envolve as propriedades de resistência e de deformabilidade. Estas propriedades são necessárias, quer para o dimensionamento de estruturas novas, quer para diagnosticar problemas existentes com vista à definição de estratégias de reabilitação.

A determinação destas propriedades tem sido objecto de importantes desenvolvimentos experimentais, quer de laboratório, quer de campo, de modo a alterar o uso corrente de parâmetros índices, muitos de natureza empírica, por parâmetros mecânicos compatíveis com as análises estruturais implementadas para o dimensionamento dos pavimentos e das vias férreas [5]. Contudo, estes desenvolvimentos têm tido alguma dificuldade na sua implementação a nível do dimensionamento corrente em virtude de não haver dados concretos das vantagens técnico-económicas da aplicação destas ferramentas. Para o efeito será necessário fazer-se observações experimentais que comprovem as vantagens desta mudança. De facto, ensaios empíricos como o CBR e o Marshall continuam a ser executados correntemente a nível dos estudos, apesar da extrapolação que é feita para novos materiais e novas estruturas onde não há comprovação experimental da sua adequabilidade. A sua validação para estas novas condições, bem como para carregamentos e condições ambientais diferentes das que estiveram na origem do seu desenvolvimento será preterida pelo recurso a uma caracterização mais meccanicista associada a modelos de comportamento dos materiais e das estruturas mais em consonância com a abordagem das outras estruturas de engenharia. Assim, o desafio futuro será estabelecer um compromisso entre a complexidade e sofisticação laboratorial compatíveis com os modelos de previsão do comportamento das estruturas e a implementação de rotina destas ferramentas. Uma das primeiras etapas deste processo será demonstrar os benefícios da sua aplicação em relação aos métodos existentes para o dimensionamento de novas estruturas incorporando novos materiais. Um desafio de maior ambição será a utilização de ensaios de laboratório e de campo que forneçam um conjunto de propriedades que possam ser utilizadas em todas as fases do processo, ou seja desde o projecto, à construção, ao controlo da qualidade e à avaliação do comportamento.

A nível de laboratório as propriedades relevantes a medir são as características de deformabilidade (elásticas e plásticas), de resistência e de fadiga dos materiais constituintes das estruturas, associando-lhes as condições de estado traduzidas pelo índice de vazios e a sucção. A nível dos solos e das misturas de agregados os ensaios devem ser compatíveis com a obtenção de parâmetros para modelos de comportamento que incorporem a anisotropia e a dependência do estado de tensão e de deformação. No caso das misturas betuminosas, tratando-

se de materiais viscosos deverão considerar-se parâmetros como a temperatura e frequência do carregamento; necessidade de decompor as componentes viscoelásticas e viscoplásticas. Deverão, assim, estabelecer-se leis constitutivas com relações não lineares entre tensão e deformação, diferentes tempos de repouso, diferentes temperaturas e velocidades de formação. A nível do comportamento à fadiga dos materiais com ligantes será intensificado o recurso à teoria da mecânica da fractura. Haverá igualmente um maior aprofundamento no estudo da propagação em profundidade das fendas que se formam à superfície da camada de desgaste em betão betuminoso, combinando os efeitos térmicos com efeitos da pressão dos pneus.

Nos materiais estabilizados quimicamente serão continuados os estudos destinados a uma melhor compreensão do seu comportamento a longo prazo. A selecção da quantidade e do tipo de aditivo químico deverá ser um compromisso entre os requisitos de resistência, retracção e durabilidade.

A nível dos ensaios de campo os futuros desenvolvimentos dar-se-ão a nível de ensaios não destrutivos continuando-se com o deflectómetro de impacto (FWD) e implementando-se novas tecnologias como a do georadar e a da propagação de ondas. Deverá emergir a nova geração de deflectómetros, os designados deflectómetros rolantes, onde a carga será aplicada por uma roda rodando a cerca da velocidade de circulação e a deflexão captada por sensores de proximidade (não contacto). Deste modo será eliminada a paragem para executar cada medição.

Haverá uma implementação da tecnologia do georadar nas aplicações rodoviárias. Também neste caso será possível circular à velocidade da circulação e registar as propriedades eléctricas das camadas das estruturas. Estas propriedades eléctricas são influenciadas por factores dos materiais, nomeadamente o teor em água e o índice de vazios. Prevê-se a implementação de programas de interpretação dos sinais do georadar tornando-os em parâmetros úteis para os engenheiros. Além disso, este método de ensaio será também utilizado no controlo de qualidade de pavimentos novos.

Os métodos sísmicos serão igualmente de grande utilidade para diagnosticar zonas de comportamento anómalo e seleccionar técnicas de reabilitação, bem como para avaliar a eficácia das mesmas. Esta tecnologia permitirá detectar vazios em pavimentos em betão e providenciar informação acerca da qualidade e espessura da camada de superfície e avaliar o módulo das camadas de base e de fundação. Há de facto grandes potencialidades nesta tecnologia, embora necessite ainda de uma análise mais robusta e de utilização mais amigável.

