



## OS SOLOS NAS CONSTRUÇÕES

### Ensaio de prospeção e validação

O solo é um elemento fundamental quando se projeta qualquer edifício, no entanto, como material natural apresenta uma grande variabilidade no seu comportamento e na sua composição.

Para diminuir os riscos associados à escavação, dimensionamento e execução de fundações especiais e de soluções de contenção, são executados ensaios de caracterização do solo e que permitem estimar os parâmetros resistentes do solo.

Em norma, os ensaios de prospeção são acompanhados de um relatório geotécnico redigido por uma entidade competente e as soluções de fundação e de contenção, dimensionadas por um projetista da especialidade. No entanto, neste documento pretende-se enumerar algumas conclusões que se podem retirar de um ensaio geotécnico, permitindo assim, à partida excluir soluções que não se adequam ao solo e antever os riscos associados à terraplenagem.

### ► Ensaio de Prospeção Geotécnica

Atualmente já existem vários ensaios que permitem responder a várias condicionantes do terreno ou às necessidades do projeto, neste documento pretende-se elucidar para os vários ensaios existentes, em que casos devem ser utilizados e quais os resultados extraídos. Dentro do universo dos ensaios de prospeção pode, à partida separar-se em duas famílias:

- Ensaio mecânicos
- Ensaio geofísicos

#### Ensaio Geofísicos

São caracterizados pela não perturbação ou perturbação ligeira do solo, normalmente consiste na emissão de ondas e análise do sinal recebido. A análise destes ensaios permite, em conjunto com a prospeção mecânica diminuir o grau de incerteza do desenvolvimento das camadas longitudinalmente e em profundidade. Não sendo ensaios muito comuns nas obras executadas, fica uma lista de possíveis ensaios para consultar empresas da especialidade.

Nome	Aplicações
Sísmica de refração	Espessura/desenvolvimentos das camadas,
Cross-hole	Espessura/desenvolvimentos das camadas,
Georadar	Desenvolvimento das camadas, deteção de alterações naturais ou artificiais.

Estes ensaios serão especialmente úteis quando o local de construção se encontra perto de zonas em que há conhecimento de bolsas de ar, existência de objetos

enterrados ou quando os resultados pontuais mostrem um desenvolvimento muito irregular.

### Ensaios Mecânicos

Esta tipologia de ensaios é a mais utilizada nos projetos estudados pela AOC, envolve uma perturbação no solo, seja pela cravação por pancadas ou pela cravação contínua. Por haver uma alteração do solo a estudar, os resultados são ajustados de forma a aproximar-se o máximo possível com a realidade.

Nome	Tipo ensaio	Aplicação	Resultados
Poço inspeção	Abertura vala	Todos	Compactação/ rigidez do terreno
SPT	Cravação dinâmica	Granulares	Amostra, estratigrafia, características resistentes e nível freático
CPT/CPTu	Cravação contínua	Solos moles, aluvionares, areias finas	Estratigrafia, resistência ponta e de atrito. CPTu- medição adicional da pressão hidrostática.
PDL/PDM/ PDP/PDSP	Cravação contínua	Todos	Estratigrafia, índice de resistência.

Note-se que a aplicação do ensaio não restringe a sua utilização num solo não mencionado, serve apenas como indicação onde a sua aplicação mostra melhores resultados. Os ensaios de prospeção enunciados seguem a norma em vigor EC7 complementada com a EN 1997-2, este último que aborda a investigação do solo e as campanhas de prospeção.

### Poços de prospeção

Os poços de prospeção são um ensaio expedito que permitem verificar várias características do solo como:

- Heterogeneidade do solo (estratos);
- Existência de matéria orgânica;
- Grau de compactação/ rigidez do solo (estimado);
- Nível freático.

Com este método não é possível atingir grandes profundidades, é condicionado pela consistência/ compacidade do terreno e pela existência de nível freático, no entanto por ser rápido e executado com meios de fácil acesso em obra pode ser bastante útil.

