CAPÍTULO 2

ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO EM SOLOS

2.1 - Introdução

Os ensaios laboratoriais de caracterização mecânica dos solos constituem uma das componentes de grande relevância na engenharia geotécnica. Na prática corrente, devido à dificuldade em obter amostras *indeformadas* de elevada qualidade, é habitual considerar-se que os ensaios laboratoriais são menos adequados quando comparados com os ensaios de campo. Outra forte razão, para o recurso menos frequente aos ensaios laboratoriais, prende-se com a morosidade dos ensaios, muitas vezes não compatível com o ritmo de avanço das obras.

Porém, é igualmente óbvio, que estudos mais detalhados para caracterizar o comportamento tensão-deformação dos solos poderá contribuir para um dimensionamento mais racional das obras geotécnicas. Para tal, torna-se indispensável um programa avançado de ensaios laboratoriais de precisão. De uma forma genérica, pode-se dizer que a caracterização do comportamento tensão-deformação-tempo do solo deverá contemplar ensaios de campo, ensaios laboratorias e observação do comportamento em escala real.

Os ensaios a realizar deverão visar a caracterização física e mecânica dos materiais. Em determinadas situações, a caracterização hidráulica poderá ser também um dos aspectos importantes a ter em consideração nos trabalhos.

A caracterização física é feita habitualmente recorrendo a ensaios de rotina simples nomeadamente: análises granulométricas, determinação dos limites de consistência e do teor em água natural (nos solos finos), ensaios de compactação, determinação da massa volúmica através de amostras *representativas* e determinação da densidade das partículas sólidas. Este conjunto de ensaios extremamente expeditos proporcionam a obtenção de parâmetros índice que identificam não só a natureza do solo, bem como podem ser correlacionados com as suas propriedades mecânicas.

Para o caso dos solos argilosos (saturados) o teor em água constitui um dos parâmetros índice de maior relevância. Para definir o estado do solo é usual referenciar o teor em água natural em relação ao limite de liquidez e ao limite de plasticidade. Definem-se para o efeito dois índices:

- Índice de liquidez

$$I_L = \frac{w - w_P}{w_L - w_P} \tag{2.1}$$

- Índice de consistência

$$I_c = \frac{w_L - w}{w_L - w_P} \tag{2.2}$$

Existem imensas correlações baseadas nestes índices para: a resistência não drenada, o coeficiente de consolidação, o índice de compressibilidade, o ângulo de atrito residual, o coeficiente de impulso em repouso, etc. Cita-se, a título de exemplo, a correlação empírica com a resistência não drenada: verifica-se experimentalmente que a resistência não drenada dos solos argilosos é cerca de 2kPa no limite de liquidez (I_L=1 ou I_c=0) e cerca de 100 vezes superior no limite de plasticidade (I_L=0 ou I_c=1).

No caso dos solos granulares (areias e cascalhos) o parâmetro índice de maior relevância é o índice de vazios. O seu valor é habitualmente referenciado em relação ao índice de vazios mínimo e máximo do solo. Define-se assim a compacidade relativa (I_D ou D_r):

$$I_D = \frac{e_{máx} - e}{e_{máx} - e_{mín}} \tag{2.3}$$

Para além da compacidade relativa, não será difícil de perceber, à luz da natureza particulada dos solos granulares, a forte influência da forma e das dimensões dos grãos no comportamento mecânico do conjunto.

Nos solos granulares, dá-se particular ênfase aos ensaios de caracterização mecânica *in situ* dada a impossibilidade de colheita de amostras de elevada qualidade.

2.2 - Ensaios de corte correntes

A caracterização mecânica é feita habitualmente recorrendo a ensaios de corte directo (em caixa de corte) ou a ensaios triaxiais em condições de simetria radial. Nos solos finos (saturados) de elevada compressibilidade, é usual realizar-se ensaios de compressão unidimensional em edómetro para analizar o fenómeno da consolidação (primária e secundária).

Descrevem-se seguidamente, de forma sumária, os ensaios de corte correntes que visam essencialmente a obtenção dos parâmetros de resistência dos solos.

Ensaio de corte directo (caixa de corte)

A caixa de corte é talvez o mais comum na prática, e é particularmente apropriado para analisar situações em que a rotura é localizada desenvolvendo-se em bandas de corte de reduzida espessura, em estado plano de deformação.

A caixa de corte é constituída basicamente por duas meias-caixas metálicas. O solo é colocado na caixa e provoca-se o deslocamento relativo entre as duas meias-caixas. Deste modo, a superfície de rotura é imposta e tem de processar-se ao longo de um plano horizontal. O ensaio é realizado, em geral, sob condições de deslocamento (deformação) controlado, porque deste modo é possível obter a resistência de pico e de rotura do solo. Considera-se que é atingida a rotura quando o solo não consegue resistir a qualquer acréscimo de carga horizontal.

Neste ensaio medem-se os deslocamentos horizontal e vertical através de transdutores LVDT e as forças horizontal e vertical recorrendo a células de carga. Neste ensaio, é difícil (ou mesmo impossível) de calcular, com rigor, as tensões e deformações a partir das grandezas medidas. A distribuição de tensões no plano de corte não é uniforme e desconhecem-se as dimensões da zona de rotura, pelo que as deformações não podem ser determinadas. Na prática, consideram-se simplificadamente as tensões médias instaladas na superfície de rotura (dividindo as forças normal e tangencial pela área transversal do provete). Normalmente, fazem-se três ou mais ensaios, cada um com uma determinada força vertical constante e determina-se a resistência (de pico e de rotura) associada a cada um destes ensaios. A interpretação dos resultados permite traçar as envolventes em termos de estado de pico ou estado de rotura do solo.

Ensaio triaxial corrente (simetria radial)

O ensaio triaxial corrente é utilizado fundamentalmente para caracterizar a resistência dos solos. Quando munido de instrumentos de medição interna de precisão permite caracterizar também a rigidez dos solos.

No ensaio triaxial corrente uma amostra de solo cilíndrica (geralmente com uma relação altura/diâmetro igual a 2) é colocada dentro de uma câmara cheia de água desareada. A amostra é isolada por uma membrana impermeável à água e as tensões radiais são aplicadas elevando a pressão da água na câmara. O ensaio é conduzido sob condições de deformação axial controlada e a força vertical (deviatórica) é medida através de uma célula de carga submersível.

As tensões aplicadas no ensaio: axial e radial são tensões principais, por imposição, ou seja, não há rotação das tensões principais durante o corte. O equipamento permite controlar de forma independente as tensões ou as deformações axial e radial. Além disso, permite ainda efectuar ensaios em condições drenadas ou não drenadas. As modalidades de ensaios mais frequentes são:

Ensaio não consolidado não drenado (UU) - constitui um caso particular deste ensaio o ensaio de compressão simples (uniaxial ou não confinado - UC) em que não é aplicada qualquer tensão lateral. No ensaio (UU), submete-se a amostra com as válvulas de drenagem sempre fechadas a uma pressão lateral e aumenta-se, de seguida, a tensão axial até à rotura. Este ensaio permite obter a resistência não drenada do solo (c_u ou c_{uu}).

Ensaio consolidado não drenado (CU) - O ensaio é conduzido em duas fases. Numa primeira fase o solo é consolidado para um determinado estado de tensão (isotrópico ou anisotrópico). As válvulas de drenagem estão abertas de modo a permitir a dissipação do excesso de pressão intersticial gerado. Na segunda fase (fase de corte), com as válvulas de drenagem fechadas o provete é levado à rotura, por variação das tensões ou das deformações impostas. Nesta fase geram-se variações da pressão intersticial que podem ser medidas através de um transdutor de pressão. Este ensaio permite obter a envolvente em tensões totais e em tensões efectivas caracterizada pelos respectivos parâmetros (c_{cu} e ϕ_{cu}) e (c'_{cu} e ϕ'_{cu}), respectivamente. Admite-se que $c'=c'_{cu}$ e $\phi'=\phi'_{cu}$.

Ensaio consolidado drenado (CD) - O ensaio é semelhante ao anterior com a diferença de que se garante excesso de pressão intersticial nula na fase de corte. Este ensaio permite obter a envolvente em tensões efectivas caracterizada pelos parâmetros (c'_{cd} e ϕ'_{cd}). Admite-se que $c'=c'_{cd}$ e $\phi'=\phi'_{cd}$.

No ensaio triaxial tradicional medem-se a força vertical, a pressão da água na câmara, a variação do volume de água na câmara (e, por via indirecta, calcula-se a variação de volume do provete), o deslocamento vertical no topo do provete e a pressão da água intersticial no solo. Estas medições permitem caracterizar adequadamente o estado de tensão no solo e por conseguinte, avaliar adequadamente a resistência do solo. No que respeita às deformações, estudos recentes, mostram, efectivamente, que os métodos de medição externa no ensaio triaxial tradicional só garantem leituras fiáveis para deformações da ordem de 10^{-2}.

2.3 - Outros tipos de ensaios de corte

Em laboratório, nos ensaios de corte tais como o triaxial corrente de compressão ou de extensão axial (com simetria radial), ou até mesmo o *verdadeiro* ensaio triaxial, só as tensões normais podem ser controladas e medidas.

Apesar das tensões normais nas fronteiras não serem exactamente as tensões principais devido ao atrito que se gera nas fronteiras rígidas (topo e base) e flexível (lateral), estas tensões normais podem ser consideradas, como tensões principais em termos médios. Nestes ensaios, a direcção das tensões principais não pode variar continuamente, pois apenas é possível impor uma rotação (salto) de 90º. Noutros tipos de ensaios, tais como o corte simples ou o ensaio de torção, é possível controlar a direcção de duas tensões principais. Estas duas tensões principais podem ser definidas, se se conhecer as tensões normais e tangenciais em dois planos ortogonais. Assim, os ensaios de corte em laboratório podem ser classificados de acordo com a magnitude e a direcção das tensões principais e o modo como é possível controlar estas grandezas.

Grande maioria dos solos exibem comportamento anisotrópico, quer em termos de resistência, quer em termos de rigidez. Nestas circunstâncias, a magnitude e a direcção dos incrementos das deformações dependem das tensões principais e dos incrementos das tensões principais.

Quando o solo exibe um ou mais eixos de simetria, no sentido de que as propriedades mecânicas são idênticas em qualquer plano normal ao eixo(s) de simetria, então a direcção do eixo(s) de simetria pode ser definido em função dos ângulos medidos em relação às tensões principais.

Muitos solos exibem anisotropia inerente com um eixo de simetria (isotropia transversal). São, exemplos típicos, o caso de solos sedimentares e de solos reconstituídos em laboratório pela técnica de pluviação ou por consolidação/compactação unidimensional. Para analisar o efeito da anisotropia na resistência dos solos é necessário recorrer a um programa de ensaios sofisticados com diferentes trajectórias de tensões.

A descrição do ensaio de torção será apresentado mais adiante.

2.4 - Rigidez do solo em muito pequenas deformações

No estado actual do conhecimento, é bem reconhecida a grande importância da caracterização dos solos no domínio das muito pequenas deformações, isto é, para valores da deformação da ordem de 10^{-6}. Neste domínio das muito pequenas deformações, o solo apresenta um comportamento quase elástico e linear, sendo o módulo de distorção correspondente, denominado por módulo de distorção máximo ou inicial e representado por $G_{máx}$ ou G_0.

O módulo de distorção inicial G_0 constitui um parâmetro fundamental que caracteriza o estado do solo e está intimamente ligado à estrutura ou à fábrica do material, como se já se viu no Capítulo 1.

A determinação de G_0 pode ser feita por duas vias:

- através da medição das tensões e das deformações em "pequenos" carregamentos (teoria da elasticidade);
- através da medição da velocidade de propagação da onda de corte (teoria de propagação das ondas).

Para tal, foram desenvolvidos diversos tipos de ensaios, tanto de campo como de laboratório.

Os ensaios de campo têm a vantagem de eliminar os problemas inerentes à amostragem dos solos, mas permitem apenas investigar o comportamento dos solos na gama de pequenas a moderadas deformações e traduzem características médias do volume de terreno envolvido no ensaio; enquanto que os ensaios de laboratório permitem caracterizar os solos para uma faixa ampla de deformações e para diversos estados de tensão, mas apenas confinados à amostra utilizada.

Apresenta-se nos Quadros 2.1 e 2.2 um resumo das principais técnicas de ensaio de campo e de laboratório disponíveis para a caracterização da rigidez ao corte dos solos, com a indicação do valor aproximado da distorção associada a cada um destes ensaios.

Quadro 2.1 - Ensaios de campo mais utilizados para avaliação do módulo de distorção dos solos

Ensaio	Princípio da técnica do ensaio	Nível de distorção
Sísmico entre furos de sondagem *Crosshole seismic testing*	determinação da velocidade de propagação da onda de corte	~ 10^{-6}
Sísmico ao longo de furos de sondagem, com fonte à superfície *Downhole seismic testing*		
Sísmico ao longo de furos de sondagem, com fonte no interior do furo *Uphole*		
Piezocone sísmico		
Refracção sísmica		
Vibração em regime permanente	determinação da velocidade de propagação da onda de superfície	~ 10^{-6}
Análise espectral de ondas de superfície		
Ensaio pressiométrico (auto-perfurador)	curva tensão-deformação	> 10^{-3}

Quadro 2.2 - Ensaios de laboratório mais utilizados para avaliação do módulo de distorção e do coeficiente de amortecimento histerético dos solos

Ensaio	Princípio da técnica do ensaio	Nível de distorção
Coluna ressonante	velocidade de propagação da onda de corte	~ 10^{-6} a 10^{-4}
Bender elements		~ 10^{-6}, apenas para avaliação do módulo
Corte simples	curva tensão-deformação	> 10^{-4} (*)
Triaxial cíclico		> 10^{-4} (*)
Torção cíclica		> 10^{-4} (*)
(*) Obs: Recorrendo a sistemas de medição local de alta precisão é possível atingir níveis de distorção mais baixos (10^{-5} ou até 10^{-6})		

Descrevem-se, a seguir, os ensaios de campo e os ensaios laboratoriais mais utilizados para a caracterização dos solos no domínio das muito pequenas a pequenas deformações.

