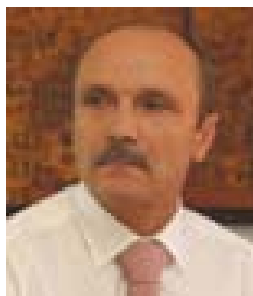


## **Avaliação da resistência à compressão do betão nas estruturas com base em ensaios esclerométricos (Nova normalização EN 13791:2007)**



**André  
Monteiro<sup>1</sup>**



**Arlindo  
Gonçalves<sup>2</sup>**

### **RESUMO**

O comité técnico do CEN, TC104 – *Concrete and related products*, tem vindo a desenvolver a Norma Europeia EN 13791 [1], aprovada recentemente e já publicada como Norma Portuguesa, que permite avaliar a resistência à compressão característica do betão nas estruturas com base em ensaios *in situ*, nomeadamente, o ensaio de compressão de carotes e a sua combinação com métodos indirectos como o ensaio esclerométrico, de ultra-sons e *pull-out*.

Estes ensaios indirectos têm a vantagem face ao ensaio de compressão de carotes de serem não destrutivos (à excepção do ensaio *pull-out*) e de rápida execução, tendo, contudo, o inconveniente da pouca precisão normalmente obtida nos resultados.

Na presente comunicação é apresentado um estudo realizado num edifício onde foi aplicada a abordagem prevista na EN 13791 [1] na avaliação da resistência característica *in situ* do betão, com base num conjunto alargado de pares de resultados de ensaios esclerométricos e de compressão de carotes.

São exemplificadas as duas formas de tratar e analisar os resultados segundo a EN 13791, uma através da calibração numa curva básica e outra através da análise de regressão, apresentando-se para esta última expressões que podem ser utilizadas na sua aplicação. São também discutidos alguns aspectos relevantes, não mencionados na EN 13791, relativos ao estabelecimento da relação entre o índice esclerométrico e a resistência à compressão de carotes.

### **PALAVRAS CHAVE**

Esclerómetro, resistência *in situ*, EN 13791, ensaios não destrutivos, análise de regressão

<sup>1</sup> Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa, Portugal. [avmonteiro@lnec.pt](mailto:avmonteiro@lnec.pt)

<sup>2</sup> Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa, Portugal. [arlindo@lnec.pt](mailto:arlindo@lnec.pt)

## **1. INTRODUÇÃO**

O ensaio de compressão de carotes é actualmente o ensaio mais preciso para avaliar a resistência à compressão do betão nas estruturas. Contudo, a opção exclusiva por este ensaio em obras onde se pretenda avaliar um elevado volume de betão, pode implicar elevados custos e tempos de execução, para além de criar danos na estrutura (tanto mais importantes quanto maiores forem as tensões instaladas e a esbelteza dos elementos estruturais a avaliar).

O ensaio esclerométrico é um instrumento bastante prático que permite avaliar a uniformidade da qualidade do betão superficial nas estruturas. A sua utilização não oferece grandes dificuldades e permite um levantamento exaustivo da qualidade do betão num curto espaço de tempo. Porém, a sua utilização para estimar a resistência à compressão do betão apresenta normalmente pouca precisão. Isto deve-se a inúmeros factores entre os quais se salienta o facto do ensaio esclerométrico medir uma propriedade indirecta e superficial do betão (dureza superficial), envolvendo apenas o betão até cerca de 30 mm de profundidade [2], não estando, portanto, directamente relacionado com a resistência à compressão do betão (do interior) da estrutura.

Segundo Bungey [2], são vários os factores que influenciam o índice esclerométrico, sendo o tipo de agregado e a humidade do betão os de maior relevância. Assim, para cada betão, esclerómetro e condição de cura, sempre que se pretenda avaliar a resistência à compressão *in situ* com base em resultados de ensaios esclerométricos, é fundamental estabelecer uma curva que relacione a resistência à compressão do betão com o índice esclerométrico, podendo ser obtida através de ensaios sobre carotes ou provetes moldados.