### SPT

O ensaio mais utilizado em todo mundo trata-se do SPT, que consiste basicamente na penetração de um amostrador normalizado (Terzaghi) por meio de pancadas. Este ensaio apresenta as seguintes vantagens:

- Expedito;
- Recolha de amostra;
- Correlação entre resultados e parâmetros geotécnicos;
- Identificação do nível freático;
- Identificação de estratos;
- Índice RQD (em rochas).

Quando se analisa este ensaio é necessário verificar a cota a que o ensaio foi executado e a data da sua realização, uma vez que o nível freático tende a oscilar consoante as diferentes épocas do ano e esta variação poderá provocar custos imprevistos.

Os resultados do ensaio SPT mostram em perfil o número de pancadas necessárias para o solo sofrer um assentamento de 15cm (desprezados) mais 30cm e uma estratigrafia do solo com uma descrição das camadas intersetadas. A descrição das camadas em conjunto com o número de pancadas permite retirar algumas conclusões do comportamento dos solos.

- Areias e cascalhos: Solos granulares;
- Areias e argilas: Solos finos.

O mesmo acontece para maciços rochosos, no entanto a nega pode ser atingida quase à superfície e a análise deve ser feita pelos graus de fracturação, alteração e índice RQD. Em suma, podem ser analisados da seguinte forma:

- Grau de fracturação e alteração- escala de 1 a 5 (1 menos fraturado/alterado, 5 mais fraturado/alterado);
- Índice RQD- escala percentual (100% rochas de melhor qualidade).

Fica a nota que rochas com graus de alteração muito elevados têm um comportamento semelhante ao solo.

O ensaio SPT, através de correlações também nos permite aferir o ângulo de atrito associado ao solo, este parâmetro tem especial relevância na execução de taludes em solos granulares, sejam eles permanentes ou provisórios. A coesão é o parâmetro que caracteriza os solos finos e que em escavações profundas também tem de ser considerado, quanto maior a coesão maior a altura de um talude vertical nesse terreno.

Segue um quadro sumário de parâmetros aproximados para solos granulares e solos finos relacionados com os resultados SPT.

Solos granulares	$N_{SPT}$	$\Phi$ (°)
Fofa	>4	<30°
Pouco compacta	4-10	30°- 35°
Mediamente Compacta	10-30	35°- 40°
Compacta	30-50	40°- 45°
Muito compacta	>50	>45°

Solos finos	$N_{SPT}$	$c'$ (kPa)
Muito mole	>2	<10
Mole	2-4	10-25
Média	4-8	25-50
Rija	8-15	50-100
Muito Rija	15-30	100-200
Dura	>30	>200

No âmbito da execução de obra uma das características do solo mais importantes a avaliar é a tensão admissível no terreno, que pode ser estimada consoante o tipo de solo de implantação e a fundação. São colocadas à disposição duas tabelas que permitem estimar a tensão admissível em solos granulares e solos finos no final do documento.

### CPT/CPT-u

O ensaio CPT, também muito utilizado na prospeção do terreno permite caracterizar até solos muito moles. A penetração da sonda no solo é feita de forma contínua e permite estudar a estratigrafia do terreno com maior precisão que o SPT. Existe uma variação deste ensaio, o CPTu que conta com um piezocone no amostrador. Este ensaio permite medir:

- Resistência de ponta ( $Q_c$ );
- Atrito do solo ( $f_s$ );
- Razão de atrito ( $R_f$ );
- Potencial de liquefação;
- Pressão neutra (CPTu);
- Permeabilidade do solo (CPTu).

Este ensaio vem normalmente acompanhado por um relatório, escrito por empresa especializada que permite entender os solos estudados e os resultados obtidos, de toda a forma, é possível fazer uma rápida análise dos resultados obtidos pela máquina que executa o ensaio quando não existe um documento que sumariza toda a informação.

O ângulo de atrito pode ser estimado com base na resistência de ponta, com os seguintes intervalos:

Compacidade relativa	Resistência de ponta $Q_c$ (MPa)	$\phi'$ (°)
Muito baixa	0-2.50	29-32
Baixa	2.5-5.0	32-35
Média	5-10	35-37
Elevada	10-20	37-40
Muito elevada	>20	40-42

Já a razão de atrito permite detetar o tipo de solo intersetado na sondagem. Solos com maior razão de atrito tendem a conter mais finos e solos com  $R_f$  mais baixo contêm normalmente na sua génese material granular mais grosseiro.