2.5 - Ensaios de campo no domínio das pequenas deformações

2.5.1 - Ensaios sísmicos entre furos de sondagem

A técnica designada por ensaios sísmicos entre furos de sondagem, é considerada por muitos como sendo o método mais fiável para a determinação das velocidades de propagação das ondas P e S em campo.

O ensaio encontra-se esquematizado na Figura 2.1 e consiste na geração das referidas ondas, através de uma determinada fonte de energia sísmica colocada no interior de um furo de sondagem, e na sua captação por meio de receptores colocados em dois ou mais furos de sondagem, à mesma profundidade da fonte.

As velocidades de propagação são calculadas dividindo simplesmente as distâncias percorridas pelos respectivos tempos de percurso, correspondentes às primeiras chegadas das ondas. A distância correcta entre os receptores para os vários níveis de ensaio, é calculada tendo em conta a distância entre as bocas dos furos de sondagem e o levantamento inclinométrico efectuado em cada um dos furos.

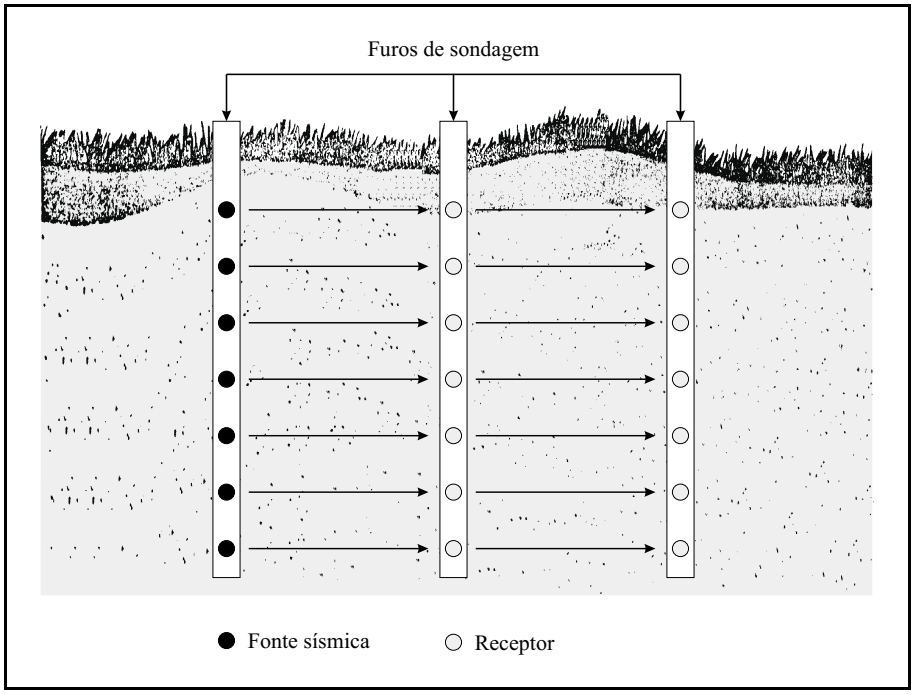

Figura 2.1 - Ensaio sísmico entre furos. Esquema da técnica de ensaio

Para cada nível de ensaio a fonte sísmica e os receptores são fixados à parede dos respectivos furos de sondagem por meio de calços actuados por um sistema hidráulico.

Para a geração das ondas S utilizam-se geralmente fontes mecânicas manuais. O martelo sísmico gera ondas de corte polarizadas verticalmente (ondas S_{hv}) através dos impactos verticais de um

peso central deslizante, o qual é controlado a partir da superfície. O sistema permite a inversão do sentido do impacto (ascendente ou descendente), ou seja, a inversão da polaridade das ondas de corte, o que facilita a sua identificação e, por conseguinte, a interpretação dos resultados (Fialho Rodrigues, 1979).

Os sinais eléctricos captados pelos receptores (geofones) são transmitidos a um sismógrafo colocado à superfície. A Figura 2.2 mostra um esquema do ensaio sísmico entre furos de sondagem, ilustrando a geração e a captação e registo das ondas de corte.

O processo de geração e de captação das ondas P é em tudo análogo, mas utilizando fontes de energia e receptores com características diferentes.

Recentemente, para investigar o comportamento anisotrópico dos solos tem-se assistido ao desenvolvimento de martelos especiais para geração de ondas de corte do tipo S_{hh}.

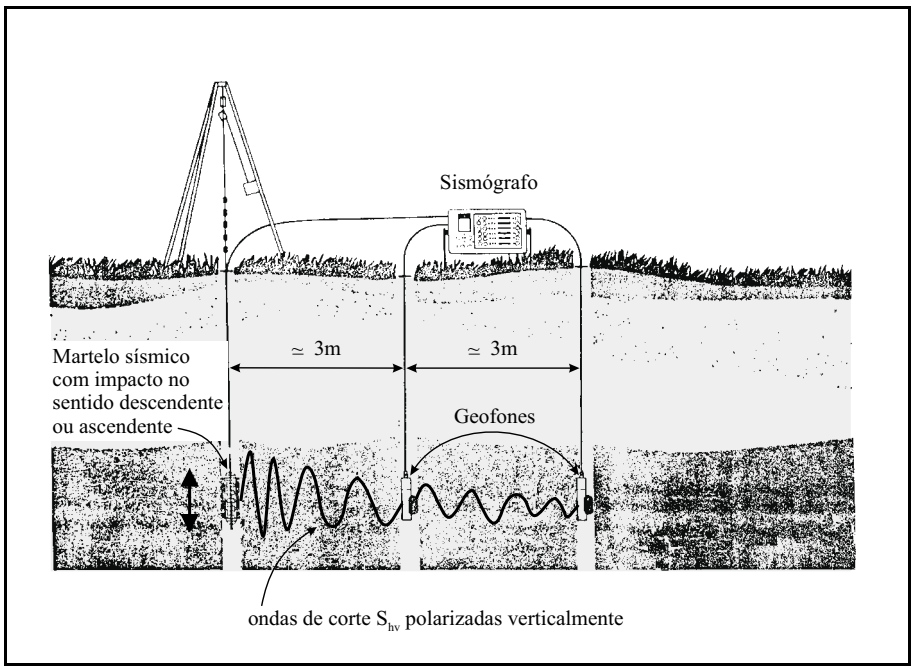

Figura 2.2 - Geração e captação das ondas de corte

2.5.2 - Ensaios sísmicos ao longo de furos de sondagem com fonte na superfície

A técnica designada por ensaios sísmicos ao longo de furos de sondagem, com fonte na superfície constitui uma alternativa relativamente à técnica de ensaio descrita no ponto anterior e é utilizada geralmente para a determinação da velocidade de propagação da onda S.

Nesta técnica de ensaio, a onda é gerada à superfície e o receptor(geofone) é posicionado no interior do furo de sondagem, à profundidade desejada.

A onda é provocada à custa de um impulso horizontal com um martelo, numa das extremidades de uma placa de madeira colocada à superfície do terreno, e próxima da boca do furo de sondagem. A superfície do terreno é previamente preparada e nivelada, e a placa é fixa, normalmente por meio de pesos (bidões cheios de água ou de areia).

O procedimento é repetido aplicando um segundo impacto na extremidade oposta da placa e o instante de chegada da onda é obtido por sobreposição dos dois registos (Fialho Rodriques, 1979). O ensaio é repetido para outros níveis de posicionamento do receptor.

As ondas de corte geradas estão polarizadas horizontalmente e são, portanto do tipo S_{vh}. No final, é calculada para cada troço, definido por dois níveis consecutivos de posicionamento do receptor, a velocidade média de propagação da onda de corte.

A Figura 2.3 mostra um esquema do ensaio sísmico ao longo de furos de sondagem, ilustrando a técnica acabada de descrever.

Uma limitação desta técnica de ensaio, prende-se com a direcção subvertical da propagação da onda. Para um terreno com variações litológicas importantes serão necessários cuidados adicionais para a correcta interpretação dos resultados.

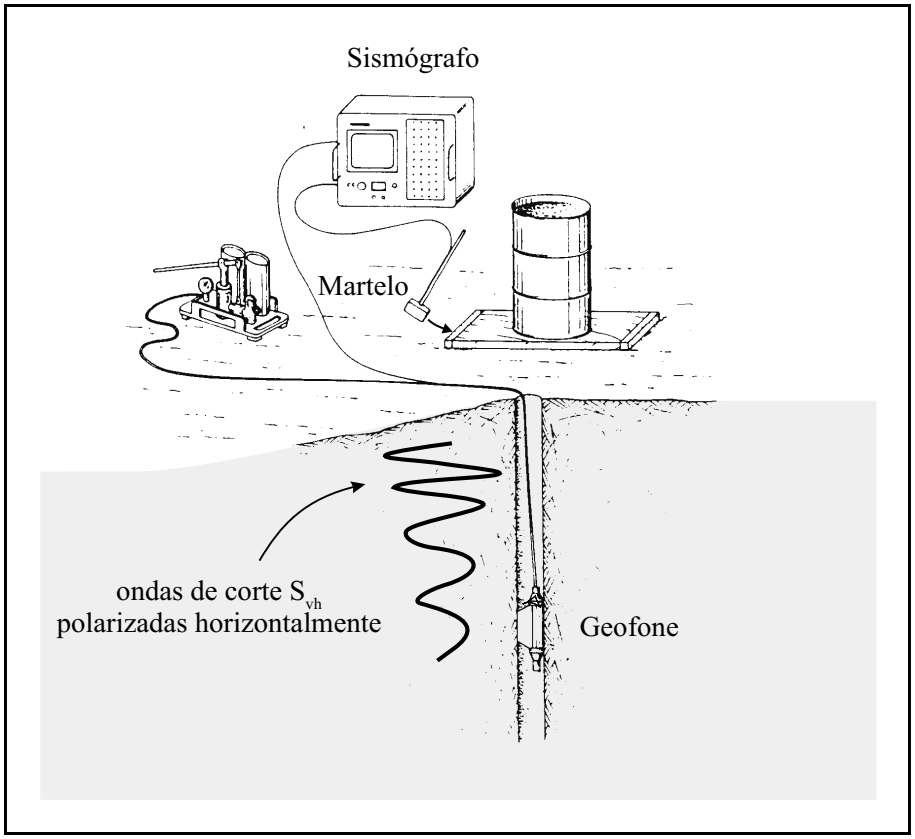

Figura 2.3 - Representação esquemática do ensaio com fonte colocada na superfície e receptores num furo de sondagem

2.6 - Ensaios laboratoriais no domínio das pequenas deformações

2.6.1 - Ensaio de coluna ressonante

O ensaio de coluna ressonante é um dos ensaios de laboratório mais amplamente utilizado para determinar as propriedades dinâmicas dos solos (módulo de distorção e coeficiente de amortecimento) no domínio das muito pequenas a pequenas deformações. Este ensaio baseia-se na teoria da propagação unidimensional das ondas num meio elástico, isotrópico e homogéneo e poderá ser do tipo axial ou de torção.

Neste ensaio, um provete de solo maciço ou oco, previamente consolidado para um determinado estado de tensão fica sujeito a uma excitação sinusoidal através de um oscilador electromagnético. O ensaio consiste em, para uma determinada amplitude da excitação aplicada, fazer variar a sua frequência, por forma a atingir o ponto de ressonância do sistema.

É um ensaio extremamente fiável no que respeita à determinação do módulo de distorção no domínio das muito pequenas a pequenas distorções, sendo de facto esta a sua principal particularidade. Outra particularidade deste ensaio, diz respeito ao seu carácter não destrutivo. De facto, uma vez que as extensões ou as distorções máximas atingidas são inferiores a 10^{-3} não ultrapassando, em geral 10^{-4}, considera-se que o ensaio não provoca perturbações no provete, e por conseguinte, poder-se-á ensaiar o mesmo provete para várias tensões de confinamento.

Diversos equipamentos de coluna ressonante foram desenvolvidos utilizando condições de fronteira diferentes, conforme ilustra a Figura 2.4.

O tipo de equipamento mais simples é o ilustrado na Figura 2.4a), no qual a excitação é aplicada e a resposta medida também no topo do provete, sendo a base perfeitamente encastrada. Pode-se demonstrar que para esta configuração do tipo fixo-livre, a distribuição da rotação θ ao longo da altura do provete segue o andamento de 1/4 de uma sinusóide. Esta distribuição pouco uniforme da rotação torna difícil a interpretação dos resultados, pelo que se desenvolveu um segundo tipo de equipamento adicionando um momento polar de inércia de massa J_A no topo, o que torna a variação de θ praticamente linear, conforme mostra a Figura 2.4b), sendo assim constante o ângulo de torção por unidade de comprimento tal como acontece numa peça linear sujeita a torção simples em situação estática. O bem conhecido oscilador do tipo Hall utilizado por Hardin e Richart (1963) pertence a esta segunda classe de equipamento.

