

O "MÉTODO DE CORTE DE ARMADURAS" NA AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DE PILARES DE BETÃO ARMADO

Branco*, F. A.; Santos**, J. R. L.

*Professor Catedrático. DECivil, Instituto Superior Técnico, Lisboa - Portugal

**Engenheiro Civil, Mestre em Engenharia de Estruturas. Instituto Superior Técnico, Lisboa - Portugal



RESUMO

No processo de avaliação estrutural de uma estrutura em betão, a determinação do estado de tensão existente é fundamental para a quantificação da capacidade resistente residual da estrutura e conseqüentemente para a optimização de uma eventual operação de reforço. Neste artigo apresenta-se uma técnica desenvolvida no Instituto Superior Técnico para a avaliação in situ do estado de tensão em pilares de betão armado, baseada na libertação das tensões num dos varões de aço do pilar, através do corte do mesmo com disco apropriado, técnica designada de "Método de Corte de Armaduras". Apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios de calibração e as principais grandezas intervenientes na técnica.

1. INTRODUÇÃO

Nas estruturas de betão é frequentemente necessário proceder-se a uma avaliação estrutural sempre que existem sinais de anomalias (fissuração, deformações excessivas, deteriorações, etc.) ou quando se pretende aplicar cargas não previstas no projecto original que possam levar ao reforço da estrutura principal.

A medição directa das tensões existentes é nestes casos particularmente importante para os engenheiros responsáveis pelo projecto de manutenção ou reforço da construção, já que o nível verdadeiro das tensões totais é um dos parâmetros principais na avaliação da capacidade estrutural residual.

O recurso alternativo aos métodos analíticos / numéricos, utilizados no dimen-

sionamento das estruturas, é uma técnica aproximada, em que se omite frequentemente os efeitos das fases construtivas, o comportamento termo-higrométrico do betão e as cargas efectivamente aplicadas.

Os métodos existentes para avaliação de tensões in situ em estruturas de betão, baseiam-se fundamentalmente em duas técnicas:

- libertação parcial e local das tensões, seguida por uma compensação de pressão controlada (método directo);
- alívio de tensões em redor, quer de inclusões cilíndricas previamente instaladas, quer de carotes extraídas da estrutura (método indirecto).

O método directo tem vindo a ser desenvolvido em França por Abdunur [2]. Também conhecido por método da libertação, fundamenta-se na instalação

inicial de um campo de deslocamentos de referência sobre a superfície e na posterior introdução de um macaco plano numa abertura feita num plano normal às direcções de tensões desejadas.

Os métodos indirectos para medição de tensões a partir da libertação das mesmas, têm tido grande aplicação na mecânica das rochas [8] e em estruturas metálicas [7]. Coutinho [4] introduziu o método indirecto com o uso de inclusões, cujo módulo de elasticidade é bastante superior ao do betão, como método para a determinação das tensões no betão. Mehrkar Asl [3] estudou inicialmente em Inglaterra um método indirecto baseado no alívio de tensões que ocorre na superfície do betão, em redor de uma carote extraída da peça. M. J. Ryall [1] [10] desenvolveu também em Inglaterra um método baseado na introdução no betão de inclusões cilíndricas instrumentadas.

O “Método de Corte de Armaduras” destina-se à avaliação in situ do estado de tensão em pilares de betão armado, limitando-se nesta fase inicial do desenvolvimento da técnica apenas o seu emprego a pilares onde prevalecem tensões de compressão devidas a cargas axiais.

Isto justifica-se já que, na maioria dos edifícios com estrutura em betão armado, os pilares estão sujeitos, para as acções de carácter permanente, a tensões de compressão, prevalecendo nestas essencialmente a componente devida ao esforço normal.

2. DESCRIÇÃO DA TÉCNICA

2.1 Considerações Gerais

A técnica proposta baseia-se fundamentalmente na determinação do esforço axial em pilares através da libertação total e localizada das tensões num dos varões de aço do pilar. Esta libertação é feita abrindo-se um roço com dimensões apropriadas no betão, na região do varão, deixando-se o mesmo exposto e livre de betão em seu redor. Posteriormente, corta-se, com o auxílio de um disco

apropriado, total e transversalmente o varão de aço exposto. A variação de extensão no varão, decorrente do corte, é registada através de um extensómetro de resistência eléctrica previamente colado no mesmo, numa posição próxima da secção de corte. A tensão total existente no varão é então avaliada pela variação de extensão no mesmo.

Para se obter a tensão no varão apenas devida às cargas aplicadas (componente externa) é ainda necessário quer uma avaliação, em paralelo, das tensões devidas ao comportamento visco-elástico do betão, as quais são internas e auto-equilibradas na secção transversal, quer das que resultam da perturbação devida à abertura do roço.

A técnica será completada, após ensaio, pela soldadura do varão cortado e pelo refechamento com argamassa não retráctil do roço aberto, de modo a garantir a manutenção da resistência última do pilar analisado.

2.2 Hipóteses de Base

No desenvolvimento da técnica, admittiram-se as seguintes hipóteses fundamentais da teoria da elasticidade:

- 1) as secções planas e normais ao eixo longitudinal do pilar mantêm-se planas e normais, após ocorrerem as deformações devidas ao esforço axial aplicado (hipótese de Bernoulli);
- 2) as tensões são directamente proporcionais às deformações (Lei de Hooke).

A hipótese 2) é válida nas situações tipo em que o ensaio aqui preconizado é feito. De facto, os pilares das estruturas numa situação de serviço estão praticamente em compressão simples e têm tensões instaladas que correspondem aos troços iniciais, praticamente lineares, das respectivas relações constitutivas.

Com base nestas hipóteses e na equação geral de equilíbrio de um pilar de betão armado sujeito a esforços axiais de compressão, pode-se escrever a seguinte equação:

$$N = E_c \epsilon_s A_c + E_s \epsilon_s A_s \quad (1)$$

onde N - esforço normal aplicado;

E_c - módulo de elasticidade do betão;

E_s - módulo de elasticidade do aço;

A_c - área da secção transversal de betão;

A_s - área da secção transversal de aço;

ϵ_s - deformação longitudinal dos varões de aço.

