

Mestrado em Estrutura de Engenharia Civil

Laboratório de Técnicas Experimentais e Observação de Obras

Projecto Geotécnico Assistido por Ensaios de Laboratório e *In Situ*

António Viana da Fonseca

1. BASES DO DIMENSIONAMENTO GEOTÉCNICO (Eurocódigo 7)

- Com base no cálculo;
- Por medidas prescritivas;
- Uso de ensaios de carga e ensaios em modelo experimental;
- Método observacional;
- Relatório do projecto geotécnico.

Em todas as bases expostas pressupõe-se a utilização de técnicas experimentais de **caracterização geotécnica** que incluem:

- Estudos preliminares;
- Estudos para o dimensionamento;
- Determinação dos parâmetros geotécnicos;
- Relatório de caracterização geotécnica.

No EC7 Parte 1 indica-se que os resultados de campo e de laboratório podem ou devem ser usados no estabelecimento dos valores de cálculo das propriedades do terreno relevantes. Mas não se prescreve em detalhe o modo como os resultados dos ensaios devem ser tratados para obter os parâmetros geotécnicos.

Exemplo: no EC7 Parte 1 afirma-se relativamente ao CPT.

RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO ESTÁTICA

(1) Na determinação dos valores da resistência de ponta e da resistência lateral local e, eventualmente da pressão intersticial durante um ensaio com penetrómetro de cone introduzido estaticamente, é conveniente ser tidos em consideração os seguintes aspectos:

- os resultados obtidos podem ser significativamente influenciados por pormenores de concepção do cone e da manga, pelo que é necessário ter em devida conta o tipo de cone que está a ser usado;*
- os resultados só podem ser interpretados com confiança quando se conheça previamente a estratigrafia do local, sendo por isso geralmente necessário realizar furos de sondagem conjuntamente com os ensaios penetrométricos;*
- é conveniente ter em atenção os efeitos no solo da água subterrânea e da pressão dos terrenos sobrejacentes na interpretação dos resultados;*
- em solos heterogéneos cujos registos penetrométricos sejam muito irregulares devem ser considerados apenas os valores respeitantes à matriz de solo relevante para o projecto em causa;*
- sempre que existam e sejam fiáveis, é conveniente ser tidas em conta correlações com resultados de outros ensaios, tais como determinações de compacidade e outros tipos de ensaios penetrométricos.*

Para estruturar esta questão surgem as Partes 2 e 3 do EC7:

- Parte 2: **Projecto Geotécnico Assistido por Ensaios. Ensaios de laboratório.***
- Parte 3: **Projecto Geotécnico Assistido por Ensaios In Situ.***

são dois documentos adicionais com os requisitos fundamentais dos vários ensaios de campo e laboratório e indicando como obter os parâmetros geotécnicos a partir dos resultados dos ensaios. Pretende-se dar:

- os requisitos essenciais dos aparelhos e procedimentos de ensaio;*
- os requisitos essenciais para apresentação dos resultados dos ensaios;*
- a interpretação dos parâmetros dos ensaios;*
- exemplos que mostrem como derivar valores dos parâmetros geotécnicos.*

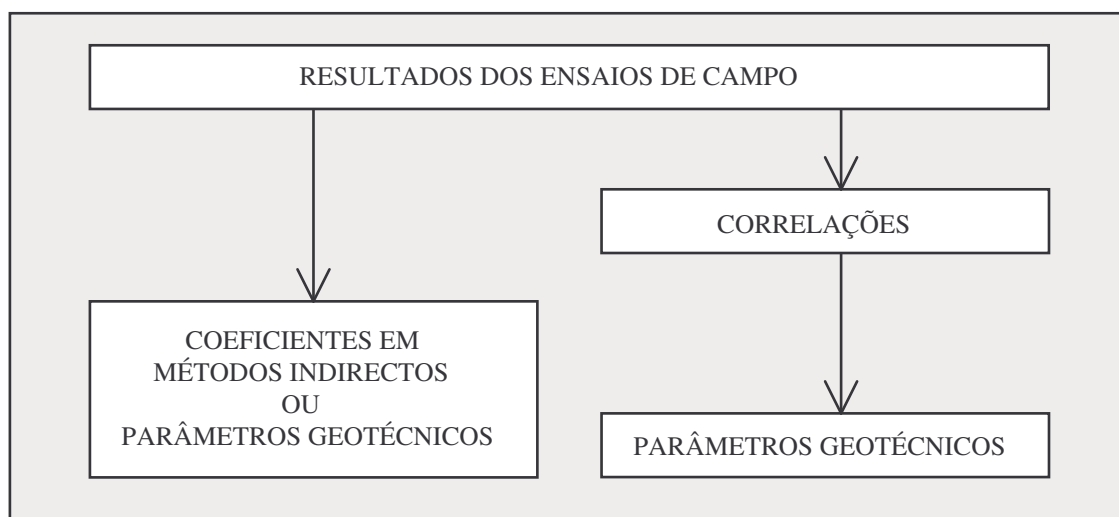
Como exemplo de requisitos essenciais do equipamento para ensaios CPT, a Parte 3 refere:

- (1) P O aparelho deve ser constituído por:*
- sistema de aplicação de pressão;*

- varas;
 - ponteira penetrométrica
- (2) *P O sistema de aplicação de pressão deve proporcionar uma penetração das varas no solo a velocidade constante;*
- (3) *P As varas devem ser ligadas umas às outras de modo a formar um conjunto rígido e com um eixo rectilíneo e contínuo;*
- (4) *Para evitar encurvadura podem usar-se guiamentos ou revestimentos na parte livre das varas acima do solo e para a zona submersa das varas;*
- (5) *As varas devem ser rectilínias de tal modo que a deflexão máxima de um ponto de um metro de vara, relativamente a uma recta que passa pelas extremidades, não deve exceder 0.5mm para as cinco varas mais profundas e 1mm para as restantes;*
- (6) *P A ponteira penetrométrica situa-se na extremidade inferior do conjunto de varas. É formada por um cone e um fuste com o mesmo eixo do conjunto de varas;*
- (7) *P Quando o fuste tem uma manga de atrito, devem ter um eixo comum e a manga deve localizar-se imediatamente atrás do cone;*
- (8) *P O ângulo da ponteira do cone deve ser igual a 60° e a área total nominal da base deve ser $A_C = 1000\text{mm}^2$.*

Como derivar valores, por exemplo através de correlações

Na Parte 3 do EC7 adoptou-se o conceito de “valor derivado” para demonstrar como os parâmetros geotécnicos a usar nos métodos analíticos e/ou coeficientes para utilização nos métodos semi-empíricos podem ser obtidos dos resultados dos ensaios.



Os valores dos parâmetros geotécnicos e coeficientes, obtidos, por exemplo, através de correlações são chamados “valores derivados”.

Exemplo de como na Parte 3 do EC7 são usados os “valores derivados” (as correlações utilizadas não são obrigatórias).

3.1.7 “valores derivados” de parâmetros geotécnicos

3.1.7.1 capacidade resistente de fundações superficiais

- (1) *P Quando se avalia a capacidade resistente duma fundação superficial a partir dos resultados CPT devem ser usados métodos semi-empíricos ou analíticos.*
- (2) *P Quando se usa o método semi-empírico devem ter-se em atenção as particularidades do método.*
- (3) *P Quando se usa o exemplo de método analítico de avaliação de capacidade resistente apresentado no Anexo B na Parte 1 do EC7, a resistência não drenada, c_u , pode obter-se da seguinte relação:*

$$c_u = (q_c - \sigma_{v0}) / N_k$$

onde N_k é estimado com base na experiência local.