A nova norma europeia EN 13791 [1] permite avaliar a resistência à compressão do betão *in situ* com base em resultados de ensaios esclerométricos e de compressão de carotes extraídas da estrutura. Para tal, estabelece duas metodologias para a determinação da relação entre a resistência do betão e o índice esclerométrico (curva de relação): uma baseada numa análise de regressão, exigindo que sejam extraídas carotes em pelo menos 18 áreas de ensaio (alternativa 1); e a outra baseada numa curva básica que posteriormente é ajustada em função da média das diferenças entre os resultados individuais e esta curva, exigindo um número mínimo de apenas 9 de áreas de ensaio onde devem ser extraídas carotes (alternativa 2). As áreas de ensaio utilizadas para estabelecer a relação devem ser escolhidas de forma a obter resistências igualmente espaçadas dentro da gama prevista para a obra.

Contudo, ao contrário da norma americana ACI 228.1R [3], para o estabelecimento da curva de relação esta norma é omissa no que diz respeito à análise das incertezas do ensaio indirecto (repetibilidade) e da variabilidade dos resultados obtidos (normalmente diferente da do ensaio de compressão), assim como à validação dos pressupostos assumidos na análise de regressão usada na alternativa 1, entre outros aspectos. É também pouco esclarecedora no que diz respeito à curva a utilizar para a relação segundo a alternativa 1 (limite do intervalo de confiança, de predição ou de tolerância, e se o intervalo é simultâneo ou não simultâneo), não indicando ainda qual o nível de confiança a adoptar.

Neste artigo é efectuada uma análise exaustiva dos resultados obtidos em ensaios esclerométricos e de compressão realizados sobre o betão dum edifício, contemplando-se todos os aspectos mencionados no último parágrafo. São também comparados os resultados obtidos através das duas metodologias para o estabelecimento da curva que relaciona os resultados dos dois ensaios (curva de relação), prescritas na norma europeia [1].

## **2. TRABALHO EXPERIMENTAL E RESULTADOS**

Foi solicitada a contribuição do LNEC para avaliar a resistência à compressão do betão aplicado num edifício cuja segurança foi posta em causa devido a suspeitas na qualidade do betão. Tendo em conta a elevada variabilidade dos resultados obtidos nos primeiros ensaios de compressão de carotes extraídas da estrutura e o volume de betão a avaliar, foi decidido recorrer ao esclerómetro para inspeccionar toda a estrutura, efectuando-se um levantamento exaustivo do índice esclerométrico dos pilares.

De modo a estabelecer uma relação adequada entre os resultados do ensaio esclerométrico e a resistência à compressão do betão (curva de relação), assim como avaliar com maior precisão a resistência do betão nas zonas que apresentaram valores baixos para o índice esclerométrico, foram extraídas cerca de 90 carotes da estrutura, com diâmetros compreendidos entre 93 e 104 mm, contemplando um total de 44 pilares (amostras). Contudo, apenas se seleccionaram 23 amostras para estabelecer a curva de relação, uma vez que, em alguns pilares caroteados não foram realizados ensaios esclerométricos, e parte das carotes apresentavam varões ou não foram ensaiadas em condições saturadas.

Os ensaios esclerométricos e de compressão foram efectuados sobre betão com idades compreendidas entre os 110 e 250 dias. Uma vez que, ao contrário dos ensaios de compressão das carotes, os ensaios esclerométricos foram todos realizados num dia (durante o início dos ensaios de compressão), para o betão dum mesmo pilar obtiveram-se diferenças máximas de 54 dias entre a realização dos dois ensaios.

Segundo informação do cliente, foi utilizado um esclerómetro do tipo ND (Digi-Schmidt 2000 ND Proceq), tendo sido efectuadas 10 leituras (réplicas) em cada pilar. No fabrico do betão usou-se cimento do tipo I ( $335 \text{ kg/m}^3$ ), uma razão A/C de 0,59 e agregados siliciosos.

## **3. TRATAMENTO DOS RESULTADOS**

Para se poder interpretar os resultados do ensaio de compressão das carotes é necessário que estas sejam ensaiadas em condições semelhantes, ou seja, com a mesma razão altura/diâmetro (h/d), sem varões embebidos, e com o mesmo teor de humidade. Esta última é mais facilmente garantida se as carotes forem ensaiadas saturadas. Contudo, quando não se pretende caracterizar o betão fornecido, é mais adequado ensaiar as carotes em condições semelhantes às da estrutura para avaliar a resistência *in situ* do betão.