### **3. MELHORAR A QUALIDADE DOS ATERROS**

Os desenvolvimentos futuros na construção de aterros prendem-se com a redução dos custos de construção e de exploração durante a vida da obra. Para o efeito, devem utilizar-se o mais possível os materiais provenientes da linha e estudarem-se materiais alternativos que com a sua utilização se evitem depósitos dessas matérias, reduzindo-se, assim, os impactos ambientais. Além disso, devem implementar-se novos processos constructivos, envolvendo sobretudo novas tecnologias a nível dos equipamentos, associadas a novos critérios de controlo de qualidade. Será de prever uma nova geração de equipamentos de compactação, designados de equipamentos “inteligentes”, que variarão automaticamente os seus parâmetros de operação

face à variação das propriedades de interacção rolo-material da camada. Existem já equipamentos com sistemas de regulação automática de frequência e de amplitude, que constituem um avanço neste domínio. Além disso, a nível da tecnologia dos equipamentos de compactação têm também aparecido rolos com secção diferente da cilíndrica, como seja em forma poligonal, que constituem uma vantagem pela maior profundidade atingida na compactação e pela redução no esmagamento das partículas [6,7].

Um dos aspectos relevantes da compactação é a obtenção de um bom adensamento do material, sendo o índice de compactidade ou o grau de compactação um dos parâmetros utilizados no controlo corrente da compactação, especificando-se em geral um valor mínimo a ser atingido. Contudo, este parâmetro é insuficiente para garantir um bom comportamento do aterro, nomeadamente no que respeita aos assentamentos diferenciais, que terão uma grande implicação nos custos de exploração da superestrutura. Para se obviar os assentamentos diferenciais será indispensável complementar o grau de compactação exigido nos cadernos de encargo com um parâmetro que permita garantir uma uniformidade dos resultados da compactação. O Quadro 1 extraído de Brandl [8] é um bom exemplo do tipo de especificação que se deve ser adoptada no controlo de compactação para se garantir uma boa homogeneidade ou uniformidade da compactação.

Quadro 1: Especificações para controlo da compactação [8]

Parâmetro	Coeficiente de variação cv (%)		
	Fundação	Sub-base	Base
Massa volúmica seca $\rho_d$	5	4	3
Módulo de placa $E_{v1}$ ; $E_{v2}$	30	20	15

Em termos mais gerais Brandl [8] recomenda os seguintes critérios para obtenção de aterros com elevada qualidade de uniformidade em compactidade: valores mínimo e máximo de compactação dinâmica delimitados por um quantilho de 10% or uma variação do desvio padrão em relação à média inferior ou igual a 15 a 20%; um aumento desse valor entre duas passagens inferior a 5% e a não diminuição do valor de compactação dinâmica, que significaria descompactação do material e ou esmagamento das partículas.

Os factores que afectam a compactação são inúmeros: características dos materiais, tipo de equipamento e condições de aplicação da compactação (velocidade, número de passagens, tipo de contacto mecânico, etc). Percebe-se assim, a complexidade do processo de compactação e portanto o número de factores que intervêm na obtenção de uma compactação adequada. Este não se obtém apenas pela especificação de um grau de compactação, mas sobretudo pelo grau de homogeneidade ou uniformidade da compactação. Dados experimentais de observação de aterros mostram que a duração de uma estrutura (pavimento ou via férrea) depende largamente do grau de compactação e da homogeneidade das camadas da estrutura, bem como do terreno de fundação.

O recurso actual ao controlo em contínuo da compactação (CCC) facilita significativamente o controlo sofisticado da homogeneidade e deverá substituir no futuro o controlo pontual (método da garrafa de areia, método do balão, métodos radioactivos). Estes desenvolvimentos permitem encarar a possibilidade da construção de aterros de altura elevada em vez de viadutos e pontes, quer em estradas quer em caminhos de ferro, bem como em aeroportos. Esta solução conduzirá em geral a uma redução dos custos de construção e facilitará a utilização dos materiais provenientes da linha, bem como materiais não tradicionais. Além disso, estes aterros poderão ser revestidos com vegetação integrando-se por isso muito bem no ambiente e terão certamente custos de manutenção inferiores aos das pontes [10].

Brandl [10], mostra que os assentamentos observados num aterro de 120 m de altura, correspondem a 0.1% da altura, sendo cerca de 10 vezes inferiores aos obtidos com materiais de bom comportamento mecânico (enrocamentos), mas construídos de acordo com os critérios tradicionais [11].

A implementação da CCC permitirá igualmente, com recurso a materiais de boas características mecânicas, a fundação dos encontros de pontes em fundação directa nos aterros, contrariamente às soluções tradicionais, de custos muito mais elevados. Além disso, permitirá igualmente uma economia nos blocos técnicos currentemente utilizados nas vias férreas, muito particularmente para as linhas de alta velocidade.

Uma outra técnica em implementação no controlo da qualidade dos aterros é o recurso à análise espectral das ondas de superfície (Spectral Analysis of Surface Waves – SASW). Em relação ao CCC tem o inconveniente de recorrer a equipamento independente do equipamento de compactação, que consiste num vibrador electromagnético para gerar as ondas de superfície e um conjunto de geofones para detectarem estas ondas. Não permite, por isso, uma real optimização contínua do processo de compactação. Contudo, tem a vantagem de interessar uma muito maior profundidade de investigação, que o CCC, que abrange uma profundidade de cerca de 1.5m, embora esta seja, por sua vez, maior que a dos ensaios de placa (0.5 a 0.6m) e muito maior que a dos ensaios de medição da massa volúmica (garrafa de areia, balão e métodos radioactivos). A elevada profundidade de investigação da SWSA torna-a uma técnica muito interessante para controlo pós construção.