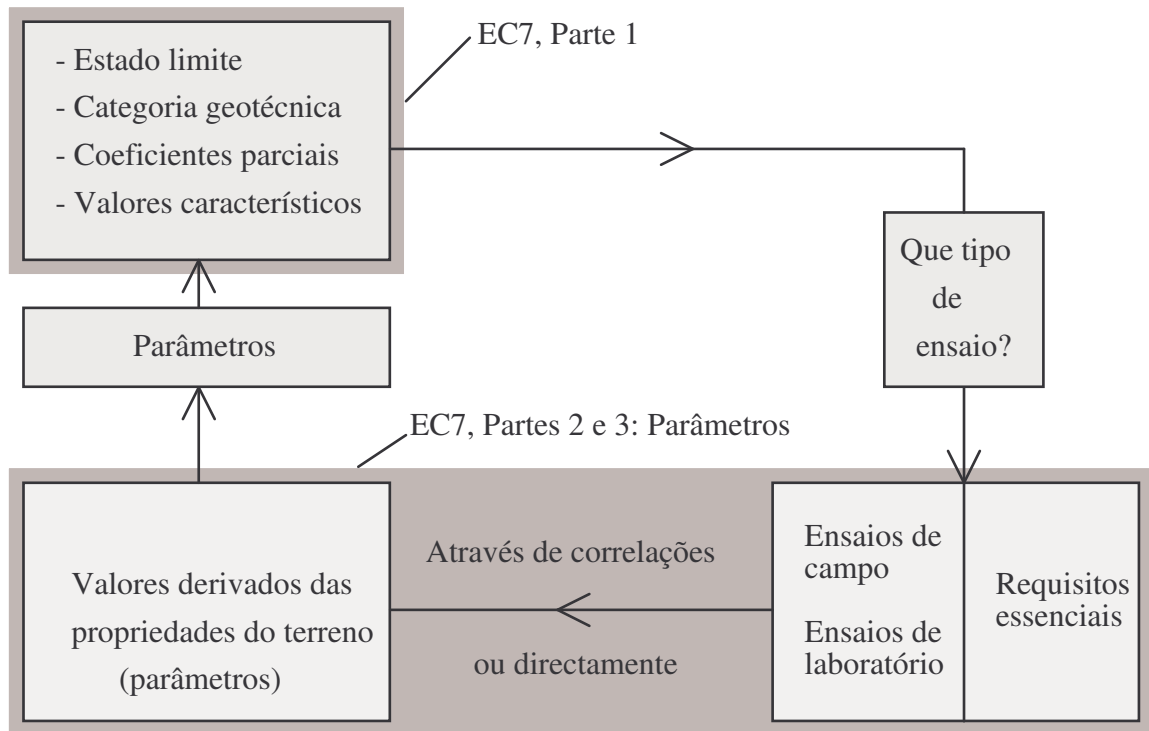
- (4) *Quando se usa o exemplo referido em (3) o ângulo de resistência ao corte, ϕ' , pode obter-se da resistência de ponta, q_c , com base na experiência local.*
- No caso de areias de quartzo e feldspato, pode usar-se o quadro abaixo para determinar o valor médio de ϕ' a partir do valor de q_c .*
- (5) *P Podem usar-se métodos mais elaborados de determinação de ϕ' a partir de q_c , tendo em atenção a tensão vertical efectiva, a compressibilidade e o grau de sobreconsolidação.*

Ângulo de atrito ϕ' para areias de quartzo e feldspato a partir da resistência de ponta q_c .

COMPACIDADE RELATIVA	RESISTÊNCIA DE PONTA q_c (MPa) A PARTIR DO ENSAIO CPT	ÂNGULO DE RESISTÊNCIA AO CORTE ϕ' *
MUITO BAIXA □	0 - 2.5 □	29 - 32 □
BAIXA □	2.5 - 5 □	32 - 35 □
MÉDIA □	5 - 10 □	35 - 37 □
ELEVADA □	10 - 20 □	37 - 40 □
MUITO ELEVADA □	> 20 □	40 - 42 □