No presente estudo não foram necessárias quaisquer correcções, atendendo a que todas as carotes foram ensaiadas saturadas, sem varões, e com altura igual ao diâmetro.

Relativamente às diferenças na maturidade do betão entre os momentos do ensaio esclerométrico e do ensaio de compressão, não se efectuaram quaisquer correcções, uma vez que, para as idades consideradas, estas diferenças não influenciam significativamente a resistência, correndo-se o risco de aumentar as incertezas ao introduzirem-se factores correctivos.

Na Tabela 1 apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios de compressão das carotes, já corrigidos, e os resultados do ensaio esclerométrico. Considera-se que cada pilar representa uma amostra. O índice esclerométrico foi calculado através da mediana das 10 leituras efectuadas em cada pilar.

Apresentam-se nas secções seguintes os procedimentos utilizados no estabelecimento da relação entre o índice esclerométrico e a resistência à compressão das carotes através das duas metodologias prescritas na EN 13791.

Quadro 1. Resultados dos ensaios.

<i>Amostra (piso/pilar)</i>	<i>N<sup>a</sup> de carotes ensaiadas</i>	<i>Valor médio da resistência das carotes, <math>f_{is}</math> (MPa)</i>	<i>Índice esclerométrico, <math>N</math></i>
P-2/D1*	1	17,1	38,5
P-2/D3	2	24,9	41,0
P-1/B5	3	19,3	37,0
P-1/C5	3	23,9	38,0
P-1/D2	3	20,2	37,0
P0/A3	3	22,5	39,0
P0/A6	1	22,6	37,5
P0/B1	2	12,3	32,0
P0/B2	4	23,6	37,0
P0/B6	1	13,2	30,5
P0/C6	1	15,3	31,0
P0/D1	1	16,6	35,0
PI/A2	3	22,2	35,5
PI/A4	3	17,7	34,0
PI/A6	1	15,5	35,5
PI/B1	1	23,7	37,5
PI/B2	3	18,4	37,5
PI/B5	3	16,3	35,0
PI/C1	1	20,9	36,0
PI/C2**	4	24,3	36,0
PI/D1	1	23,5	38,5
PI/D2	3	22,3	39,5
PI/D6	1	19,7	39,0
Média***	2	19,7	36,3
Desvio padrão***	-	3,75	2,74
COV***	-	19,0	7,6

\* Parede

\*\* 3 das leituras do índice esclerométrico superaram em mais de 6 unidades o valor da mediana

\*\*\* No seu cálculo desprezaram-se os resultados das amostras P-2/D1 e PI/C2

### 3.1 Análise de regressão (secção 8.2 da EN 13791 - Alternativa 1)

Para estabelecer a relação entre o índice esclerométrico (variável independente),  $N$ , e a resistência à compressão do betão das carotes (variável dependente),  $f_{is}$ , foi escolhida a análise de regressão de potência (Eq.2), utilizando-se o método dos mínimos quadrados ordinário, o que é equivalente a efectuar uma análise de regressão linear simples sobre os logaritmos naturais das duas variáveis:

$$\ln(f_{is}) = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 \cdot \ln(N) \quad (2)$$

sendo  $\hat{\beta}_0$  e  $\hat{\beta}_1$  a ordenada de origem e o declive estimados para a regressão, respectivamente. Esta escolha deveu-se ao facto de se ter obtido uma ligeira melhoria na correlação entre as duas variáveis em comparação com a regressão linear simples.

O uso dos valores transformados (logaritmos) implica que a resistência do betão tenha uma distribuição lognormal em vez de normal, pelo que, para a variabilidade da resistência usualmente exibida pelos betões, os possíveis erros obtidos por considerar este pressuposto não são significantes [3].

Para que o modelo de regressão escolhido seja adequado, é necessário que sejam válidos os pressupostos assumidos na análise de regressão. Estes pressupostos dizem respeito aos resíduos da regressão e consistem em admitir que estes:

- apresentam média zero (garantido pelo método dos mínimos quadrados);
- variância constante (homocedasticidade);
- são independentes entre si;
- seguem uma distribuição normal.