Designando a extensão no varão de aço instrumentado devida à retracção e à fluência respectivamente por ϵ_{srt} e ϵ_{sfl} , a variação de extensão no mesmo decorrente da abertura do roço por ϵ_{sr} , e a extensão total registada pelo extensómetro colado ao varão por ϵ_{st} , pode-se reescrever a equação (1) na forma:

$$N = E_c (\epsilon_{st} - \epsilon_{sr} - \epsilon_{srt} - \epsilon_{sfl}) A_c + E_s (\epsilon_{st} - \epsilon_{sr} - \epsilon_{srt} - \epsilon_{sfl}) A_s \quad (2)$$

onde N é o esforço normal aplicado, avaliado in situ pelo método de corte de armaduras.

3. ENSAIOS DE LABORATÓRIO

3.1 Calibração da Posição de Corte do Varão

Inicialmente, para otimizar a posição de corte nos varões, previamente instrumentados em relação à localização do extensómetro, bem como para verificar se o aquecimento do varão durante a operação de corte alterava o valor registado pelo extensómetro, foram efectuados ensaios de tracção axial sobre varões de aço de 16 mm de diâmetro.

Com o varão tensionado sob carga constante, colou-se nele um extensómetro de resistência eléctrica para registo da variação de extensão que ocorre durante o corte com disco.

Cada extensómetro colado ao varão foi ligado a uma ponte extensiométrica numa ligação de tipo quarto de ponte, sendo o sinal emitido pelo mesmo registado

por um registor x-t do tipo Yokogawa numa escala previamente aferida.

Comparou-se o valor obtido nos ensaios com o obtido analiticamente através da Lei de Hooke, concluindo-se que para uma distância entre a secção de corte do varão e o eixo do extensómetro a partir de 7 cm, as diferenças máximas alcançadas entre os valores experimentais e os analíticos foram de 11%.

3.2 Ensaios do Método de Corte de Armaduras

A calibração da técnica propriamente dita constou em ensaiar modelos de betão armado, submetendo-os a uma força axial de compressão de valor conhecido para posterior comparação com a força axial avaliada através da técnica.

Os modelos construídos tinham geometria cilíndrica, com secção transversal de 15 cm de diâmetro, e altura de 90 cm. Foram colocados simetricamente, em cada modelo, quatro varões de aço de 12 mm de diâmetro, sendo um deles instrumentado com um extensómetro de resistência eléctrica de 6 mm de comprimento.

Na construção dos modelos foi utilizada uma cofragem de aço, sendo colocado um estribo em redor de cada extremidade dos varões para assegurar que os mesmos mantinham a sua posição original durante a betonagem. A cofragem de aço, pronta para betonagem, pode ser observada na Fig.1.

O extensómetro colado num dos varões de aço de cada provete, antes da betonagem, permitiu medir a variação de extensão no varão devida à retracção, bem como a devida à redistribuição de tensões que ocorre durante a abertura do roço.

A retirada da cofragem foi feita 24 horas após a betonagem. Imediatamente após a descofragem, o extensómetro previamente colado a um dos varões de aço, em cada provete, foi ligado a uma ponte extensiométrica, a qual foi ligada a um armazenador de dados do tipo HBM UPM100. A partir deste instante foi então

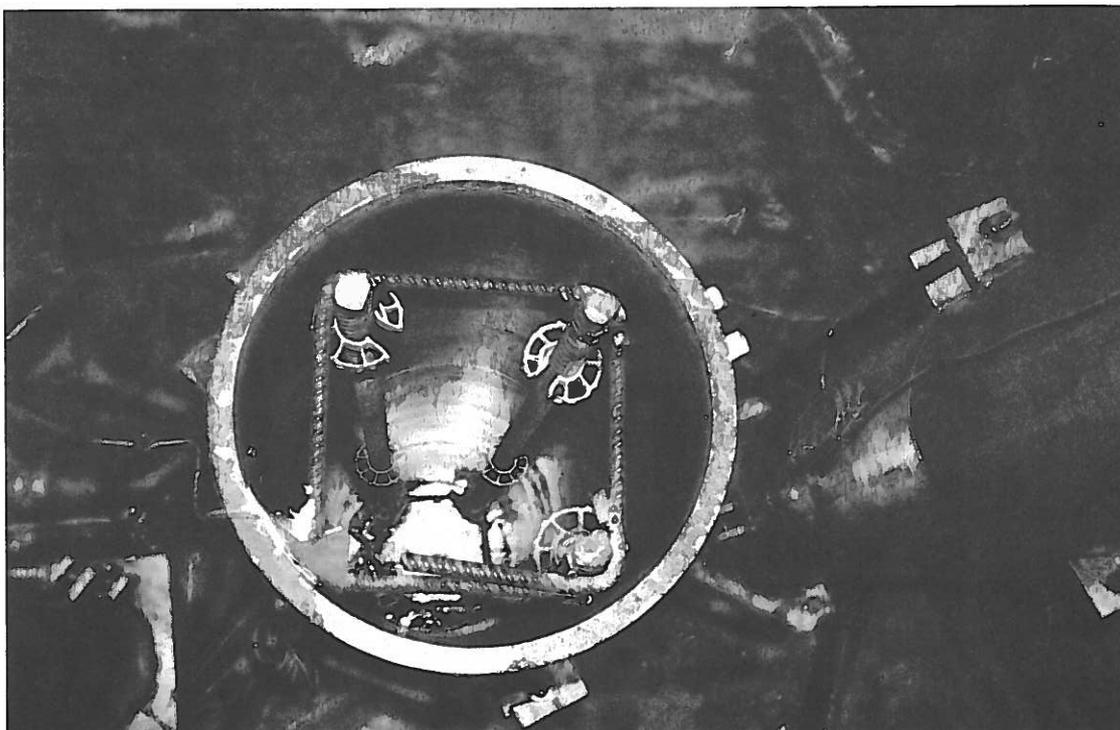


Fig.1 - Cofragem com os varões de aço posicionados pronta para betonagem (vista superior).

registada pelo armazenador de dados, em intervalos de 1 hora, a extensão no varão de aço devida à retracção do betão.

Após um período mínimo de 28 dias, os cilindros foram individualmente levados a uma prensa com capacidade de 5000 kN, para posterior aplicação da carga axial de compressão e para realização do ensaio. Nesta altura, o extensómetro previamente instalado foi desligado do armazenador de dados, estando a variação de extensão até este instante registada, enquanto que dois extensómetros de resistência eléctrica com 10 mm de comprimento foram posicionados no betão em duas geratrizes do cilindro, paralelas e opostas.