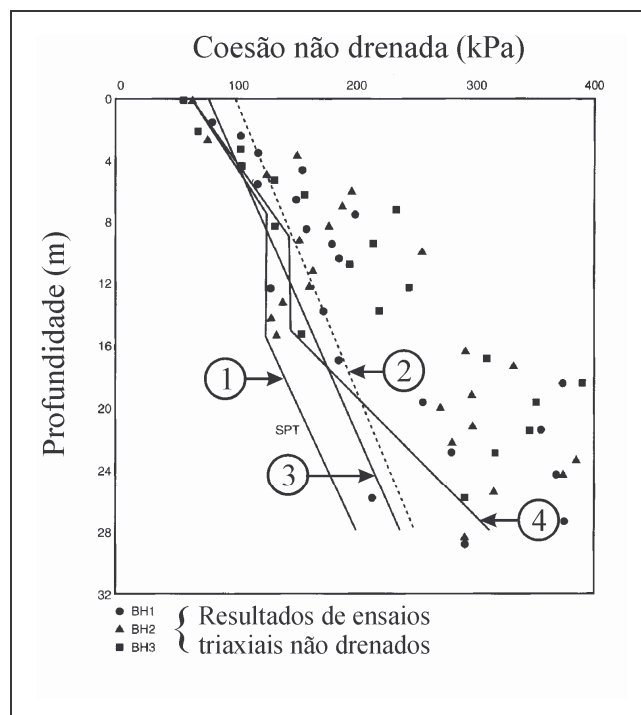
* Valores válidos para areias. Para solos siltosos reduzir 3°. Para burgaus aumentar 2°.

Ligação entre parâmetros geotécnicos dos ensaios de campo (ou de laboratório) e o cálculo das estruturas geotécnicas



Na obtenção de um “valor derivado” admite-se uma zona homogénea de terreno governando o comportamento da estrutura geotécnica.

Como exemplo, consideram-se dois tipos de ensaios de campo, CPT (5 ensaios) e SPT (5 ensaios) e ainda se admitem cinco ensaios de laboratório para determinar, por ex., c_u . podem assim estabelecer-se os conjuntos (três) de “valores derivados” a partir de certas **correlações com c_u** . A partir destes três conjuntos de “valores derivados” para a resistência ao corte não drenado (c_u), o projectista tem de estimar o valor característico a usar:



2. METODOLOGIAS EXPERIMENTAIS PARA PARAMETRIZAÇÃO EM GEOTECNIA

ENSAIOS DE LABORATÓRIO *VERSUS* ENSAIOS *IN SITU*

ENSAIOS *IN SITU*

O recurso aos ensaios *in situ* constitui muitas vezes o meio mais fiável para determinação de parâmetros a serem usados em análise e dimensionamento geotécnico ou, simplesmente, para a avaliação de perfis do subsolo.

Das metodologias comuns de análise geotécnica *in situ*, saliente-se as seguintes como indispensáveis para uma boa caracterização de maciços:

- (i) *mapeamento*: a definição geomorfológica e material de zonas permite mais fáceis decisões sobre as soluções para as obras geotécnicas (cartas geotécnicas);
- (ii) *bases de dados materiais e zonais*: descritivos do mapeamento anterior permitem partir para caracterizações mais direccionadas quando definidos os objectivos geotécnicos da obra (como exemplo deste esforço refira-se a Carta Geotécnica da Cidade do Porto - Oliveira *et al.*, 1995);
- (iii) *métodos de prospecção geofísica*: podem extrapolar com alguma eficiência profundidades aproximadas de rocha como do firme rochoso (em prática corrente geotécnica) se não houver forte proliferação de heterogeneidades;
- (iv) *sondagens de furação com recolha de amostras*: em solos residuais as técnicas de amostragem devem ter em consideração a sensibilidade destes materiais que mesmo com os maiores cuidados, são sempre perturbados na sua integridade estrutural (Clayton, 1986);
- (v) *poços de inspecção*: ideais para recolha de amostras em materiais mais sensíveis - como os residuais - pois permitem a cravação estática lenta e controlada e(ou) a bizelagem de blocos indeformados nas paredes dos poços; têm claras limitações na profundidade a atingir;
- (vi) *amostragem a trado*: servem como estimativa preliminar para a definição do perfil rocha-solo;
- (vii) *ensaios in situ*: devem ser sempre usados e os seus resultados cruzados para se obterem correlações paramétricas valiosas; este foi um dos objectivos principais do trabalho realizado; ensaios mais robustos como o SPT são tidos como mais hábeis na avaliação da estratigrafia, enquanto outros mais sofisticados, como os pressiómetros, podem simular as trajectórias de tensões representativas de algumas obras

geotécnicas mas, pelas suas características, são limitados a maciços mais brandos e homogéneos.