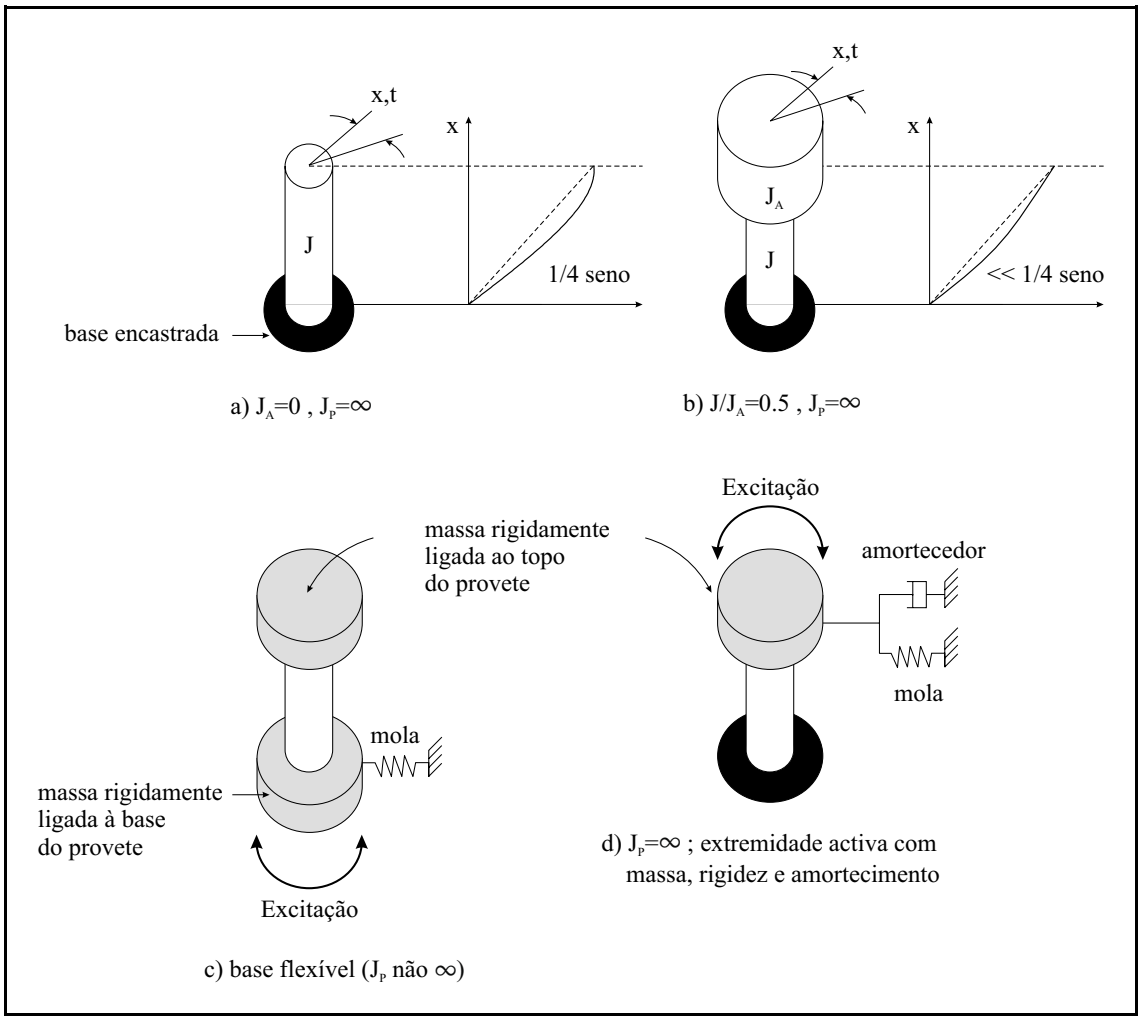

Figura 2.4 - Tipos de equipamento para o ensaio de coluna ressonante

A Figura 2.4c) mostra o terceiro tipo de equipamento, em que consoante a rigidez da mola na base, se poderá, nos casos extremos, representar o modelo fixo-livre ou livre-livre. Nesta última configuração a máxima amplitude de vibração ocorre nos extremos do provete e por simetria a distribuição de θ segue o andamento de metade de uma sinusóide.

As primeiras versões do equipamento de coluna ressonante baseado no tipo da Figura 2.4b) permitiam apenas consolidar o provete em condições isotrópicas. Hardin e Music (1965) baseando-se na configuração da Figura 2.4d), desenvolveram o chamado oscilador tipo Hardin, em que o topo do provete está parcialmente restringido por uma mola e um amortecedor. A massa é normalmente contrabalançada por um sistema de contrapeso que permite consolidar o provete em condições anisotrópicas.

Num ensaio do tipo torção, a amplitude da distorção numa determinada secção não é constante e varia de zero no centro até ao seu valor máximo no perímetro da secção. Drnevich (1967) aperfeiçoou o oscilador tipo Hardin permitindo a realização do ensaio em provetes cilíndricos ocos.

O ensaio de coluna ressonante permite estudar o comportamento dos solos na faixa de distorções entre 10^{-6} e 10^{-4}, podendo nalgumas situações particulares atingir 10^{-3}. Mais recentemente, foram desenvolvidos equipamentos híbridos, conjugando a coluna ressonante com a torção cíclica, permitindo assim varrer uma maior gama de distorções. Citam-se neste domínio os trabalhos de Alarcon-Guzman et al. (1986) e de Ampadu e Taksuoka (1993).

Foi também desenvolvido recentemente, um equipamento de coluna ressonante capaz de ensaiar provetes sujeitos a tensões de consolidação elevadas da ordem de 3.5MPa (Hardin et al. 1994).

Um ponto importante a ter em atenção no ensaio de coluna ressonante prende-se com o acoplamento entre a extremidade activa do equipamento e o topo do provete. Este problema foi investigado por Drnevich (1978) e segundo aquele autor a inclusão de lâminas na placa porosa da extremidade activa é usualmente suficiente para garantir o desejado acoplamento perfeito.

2.6.1.1 - Fundamentos teóricos

A norma ASTM-D4015-92, revisão de 1992 especifica, em linhas gerais, a técnica do ensaio de coluna ressonante, do tipo axial ou de torção, com vista à determinação do módulo e do coeficiente de amortecimento histerético do solo em função do nível de distorção.

Esta norma fundamenta-se nos trabalhos de Hardin(1965) e de Drnevich(1978). Aquele primeiro autor apresentou, para várias condições de fronteira simples, as soluções analíticas em regime de vibração permanente, tendo considerado para o solo o modelo viscoelástico de Kelvin-Voigt. Posteriormente, Drnevich(1978) prosseguiu com o trabalho pioneiro de Hardin investigando situações com condições de fronteira mais complexas. Ambos os autores aplicaram, para a resolução do problema, funções trigonométricas o que tornou a operação bastante trabalhosa.

O equipamento disponível no Laboratório de Geotecnia do IST é do tipo da Figura 2.4d): o topo do provete é excitado por um momento torsor harmónico, com frequência de vibração ajustável de modo a se atingir o ponto de ressonância do sistema. Entende-se por frequência de ressonância, como sendo a mais baixa frequência (ou frequência própria fundamental) para a qual o momento torsor de excitação está em fase com a velocidade medida no topo do provete.

A interpretação dos resultados do ensaio pode ser feita recorrendo ao modelo físico representado na Figura 2.5 admitindo para os materiais um amortecimento do tipo histerético, usando-se, por isso, para o equipamento e para o solo as rigidezes complexas, $K^*=K(1+2i\xi_K)$ e $G^*=G(1+2i\xi)$. Ao contrário, daquilo que é habitualmente apresentado na bibliografia, a abordagem recorrendo a variáveis complexas permite introduzir com grande facilidade no modelo físico e matemático o amortecimento histerético dos materiais.

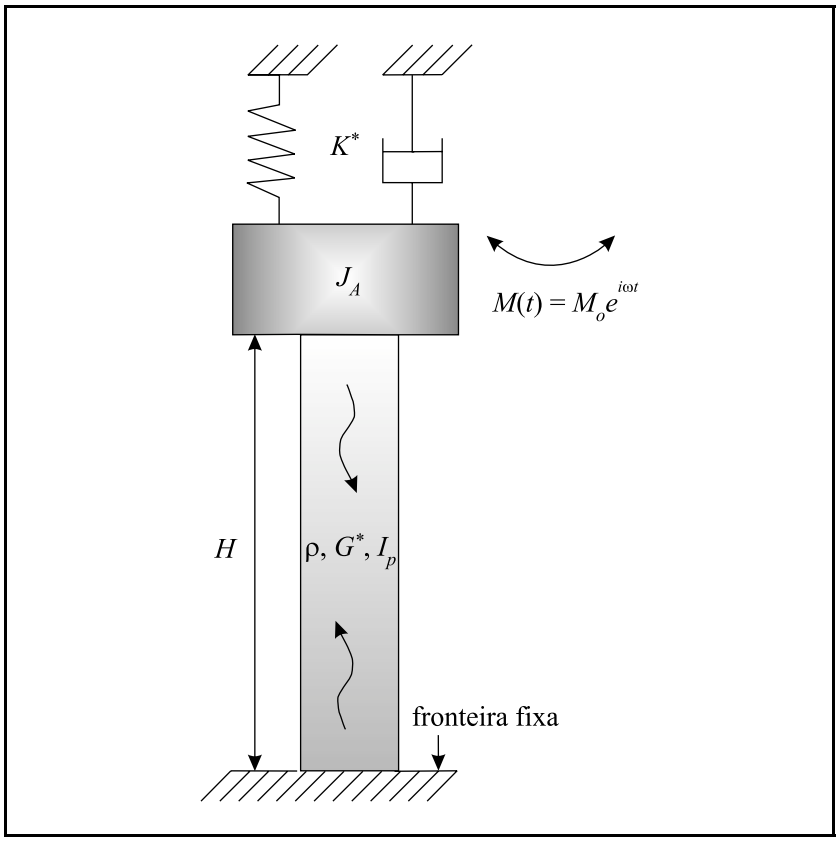

Figura 2.5 - Ensaio de coluna ressonante. Modelo físico

Tendo em conta as equações governativas de equilíbrio e de compatibilidade e as condições de fronteira do problema, Santos (1999) obteve a solução analítica exacta que permite determinar as propriedades dinâmicas do solo e que se resume nas duas equações seguintes:

• módulo de distorção

$$GI_p \frac{\omega}{\sqrt{\frac{G}{\rho}}} \% \; tg\left(\frac{\omega H}{\sqrt{\frac{G}{\rho}}}\right)(K \;\&\; J_A\omega^2) \;\; ' \;\; 0 \tag{2.4}$$

• coeficiente de amortecimento histerético

$$\frac{M_o}{\dfrac{G(1\%i2\xi)I_p \dfrac{\omega}{\sqrt{\frac{G}{\rho}}\sqrt{1\%i2\xi}}}{tg\left(\dfrac{\omega H}{\sqrt{\frac{G}{\rho}}\sqrt{1\%i2\xi}}\right)} \% \; K(1\%i2\xi_K) \;\&\; J_A\omega^2} \tag{2.5}$$

Note-se que as grandezas conhecidas são: o momento polar de inércia de massa J_A, a rigidez K, e o coeficiente de amortecimento ξ_K da extremidade activa do equipamento; o momento polar de inércia I_p e a altura H do provete; a massa volúmica ρ do solo; a frequência própria fundamental ω do sistema global; a amplitude do momento torsor aplicado M_o e a amplitude da rotação no topo do provete θ_o.

As incógnitas do problema são, de facto, o módulo de distorção G e o coeficiente de amortecimento ξ do solo.

O ensaio de coluna ressonante tem sido o ensaio de laboratório mais amplamente utilizado nas últimas três décadas para a determinação das propriedades dinâmicas dos solos no domínio das muito pequenas a pequenas deformações. Tem-se demonstrado uma boa fiabilidade principalmente para a determinação do módulo de distorção. Isto pode ser entendido à luz da solução analítica exacta acabada de ser apresentada.

A avaliação do módulo de distorção é feita recorrendo à equação (2.4) na qual não intervém a rotação θ_o e, portanto, a fiabilidade do resultado depende sobretudo da frequência de ressonância e das outras variáveis intervenientes que são facilmente determináveis.

Já para o cálculo do coeficiente de amortecimento recorrendo à equação (2.5), é necessário o conhecimento do valor da rotação θ_o no topo do provete. O valor da rotação é obtido a partir da medição da velocidade ou da aceleração no topo do provete. Sendo o movimento harmónico, a rotação obtém-se dividindo aqueles valores por ω e ω^2, respectivamente.

Indicam-se, a título de exemplo, alguns valores para se ter uma noção da precisão necessária nas medições. Considere-se um provete com 7 cm de diâmetro e 10 cm de altura e admita-se uma frequência de ressonância de 100 Hz. Os excitadores estão afastados equidistantemente do eixo vertical do provete de uma distância de 5cm. Nestas condições, e para um nível de distorção de $5\text{x}10^{-6}$, a amplitude da rotação no topo seria de $4.3\text{x}10^{-6}$ rad e o deslocamento linear nos excitadores de 1.1μm. A amplitude da aceleração correspondente seria da ordem de 10^{-3}g.

Num ensaio alternativo do tipo triaxial com medições locais seria necessário dispôr de um sistema com uma resolução inferior a 1μm (para um comprimento de referência de 60mm) para se conseguir estimar com fiabilidade o valor do módulo de deformabilidade inicial.