A força de compressão foi aplicada em cada provete com um macaco hidráulico de dimensões apropriadas, sendo o mesmo ligado a uma bomba automática que mantinha a carga constante durante o ensaio.

A compressão axial foi garantida com o auxílio de uma pequena rótula colocada na extremidade superior do cilindro, e uma outra, com maiores dimensões, instalada na extremidade inferior, junto ao macaco. Para melhor distribuição da força aplicada, foi

introduzida nas extremidades superior e inferior do cilindro, entre os mesmos e as rótulas, uma chapa de aglomerado de madeira com 1 cm de espessura e secção transversal quadrada.

Antes da aplicação da carga axial de compressão, o extensómetro previamente colado ao varão de aço, bem como os dois outros colados exteriormente ao betão, foram ligados à ponte extensiométrica (ligação de tipo quarto de ponte).

Aplicou-se então ao cilindro uma carga axial de compressão de 150 kN. Se para este carregamento, as extensões registadas nos três extensómetros não apresentassem valores aproximadamente iguais, alterava-se levemente a posição da rótula superior até que tal ocorresse. A determinação gráfica das extensões foi feita através do registador x-t, utilizando-se uma escala apropriada, previamente aferida.

O módulo de elasticidade do betão foi avaliado experimentalmente através da seguinte equação:

$$E_c = \frac{150 - 210 \times 10^6 \times 4,52 \times 10^{-4} \times \epsilon}{0,017 \times \epsilon} \quad (3)$$

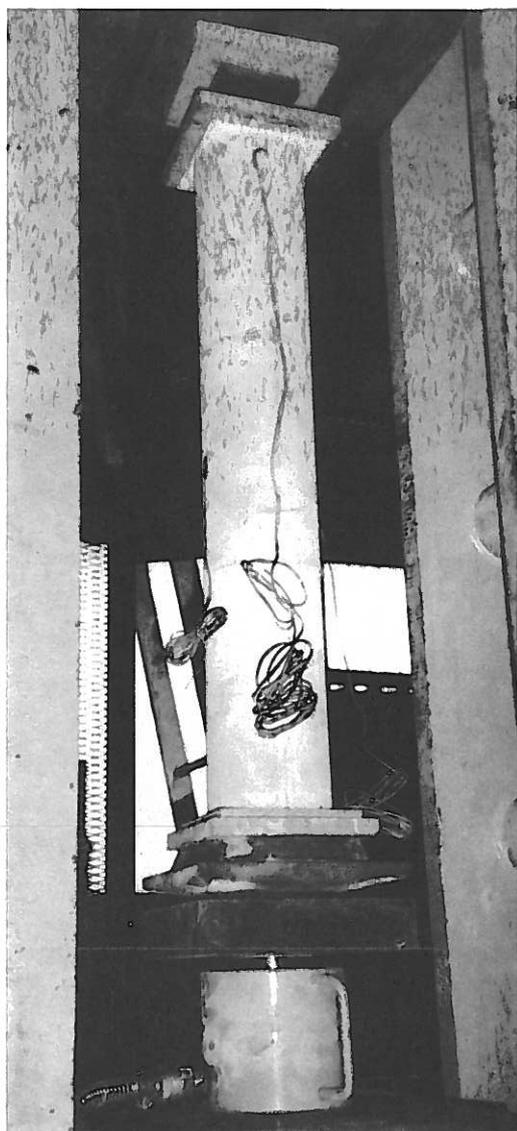


Fig.2 - Perfil do cilindro instalado na prensa, pronto para receber o carregamento.

onde ε é o valor médio das extensões registadas logo após a aplicação da carga de 150 kN pelos extensómetros instalados no betão e no varão de aço e E_c é obtido em kN / m^2 .

A Fig.2 apresenta um perfil do cilindro, já posicionado para receber a força axial de compressão, notando-se os extensómetros colados ao betão, as duas rótulas instaladas nas extremidades do mesmo, bem como a região do varão previamente instrumentado.

Com o provete carregado, iniciou-se então a operação de abertura do roço na região do varão previamente instrumentado tomando-se os seguintes cuidados:

- garantir que o roço intersecta a zona com

o extensómetro inicialmente colado ao varão (a posição do extensómetro em termos de altura foi anotada antes da betonagem), a fim de permitir que o mesmo registre a variação de extensão no varão devida à abertura do roço;

- escarificar o roço de modo a não perder, durante a operação, o sinal do extensómetro;
- obter um roço com espessura mínima em torno do varão, mas suficiente para tornar o mesmo livre de betão ao seu redor;
- garantir ao roço uma altura mínima em torno do varão, mas suficiente para posterior colagem de um outro extensómetro e corte do varão numa secção distante de aproximadamente 7 cm da posição do extensómetro.

As Fig.3, 4, 5 apresentam a evolução da abertura do roço, observando-se nas mesmas o pequeno martelo eléctrico utilizado. Na Fig.5, observa-se que o extensómetro previamente colado ao varão está posicionado na extremidade superior do roço, ou seja que o roço foi aberto aproximadamente para baixo da zona do extensómetro, facilitando assim a operação de abertura de modo a não perder o sinal do extensómetro.

Após o fim da abertura do roço, foi colado um outro extensómetro ao varão para posterior registo da variação de extensão decorrente da libertação das tensões no mesmo, estando tal realçado na Fig.6. Para libertação das tensões no varão, utilizou-se um disco de corte apropriado, tomando-se o devido cuidado para que o varão fosse transversalmente cortado por inteiro (Fig.7).

A secção de corte do varão localizou-se a uma distância de aproximadamente 7 cm do eixo do extensómetro colado posteriormente. A determinação gráfica da variação de extensão no varão, decorrente do corte, foi feita utilizando-se o registador x-t, numa velocidade de registo apropriada à velocidade do corte e numa escala conveniente, previamente aferida.

Nos ensaios de laboratório realizados, a deformação no varão instrumentado



Fig.3 - Início da abertura do roço.