Três factores principais devem ser tidos em conta na selecção dos ensaios *in situ* para a caracterização mecânica de solos residuais:

- (i) a variabilidade destes materiais tem que ser bem avaliada;
- (ii) a vasta gama de rigidez e resistência que tipifica um dado maciço natural impõe tecnologias que se adaptem facilmente a respostas heterogéneas (equipamentos suficientemente potentes) sem descurar as exigências de uma boa sensibilidade para avaliação paramétrica;
- (iii) a interpretação tem que ser adequada a diferentes condições de textura, anisotropia e saturação dos solos.

No Quadro são resumidos os parâmetros condicionantes de alguns ensaios *in situ*.

Comparação entre vários métodos testados *in situ*

Ensaio	Natureza	Custo *	Vantagens/Limitações Práticas	Aplicabilidade +	
				Avaliação da variabilidade	Avaliação paramétrica
SPT□	Resist. Dinâmica Indirecta	M□	recolha de amostras□	A□	B□
RST (DP)	Resist. Dinâmica Indirecta	L-M□	alta mobilidade e velocidade	A	B
CPT□	Resist. Estática Indirecta□	M□	penetrabilidade moderada	B□	B□
WST □	Resist. Estática Indirecta □	L□	penetrabilidade limitada□alta mobilidade e velocidade	C	B
DMT □	Tensão-Deformação (Dir.)	M□	Penetrabilidade moderada	B	B
PMT □	Tensão-Deformação (Directa)	H□	boa adaptabilidade às condições variáveis do solo	C	A
PLT□	Tensão-Deformação (Directa)	VH	aplicável a solos homogéneos	—	A

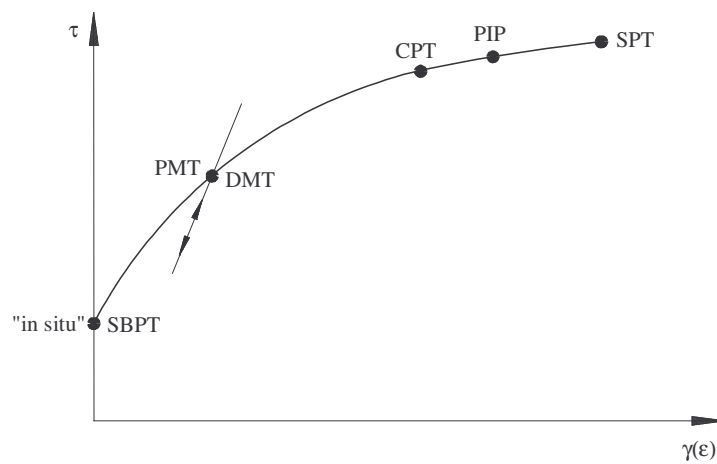
* L = baixo; M = médio; H = alto; VH = muito alto;

+ A = alta; B = moderada; C = limitada; — = não aplicável;

A nomenclatura adoptada terá que ser lida da seguida forma: RST corresponde ao corrente DP

(Dynamic Probing), WST (Weight Sounding Test) não são correntemente usados em Portugal; DMT e PMT referem-se, respectivamente, ao Dilatómetro de Marchetti e Pressiómetro de Ménard.

Na Figura ilustra-se a posição relativa de alguns dos ensaios mais correntes em relação a uma curva genérica de tensão-deformação. Salienta-se que quanto mais destrutivo é o ensaio mais incide exclusivamente nas características de resistência (valores últimos daquela relação) enquanto que quanto mais cuidadosa é a inserção do equipamento de ensaio no interior do maciço (caso do SBPT) mais facilmente se consegue avaliar o estado de tensão em repouso no maciço bem como definir uma lei representativa das suas características constitutivas.



Da **aplicabilidade de alguns ensaios *in situ* para o projecto geotécnico** de fundações em solos, deve-se destacar algumas vantagens e inconvenientes das técnicas mais difundidas para definição da estratigrafia e obtenção directa (formulação) ou indirecta (correlação total ou semi-empírica) dos parâmetros de projecto.