Esta técnica tem também a vantagem de fornecer parâmetros mecânicos directamente utilizados no dimensionamento, visto permitir medir o módulo de elasticidade do material da camada. Além disso, uma outra vantagem deste método sísmico é a de produzir valores comparáveis aos obtidos em laboratório sob as mesmas condições de ensaio.

Outros ensaios pontuais que permitem obter parâmetros mecânicos de controlo pós construção são os pressiómetros. Contudo, a comparação dos módulos obtidos por estas diferentes técnicas (CCC, SWSA, placa e pressiómetro) é complexa, visto o módulo de um solo depender, entre outros factores, das condições de aplicação da carga (estática ou dinâmica), do nível de tensão e do nível de deformação. A Figura 1 extraída de Gomes Correia et al. [11] evidencia para os resultados de ensaios de campo (placa e pressiómetro) e de simulação numérica de um ensaio triaxial a importância do nível de deformação no módulo de deformabilidade.

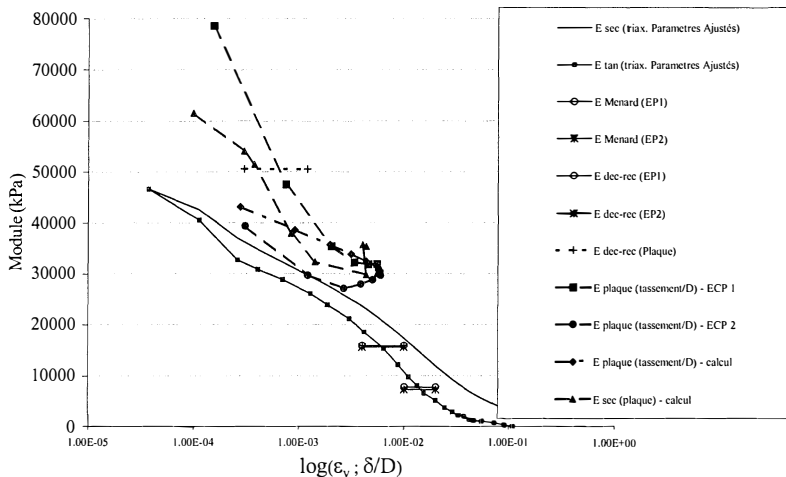


Figura 1: Módulo de deformabilidade em função da deformação para diferentes simulações numéricas e de interpretação de ensaios [11]

#### 4. MELHORAMENTO DOS TERRENOS E RECURSO A MATERIAIS NÃO TRADICIONAIS

Os futuros desafios nesta matéria envolvem o melhoramento, quer de natureza química, quer mecânica, de terrenos com características geotécnicas impróprias para o fim em vista (solos susceptíveis à liquefação, solos moles ou compressíveis). Além disso, devem também contemplar o recurso a materiais sintéticos, a materiais de subprodutos industriais e a materiais reciclados.

Neste âmbito têm sido aplicadas diferentes técnicas construtivas no melhoramento de terrenos de fundação que vão desde as utilizações tradicionais de drenagem acelerada dos terrenos com recurso a geodrenos, a soluções mistas de drenagem e reforço com a utilização de estacas de brita, abrangendo ainda as soluções de melhoramento mecânico com colunas de «jet grouting», colunas de misturas de solo-cal e de misturas de solo-cimento. No que se refere às escavações destaca-se muito particularmente o recurso às pregragens de uso cada vez maior. Uma das preocupações para o futuro é a monitorização destas soluções no sentido de avaliar o seu desempenho ao longo do tempo.

Quanto aos materiais de subprodutos industriais, genericamente designados por lixo, são produzidos em grandes quantidades e variedades. Os depósitos (aterros) de resíduos sólidos, amigos do ambiente, são caros e demorados de implementar e executar. Uma alternativa é a utilização destes materiais como material de construção, reduzindo, assim, os custos dos depósitos. De facto, estes materiais são materiais particulados e podem ser utilizados para propósitos geotécnicos. Citam-se como exemplo: os resíduos das centrais térmicas (cinzas e escórias), os materiais de demolição, e os aterros de pneus. O encorajamento da reciclagem de materiais de pavimentação com correcção granulométrica e com adição de ligantes, bem como o uso de lixos industriais passa pelos desenvolvimentos seguintes :



- incorporar esses materiais nas componentes das estruturas geotécnicas, incluindo estruturas dos pavimentos e das vias férreas ;
- remoção de lixos existentes para uso em obras, libertando, assim, espaços para depósitos de materiais perigosos;
- expandir o uso de materiais não tradicionais, com melhoramento das respectivas propriedades, em vez de simplesmente pensar nestes materiais para depósito em lixeiras.

Uma área com enorme desenvolvimento é o recurso a materias mais leves que o solo para a realização de aterros, que sejam economicamente viáveis e amigos do ambiente. Destam-se neste domínio o recurso a grãos de argila expandida e a tiras de pneus na construção de aterros e na incorporação de materias constituintes das camadas das estruturas de pavimentação e da via férrea [12].