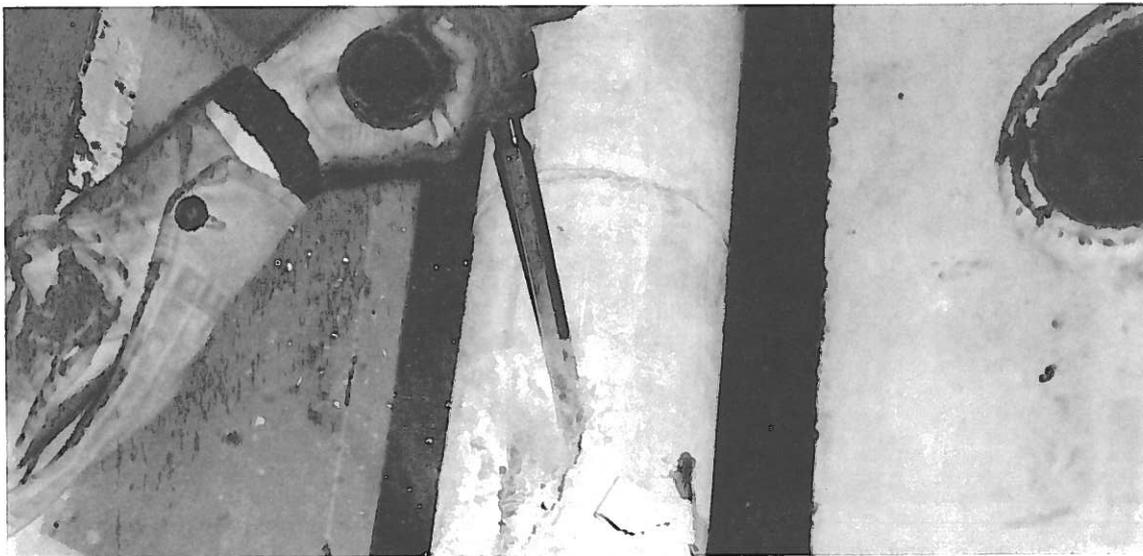


Fig.4 - Desenvolvimento do roço em altura.



Fig.5 - Aspecto final do roço, notando-se superiormente o extensómetro previamente colado ao varão.

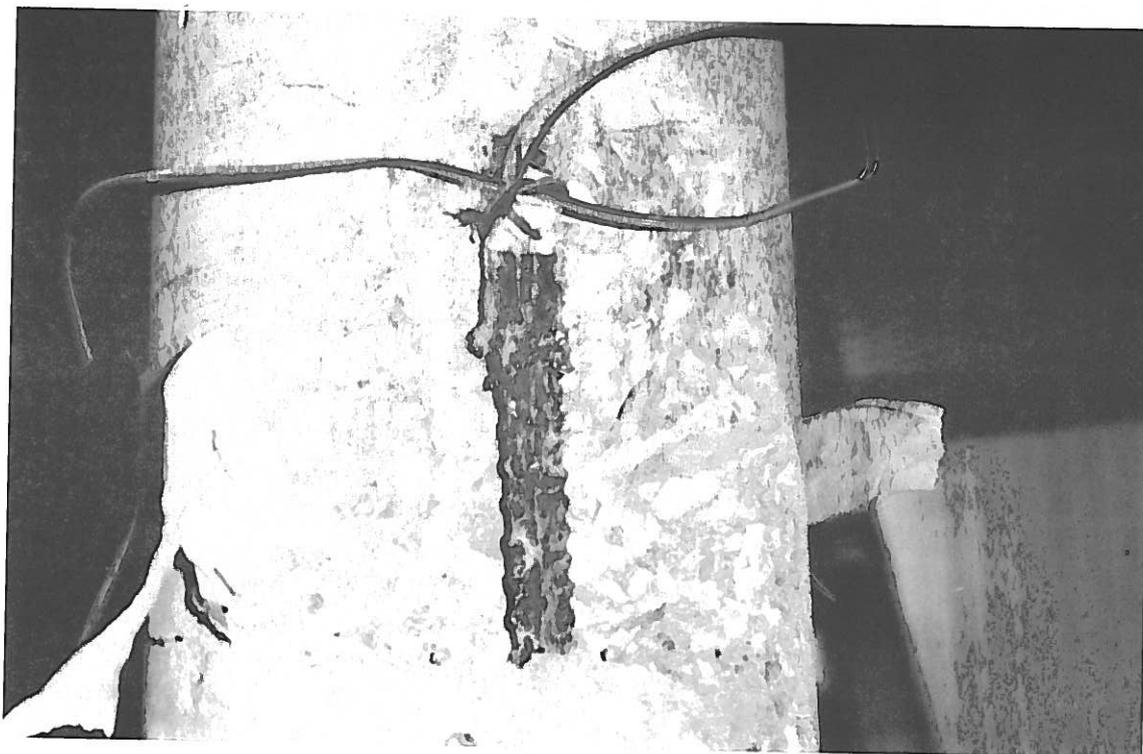


Fig.6 - Pormenor do roço com o varão instrumentado pronto para o corte com disco.

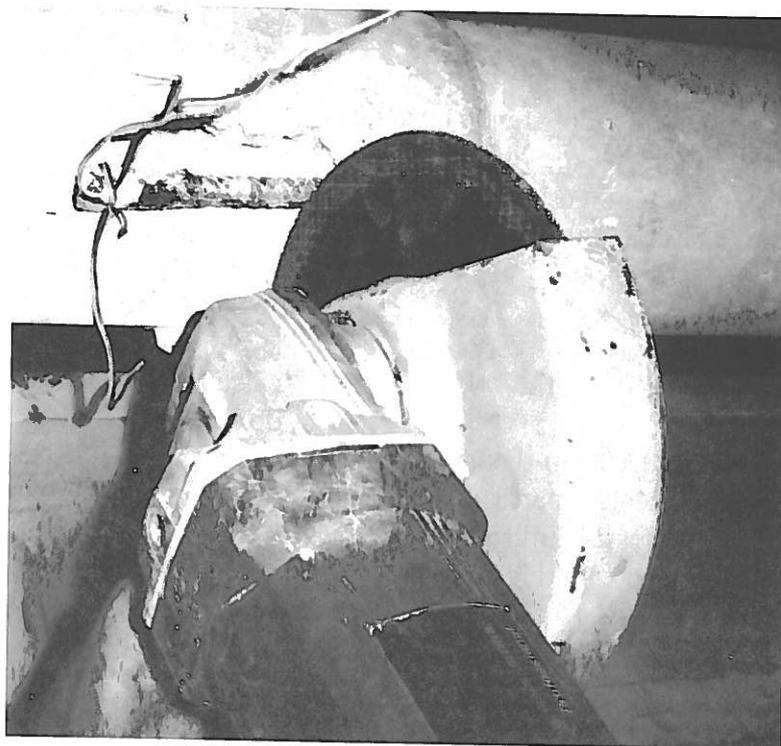


Fig.7 - Serra eléctrica com disco apropriado posicionada na secção de corte.

devida à fluência do betão foi desprezada em virtude do corte do varão ter-se realizado no máximo duas horas após a aplicação da carga.