O estudo da pressão neutra no solo é importante para verificar o comportamento do solo quando solicitado a uma sobrecarga instantânea, a variação da pressão acaba por validar a caracterização do solo, uma vez que pressões intersticiais que demorem muito tempo a dissipar estão relacionadas a solos mais finos, com índices de permeabilidade mais baixos.

### Penetrómetro dinâmico

O ensaio com recurso a penetrómetro dinâmico tem algumas semelhanças com o ensaio SPT, uma vez que

mede o número de pancadas necessárias para afundar o cone 10 ou 20cm, a cravação é executada através da queda de uma massa, esta que define o tipo de ensaio.

Massa (kg)	Sigla- Penetrómetro dinâmico
10	DPL/ PDL- P. D. Leve
30	DPM/ PDM- P. D. Médio
50	DPH/ PDP- P. D. Pesado
63.50	DPSH/ PDSP- P. D. Super Pesado

Este ensaio apresenta as seguintes vantagens:

- Rápido;
- Baixo custo;
- Penetração contínua;
- Resistência dinâmica de ponta.

Este ensaio quando executado em simultâneo com ensaios SPT e CPT permite um melhor e maior reconhecimento do solo, uma vez que os primeiros dois permitem estimar várias características resistentes do solo que podem ser relacionadas com os resultados do penetrómetro dinâmico, que por ser mais barato permite a execução de mais ensaios.

A nível das tensões admissíveis no terreno para a sapatas diretas, pode recorrer-se à seguinte fórmula que, de forma expedita poderá ajudar na conceção da solução de fundações.

$$q_{adm} = \frac{q_d}{15 \text{ ou } 20}$$

## ➤ Ensaios de Compactação

Para além dos ensaios de prospeção geotécnica que permitem analisar os parâmetros resistentes do solo e o seu desenvolvimento, existem os ensaios de controlo de compactação que são muitas vezes uma obrigatoriedade do projeto para confirmar a capacidade do aterro antes da execução de pavimentos térreos, para garantir tensões de contacto nas sapatas ou em aterros técnicos.

### Ensaio troxler

Para entender os resultados do ensaio troxler é necessário compreender a teoria que o sustenta.

O solo é composto por três partes, a parte, sólida, líquida e gasosa, as duas últimas, representam o volume de vazios. Compreende-se que um solo à medida que é compactado apresenta uma diminuição dos vazios e um aumento do seu peso volúmico. O peso volúmico é aferido a partir da seguinte equação:

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V}$$

Com:

$Y_d$  - Peso aparente seco

$W_s$  - Peso das partículas

$V$  - Volume total

O peso aparente seco ótimo é o valor que garante melhores condições de compactação e este está relacionado com o teor ótimo de água no solo. Embora a presença de água no solo esteja ligada a um índice de vazios maiores, quando não existe água, após compactação do solo o ar fica aprisionado entre as partículas sólidas não permitindo a sua expulsão. A água neste sistema acaba por ser fundamental uma vez que a sua presença funciona como uma “cola” entre partículas, que ao serem compactadas se separam e libertam o ar. Claro que quando existe água em excesso esta função de agregação desaparece uma vez que não existe contacto entre partículas.

O ensaio troxler, segue a norma ASTM D2922 & ASTM D3017, permite medir através da emissão e receção de raios gama o peso específico do solo e o teor de água.

Através destes dois dados obtém-se o peso específico seco e o grau de compactação.

SÍNTESE DE RESULTADOS

ENSAIO N.º	COTA DE TRABALHO	AMOSTRA PADRÃO N.º	ENSAIO LABORAT. COMPACTAÇÃO		CARACTERIZAÇÃO PONDERAL "IN SITU"				
			Wopt (%)	γ <sub>dm</sub> (g/cm³)	W (%)	γ (kg/m³)	γ <sub>d</sub> (kg/m³)	DESVIO Wopt (%)	Cr (%)
1	BATE	EUARTE	5,4	2,390	4,8	2,368	2,260	-0,6	98,7
2	4	4	4	4	4,2	2,260	2,268	-0,7	98,6
3	4	4	4	4	4,2	2,396	2,288	-0,2	99,9
4	4	4	4	4	4,9	2,393	2,281	-0,4	99,8

Note-se que antes de executar este ensaio, é necessário saber quais os dois parâmetros ótimos,  $\gamma_d$  e  $W_{opt}$ , para haver meio de comparação, para tal deve prever-se um ensaio de compactação do solo a compactar/ analisar.