- O **SPT** apresenta a **vantagem** de associar a uma resistência à penetração, a recolha de amostras, ao longo de um perfil para fundação. É um ensaio simples em equipamento e técnica de execução. *As limitações deste ensaio são devidas à corrente indefinição das características energéticas do equipamento usado e, situação marginal, ao pouco rigor dos procedimentos durante o ensaio, bem como ao empirismo da parametrização geotécnica (uso de correlações que podem variar muito com o tipo de maciço).*
- A *disposição das camadas* directamente determinada pelo ensaio anterior é frequentemente avaliada nos ensaios **CPT**, de uma forma *indirecta*, através da razão da resistência lateral de atrito pela resistência de ponta. Este processo, frequente **em maciços de origem sedimentar com bons resultados**, é *discutível nos maciços residuais* que apresentem grande e brusca variabilidade estratigráfica. Como se refere mais à frente, este ensaio não é muito usado nestes maciços pelas limitações inerentes ao seu processo de penetração (exigente de meios de reacção ou de ancoragem), sendo preterido para os

ensaios de **penetração dinâmica (DP)** quando se pretende uma indicação contínua da resistência de ponta com a profundidade.

- Os ensaios com **pressiómetros**, pelo seu princípio de aplicação de carga e medição da resposta em pontos localizados, constituem um instrumento valioso para a **determinação directa dos parâmetros de resistência, de deformabilidade e, muito particularmente, para definição do estado de tensão em repouso**. Destaca-se assim como um ensaio de boa reprodutibilidade e boa conformidade entre os diversos tipos de perfis geotécnicos.

Destacam-se duas classes: a de “**préfuração**” e a de “**autoperfuração**”; do primeiro, mais comum, salienta-se o **Pressiómetro de Ménard (PMT)** e do segundo (**SBPT**) conhecem-se os bons desempenhos do “**Camkometer**” (de Cambridge).

- Da família dos pressiómetros, o ensaio com o **dilatómetro de Marchetti (DMT)** é uma técnica de ensaio *in situ* limitada pela restrita penetrabilidade do aparelho (lâmina relativamente sensível a danos) em perfis resistentes ou com resistências muito variáveis. No entanto, pela profícua informação paramétrica, tem grandes potencialidades quando usado em solos sedimentares e horizontes de solos residuais mais alterados.
- Os ensaios de carga em placa (**PLT**) são valiosos instrumentos de avaliação da **resposta deformacional de protótipos ou modelos de fundações superficiais**. A sua utilidade fica grandemente potenciada se forem complementados com instrumentação apropriada que permita inferir os efeitos da não-homogeneidade em profundidade (variação linear em profundidade do módulo de deformabilidade) com uma simples instrumentação para determinar deslocamentos superficiais fora da área carregada poderá permitir extrapolações para fundações de dimensões diferentes. Uma alternativa mais simples utiliza o conceito de centro de assentamento para, em ensaios com placas de diferentes diâmetros, se avaliar os parâmetros de extrapolação para outras escalas.

ENSAIOS EM LABORATÓRIO

Das muitas vantagens dos ensaios de laboratório sobre amostras indeformadas deve ser salientada a que consiste na possibilidade de os efectuar em condições de **tensão, deformação e drenagem bem conhecidas e controladas**.

Nos materiais naturais é legítimo questionar se mesmo um cuidadoso processo de **amostragem** pode preservar propriedades tão importantes no comportamento mecânico do maciço como a fábrica, a cimentação relicar e o efeito da história de tensões. Dos factores que perturbam a estrutura cimentada destes materiais no processo de amostragem, o alívio das tensões pode assumir consequências relativamente gravosas na perda de resistência e, particularmente, de rigidez natural. A expansão que lhe está associada pode ser suficiente para a quebra irremediável das ligações interparticulares, cuja fragilidade é de sobremaneira notória em materiais incipientemente alterados (solos residuais jovens - saprólitos). Este

efeito é particularmente importante quando as amostras são retiradas de grandes profundidades. Pelo contrário, se a amostragem, que se pretende significativa, se faz a pequenas profundidades, a baixa expansão dos materiais não acarreta grandes consequências na estrutura natural.

- Os ensaios triaxiais tinham, até muito recentemente, como principal objectivo obter parâmetros de resistência (de pico ou residual) e de deformabilidade para níveis de deformação relativamente elevados (maiores que 0,1%). Ultimamente tem-se dedicado atenção especial à medição mais precisa e independente de erros, das deformações dos provetes utilizados em ensaios de laboratório, particularmente triaxiais, para melhor estabelecimento das leis constitutivas dos geomateriais.