Tendo em conta as características da secção transversal dos provetes (constantes) e tomando-se para E_s o valor de 210 GPa, pode-se escrever a equação (2) da

forma:

$$N_{exp} = 0,017E_c(\epsilon_{st} - \epsilon_{sr} - \epsilon_{srt}) + 94920(\epsilon_{st} - \epsilon_{sr} - \epsilon_{srt}) \quad (4)$$

onde N_{exp} [kN] é o esforço normal aplicado (avaliado experimentalmente e desprezando o peso próprio do cilindro).

Utilizou-se a equação (4), entrando-se na mesma com um valor de E_c calculado pela expressão (3), para a avaliação experimental do esforço normal aplicado, através do método de corte de armaduras, em todos os provetes ensaiados.

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1 Resultados dos Ensaios

A utilização do método de corte de armaduras obriga ao conhecimento, além do valor da libertação de tensão que ocorre no varão cortado, do módulo de elasticidade do betão (E_c) e da variação das tensões no varão devida à abertura do roço e aos efeitos da retracção e fluência do betão.

Estes efeitos serão analisados tendo como referência os resultados experimentais de um dos provetes ensaiados, designado por provete 1, os quais estão apresentados na Tab. 1.

4.2 Módulo de Elasticidade do Betão

O módulo de elasticidade do betão pode ser avaliado analiticamente a partir da resistência do betão à compressão, utilizando-se a seguinte expressão contida no artigo 17º do REBAP:

$$E_{c,j} = 9,5 \sqrt[3]{f_{cm,j}} \quad (5)$$

onde $E_{c,j}$ - valor médio do módulo de elasticidade do betão aos j dias de idade expresso em GPa;

$f_{cm,j}$ - valor médio da tensão de rotura à compressão do betão, à mesma idade, expresso em MPa e referente a

provetes cilíndricos.

No caso do provete 1, o valor obtido para $E_{c,j}$, a partir de f_{cm} dado pelo ensaio à compressão de 3 cubos moldados durante a betonagem dos provetes, foi de 31,3 MPa.

4.3 Efeito do Comportamento Diferido do Betão

A medição dos efeitos da retracção na variação de tensão do varão instrumentado, no provete 1, foi realizada experimentalmente através do extensómetro colado ao varão antes da betonagem. A título de exemplo, apresenta-se na Fig.8, para o provete 1, a variação com o tempo da extensão no varão de aço devida à retracção, a partir da descofragem do cilindro e até a data do ensaio.

A extensão no varão de aço devida à retracção pode ser determinada analiticamente através da seguinte expressão, válida para peças com distribuição simétrica de armaduras na secção:

$$\epsilon_{srt,an} = \frac{\epsilon_{cs}}{1 + \frac{E_s A_s}{E_c A_c}} \quad (6)$$

onde $\epsilon_{srt,an}$ - extensão no varão de aço devida à retracção avaliada analiticamente;

ϵ_{cs} - extensão devida à retracção, calculada de acordo com o anexo I do REBAP.

Simplificadamente, considerou-se uma condição de humidade relativa do ambiente média (70%) e uma temperatura ambiente de 20°C, no cálculo de $\epsilon_{srt,an}$ para o provete 1. O valor alcançado foi de $92,8 \times 10^{-6}$.

Num pilar de betão armado, a extensão no varão de aço devida à fluência do betão (ϵ_{sfl}) deve também ser considerada, estimando-se o seu efeito analiticamente a partir da formulação do anexo I do REBAP.

Tab.1 - Resultados obtidos experimentalmente no provete 1.

Provete	ϵ ($\times 10^{-6}$)	E_c (GPa)	ϵ_{srt} ($\times 10^{-6}$)	ϵ_{sr} ($\times 10^{-6}$)	ϵ_{st} ($\times 10^{-6}$)	N_{exp} (kN)	$N_{exp} / 150$
1	273,2	26,7	95	252,9	671,1	177,4	1,18

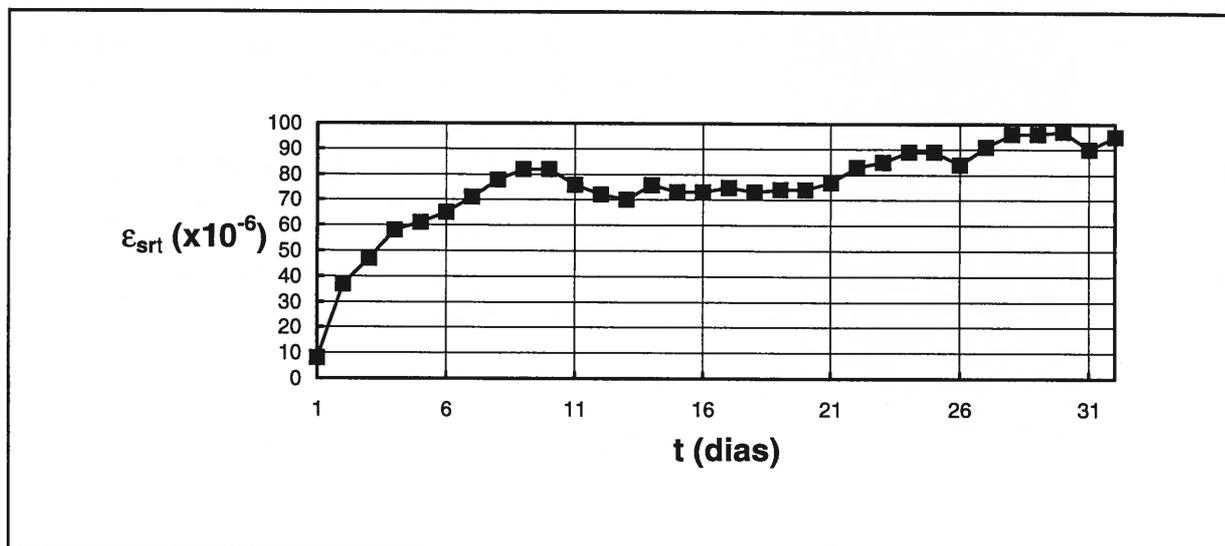


Fig. 8 - Variação com o tempo da extensão no varão de aço devida à retracção (provete 1).