## **5. VIA FÉRREA PARA ALTA VELOCIDADE**

### **5.1. Considerações preliminares**

A maioria dos aspectos geotécnicos ligados ao projecto e construção, associados às linhas de alta velocidade, são problemas clássicos da mecânica dos solos e da dinâmica dos solos. Certamente que um dos aspectos geotécnicos relevantes prende-se com os muito pequenos níveis de assentamentos, muito particularmente assentamentos diferenciais, que as estruturas para estas linhas podem suportar, quer por razões de segurança, quer de exploração ligada às operações de manutenção. Tal facto tem levado algumas países, sobretudo onde os terrenos de fundação são de má qualidade, a optar por soluções estruturais em detrimento de soluções geotécnicas ; é nomeadamente o caso das soluções de obras de arte enterradas (plataforma em laje de betão armado apoiada em estacas). A opção por uma solução geotécnica requer uma caracterização muito cuidada dos terrenos de fundação da via e processos construtivos dos aterros e das camadas da via que minimizem os assentamentos futuros, como por exemplos os referidos em 3.

A caracterização dos terrenos deve ser de modo a obter os parâmetros geotécnicos necessários aos modelos de análise solo-estrutura. Anote-se que, devido à importância da propagação das ondas em profundidade, contrariamente aos modelos de análise dos pavimentos, o modelo deve incluir os aterros e respectivas fundações, no caso dos aterros de pequena altura [13, 14]. No que respeita aos materiais da via, a caracterização dos balastros merece uma atenção especial pelos meios experimentais que envolve, e pelo seu comportamento peculiar [15, 16]. Destaca-se muito particularmente a não linearidade da resistência com o estado de tensão, bem como a não linearidade da relação tensão deformação (Figs. 2,3).

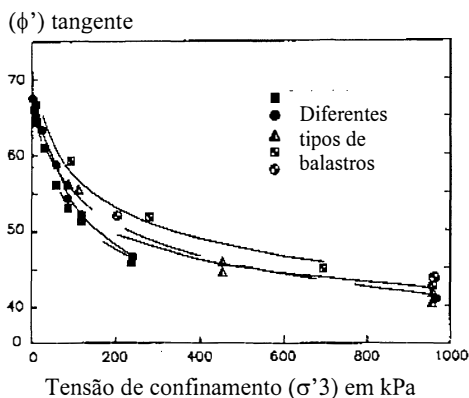


Figura 2 : Influência da tensão no ângulo de atrito de diferentes balastros [15]

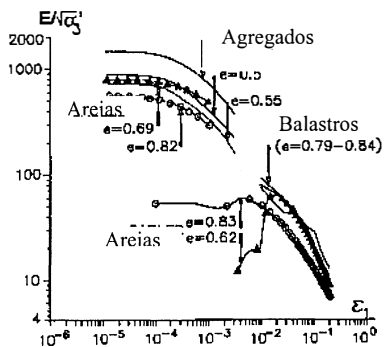


Figura 3: Influência da tensão e da deformação no módulo de deformabilidade secante [16]

### 5.2. Reabilitação das linhas existentes

O aumento da velocidade de circulação dos comboios, bem como das cargas por eixo nos transportes de mercadoria, levanta questões específicas, quer do ponto de vista do dimensionamento, quer da avaliação da capacidade estrutural das vias existentes. Os métodos de investigação da subsuperfície referidos, quer em 2 darão uma contribuição importante na caracterização do estado das fundações e dos aterros das vias existentes. Anote-se que só com um conhecimento detalhado das condições existentes e do respectivo comportamento é possível tomar decisões quanto às soluções a tomar em termos de reabilitação, ou encarar a solução de construção de via nova se uma análise de custo-benefício assim o ditar.

Os métodos muitas vezes utilizados na avaliação da capacidade de carga das plataformas existentes são insuficientes para propósitos de linhas de alta velocidade, sobretudo pela insuficiente profundidade interessada pelos métodos de ensaio utilizados, como sejam, por exemplo, os tradicionais ensaios de placa. Estes métodos só serão eficazes se complementados com outros que permitam atingir uma profundidade de investigação compatível com a interessada pelo comportamento da estrutura sob a acção das cargas dinâmicas dos comboios. Cita-se como exemplo o ensaio de carga dinâmica (DYSTAFIT) desenvolvido na Alemanha com uma placa de 2.5 m (ou superior) de diâmetro capaz de simular aproximadamente a acção induzida por diferentes tipos de comboios [17] (Fig. 4).