TENDÊNCIA ACTUAL NAS METODOLOGIAS DE CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA. INTEGRAÇÃO DOS ENSAIOS EM LABORATÓRIO E *IN SITU*

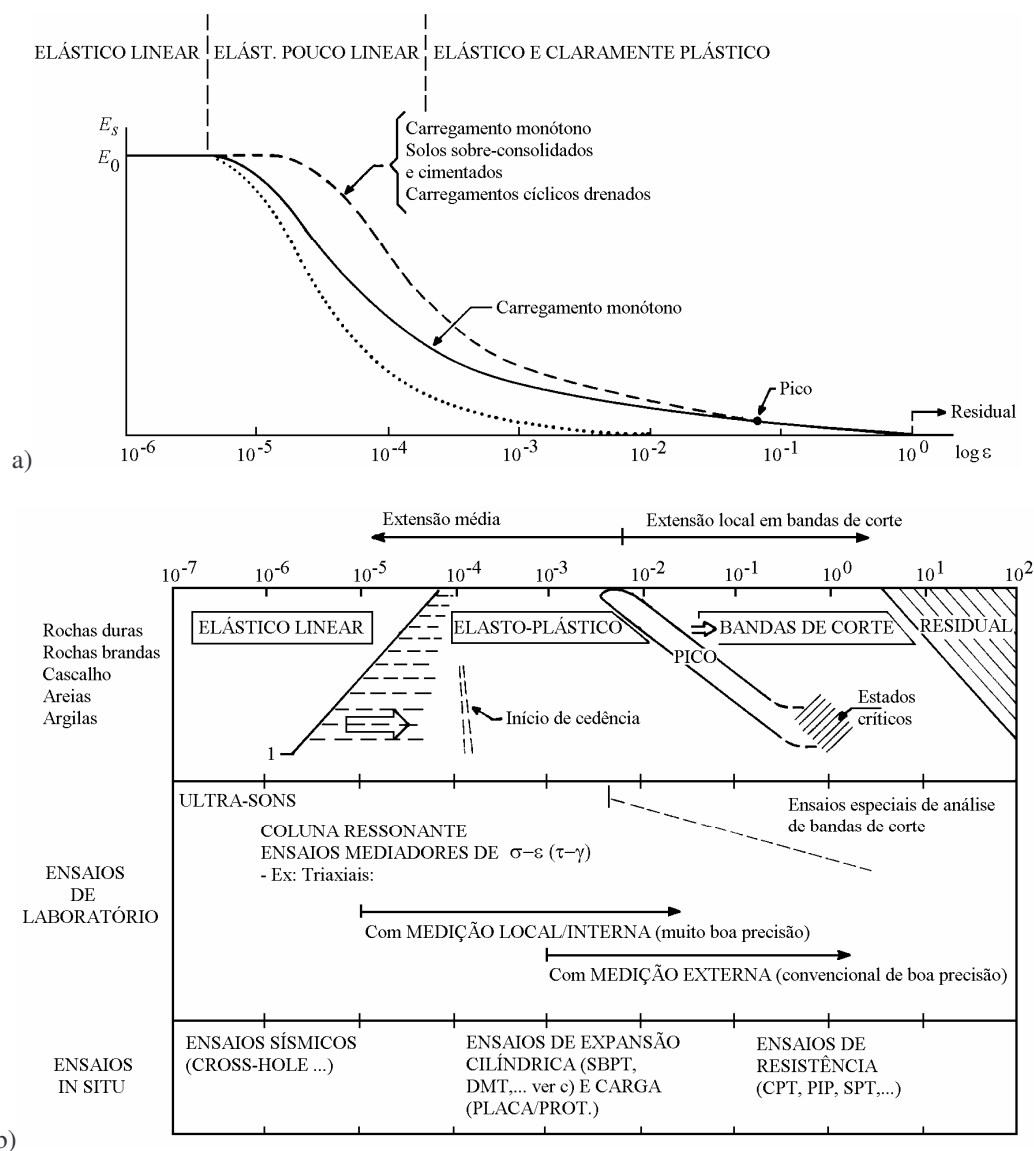
Na prática, é razoável combinar tensões previstas pela Teoria da Elasticidade e relações de tensão-deformação não lineares obtidas em ensaios, para estimar mais correctamente os assentamentos. Assim, sendo a Teoria da Elasticidade uma ferramenta prática para avaliação dos assentamentos de fundações superficiais, *esta deve ser complementada com a indexação dos valores dos módulos de deformabilidade aos níveis de deformação esperados.*