4.4 Efeito do Roço

Foi construído um modelo de elementos finitos para o provete 1, recorrendo-se ao programa de cálculo automático “SAP 90”, a fim de proporcionar uma verificação independente do resultado obtido experimentalmente para a variação de extensão no varão devida à abertura do roço.

O betão foi simulado no modelo com elementos finitos tridimensionais de 8 nós, enquanto que os varões de aço foram discretizados em elementos de barra (“frame”). O vazio na zona do roço foi também devidamente simulado no modelo. A Fig.9 representa a malha de elementos finitos, estando os nós referentes aos elementos de barra em destaque. A Fig.10, apresenta em alçado um pormenor da metade do cilindro modelada.

A variação da extensão no varão de aço devida à abertura do roço foi determinada analiticamente, submetendo-se o modelo numérico a uma tensão correspondente a uma força de 150 kN (igual à aplicada nos ensaios de laboratório), através da seguinte expressão:

$$\epsilon_{sr,an} = \frac{\Delta N_{an}}{A_{s1} E_s} \quad (7)$$

onde $\epsilon_{sr,an}$ - variação de extensão no varão de aço devida à abertura do roço calculada analiticamente;

ΔN_{an} - variação de esforço normal no varão de aço calculada analiticamente por intermédio do programa de cálculo automático “SAP 90”;

A_{s1} - área da secção transversal do varão de aço localizado na região do roço.

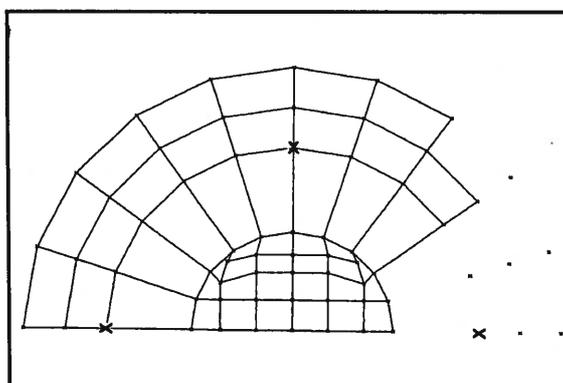


Fig.9 - Malha de elementos finitos utilizada no modelo numérico.

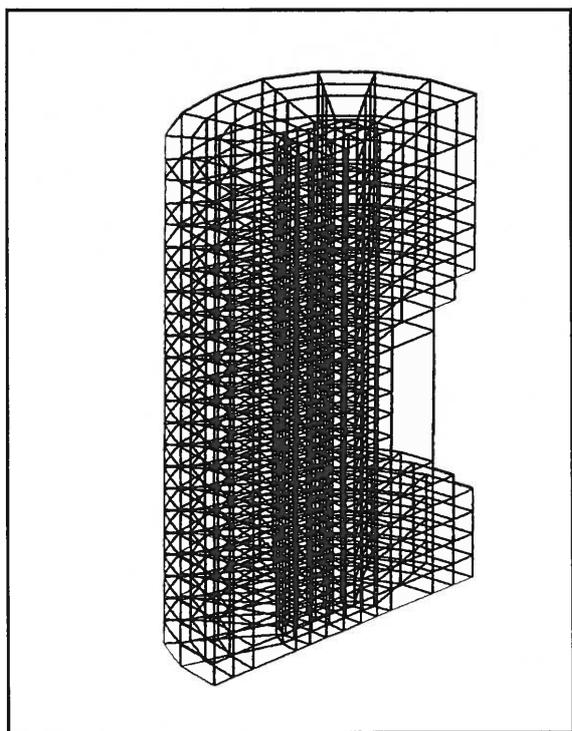


Fig.10 - Alçado com o elemento de barra e os elementos finitos tridimensionais na região do roço

O termo ΔN_{an} , utilizado na equação (7), é determinado subtraindo-se o esforço normal, para o modelo com o roço discretizado, numa secção qualquer do varão localizada na região do roço, do esforço normal, para o modelo sem o roço discretizado, na secção acima descrita.

Com base no modelo numérico pode concluir-se que, para uma mesma geometria do roço, a variação do esforço normal no varão (ΔN_{an}) diminui com o aumento do módulo de elasticidade do betão (E_c). Por outro lado, um aumento da área da secção transversal do roço (A_r), aumenta também a variação de esforço normal.

Desenvolveu-se então uma análise paramétrica, tendo em vista a obtenção de uma formulação que permita a avaliação de ΔN_{an} em função de A_r / A_c e de E_c , o que facilita a aplicação da técnica na prática. A Fig.11 apresenta um diagrama variação de esforço normal no varão (ΔN_{an}) X A_r / A_c , no qual os pontos foram determinados fazendo variar, para quatro valores do módulo de elasticidade do betão, a área da secção transversal do roço, obtendo-se, através do modelo numérico de elementos finitos, valores correspondentes de ΔN_{an} .

As curvas representadas na Fig.11 são polinómios do 2º grau que interpolam os pontos obtidos através da análise numérica. No diagrama da Fig.11 observa-se que os valores de ΔN_{an} para E_c entre 25 e 40 GPa são aproximadamente iguais num intervalo de A_r / A_c entre 0 e 0,12. A aplicação da técnica na prática dificilmente permitirá a obtenção de uma relação A_r / A_c fora do intervalo entre 0 e 0,12, mesmo no caso de um pilar de edifício com dimensões mínimas.

Tomou-se para exprimir a lei de variação de ΔN_{an} com A_r / A_c a seguinte equação:

$$\Delta N_{an} = 28,926 \left(\frac{A_r}{A_c} \right)^2 + 15,329 \frac{A_r}{A_c} - 0,1536 \quad (8)$$

Substituindo-se (8) em (7):

$$\varepsilon_{sr,an} = \frac{28,926 \left(\frac{A_r}{A_c} \right)^2 + 15,329 \frac{A_r}{A_c}}{A_{s1} E_s} - \frac{0,1536}{A_{s1} E_s} \quad (9)$$

Na expressão (4) substituindo-se ε_{sr} por $\varepsilon_{sr,an}$ e entrando com (9) obtém-se para o esforço normal aplicado $N_{apl,an}$:

$$N_{apl,an} = (E_c A_c + E_s A_s) (\varepsilon_{st} - \varepsilon_{srt} - \varepsilon_{sfl}) - \left(\frac{E_c A_c}{E_s A_{s1}} + \frac{A_s}{A_{s1}} \right) x \left[28,926 \left(\frac{A_r}{A_c} \right)^2 + 15,329 \frac{A_r}{A_c} - 0,1536 \right] \quad (10)$$

A equação (10) é a indicada na prática para avaliar o esforço normal aplicado num pilar de betão armado utilizando-se a técnica proposta.