Os pressupostos das alíneas a), b) e c) podem ser avaliados através dum gráfico residual (Fig.1a) que exprime os resíduos em função dos valores estimados para variável dependente (no presente caso, o logaritmo natural da resistência do betão das carotes), podendo também ser construído em função dos valores da variável independente (no presente caso,  $\ln(N)$ ). Para validar os pressupostos, os resíduos devem distribuir-se aleatoriamente (independência) e de forma simétrica em torno da recta de resíduo nulo (média nula), formando uma mancha de largura uniforme (homocedasticidade).

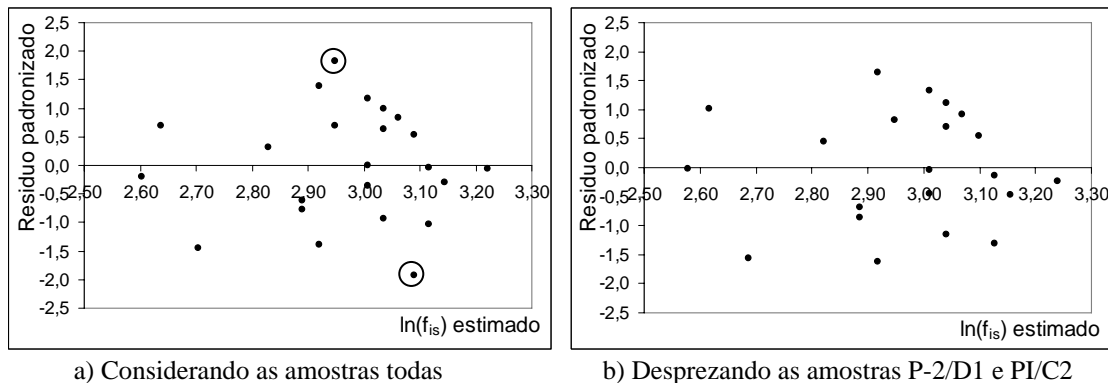


Figura 1. Gráfico residual.

O pressuposto da alínea a) é automaticamente garantido pelo método dos mínimos quadrados utilizado na análise de regressão.

Relativamente à homocedasticidade (alínea b)), é possível detectar através da análise da Fig.1a) uma ligeira tendência para o aumento da variância com a resistência. Tal se deve provavelmente ao facto de existirem poucos resultados na zona de menores resistências, tornando a análise pouco esclarecedora, e à existência de dois resíduos com valores absolutos elevados (marcados no gráfico da Fig.1a), relativos às amostras P-2/D1 e PI/C2. Curiosamente, verificou-se que para o caso da amostra P-2/D1, esta não era referente a um pilar mas sim a uma parede, admitindo-se que tal dispersão resulte dum eventual afastamento entre a zona onde foi realizado o ensaio esclerométrico e a zona onde foi extraída a carote. Relativamente à amostra PI/C2 verificou-se que existiam 3 leituras do ensaio esclerométrico superiores à mediana em mais de 6 unidades, pelo que, segundo a NP EN12504-2, este resultado não deve ser considerado. Construindo um novo gráfico residual sem estas duas amostras (Fig.1b), verifica-se uma maior uniformidade da mancha formada pelos resíduos, pelo que, estas duas amostras deixarão de ser consideradas.

Verificou-se que para a regressão linear simples (utilizando os valores não transformados originais das variáveis), o aumento da variância dos resíduos com a resistência estimada é mais claro. Tal resultado é espectável visto que a resistência à compressão do betão apresenta normalmente um coeficiente de variação constante para esta gama de resistências, o que implica que a variância aumente com a resistência. Ao fazer-se a transformação logarítmica dos resultados da resistência, passa a existir uma maior uniformidade da variância, motivo também pelo qual se usou a regressão de potência.

Quanto à independência dos resíduos sucessivos, principalmente quando se usam poucas amostras como é o presente caso, nem sempre é fácil avaliar a independência dos resíduos, pelo que muitas vezes se recorre ao teste de Durbin-Watson. No presente artigo não será explicado este teste, indicando-se apenas que se obteve o valor de 2,511 para a estatística do teste, encontrando-se dentro do intervalo ( $d_U$  (1,232),  $4-d_U$  (2,768)), obtido através da tabela de valores críticos da estatística de Durbin-Watson para um nível de significância de 5 %, validando-se desta forma o pressuposto da independência, ou seja, à ausência de correlação entre resíduos sucessivos.