Na prática actual constata-se a tendência para estabelecer a lei da variação da rigidez com o nível de deformação na base das seguintes metodologias:

- (i) uso de ensaios sobre amostras de “grande-qualidade” (com tecnologias de amostragem sofisticadas) e instrumentação local e de grande precisão;*
- (ii) uso simultâneo da informação de ensaios sísmicos (como o “cross-hole”) para avaliação dos módulos distorcionais elásticos (G_0) e de leis de variação da rigidez com os níveis distorcionais em amostras de boa qualidade, e sua integração conjunta; ou seja, por meio da obtenção em laboratório da tendência não linear de variação do módulo de distorção secante (G_s versus γ) ajusta-se o módulo de distorção máximo de laboratório ($G_{0,lab}$) para o módulo de distorção máximo in situ ($G_{0,in situ}$); os módulos de distorção deduzidos de outros ensaios, quando disponíveis, como os de SBPT ou PLT, serão integrados nessa lei para melhor ajuste da mesma.*

Na Figura apresenta-se uma perspectiva geral do enquadramento destas tendências, procurando de forma esquemática salientar as posições relativas destes vários métodos de ensaio nas leis constitutivas dos materiais granulares.

Verifica-se que os módulos de deformabilidade e de distorção (E ou G) deduzidos de ciclos de descarga-recarga em ensaios de laboratório ou de campo, mesmo com técnicas muito precisas de instrumentação, não são forçosamente iguais ao módulo elástico inicial (G_0 ou E_0), já que as deformações dos solos e das rochas não são totalmente recuperáveis nas mudanças de estado de tensão, nos termos de qualquer combinação entre as grandezas e direcções de tensões principais.



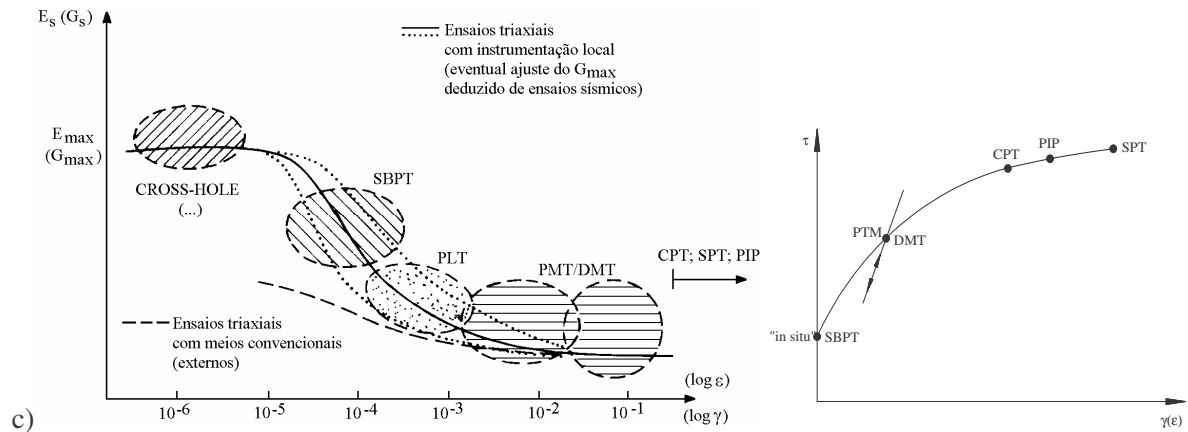


Ilustração da dependência da deformabilidade dos solos em relação aos níveis de deformação e enquadramento de métodos de ensaio. a) não linearidade constitutiva em função do tipo de carregamento; b) enquadramento de ensaios de laboratório e *in situ* em função do nível de deformação; c) níveis de deformabilidade envolvidos em ensaios geotécnicos.