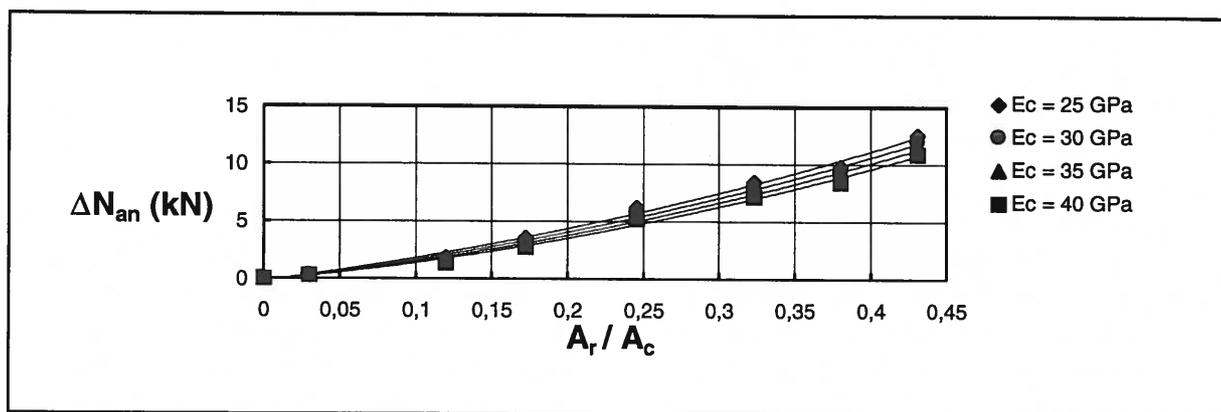


Fig.11 - Diagrama ΔN_{an} X A_r / A_c ($E_c = 25, 30, 35$ e 40 GPa).

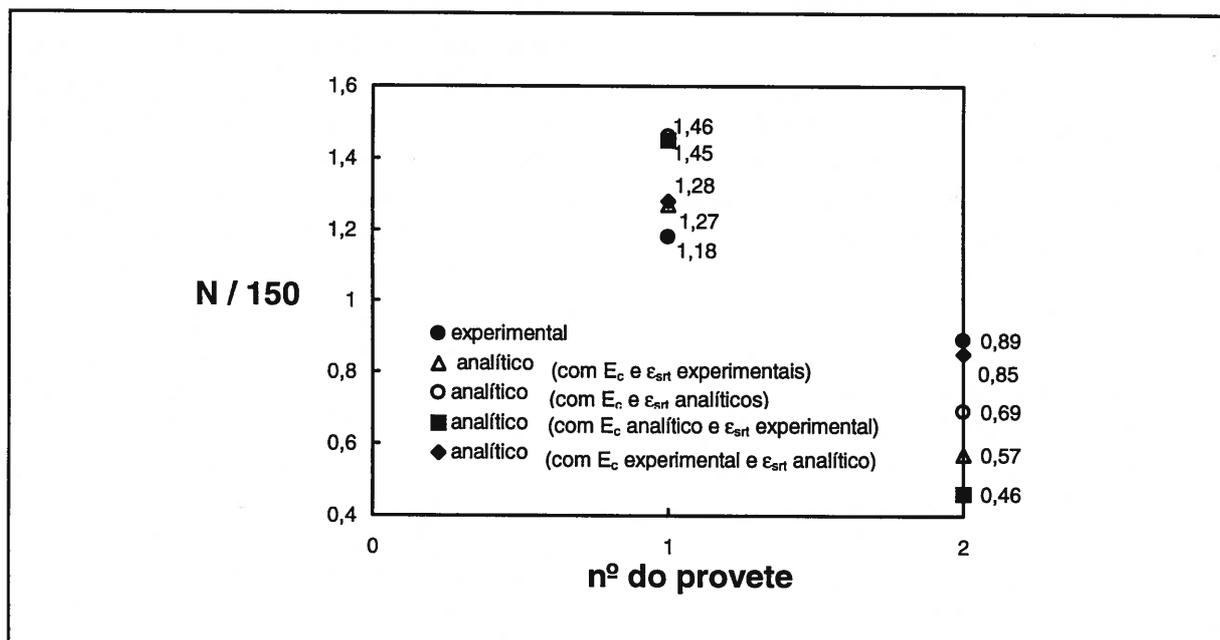


Fig.12 - Diagrama $N / 150$ X n° do provete.

Tab. 12 - Esforço normal avaliado no provete 3 com a introdução na equação (10) de um valor de E_c avaliado *in situ* ou por via da expressão (5).

Provete 3 (com E_c determinado <i>in situ</i>)							
E_c (kN/m ²)	ϵ_{srt} (x10 ⁻⁶)	ϵ_{st} (x10 ⁻⁶)	A_s (m ²)	A_{s1} (m ²)	A_r (m ²)	$N_{apl,an}$ (kN)	$N_{apl,an}/150$
25,5x10 ⁶	107,4	661,4	4,52x10 ⁻⁴	1,13x10 ⁻⁴	36,25x10 ⁻⁴	194	1,29
Provete 3 (com E_c avaliado em função da resistência do betão à compressão)							
E_c (kN/m ²)	ϵ_{srt} (x10 ⁻⁶)	ϵ_{st} (x10 ⁻⁶)	A_s (m ²)	A_{s1} (m ²)	A_r (m ²)	$N_{apl,an}$ (kN)	$N_{apl,an}/150$
32,8x10 ⁶	107,4	661,4	4,52x10 ⁻⁴	1,13x10 ⁻⁴	36,25x10 ⁻⁴	239,5	1,6

4.5 Comparação de Resultados

Com os resultados obtidos na avaliação analítica do módulo de elasticidade do betão (por via de sua resistência à compre-

ssão) e da extensão no varão de aço devida à retracção, variou-se o valor de entrada de E_c e ϵ_{srt} (experimental ou analítico) na equação (10).