2.6.1.2 - Descrição do equipamento. Procedimentos de ensaio

O ensaio de coluna ressonante é realizado sobre provetes cilíndricos maciços ou ocos e consiste na aplicação, para além da tensão de confinamento, de uma excitação sinusoidal (momento torsor) no topo do provete. As dimensões do provete, para o equipamento disponível no Laboratório de Geotecnia do IST, são:

- diâmetro=70mm, altura=100mm (maciço);
- diâmetro exterior=70mm, diâmetro interior=30mm, altura=100mm (oco);

Apresenta-se, seguidamente, um esquema do equipamento de ensaio acompanhado do respectivo pormenor.

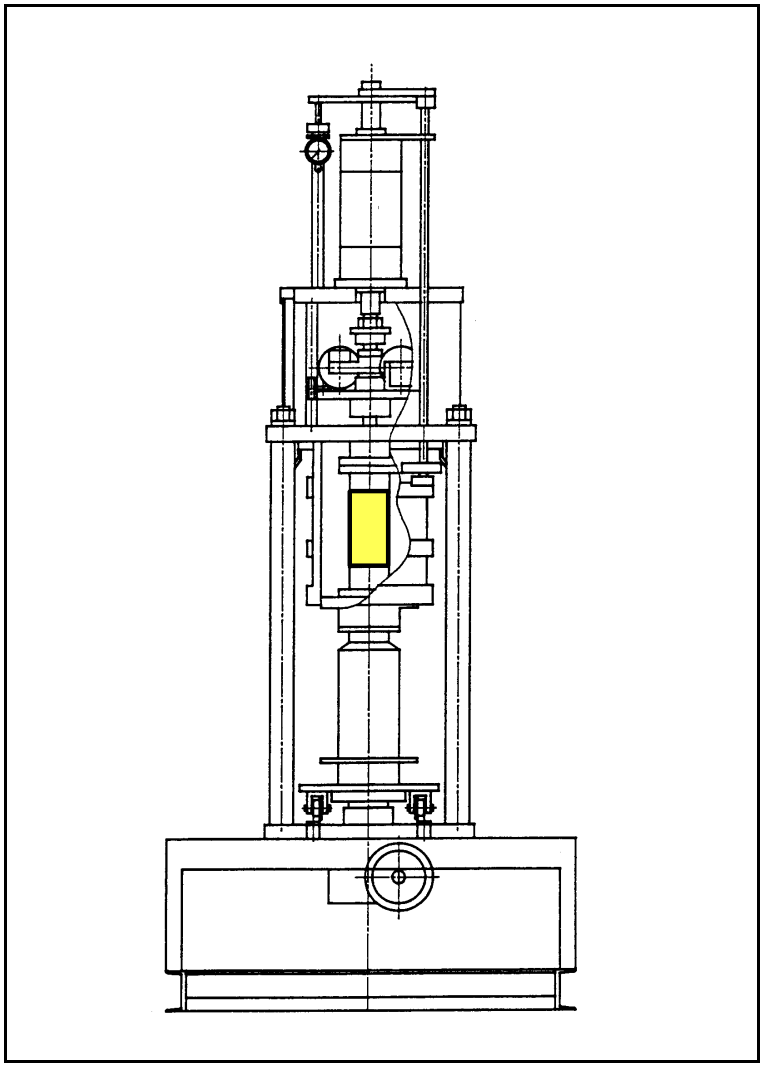

Figura 2.6 - Ensaio de coluna ressonante. Equipamento

Como se pode verificar, o provete de solo fica embebido numa câmara cheia de água até ao nível do topo do provete. Para as fases de saturação e de consolidação do provete seguem-se os procedimentos análogos ao ensaio triaxial clássico.

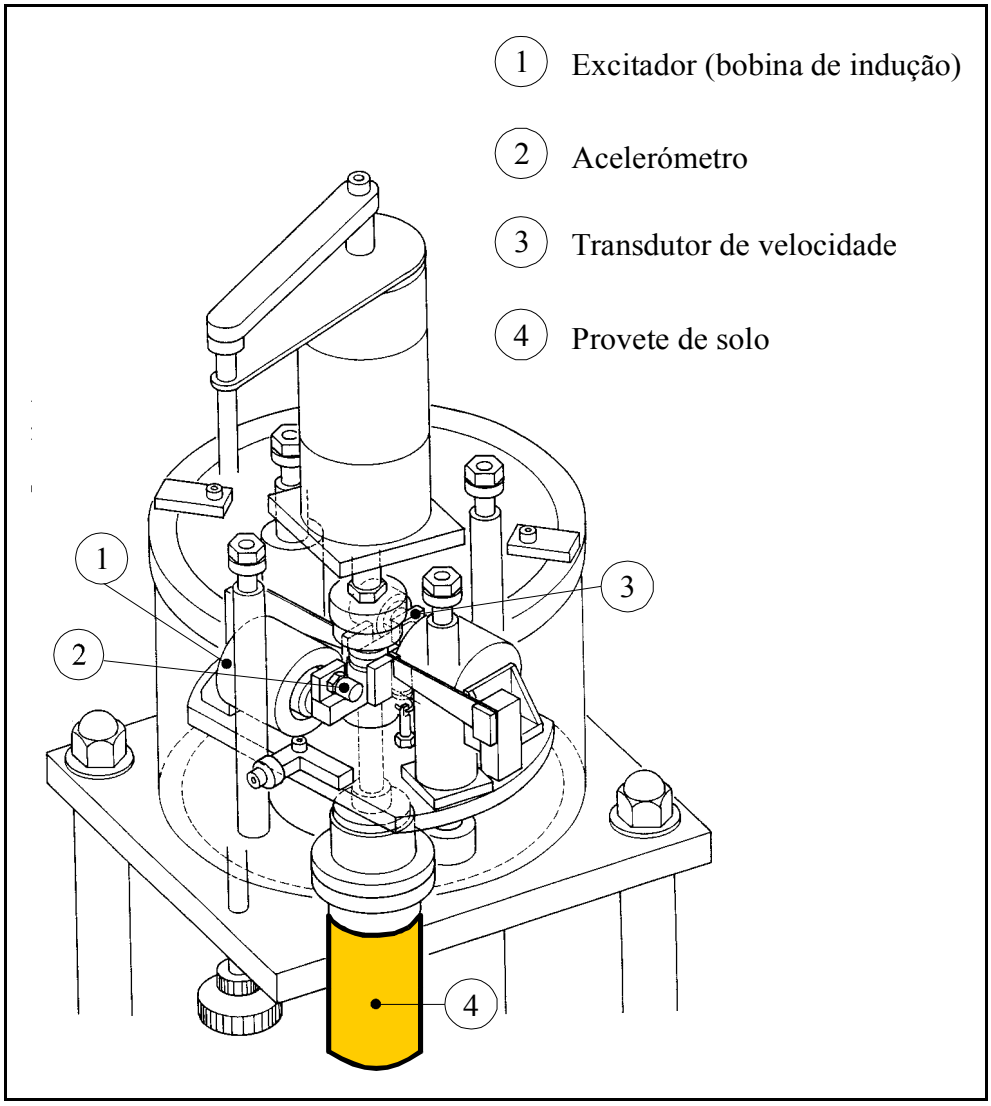

Figura 2.7 - Ensaio de coluna ressonante. Pormenor do sistema de vibração

A excitação é imposta ao topo do provete através de duas bobinas de indução (Figura 2.7). A força de indução nas bobinas é controlada através da corrente aplicada. Estas bobinas ou excitadores estão dispostas simetricamente em relação a uma distância de 5cm relativamente ao eixo vertical. O momento de torção aplicado ao provete é igual ao valor da força multiplicado pelo respectivo braço de 5cm. Junto às bobinas de indução fica localizado num dos lados o transdutor de velocidade e no outro o acelerómetro. Dado que o movimento é harmónico o valor do deslocamento obtém-se dividindo o valor medido da velocidade ou da aceleração, respectivamente, por $2\pi f$ ou por $(2\pi f)^2$. Dentro da câmara, é colocado junto do topo do provete um transdutor LVDT para medição do deslocamento vertical.

O procedimento de ensaio segue basicamente as etapas seguintes:

a) para uma determinada corrente aplicada faz-se variar a frequência da excitação por forma a se atingir a ressonância do sistema global. A medição da frequência e a verificação da ressonância é feita com recurso a um osciloscópio externo de precisão. A relação de fase que descreve a ressonância é obtida pela observação no osciloscópio x-y, da formação da figura de Lissajous, conforme ilustra a Figura 2.8. Os valores da corrente aplicada, da frequência de ressonância e da rotação do topo do provete são registados para pós-processamento;

b) repete-se o procedimento anterior para outro valor da corrente aplicada (isto é, para outro nível de distorção);

c) desde que a distorção máxima atingida não ultrapasse 10^{-4}, pode-se considerar que o ensaio é não destrutivo e, portanto, poder-se-ão repetir os procedimentos anteriores para outros valores da tensão de confinamento.

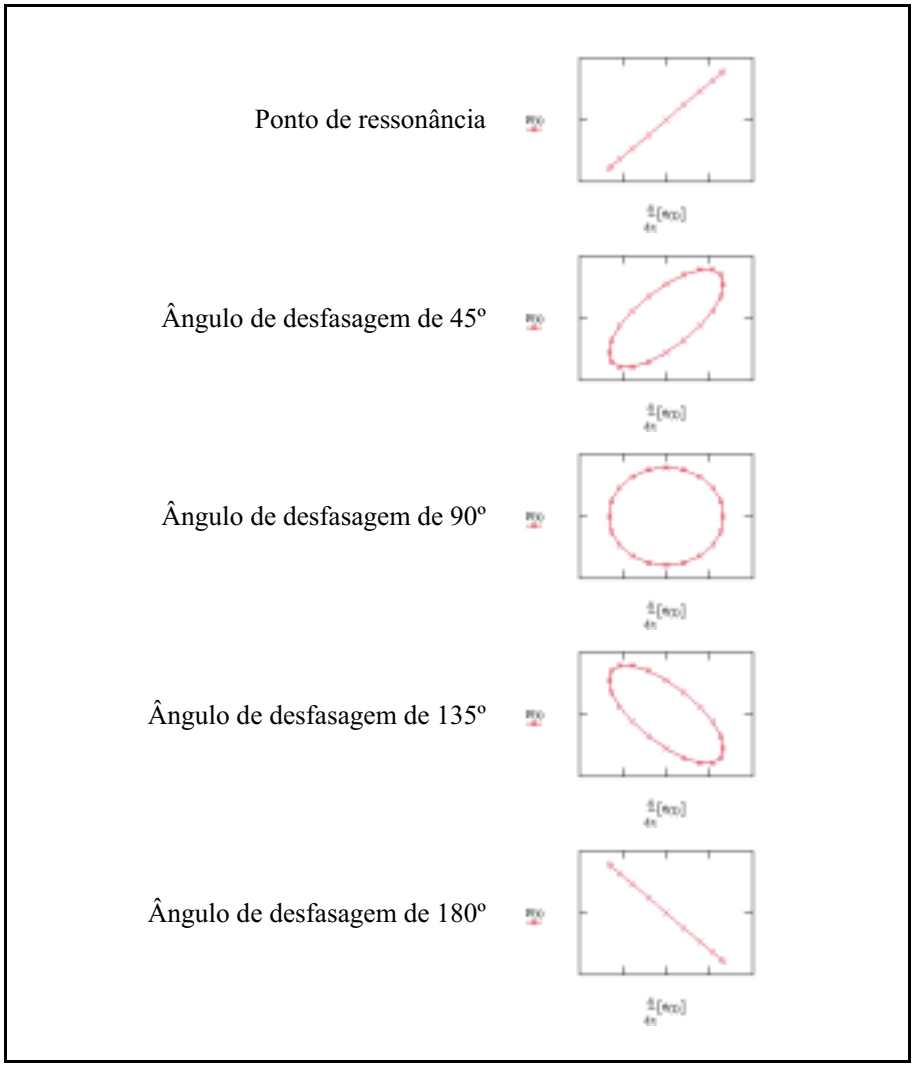

Figura 2.8 - Observação da figura de Lissajous num osciloscópio x-y

As operações de ensaio bem como o respectivo tratamento dos resultados acabados de descrever são bastante repetitivos, pelo que seria de todo o interesse desenvolver um sistema de automatização do ensaio de coluna ressonante.

O sistema de controlo desenvolvido no IST, permite operar em modo automático, gerando sucessivas excitações harmónicas a diferentes frequências até encontrar o ponto de ressonância, conforme ilustra a Figura 2.9. Durante a realização do ensaio, este modo automático é geralmente utilizado unicamente para a determinação do módulo inicial. Uma vez conhecido o seu valor, e para as fases seguintes do ensaio com níveis de distorção crescentes, a pesquisa da frequência de ressonância é feita sem dificuldade, utilizando o modo manual do sistema de controlo, emitindo poucos ciclos de cada vez. Esta forma de procedimento tem por objectivo reduzir ao mínimo as perturbações que se induzem ao provete devido ao número de ciclos de carga. Note-se que, no ensaio convencional em que a busca do ponto de ressonância é feita recorrendo ao osciloscópio, a operação leva cerca de 30 a 60s o que corresponde a 3000 a 6000 ciclos de carga (para f=100Hz).