Para verificar o pressuposto da normalidade dos resíduos (alínea c)) construiu-se um gráfico de probabilidade normal (Fig.2) que consiste em colocar nas abcissas os resíduos padronizados por ordem crescente (divisão do resíduo de cada amostra,  $d_i$ , pelo desvio padrão da estimativa,  $\hat{\sigma}$ ) e nas ordenadas o quantil que seria esperado se a distribuição fosse normal (para cada amostra  $i$  determinar

$z_i$  tal que  $P(Z \leq z_i) = (i - 0,375)/(n - 0,25)$ , sendo  $n$  o número total de amostras). Este procedimento é semelhante a traçar a recta de Henry. Para que se possa considerar a distribuição dos resíduos normal, é necessário que os pontos do gráfico da Fig.2 se situem aproximadamente sobre a recta de declive 1 e que cerca de 95% dos resíduos esteja contido no intervalo  $(-2, +2)$  [5], como é o presente caso. À semelhança do gráfico residual, este gráfico também permite detectar a existência de amostras anormais em relação às restantes, *outliers*, que podem influenciar significativamente a regressão. Segundo [5], resíduos padronizados que se afastem bastante do intervalo  $(-2, +2)$  podem indicar a presença de *outliers*, tendo já sido propostas várias regras para poder desprezar as amostras respectivas. Contudo, devem-se sempre investigar as razões para o seu aparecimento.

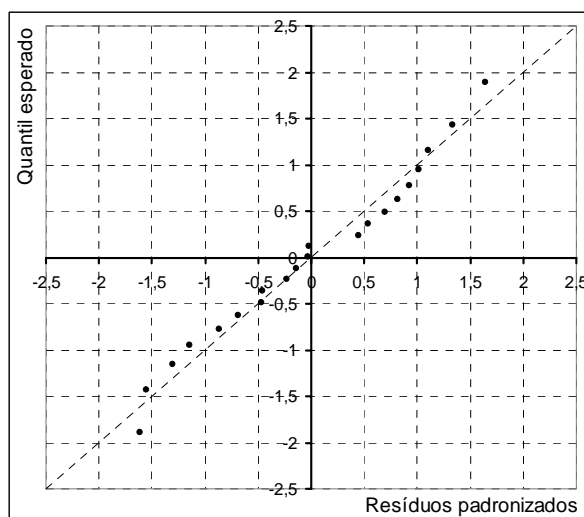


Figura 2. Gráfico de probabilidade normal dos resíduos.

É de referir que nem sempre é clara a verificação da normalidade dos resíduos através de gráficos residuais como o da Fig.2, principalmente quando se têm poucas amostras. Existem, contudo, técnicas que permitem avaliar a normalidade dos resíduos quantitativamente para um determinado nível de confiança. Porém, para o presente artigo, não se considera relevante a apresentação dessas técnicas.

Admitindo-se desta forma que os pressupostos anteriores são válidos, estamos em condições para proceder à análise de regressão. Para estabelecer a curva de relação não é suficiente determinar a curva de regressão, é também necessário ter em conta as incertezas inerentes à regressão. A norma EN13791 [1] não é clara em relação ao limite de que intervalo que deve ser utilizado de forma a ter em conta as incertezas da regressão nos valores estimados da resistência (intervalo de confiança, predição ou de tolerância, e se são simultâneos ou não simultâneos). A mesma norma também não indica qual o nível de confiança que deve ser adoptado. No entanto, uma vez que esta dá indicação sobre o percentil de resistência a ser considerado (90%) e menciona que se devem calcular os limites de tolerância para observações individuais, deduz-se que o limite a considerar seja o limite inferior do intervalo de tolerância (semi-infinito), ou seja, o limite acima do qual podemos garantir, com um certo nível de confiança, que se irão encontrar 90 % dos resultados [6]. Caso se pretendesse determinar o limite acima do qual do qual o próximo valor da resistência se iria encontrar, com um dado nível de confiança, este limite seria o de predição.