A Fig.12 apresenta um diagrama

$N / 150 X n^\circ$ do provete, no qual surgem pontos a partir de valores de N obtidos experimentalmente através dos ensaios (N_{exp}) e analiticamente através da equação (10).

A análise dos resultados apresentados na Fig.12 permite concluir que o erro ao se empregar a técnica diminui introduzindo-se na equação (10) um valor para o módulo de elasticidade do betão (E_c) obtido directamente in situ.

5. EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Para a aplicação da técnica utilizando-se a equação (10), foi moldado um provete de betão armado idêntico em termos de dimensões, geometria e secção transversal, àqueles construídos durante a calibração da técnica no laboratório. O provete foi submetido a uma carga axial de 150 kN, da mesma forma utilizada nos ensaios de calibração do método. A extensão no varão de aço devida à retracção foi determinada através do REBAP, enquanto que o módulo de elasticidade do betão foi avaliado in situ, seguindo a forma utilizada durante o trabalho experimental, e indirectamente através da equação (5).

Para a determinação da extensão no varão de aço devida à retracção, por intermédio do REBAP, foi feito um acompanhamento desde a descofragem do provete, até o momento da colocação do mesmo na prensa (28 dias), da humidade relativa e da temperatura ambiente.

O valor médio da tensão de rotura à compressão ($f_{cm,j}$) foi avaliado através do ensaio à compressão de nove cubos moldados durante a betonagem do provete.

A Tab. 2 apresenta os resultados alcançados, concluindo-se da mesma que a diferença entre o esforço normal avaliado in situ (por intermédio da equação (10)) e a força axial aplicada de 150 kN não ultrapassou 30% para um valor de E_c introduzido na expressão (10) avaliado in situ, e que a mesma diferença aumentou para 60% com o emprego na mesma equação de um valor de E_c obtido por

intermédio da equação (5).

6. CONCLUSÕES

No presente trabalho, apresenta-se uma técnica desenvolvida no IST para a avaliação in situ do estado de tensão em pilares de betão armado, baseada na libertação das tensões num dos varões de aço, designado Método de Corte de Armaduras. Apresentam-se todo o trabalho experimental executado, os resultados obtidos experimentalmente, as principais grandezas intervenientes na técnica e uma comparação dos resultados experimentais com os obtidos por intermédio de uma relação empírica proposta.

Em relação ao Método de Corte de Armaduras, as principais conclusões são:

- 1) O valor da tensão total libertada no varão é sempre um majorante do valor da tensão devida as cargas aplicadas.
- 2) O erro ao se aplicar a técnica diminui na medida que se empregue na formulação proposta um valor para E_c obtido directamente in situ.
- 3) A variação de tensão no varão devida à abertura do roço diminui, para uma mesma geometria do roço, com o aumento do módulo de elasticidade do betão. No entanto para valores usuais do módulo de elasticidade do betão (entre 25 e 40 GPa) e para uma relação A_r / A_c entre 0 e 0,12, a variação de tensão no varão devida a abertura do roço é pouco influenciada pelo valor de E_c .
- 4) A grande vantagem desta técnica é a simplicidade em termos tecnológicos sem perda de eficiência.

As principais recomendações para a realização do ensaio in situ são as seguintes:

- 1) as dimensões do roço devem ser as mais reduzidas possível;
- 2) o roço deve ter uma secção transversal aproximadamente rectangular, com uma espessura mínima mas suficiente para deixar o varão, a ser instrumentado, livre de betão em seu redor;
- 3) a largura do roço deve ser em função do

- espaçamento da armadura longitudinal do pilar, não devendo ultrapassar 8 cm;
- 4) o roço não deve ser aberto na região de um varão localizado no canto do pilar para reduzir possíveis efeitos de flexão desviada;
 - 5) o roço deve ter uma altura de aproximadamente 12 cm, para permitir que o corte do varão de aço se faça numa secção distante aproximadamente 7 cm do eixo do extensómetro.

Sugere-se, para que o erro cometido na avaliação da tensão devida às cargas aplicadas seja menor, que o módulo de elasticidade do betão seja avaliado através de ensaios à compressão de carotes extraídas in situ.

Em relação à quantificação do esforço axial a partir dos resultados do ensaio sugere-se que a extensão no varão de aço devida à retracção e à fluência sejam avaliadas por intermédio do REBAP.

7. REFERÊNCIAS

- [1] Abdul-Rahman, A.; Ryall, M. J. - "Assessment of in situ stresses in prestressed concrete bridges" - 2nd Int. Conference on Bridge Management, University of Surrey, Guilford, 1993.
- [2] Abdunur, C. - "Direct access to stresses in concrete and masonry bridges" - 2nd Int. Conference on Bridge Management, University of Surrey, Guilford, 1993.
- [3] Brookes, C. L.; Buchner, S. H.; Mehrkar-Asl, S. - "Assessment of stresses in post-tensioned concrete bridges" - 1st Int. Conference on Bridge Management, University of Surrey, Guilford, 1990.
- [4] Coutinho, A. - "Theory of an experimental method of determining stress not requiring an accurate knowledge of the elastic modulus" - Int. Association of Bridge and Structural Engineers Congress, Paris, Vol. 9, 1949.
- [5] Coutinho, A. S.; Gonçalves, A. - "Fabrico e propriedades do betão, Vol. III" - LNEC, 2^a edição, 1994.
- [6] Neville, A. M. - "Propriedades do Concreto" - Ed. PINI, 1982.
- [7] Padilha, M. A. C. - "Medição de tensões residuais pelo método do furo" - Curso de especialização em engenharia da soldadura, ISQ, 1993.
- [8] Rocha, M.; Silvério, A. - "A new method for the complete determination of the state of stress in rock masses" - Memória 329, LNEC, 1969.
- [9] REBAP - "Regulamento de estruturas de betão armado e pré-esforçado" - Decreto-Lei n° 349-C/83
- [10] Ryall, M. J. - "A stressmeter for assessing the in situ stresses in concrete bridge structures" - 3rd Int. Conference on Bridge Management, University of Surrey, Guilford, 1996.
- [11] Santos, J. R. L. - "Avaliação in situ do estado de tensão em pilares de betão armado" - Dissertação de mestrado, IST/UTL, 1997.