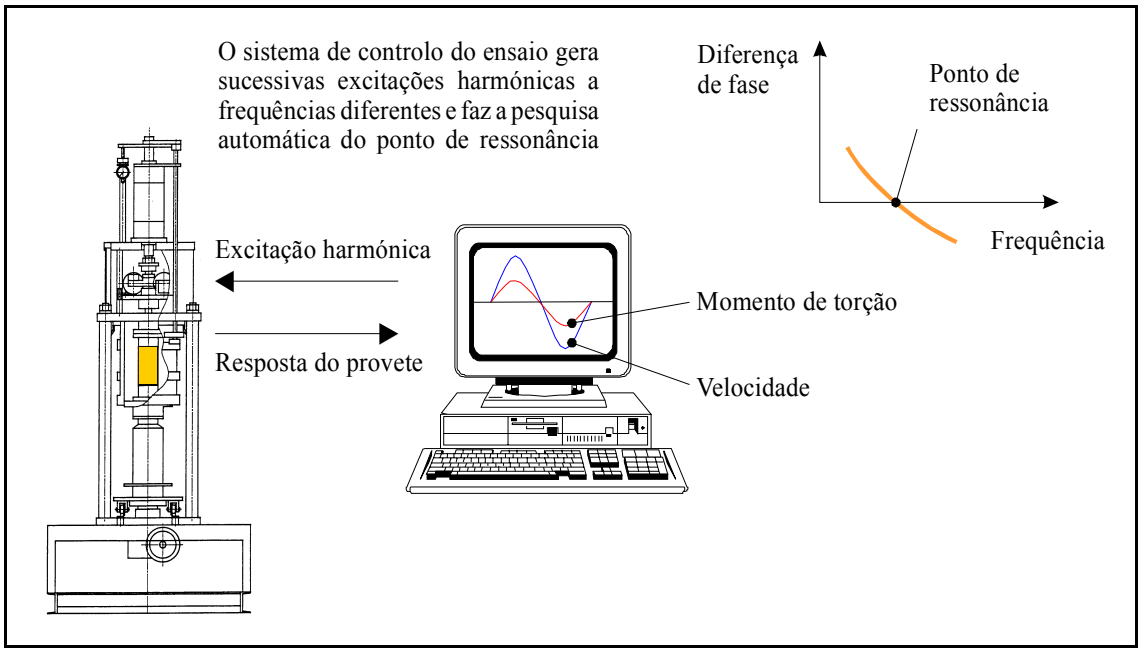

Figura 2.9 - Sistema de controlo do ensaio de coluna ressonante

2.6.2 - Técnica dos transdutores piezoeléctricos

Mais recentemente, tem-se assistido ao desenvolvimento de uma nova técnica de ensaio baseada em transdutores piezoeléctricos que permitem a geração e captação de ondas P (extender elements) e S (bender elements) em provetes de solo. Estes transdutores permitem avaliar a rigidez dos solos no domínio das muito pequenas deformações (através de V_S) e também verificar o estado de saturação (através de V_P). Apresentam a vantagem de serem extremamente versáteis e de fácil implementação nos equipamentos triaxiais correntes.

A Figura 2.10 ilustra o esquema de funcionamento do ensaio, em todo semelhante aos ensaios sísmicos *in situ*. A Figura 2.11 mostra um pormenor dos transdutores incorporados no topo e na base do equipamento do ensaio triaxial corrente.

Esta técnica de ensaio encontra-se em grande desenvolvimento, em termos de investigação, principalmente no que respeita às diferentes técnicas de interpretação que visam a determinação do tempo de propagação da onda. As dificuldades na interpretação surgem como consequência da necessidade de utilização de frequências relativamente elevadas (tipicamente da ordem de 10kHz ou superiores) associadas a alturas de provete relativamente pequenas.

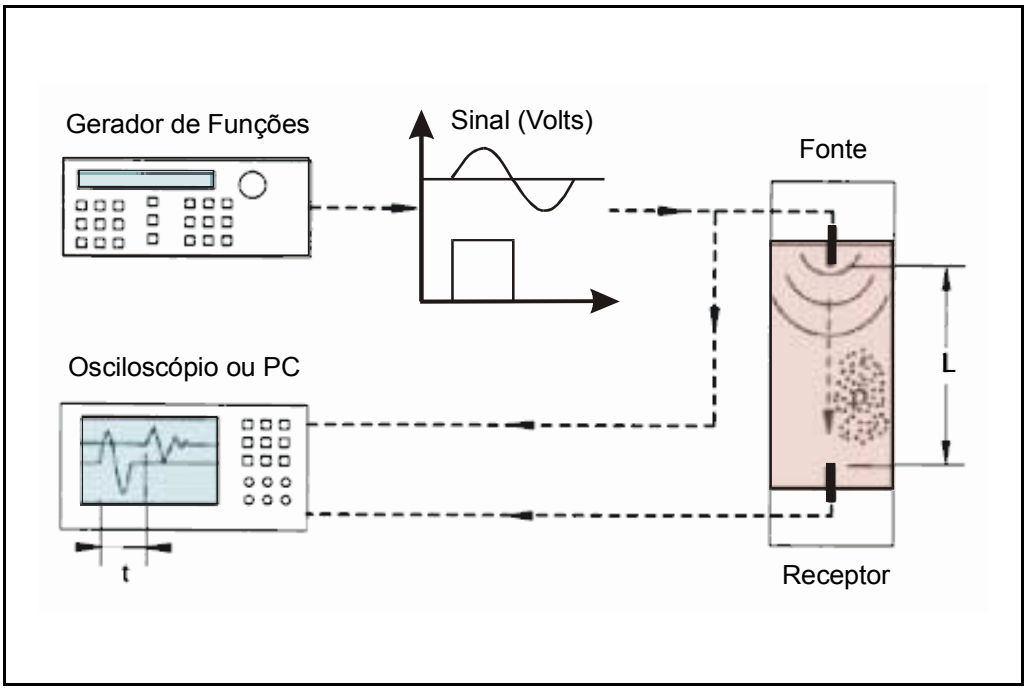

Figura 2.10 - Técnica dos *bender elements*

Figura 2.11 - Pormenor dos *bender elements*

2.7 - Ensaio triaxial de torção cíclica

Durante a actuação de um sismo o substrato rochoso transmite ao terreno de cobertura ondas de corte que se propagam predominantemente na direcção vertical. O estado de tensão inicial do solo é, em geral, anisotrópico e a actuação do sismo gera fundamentalmente um acréscimo das tensões de corte. Esta evolução das tensões pode ser bem simulada no ensaio de torção cíclica (Figura 2.12).

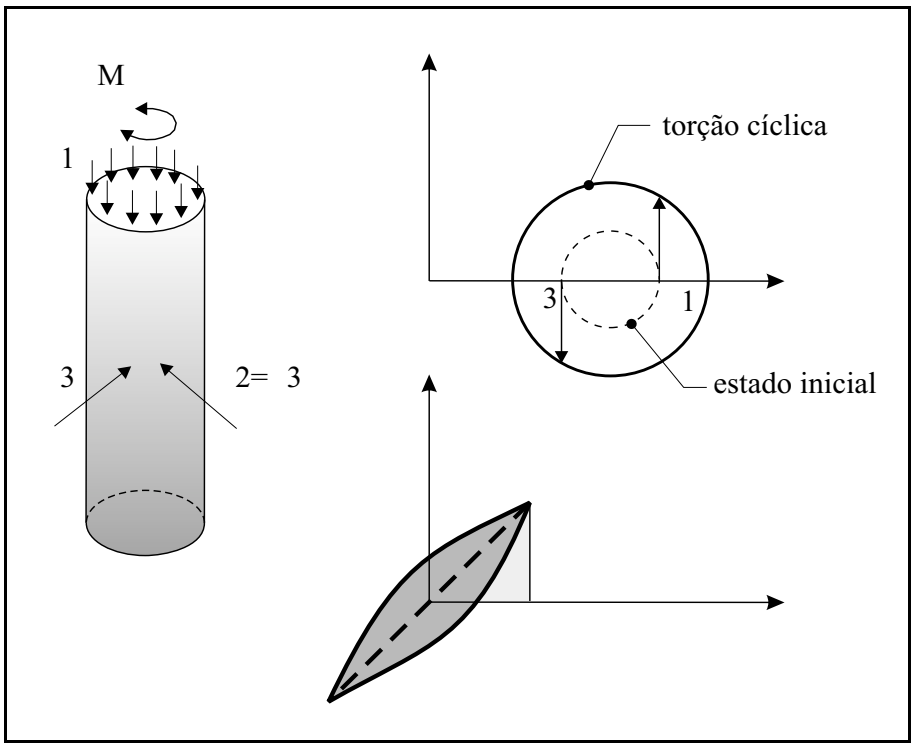

Figura 2.12 - Ensaio de torção cíclica

O ensaio permite atingir níveis de distorção elevados, até à rotura do provete, permitindo assim complementar os resultados do ensaio de coluna ressonante na caracterização dos solos no domínio das médias a grandes distorções.

Para estes níveis de distorção mais elevados pode-se recorrer a uma abordagem aproximada, aplicando o método linear equivalente. Definem-se então, valores secantes, quer do módulo de distorção, quer do coeficiente de amortecimento histerético, em função do nível de distorção.

Far-se-á, a seguir, uma descrição dos fundamentos teóricos e uma apresentação sumária das potencialidades do ensaio triaxial de torção cíclica.

2.7.1 - Trajectórias de tensões. Cálculo das tensões e das extensões

O ensaio triaxial de torção cíclica aplicado a provetes cilíndricos ocos permite controlar a magnitude e a direcção das tensões principais, como se verá mais adiante. Faz-se, seguidamente, uma revisão sumária dos fundamentos teóricos e das expressões de cálculo que permitem determinar as tensões e as extensões num ensaio de torção.

Considere-se então um provete cilíndrico sujeito apenas à acção de um momento de torção no topo. Para o cálculo das tensões e das extensões considera-se o provete como uma peça linear admitindo as hipóteses simplificativas, bem conhecidas da Resistência dos Materiais (Arantes e Oliveira, 1969).

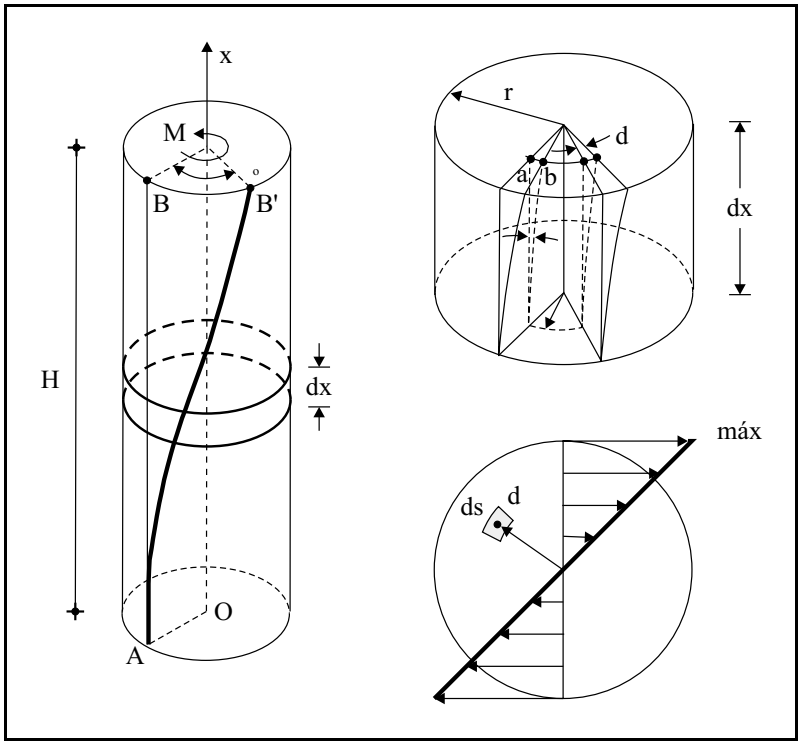

Figura 2.13 - Torção simples

O momento de torção aplicado faz com que a geratriz AB inicialmente rectilínea, passe a helicoidal para a posição AB', após a deformação. Considerando um elemento de solo, verifica-se que há uma distorção representada na figura por γ, cujo valor é dado pela equação seguinte:

$$\gamma = \frac{\overline{ab}}{dx} = \rho \frac{d\eta}{dx} \tag{2.6}$$

A distorção varia linearmente com o raio e depende do ângulo de torção por unidade de comprimento, $d\eta/dx$. Para as hipóteses simplificativas assumidas, este ângulo é suposto constante e igual a θ_o/H.

Para o cálculo da tensão de corte aplica-se a lei de Hooke que conduz a:

$$\tau = G\gamma = G\rho\frac{\theta_o}{H} \tag{2.7}$$

Num elemento de área infinitesimal dA = dsdρ actuará uma força dF cujo momento em torno do eixo x é igual a:

$$dM = dF\rho = (\tau ds d\rho)\rho \tag{2.8}$$

Combinando as duas equações anteriores e integrando para toda a área da secção vem:

$$M = \int_A \tau\rho dA = G\frac{\theta_o}{H}\int_A \rho^2 dA \tag{2.9}$$

ou seja,

$$M = G\frac{\theta_o}{H}I_p \tag{2.10}$$

em que I_p é, como se sabe, o momento polar de inércia da secção.