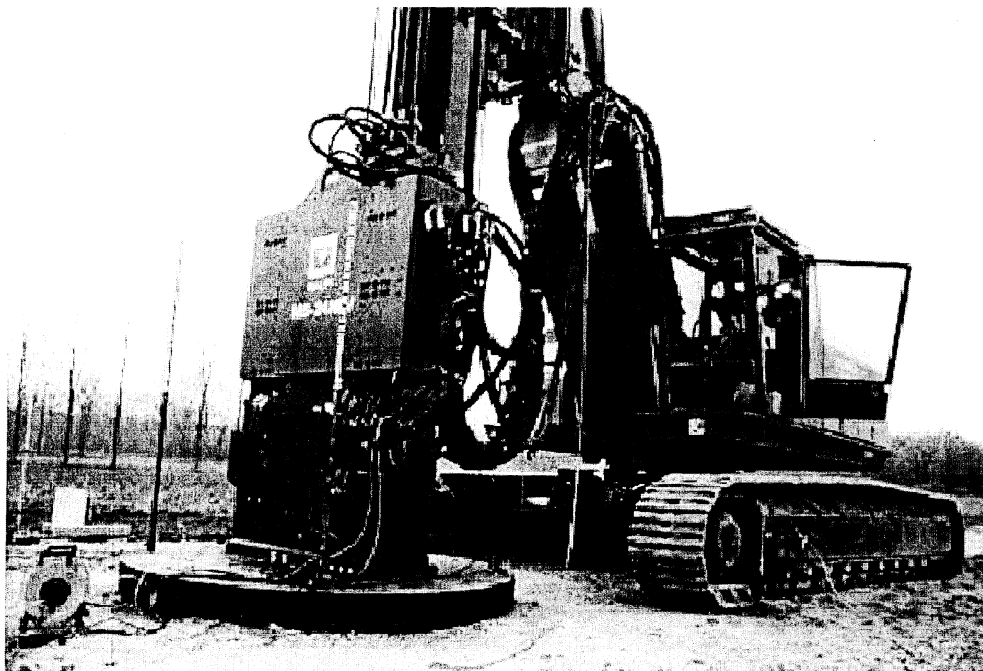


Figura 4: Equipamento de carga de placa dinâmica – DYSTAFIT [17]

Os problemas geralmente encontrados na reabilitação das vias nacionais existentes para velocidades de projecto de 220 km/h, prendem-se com a geometria, sendo geralmente as larguras das plataformas insuficientes e as inclinações dos taludes com factores de segurança pouco confortáveis. O estado da estrutura da via e sua fundação-aterro revela geralmente uma camada de sub-balastro contaminada, uma inadequabilidade da concepção da camada de leito da via e os aterros com estados de baixa compacidade. A estes problemas acrescem ainda frequentemente as insuficientes condições de drenagem. Se juntarmos aos problemas referidos ainda, as condicionantes de interdição da exploração durante as operações de reabilitação, compreende-se que os estudos de renovação/reabilitação da via devam contemplar uma análise económica das duas soluções alternativas : renovação/reabilitação da via existente ou via nova.

Os problemas referidos relativos ao estado de compacidade dos aterros das linhas existentes leva a encarar soluções de melhoramentos do tipo das que são correntemente adoptadas no melhoramento dos terrenos de fundação. A profundidade desse melhoramento dependerá das características geotécnicas desses aterros e do tipo de estrutura adoptada para a via. Este último aspecto é bem evidenciado na Figura 5, adaptada de [18]. Além disso, o melhoramento do aterro e respectiva fundação, deve ainda ser concebido para as acções, quer ambientais, quer naturais a que vai estar submetido, muito particularmente às acções sísmicas se se tratar de uma obra implantada numa zona sísmica.

Um outro aspecto geotécnico muito relevante relativamente à reabilitação da via para comboios de alta velocidade é a situação de aterros de pequena altura sobre solos compressíveis, onde a tensão induzida pelo comboio é superior à tensão aplicada pelo próprio aterro. Neste caso

verifica-se que a deformação da via aumenta significativamente com a velocidade do comboio a partir de uma determinada velocidade (Fig. 6). Este aspecto deverá merecer no futuro uma maior investigação, principalmente nas soluções construtivas, para não restringir as condições de exploração das linhas de alta velocidade, como acontece actualmente nalguma delas [19].

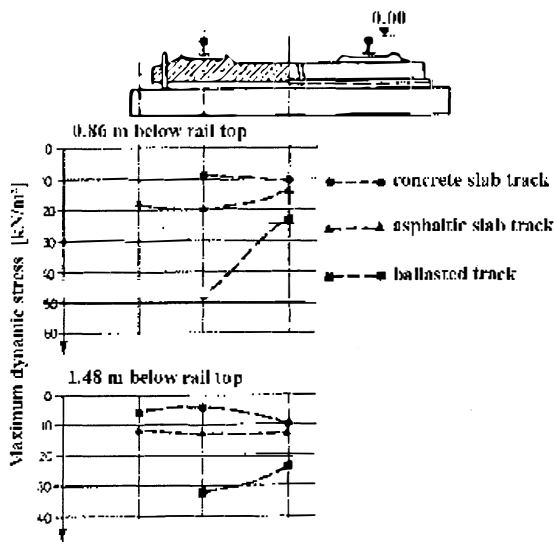


Figura 5: Influência do tipo de estrutura da via nas tensões induzidas em profundidade [18]

Alguns avanços foram já conseguidos em termos da previsão da velocidade crítica do sistema (superestrutura-infraestrutura-aterro e respectiva fundação) [13], sendo recomendável com base nalguns dados experimentais (Fig. 9) que o projectista conceba uma solução de tal modo que o sistema tenha uma velocidade crítica de pelo menos 170% da velocidade de projecto [20].