O parâmetro  $Cr$  ou  $GC$ , calculado através dos resultados obtidos no terreno, indica qual a o grau de compactação do terreno, este é obtido através da fórmula:

$$GC = \frac{\gamma_d^{campo}}{\gamma_d^{optimo}}$$

Este será tanto maior quanto a compactação do terreno.

### Ensaio de carga

O ensaio de carga permite verificar a compactação de um solo ao carrega-lo através de uma placa metálica circular e medir a sua deformação.

A compactação é avaliada pela comparação dos módulos de deformação no primeiro e no segundo carregamento, o módulo de deformação é calculado da seguinte forma:

$$E_v = \frac{\pi}{r} \times (1 - \nu)^2 \times \frac{pr}{z_2}$$

Com  $pr$  a tensão aplicada na placa,  $r$  a dimensão da placa e  $z_2$  o deslocamento da placa. Com esta fórmula, conclui-se que quanto menor o deslocamento sofrido, para uma mesma carga, maior o módulo de deformação.

A escolha do diâmetro da placa prende-se com a espessura da camada a analisar ou com a fase em a obra se encontra. Uma vez que o ensaio atinge uma profundidade de 1.5 do

diâmetro de placa utilizada, em camadas de pavimento com espessuras pequenas não interessa utilizar diâmetro de 600 ou 762mm. Quando o solo a ensaiar, é o solo natural, aconselha-se a utilização da placa de 600mm para atingir maiores profundidades e perceber a capacidade natural do solo, no entanto esta utilização está dependente dos equipamentos/ espaço disponível para fazer o contra-peso do ensaio, uma vez que para maiores diâmetros maior o contra-peso para a execução do ensaio.

Consoante a dimensão da placa, o ensaio segue até ser atingido um dos seguintes valores:

Raio (mm)	Assentamento (mm)	Tensão normal (MPa)	Norma
300	5	0.50	DIN18134
600	7	0.25	NF P94117
762	13	0.2	ASTM D 1196

Neste ensaio, o solo vai deformando gradualmente até uma certa tensão, após esta, dá-se a descarga do solo, onde se registam os assentamentos. Quando existe tensão nula na placa, entende-se que o solo não irá recuperar as deformações já sofridas e inicia-se a segunda fase de carga.

Nesta segunda fase os deslocamentos sofridos, são menores que na primeira, por isso  $E_{v2}/E_{v1} > 1$ .

Quanto maior for esta razão, menor são os assentamentos na segunda fase em relação à primeira, o que poderá significar que o solo não se encontra bem compactado à partida.

### Ensaio CBR

O ensaio CBR permite analisar indiretamente a capacidade resistente de um solo, muito utilizado para validação das bases e sub-bases para rodovia, este ensaio é uma referência para o dimensionamento de pavimentos.

A execução destes ensaios e as respetivas conclusões devem considerar a norma em vigor ASTM D1883- 14: 2014.

O ensaio CBR é um ensaio laboratorial que consiste na determinação do teor de água ótimo para um solo a utilizar como base ou sub-base num pavimento. Este ensaio compara as tensões de um provete padrão com o valor obtido no ensaio, os provetes ensaiados devem apresentar uma variação da quantidade de água no solo. O ensaio laboratorial regista o desenvolvimento dos assentamentos quando a amostra é sujeita a uma carga vertical, os valores das cargas para as quais os assentamentos de 2.5mm e 5.0mm são atingidos, servem de comparação para as cargas padrão (6.90 e 10.35MPa respetivamente). Em suma, o índice CBR é obtido com o seguinte cálculo:

$$CBR(\%) = \frac{\sigma_{lab}}{\sigma_{padrão}} \times 100$$

Este ensaio serve para comprovar a adequabilidade de um solo numa base de pavimento. Para várias granulometrias estes são os valores normais de CBR:

- Siltes e solos expansíveis: CBR (%) < 6%
- Solos finos e arenosos: 8% < CBR(%) < 20%
- Britas e solos grossos 50% < CBR(%) < 100%

### Proctor

O ensaio proctor é um ensaio laboratorial com vista à determinação dos valores ótimos para a compactação do solo, necessários para uma correta avaliação do ensaio troxler, efetuado in situ. Este divide-se em dois tipos:

- Proctor normal (peso do pilão 2.49kg)
- Proctor modificado (peso do pilão 4.54kg)

Este ensaio, executado segundo a norma E197-1966 do LNEC, consiste na compactação em laboratório de um solo, dentro de um cilindro em várias camadas, variando a quantidade de água na mistura. A compactação é efetuada através da queda do pilão sobre o solo, 25 vezes caso o molde cilíndrico seja pequeno ou 55 vezes, caso se utilize um cilindro maior.

## ➤ Conclusões

A prospeção do terreno é um aspeto muito importante na construção de edifícios, este documento tem o objetivo de ajudar técnicos e interessados a perceber o que é possível extrair de vários ensaios e como podem ser úteis nas técnicas construtivas a utilizar.

O ensaio SPT é um ensaio que mostra melhores resultados em solo granulares e apresenta a grande vantagem de recolher amostras do solo.

O ensaio CPT(u) é um ensaio de prospeção que permite uma análise contínua do terreno e apresenta muito bons resultados em solo de granulometria fina e muito fina, aconselha-se especialmente em solos juntos a rios, lodosos e siltosos.

O ensaio DP tem a vantagem de ter um custo reduzido e, sendo de penetração contínua, permite registos ao longo da profundidade. Relacionando os resultados DP com ensaios SPT ou CPT permite um conhecimento alargado do solo. Esta solução de prospeção é indicada para obra que obriguem a um conhecimento extensivo do solo devido à sua complexidade ou dimensão.

Em todos os ensaios acima abordados, as notas que se deixam são de carácter informativo, em caso de obras geotécnicas de maior complexidade ou risco, os ensaios de prospeção devem ser acompanhados de um parecer técnico por empresa especializada.

A nível dos pavimentos em edifícios com cargas no pavimento elevadas, a execução de uma base é fundamental para garantir a funcionalidade e a sua durabilidade. As bases e sub-bases já são alvo corrente de ensaios para garantir a compactação, para tal pode recorrer-se a um dos ensaios enunciados. Em ambos os ensaios, a caracterização do solo é importante para garantir que é

adequado como base, no entanto para o ensaio troxler, esta caracterização é indispensável.

### Correlação entre $N_{SPT}$ e tensão admissível em solos granulares

Descrição (compacidade) - Solos granulares	$N_{SPT}$	Tensão admissível provável (kPa)		
		L=0.75m	L=1.50m	L=3.00m
Muito compacto	>50	>600	>500	>450
Compacto	30-50	300-600	250-500	200-450
Mediamente compacto	10-30	100-300	50-250	50-200
Pouco compacto	5-10	50-100	<50	>50
Fofo	<5	A estudar		

L = dimensão mais pequena da sapata

### Correlação entre $N_{SPT}$ e tensão admissível em solos finos

Descrição (coesão) - Solos finos	$N_{SPT}$	Tensão admissível provável (kPa)		
		L=0.75m	L=1.50m	L=3.00m
Dura	>30	500	450	400
Muito rija	15-30	250-500	200-450	150-400
Rija	8-15	125-250	100-200	75-150
Média	4-8	75-125	50-100	25-75
Mole	2-4	25-74	<50	-
Muito mole	<2	A estudar		

L = dimensão mais pequena da sapata

## ➤ Agradecimentos

Ao longo da execução deste documento foi necessário recorrer a pessoas especializadas na área, neste parágrafo reserva-se um agradecimento especial à Geoma, em especial à eng. Ana Carvalheira que aconselhou e esclareceu pontos essenciais para o texto que se apresenta.

**I Eng<sup>a</sup> Filipa Rodrigues** | Engenheira Civil