A tensão de corte varia, tal como a distorção, linearmente com o raio, desde o valor zero até ao valor máximo no contorno exterior, isto é:

$$\tau = \frac{M}{I_p}\rho \tag{2.11}$$

Resumindo, a aplicação da teoria das peças lineares para a interpretação do ensaio de torção, conduz às seguintes expressões para o cálculo de G e de γ:

$$G = \frac{MH}{I_p\theta_o} \tag{2.12}$$

$$\gamma = \rho\frac{\theta_o}{H} \tag{2.13}$$

Os valores máximo e médio da distorção são, portanto, iguais a:

$$\gamma_{máx} = r\frac{\theta_o}{H} \tag{2.14}$$

$$\gamma_{méd} = \frac{r}{2}\frac{\theta_o}{H} \tag{2.15}$$

Saada e Townsend (1981) recomendam a adopção de um valor médio ponderado relativamente ao raio para a distorção, o que conduz a:

$$\bar{\gamma} = \frac{\int_0^{r_o} \frac{\rho\theta_o}{H}\rho\, d\rho}{\int_0^{r_o} \rho\, d\rho} = \frac{2}{3}\frac{r\theta_o}{H} \tag{2.16}$$

Para ultrapassar o problema da distribuição não uniforme da tensão e da distorção segundo o raio recorre-se à utilização de provetes cilíndricos ocos, pois, desta forma, a diferença entre a tensão máxima e mínima ao longo da espessura do cilindro oco é reduzida substancialmente podendo-se até assumir, com razoável aproximação, que a distribuição seja praticamente uniforme.

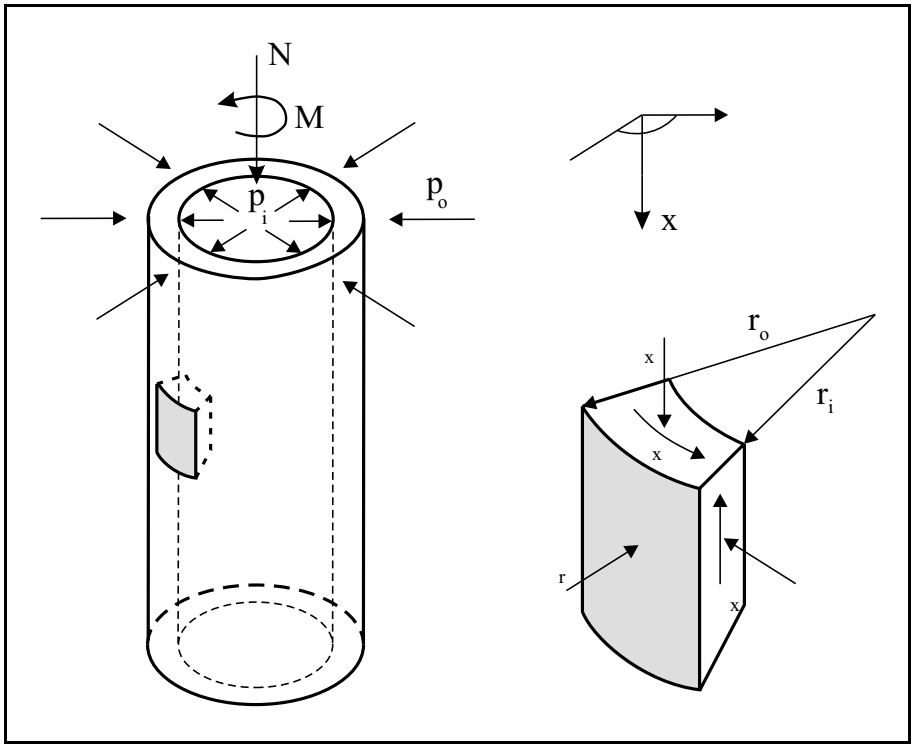

Figura 2.14 - Ensaio de torção. Tensões aplicadas

Considere-se então o provete cilíndrico oco representado na figura, sujeito à acção de uma força axial N, e de um momento de torção M, no seu topo e ainda das pressões externa p_o, e interna p_i. A força axial contribui para a tensão vertical σ_x, e o momento de torção gera tensões de corte $\tau=\tau_{x\theta}=\tau_{\theta x}$, nas facetas horizontal e vertical. A diferença entre as pressões externa e interna contribui para a existência de um gradiente da tensão radial σ_r. A tensão circunferencial σ_θ, é obtida através do estabelecimento da condição de equilíbrio radial:

$$\sigma_\theta \& \sigma_r = \rho\frac{d\sigma_r}{d\rho} \tag{2.17}$$

Note-se que nas paredes exterior e interior do provete a tensão de corte aplicada é nula, pelo que se deduz de imediato que a tensão radial é sempre uma tensão principal. A magnitude e a direcção das outras duas tensões principais serão obtidas em função das tensões normais e de corte aplicadas (σ_x, σ_θ e $\tau_{x\theta}=\tau_{\theta x}$). Para o caso particular das pressões externa e interna serem iguais $p_o=p_i=p$ é lícito admitir que as tensões σ_r e σ_θ são também iguais a p. Demonstra-se que, para esta situação particular a relação entre o parâmetro $b=(\sigma_{II}-\sigma_{III})/(\sigma_I-\sigma_{III})$ e o ângulo α, que a tensão principal σ_I, faz com a vertical é dada por $b=sen^2\alpha$.

Para o caso geral em que as pressões externa e interna do provete são diferentes pode-se controlar os parâmetros b e α de uma forma independente, ou melhor, torna-se possível o controlo independente da magnitude das três tensões principais, σ_I, σ_{II} e σ_{III} e a orientação da tensão principal σ_I.

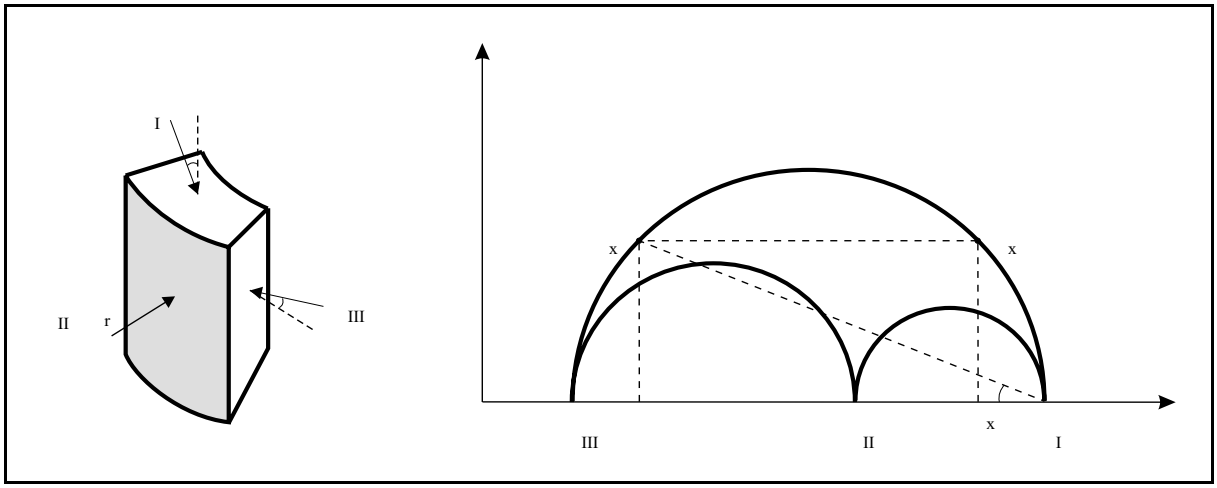

Figura 2.15 - Ensaio de torção. Círculos de Mohr em termos de tensões totais

Durante o ensaio de torção o solo está longe de se comportar como um corpo elástico, pelo que as expressões da teoria da elasticidade teriam que ser adaptadas tendo em consideração a progressiva plastificação do solo. Hight et. al. (1983) investigaram este problema e propuseram que se determinassem as tensões e as extensões médias no provete, com base nas expressões seguintes (vide significado das variáveis na Figura 2.18):

a) tensão vertical média:

$$\overline{\sigma_x} = \frac{N}{\pi(r_o^2 - r_i^2)} + \frac{p_o r_o^2 - p_i r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \qquad (2.18)$$

b) tensão de corte média

É obtida considerando uma distribuição uniforme ao longo da espessura do provete:

$$\overline{\tau_{\theta x}} = \frac{M}{\int_{r_i}^{r_o} 2\pi\rho^2 d\rho} = \frac{3M}{2\pi(r_o^3 - r_i^3)} \tag{2.19}$$

Quanto às tensões radial e circunferencial as opiniões são mais divergentes entre os diferentes autores. Assim, Hight et al. (1983) assumem para o solo o comportamento elástico linear e calculam o valor médio das tensões através de:

c) tensão radial média

$$\overline{\sigma_r} = \frac{\int_{r_i}^{r_o} \sigma_r d\rho}{\int_{r_i}^{r_o} d\rho} = \frac{p_o r_o - p_i r_i}{r_o - r_i} \tag{2.20}$$

d) tensão circunferencial média

$$\overline{\sigma_\theta} = \frac{\int_{r_i}^{r_o} \sigma_\theta d\rho}{\int_{r_i}^{r_o} d\rho} = \frac{p_o r_o - p_i r_i}{r_o - r_i} \tag{2.21}$$

Por outro lado, Fryman et al. (1973) consideram uma variação linear da tensão radial ao longo da espessura da parede do provete. Tendo em consideração a condição de equilíbrio entre as tensões radial e circunferencial e definindo as tensões para o raio médio $(r_o+r_i)/2$, chegaram a:

$$\overline{\sigma_r} = \frac{p_o - p_i}{2} \tag{2.22}$$

e para a tensão circunferencial obtiveram uma expressão idêntica àquela proposta por Hight et al. (1983).

Miura et al. (1986) assumindo também uma variação linear da tensão radial ao longo da espessura da parede do provete consideram para as tensões um valor médio ponderado relativamente ao raio e foram conduzidos a:

$$\overline{\sigma_r} = \frac{\int_{r_i}^{r_o} \sigma_r \rho \, d\rho}{\int_{r_i}^{r_o} \rho \, d\rho} = \frac{p_o(2r_o^2 - r_o r_i - r_i^2) - p_i(r_o^2 - r_o r_i - 2r_i^2)}{3(r_o^2 - r_i^2)} \tag{2.23}$$

$$\overline{\sigma_\theta} = \frac{\int_{r_i}^{r_o} \sigma_\theta \rho \, d\rho}{\int_{r_i}^{r_o} \rho \, d\rho} = \frac{p_o(4r_o^2 - r_o r_i - r_i^2) - p_i(r_o^2 - r_o r_i - 4r_i^2)}{3(r_o^2 - r_i^2)} \tag{2.24}$$

Momenzadeh (1985) (citado por Pradhan, 1990) considera para o solo o comportamento elástico linear e toma para as tensões o valor médio ponderado relativamente ao raio:

$$\overline{\sigma_r} = \frac{p_o r_o^2 - p_i r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} - \frac{2(p_o - p_i) r_o^2 r_i^2 \ln(r_o/r_i)}{(r_o^2 - r_i^2)^2} \tag{2.25}$$

$$\overline{\sigma_\theta} = \frac{p_o r_o^2 - p_i r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} + \frac{2(p_o - p_i) r_o^2 r_i^2 \ln(r_o/r_i)}{(r_o^2 - r_i^2)^2} \tag{2.26}$$

Os valores de σ_r e σ_θ propostos pelos diferentes autores são comparados a seguir para um provete com r_o=35mm, r_i=15mm e para diferentes valores da relação p_o/p_i. As comparações são feitas relativamente à solução proposta por Hight et al. (1983).