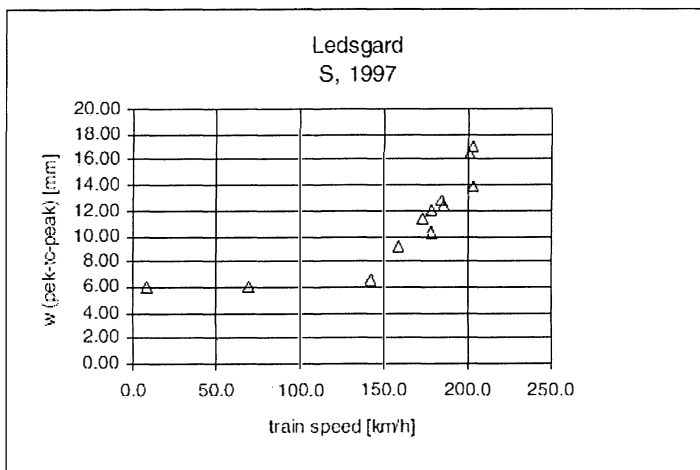


Figura 6 : Evolução da deflecção com o aumento da velocidade [20]

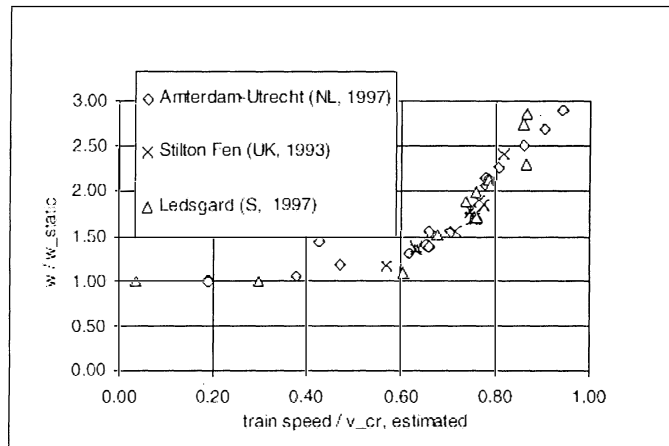


Figura 7 : Amplificação da deflecção em função da velocidade, normalizada pela velocidade crítica de cada um dos sistemas dos vários trechos experimentais [20]

## 6. SISTEMAS DE GESTÃO

A preservação e a reabilitação do património viário constitui um factor importante na economia de um país. No nosso país, onde houve grandes investimentos feitos a nível das infra-estruturas viárias na última década, é relevante a conservação desse património. Para tal é necessário dispor-se de sistemas consistentes, objectivos e fiáveis de gestão dessas infra-estruturas, de modo a antever as necessidades de conservação, sobretudo das estruturas mais antigas. Os sistemas de gestão actualmente operacionais no nosso país e noutros países baseiam-se sobretudo na inspecção visual e em dados do estado superficial. Estes dados são utilizados em análises estatísticas, quer de regressão linear, quer das cadeias de Markov de 2ª ordem, para prever o comportamento futuro, sem incorporar dados relevantes de subsuperfície que condicionam na maioria das vezes a deterioração da estrutura. Há, por isso, um imenso campo de aperfeiçoamento e de desenvolvimento de técnicas não destrutivas de observação das condições de estado das estruturas e das respectivas fundações que se prevê no futuro. A integração destes dados nos sistemas de gestão conduzirá a modelos de deterioração das estruturas muito mais fiáveis e conseqüentemente permitirá economias significativas na manutenção do património viário construído. Essas técnicas baseiam-se sobretudo na tecnologia de leituras e imagens de subsuperfície (Subsurface Sensing and Imaging – SSI). As aplicações actualmente existentes aplicáveis aos pavimentos são: georadar (GPR), termografia de infravermelhos e tomografia acústica. Nos estados Unidos da América (Agosto de 2000) foi criado, pela Fundação Nacional para a Ciência, um novo Centro de Investigação de « Sistemas de leitura e imagem de subsuperfície » para infra-estruturas de engenharia civil e aplicações geotécnicas (CenSSI: <http://www.censsis.neu.edu>). A Figura 8 pretende ilustrar o principal objectivo deste centro que é de identificar as capacidades desta tecnologia na avaliação do comportamento dos materiais e estruturas de engenharia civil, muito particularmente de estruturas geotécnicas, condutas enterradas, detecção de objectos enterrados, caracterização de pavimentos, tabuleiros de pontes.

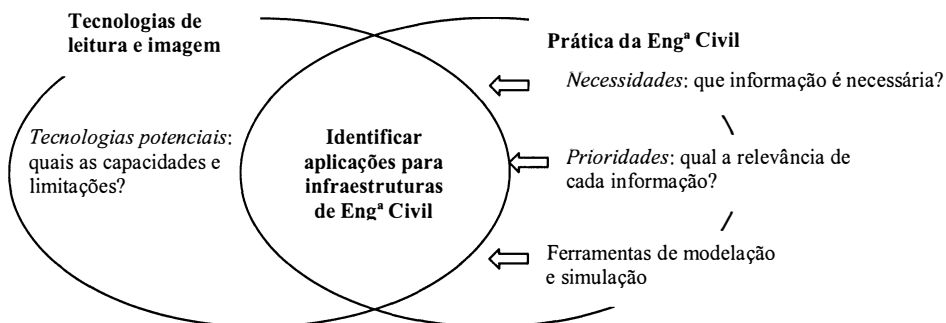


Figura 8: Identificação das tecnologias promissoras para as infraestruturas e a geotecnia

Além da consideração das condições de subsuperfície das estruturas, há ainda a necessidade de integrar as componentes geotécnicas das infra-estruturas de transporte nos sistemas de gestão de estradas e de caminhos de ferro. Essas componentes são principalmente os taludes e os aterros. O comportamento destas obras geotécnicas é influenciado pelos materiais e pelas acções ambientais e de carregamento. De facto, há custos significativos associados à totalidade dos trabalhos de rotina, quer dos taludes, quer dos aterros, principalmente ligados aos problemas de erosão e de escorregamentos superficiais. A reparação destes problemas é frequentemente feita por processos de rotina, sem haver uma análise técnica e económica específica ao tipo de ocorrência. Uma abordagem desta natureza permitirá fazer economias significativas nos custos totais anuais associados a estes tipos de reparações.

A integração das componentes geotécnicas nos sistemas de gestão de pavimentos permitirá uma redução dos custos de manutenção e conservação anuais, mantendo as infra-estruturas em níveis de serviço aceitáveis. A existência de um sistema integrado para um determinado itinerário, incluindo as componentes geotécnicas, os pavimentos, as obras especiais: obras de arte e túneis, permitirá tomadas de decisão que optimizam a utilização dos recursos disponíveis (Fig. 9). De facto, com base na análise do inventário da infra-estrutura e nos dados do respectivo comportamento, conjuntamente com os custos e disponibilidades orçamentais, será possível decidir qual a melhor acção a empreender para atingir os objectivos estabelecidos.

## 7. CONCLUSÕES

Os desenvolvimentos tecnológicos, quer a nível da mecânica, quer da electrónica, bem como as novas tecnologias a nível da informação deixam prever modificações importantes na prática geotécnica a vários níveis: no armazenamento dos dados da caracterização geotécnica e meios de transmissão e divulgação dos mesmos; na tecnologia da construção a nível dos equipamentos compactação e do respectivo controlo de qualidade; na monitorização das estruturas e respectiva transmissão da informação.

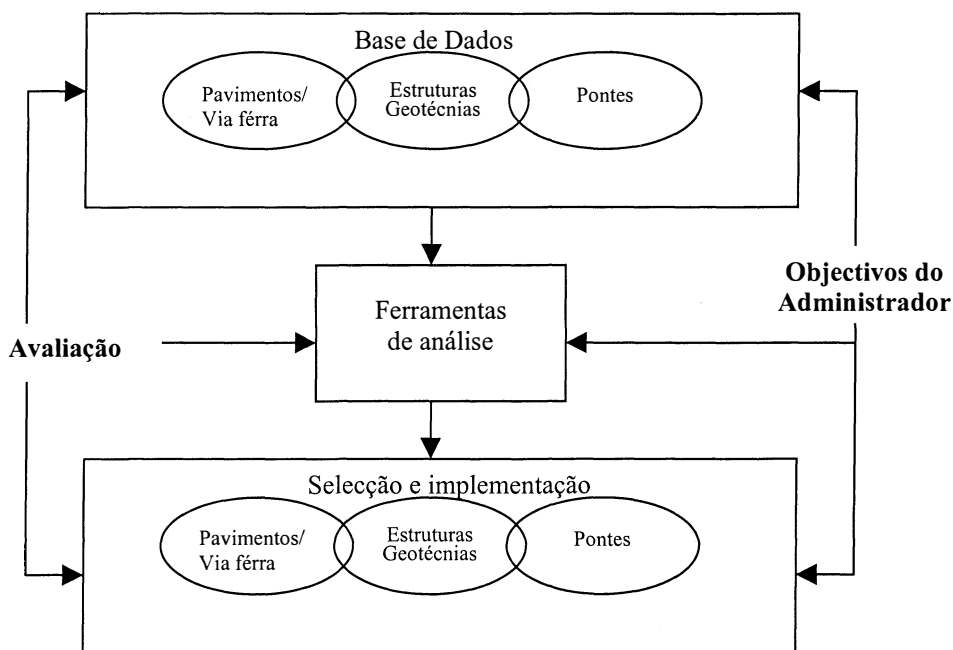


Figura 9: Interação com os diferentes tipos de estruturas

Estas tecnologias serão no futuro próximo um contributo importante na implementação de sistemas de gestão de exploração das infra-estruturas construídas. Estes sistemas deverão ser sistemas integrados, devendo contemplar não só a estrutura como nos sistemas existentes (pavimento ou via férrea) mas também as componentes geotécnicas, como sejam os aterros, os taludes e os túneis. Estes sistemas integrados permitirão tomadas de decisão relativamente às acções a empreender que optimizem a utilização dos recursos disponíveis.