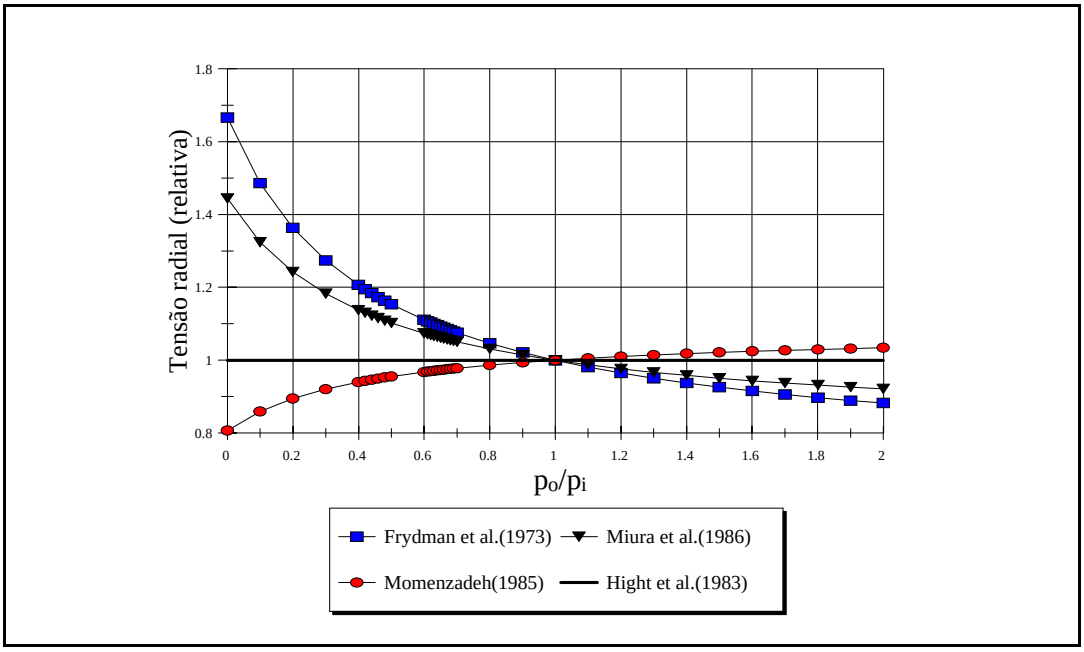

Figura 2.16 - Comparação da tensão radial proposta por diferentes autores

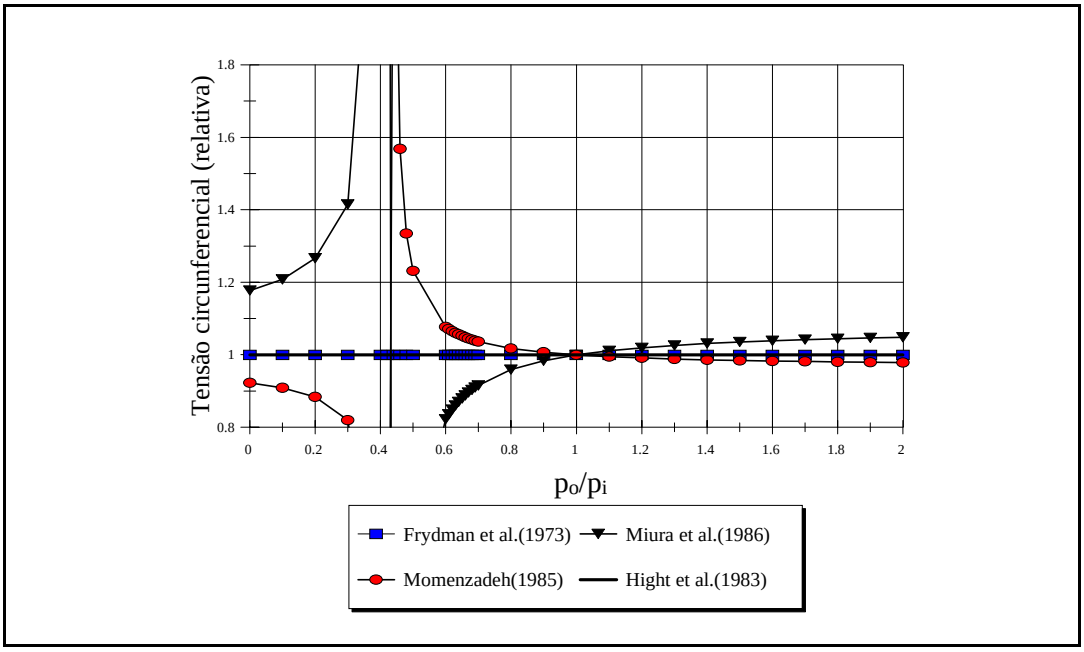

Figura 2.17 - Comparação da tensão circunferencial proposta por diferentes autores

A Figura 2.16 mostra que, para a tensão radial, o afastamento entre as diferentes soluções só se torna significativo para valores relativamente baixos da relação p_o/p_i. Assim, por exemplo, para p_o/p_i=0.5 a solução de Momenzadeh (1985) subestima o valor de σ_r em apenas 5% comparativamente com a solução de Hight et al. (1983). No que respeita à tensão circunferencial (Figura 2.17) as discrepâncias são maiores, principalmente, no intervalo de valores de p_o/p_i entre 0.3 e 0.5, onde a solução de Hight et al. (1983) se anula. Para esta gama de valores, parece imprescindível o recurso a um sistema de medição local que permita a estimação das tensões e das extensões ao longo da espessura da parede do provete. Na prática, os ensaios de torção são efectuados para valores de p_o/p_i iguais ou superiores à unidade, pelo que, de acordo com as figuras anteriores, as diferenças entre as várias soluções não são muito significativas sendo, em geral, inferior a 10%.

e) extensão axial média

$$\overline{\gamma}_x = \frac{u_x}{H} \tag{2.27}$$

Para as extensões radial e circunferencial considera-se que a distribuição é linear ao longo da espessura do provete pelo que:

f) extensão radial média

$$\overline{\gamma}_r = -\frac{u_o - u_i}{r_o - r_i} \tag{2.28}$$

g) extensão circunferencial média

$$\overline{g_\theta} = \frac{u_i - u_o}{r_i - r_o} \tag{2.29}$$

h) a distorção média

Fazendo a ponderação relativamente ao raio obtém-se:

$$\overline{\gamma} = \overline{\gamma_{\theta x}} = \frac{\int_{r_i}^{r_o} \frac{\rho\theta_o}{H}\rho\, d\rho}{\int_{r_i}^{r_o} \rho\, d\rho} = \frac{2\theta_o(r_o^3 - r_i^3)}{3H(r_o^2 - r_i^2)} \tag{2.30}$$

i) módulo de distorção secante

$$G = \frac{\overline{\tau_{\theta x}}}{\overline{\gamma_{\theta x}}} = \frac{9}{4\pi}\frac{M\,H(r_o^2 - r_i^2)}{\theta_o(r_o^3 - r_i^3)^2} \tag{2.31}$$

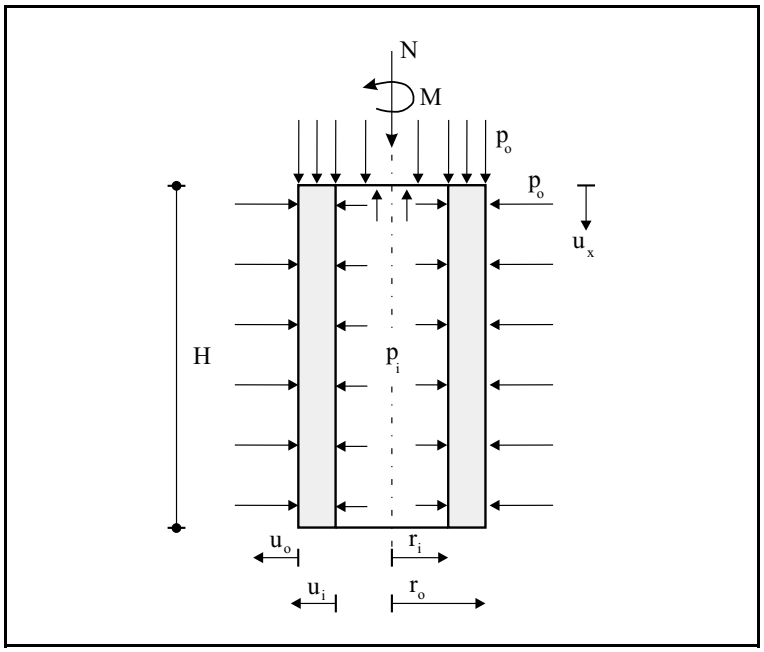

Figura 2.18 - Ensaio de torção. Significado das variáveis

Em suma, a avaliação dos valores secantes do módulo de distorção e do coeficiente de amortecimento do solo é feita considerando o provete como um único elemento e formulando o problema, em termos, de valores médios, quer para as tensões, quer para as extensões.

Sendo assim, convém salientar, que para níveis elevados da distorção os resultados só poderão ter algum significado caso se disponha de um sistema adequado de medição local, dada a distribuição não uniforme das extensões ao longo da altura do provete.

2.7.2 - Descrição do equipamento

Na Figura 2.19 representa-se um desenho esquemático do equipamento de ensaio. Como se pode verificar, o provete de solo fica embebido numa câmara cheia de água até ao nível do topo do provete. Para as fases de saturação e de consolidação do provete seguem-se os procedimentos similares ao do ensaio triaxial clássico.

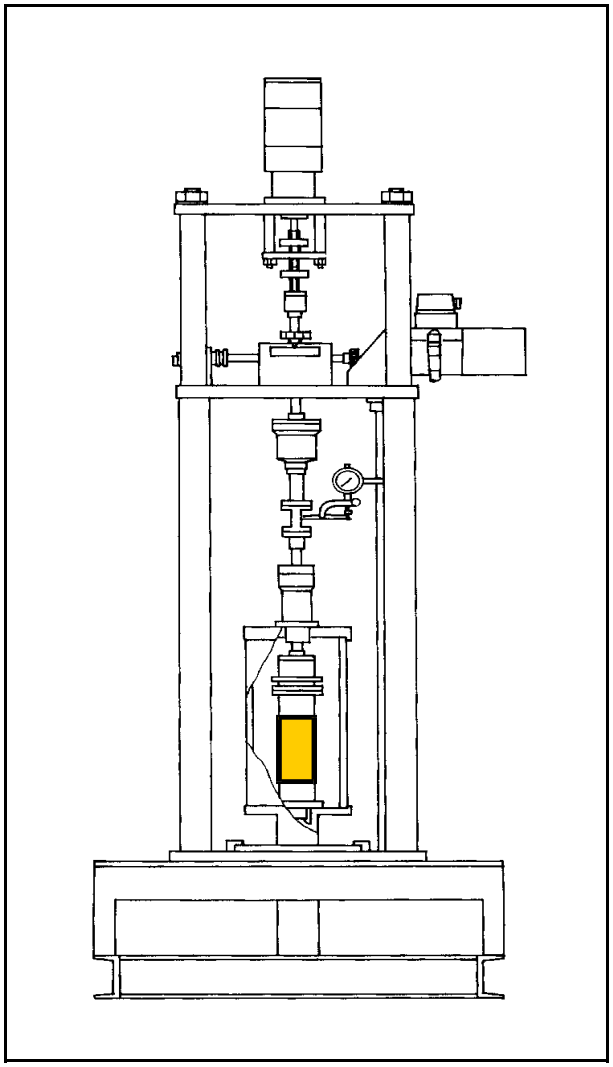

Figura 2.19 - Torção cíclica. Equipamento

O equipamento disponível no Laboratório de Geotencia do IST permite ensaiar provetes com as dimensões seguintes:

- diâmetro=70mm, altura=100mm (maciço);
- diâmetro exterior=70mm, diâmetro interior=30mm, altura=100mm (oco);
- diâmetro exterior=100mm, diâmetro interior=60mm, altura=100mm (oco).

Na Figura 2.20, representa-se um pormenor do transdutor angular de precisão. Por forma, a minimizar o erro nas medicões, este transdutor está localizado no interior da câmara e o mais próximo possível do topo do provete. Segundo as especificações do fabricante, a precisão é da

ordem de 0.01º, o que corresponde para as dimensões do provete referidas, a uma distorção de cerca de $5x10^{-5}$. Porém, na prática, verifica-se que as leituras só apresentam alguma fiabilidade para valores da distorção superiores a 10^{-4}.

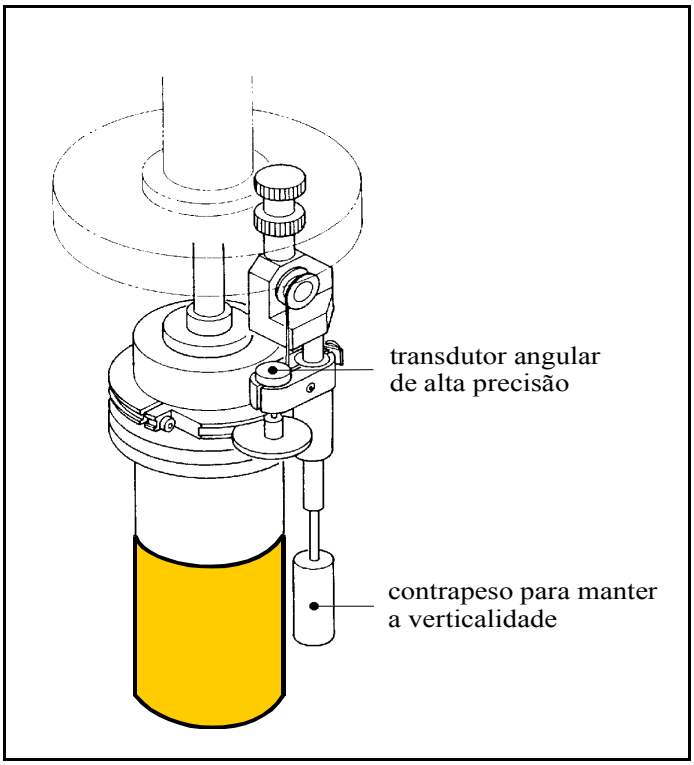

Figura 2.20 - Pormenor do equipamento

Face ao carácter cíclico do ensaio e ao grande volume de resultados daí resultante, torna-se necessário recorrer a de automatização, quer para o controlo do ensaio, quer para o tratamento dos resultados.

A Figura 2.21 ilustra o menu do programa de controlo do ensaio.

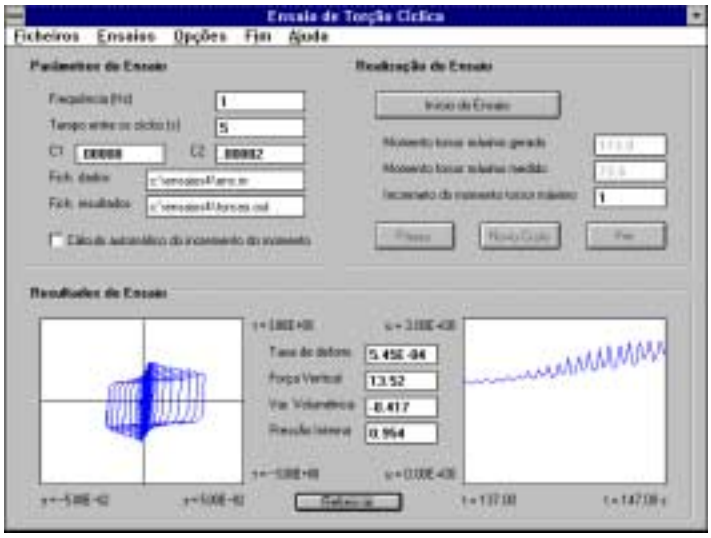

Figura 2.21 - Ensaio de torção cíclica.
Menu do programa de controlo

2.7.3 - Ensaios em estado de deformação distorcional simples

Num estado de deformação distorcional simples todas as extensões do elemento de solo são nulas, excepto uma das distorções constituindo, portanto, um caso particular, da situação indicada na Figura 2.22 em que a extensão axial é diferente de zero.