## REFERÊNCIAS

- [1] Schneider, J.A.; Schneider, J.A., Mayne, P.W. and Rix, G.J. (2001). Geotechnical site characterisation in the greater Memphis area using cone penetration tests. *Engineering Geology*, 62, pp.169-184.
- [2] Gucunski, N.; Woods, R.D. (1992). Numerical simulation of the SASW method. *Soil Dyn. Earthquake Engng.*, 11, 213-227.
- [3] Stokoe, K.H.; Wright, S.G.; Bay, J.A.; Roësset, J.M. (1994). Characterization of geotechnical sites by SASW method. *Geophysical Characterization of Sites*, R.D. Woods, ed., Special volume ISSMFE:TC 10, New Delhi. Oxford & IBH Publishing Co., pp. 15-25.
- [4] Fleureau, J-M.; Hadiwardoyo, S.; Gomes Correia, A. (2002). Influence of suction on the dynamic properties of a silty sand. 8º Congresso Nacional de Geotecnia.

- [5] Gomes Correia, A. (2001). Soil mechanics in routine and advanced pavement and rail track rational design. *Geotechnics for Roads, Rail Tracks and Aarth structures* (Gomes Correia & Brandl, eds.). A.A. Balkema, Lisse, The Netherlands, pp.165-187.
- [6] Adam, D.; Markiewicz, R. (2001). Compaction behaviour and depth effect of the polygon-drum. *Geotechnics for Roads, Rail Tracks and Aarth structures* (Gomes Correia & Brandl, eds.). A.A. Balkema, Lisse, The Netherlands, pp.27-36.
- [7] Pinard, M.I. (2001). Developments in compaction technology. *Geotechnics for Roads, Rail Tracks and Aarth structures* (Gomes Correia & Brandl, eds.). A.A. Balkema, Lisse, The Netherlands, pp.37-46.
- [8] Brandl, H. (2001). Compaction of soil and other granular materias – interactions. *Geotechnics for Roads, Rail Tracks and Aarth structures* (Gomes Correia & Brandl, eds.). A.A. Balkema, Lisse, The Netherlands, pp. 3-11.
- [9] Brandl, H. (2001). High embankments instead of bridges and bridge foundations in embankments. *Geotechnics for Roads, Rail Tracks and Aarth structures* (Gomes Correia & Brandl, eds.). A.A. Balkema, Lisse, The Netherlands, pp. 13-26.
- [10] Veiga Pinto, A.; Fortunato, E. (1999). The use of soil-rockfill mixtures in the construction of roadfills. *Proc. XII ECSMGE, Geotechnical Engineering for Transportation Infrastructure*, Barends et al. (eds), A.A. Balkema, Rotterdam.
- [11] Gomes Correia, A.; Gambin, M.; Antão, A. (2002). L'importance de l'utilisation d'un modèle de comportement non linéaire pour l'interprétation des essais de plaque e pressiométriques. 8<sup>o</sup> Congresso Nacional de Geotecnia.
- [12] Hoff, I. (2000). Exclay Internordic Geoproject. Field test at Sandmoen, Norway. Construction and instrumentation. SINTEF report STF22 F00612.
- [13] Kaynia, A.M.; Madshus, C.; Zackrisson, P. (2000). Ground vibration from high-speed trains: Prediction and countermeasure. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 126, n<sup>o</sup>6, pp: 531-537.
- [14] Aubry, D.; Clouteau, D.; Bonnet, G. (1994). Modelling of wave propagation due to fixed or mobile dynamic sources. *Proc. Workshop Wave'94*, pp: 79-93.
- [15] Indraratna, B., Ionescu, D. & Christie, H.D. 1998. Shear behavior of railways ballast based on large-sale triaxial tests. In *ASCE Journal of Geot. Et Geoenv. Eng* 124 (5).
- [16] Biarez, J., Bougriou, Z., Fayad, T., Hammoud, I., Liu, H.; Gomes Correia, A. (1999). Lois de comportement pour l'étude des fondations de voies ferrées (et routes). Les modules de  $10^{-5}$  à  $10^{-1}$  pour les sols remaniés et non remaniés. *Proc. XII ECSMGE, Geotechnical Engineering for Transportation Infrastructure*, Barends et al. (eds), A.A. Balkema, Rotterdam.



- [17] Neidhart, T. (2001). True-to-scale in situ tests determining dynamic performance of earthworks under high speed train loading. *Geotechnics for roads, rail tracks and earth structures* (Gomes Correia & Brandl, editors.). A.A. Balkema, Lisse, The Netherlands, pp.213-223.
- [18] Kempfert, H.G. & Hu, Y. (1999). Prediction on the long-term behavior of subsoils under high-speed railways. *Proc. XII ECSMGE, Geotechnical Engineering for Transportation Infrastructure*, Barends et al. (eds), A.A. Balkema, Rotterdam.
- [19] Woldringh, R.F. & New, B.M. (1999). Embankment design for high speed trains on soft soils. *Proc. XII ECSMGE, Geotechnical Engineering for Transportation Infrastructure*, Barends et al. (eds), A.A. Balkema, Rotterdam.
- [20] Woldringh, R.F. (2001). Notes on specifications for railway embankments in high speed lines. *Geotechnics for roads, rail tracks and earth structures* (Gomes Correia & Brandl, editors.). A.A. Balkema, Lisse, The Netherlands, pp.259-262.