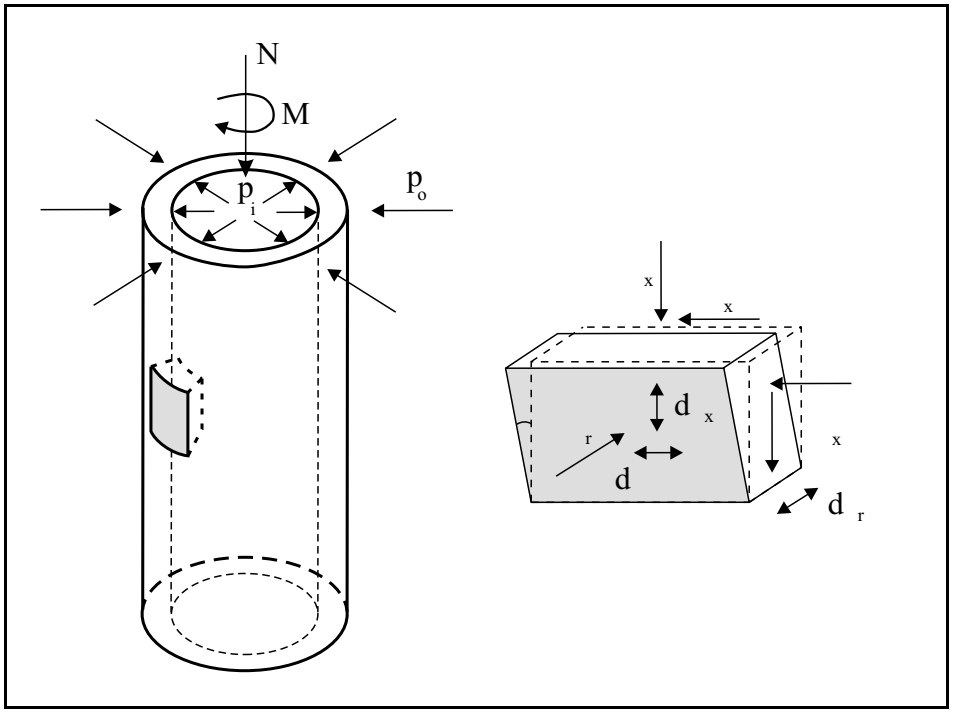

Figura 2.22 - Ensaio de torção. Estado de deformação distorcional simples

Para se conseguir impor este estado de deformação, diferentes tipos de equipamento foram desenvolvidos nomeadamente:

- o aparelho de corte criado pelo "Swedish Geotechnical Institute (SGI)", no qual um provete de solo com a forma de um disco fica confinado lateralmente por uma membrana de borracha e por anéis metálicos.
- o aparelho de corte desenvolvido pelo "Norwegian Geotechnical Institute (NGI)" - aparelho semelhante ao anterior, em que os anéis metálicos são substituídos por um membrana de borracha reforçada no interior por um fio de aço helicoidal. Para a medição da tensão horizontal Moussa (1974), utilizou para o reforço da membrana um fio de aço previamente calibrado. Por outro lado, Silver et al. (1980) e Taksuoka e Silver (1981) realizaram ensaios não drenados a volume constante em provetes de areia saturados, introduzindo o aparelho NGI dentro duma câmara sob pressão. Nestes ensaios, utilizaram-se membranas não reforçadas e as tensões efectivas foram obtidas com base na medição das tensões totais e das pressões intersticiais. Duvik et al. (1981) submeteram igualmente o aparelho NGI dentro de uma câmara de pressão para a realização de ensaios em argilas.

- o aparelho de corte criado por Roscoe (1957), no qual o provete de solo com a forma de um prisma de secção rectangular é confinado nas suas seis faces por placas. É permitido o movimento de translação de duas placas no sentido do corte, mantendo-se, no entanto, a altura do provete.
- o aparelho de torção anelar desenvolvido por Yoshimi e Oh-oka (1973) , no qual o provete de solo com a forma de um cilindro oco, fica envolvido por uma série de aneis interiores e exteriores.

Os aparelhos de ensaio acabados de referir, não cumprem todas as exigências no que respeita:
- à uniformidade das tensões no plano de corte;
- à possibilidade de realizar ensaios de corte a volume constante;
- à possibilidade da medição da magnitude e da direcção das três tensões principais.

2.7.4 - Ensaio de torção em estado de deformação distorcional simples (TSST)

Não obstante algumas dificuldades no que respeita à confecção de provetes cilíndricos ocos, o ensaio de torção em estado triaxial tem sido amplamente utilizado por diversos investigadores, principalmente para o estudo do comportamento de solos em estado de deformação distorcional simples, (ou reproduzindo as condições de deformação representadas na Figura 2.22). Isto deve-se ao facto, de neste tipo aparelho poder-se controlar os estados de tensão e de deformação do provete e a vantagem de se poder medir e avaliar de uma forma racional todas as componentes das tensões e das deformações, quando comparado com os outros tipos de ensaios de corte já referidos. Este tipo de ensaio é habitualmente designado, na literatura, pelas suas iniciais em inglês, TSST, isto é, "Torsional Simple Shear Test".

Num ensaio de torção TSST, em condições drenadas, o qual permite a deformação axial do provete cilíndrico oco, as pressões laterais interior p_i, e exterior p_o, têm que ser ajustadas continuamente durante o corte. O controlo destes ajustes só é possível mediante o recurso a um sistema automatizado utilizando um computador. Pelo contrário, o ensaio de torção TSST, em condições não drenadas para solos saturados (variação volumétrica nula) é relativamente mais simples que o ensaio em condições drenadas e pode ser realizado sem recurso à automatização.

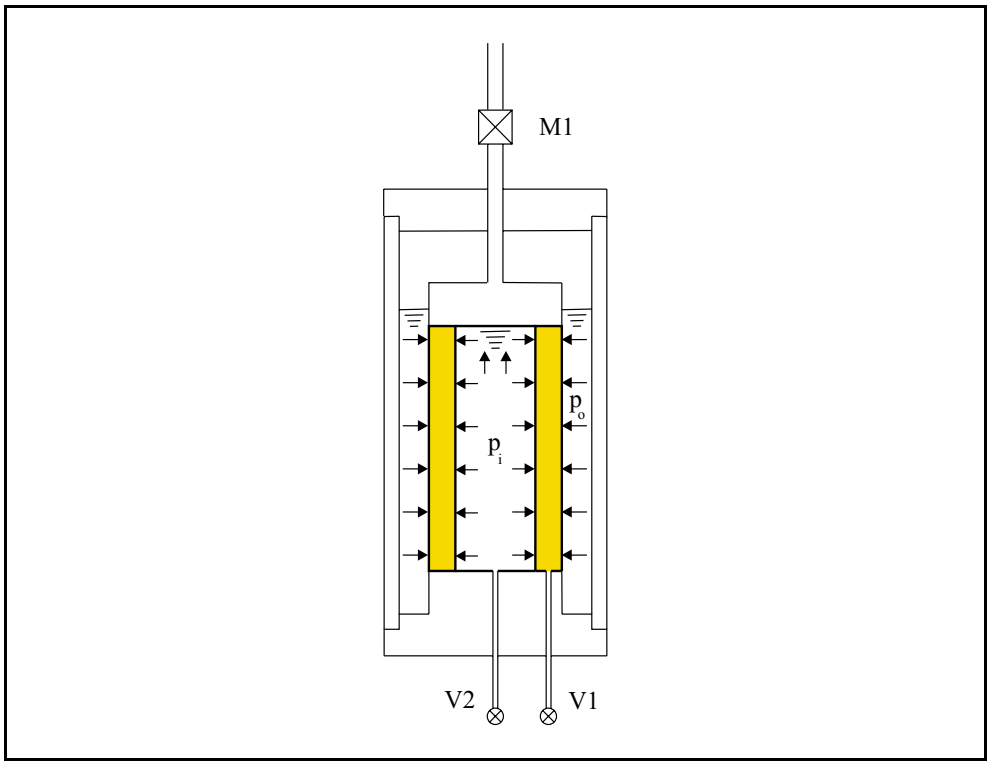

Figura 2.23 - Ensaio de torção. Dispositivos para controlo das deformações

Na Figura 2.23 apresenta-se um esquema com os dispositivos para controlo das deformações num ensaio de torção. A realização do ensaio de torção TSST, em condições não drenadas, num provete saturado e sem recurso à automatização, requer os seguintes procedimentos:

1) impede-se a drenagem do provete fechando a válvula V1 do circuito hidráulico ligado ao provete. Deste modo, a variação volumétrica é nula ($d\varepsilon_v=0$) se se desprezar a correcção da membrana;
2) a altura do provete é mantida constante durante o corte, ou seja, a extensão axial é nula, $d\varepsilon_x=0$. Esta condição é garantida, mediante o manípulo M1, o qual permite a rotação livre do pistão, mas impede qualquer movimento vertical;
3) o volume de água contida na parte oca do provete é mantido constante mediante o fecho da válvula V2 indicada na figura. Esta condição conjuntamente com a condição $d\varepsilon_x=0$, implica que não haja variação do raio interior do provete, isto é, $dr_i=0$. Por outro lado, as condições $d\varepsilon_v=0$, $d\varepsilon_x=0$ e $dr_i=0$ implicam que o raio exterior do provete se mantém constante ($dr_o=0$). Como não há variação dos raios interior e exterior do provete, a forma da secção mantém-se constante (com $d\varepsilon_\theta=d\varepsilon_r=0$, tal como num ensaio de deformação distorcional simples).

Estes procedimentos são resumidos no fluxograma indicado na Figura 2.24.

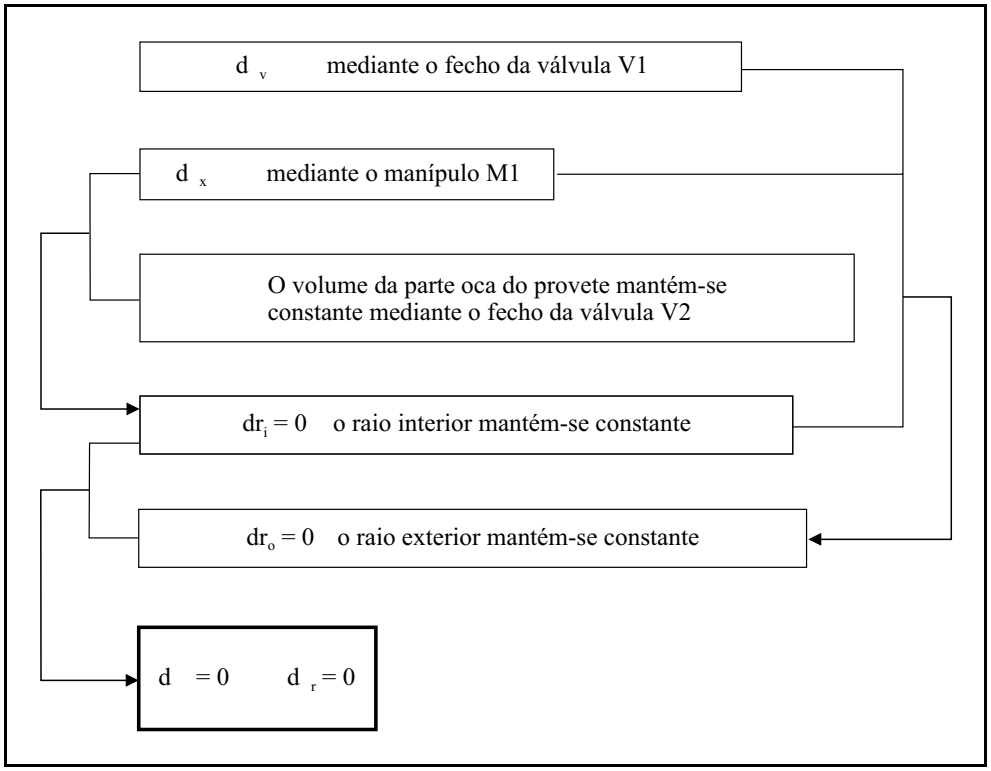

Figura 2.24 - Fluxograma explicativo do princípio de funcionamento de um ensaio de torção do tipo TSST em condições não drenadas

Salienta-se ainda, que neste método de ensaio, a pressão exterior p_o é mantida constante enquanto que a pressão interior p_i varia consoante a deformação do provete. É importante garantir durante a realização do ensaio, que a deformação axial do provete seja nula.

2.7.5 - Ensaio simplificado de torção em condições não drenadas (QSST)

Os ensaios realizados com as pressões interior e exterior idênticas (p_i=p_o) são mais simples, mas constituem uma aproximação do ensaio de deformação distorcional simples em condições não drenadas. Este tipo de ensaio é habitualmente designado, na literatura, pelas suas iniciais em inglês, QSST, isto é, "Quasi Simple Shear Test".

As condições $d\varepsilon_x$=0 e $d\varepsilon_v$=0 conjuntamente com a condição p_i=p_o implicam que a forma da secção transversal do provete se mantém constante com $d\varepsilon_\theta$+$d\varepsilon_r$=0. Este tipo de ensaio pode ser realizado no aparelho indicado na Figura 2.23, bastando impedir a variação da altura do provete e garantir a condição p_i=p_o.