Apesar da teoria relativa aos intervalos de tolerância associados à regressão linear se encontrar há muito documentada, é difícil encontrar procedimentos fáceis de aplicar para a sua determinação, utilizando-se muitas vezes, incorrectamente, os intervalos de predição (intervalos dentro dos quais podemos garantir, com um certo nível de confiança, que a próxima leitura irá estar contida), o que pode subestimar demasiado a incerteza da estimativa. Em [6] pode-se encontrar uma explicação sobre a interpretação e utilização destes intervalos, fazendo-se a distinção entre os intervalos de predição e de tolerância, simultâneos e não simultâneos.

Convém reflectir um pouco sobre o significado dos intervalos de tolerância. Suponha-se que se obtém um conjunto de pares de resultados duma estrutura. Se for determinado o intervalo de tolerância não simultâneo para uma percentagem de 90 % e um nível de confiança de 95 %, quer dizer que em 95 % das próximas vezes que se repita a experiência, ou seja, obter em cada repetição um novo conjunto de pares de resultados (índice esclerométrico/resistência de carotes), se verifica que, para um determinado valor de X (variável independente), 90 % dos valores de Y (variável dependente) se situam dentro do intervalo de tolerância calculado. Tal não significa que, para todos os valores de X, se obtenha simultaneamente, em 95 % das vezes, 90 % dos resultados de Y dentro do intervalo de tolerância, pois as verificações para cada X podem ocorrer desfasadas no tempo. Para tal, seria necessário calcular um intervalo mais amplo, designado como intervalo de tolerância simultâneo.

Tendo em conta que a norma europeia não refere qual dos intervalos deve ser utilizado (simultâneos ou não simultâneos), e dada à dificuldade em encontrar expressões suficientemente validadas que permitam determinar os intervalos de tolerância simultâneos, na presente secção considera-se como curva de relação o limite inferior do intervalo de tolerância não simultâneo (semi-infinito).

Apresentam-se a seguir expressões que permitem determinar os limites dos diferentes intervalos (confiança, predição e tolerância). Considera-se para todos apenas o limite inferior de intervalos semi-infinitos não simultâneos.

Limite do intervalo de confiança [5]:

$$Y_{\text{lim IC}}(X) = \hat{Y}(X) - t_{\alpha, n-2} \cdot \hat{\sigma} \cdot A \quad (3)$$

Limite do intervalo de predição [5]:

$$Y_{\text{lim IP}}(X) = \hat{Y}(X) - t_{\alpha, n-2} \cdot \hat{\sigma} \cdot \sqrt{1 + A^2} \quad (4)$$

Limite do intervalo de tolerância [6]:

$$Y_{\text{lim IT}}(X) = \hat{Y}(X) - t'_{\alpha, n-2, \delta} \cdot \hat{\sigma} \cdot A \quad (5)$$

ou, de forma aproximada (pode ser mais fácil de aplicar em cálculo automático) [7]:

$$Y_{\text{lim IT}}(X) = \hat{Y}(X) - \hat{\sigma} \cdot \frac{\Phi^{-1}(p) + A \cdot \Phi^{-1}(1 - \alpha) \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{n-2} \cdot \left( \frac{(\Phi^{-1}(p))^2}{A^2} - (\Phi^{-1}(1 - \alpha))^2 \right)}}{1 - \frac{(\Phi^{-1}(1 - \alpha))^2}{2 \cdot (n-2)}} \quad (6)$$

sendo:

$Y = \ln(f_{is})$ ;  $X = \ln(N)$ ;  $\bar{X}$  o valor médio dos logaritmos naturais dos índices esclerométricos das amostras;  $\hat{Y}(N) = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 \cdot \ln(N)$  o valor estimado para o logaritmo natural da resistência das carotes;

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n-2} \text{ a variância da estimativa; } S_{xx} = \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2; A = \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(X_i - \bar{X})^2}{S_{xx}}}; n \text{ o}$$

número de amostras utilizadas na regressão;  $(1-\alpha)$  o nível de confiança;  $p$  o percentil de resistência a considerar;  $\Phi^{-1}$  a inversa da função de distribuição normal;  $t$  a inversa da função de distribuição *t-student*;  $t'$  a inversa da função da distribuição *t-student* não centrada; e  $\delta = \frac{-\Phi^{-1}(p)}{A}$  o parâmetro de não centralidade de  $t'$ . Para se obterem os valores estimados da resistência do betão basta calcular  $e^Y$ .

Na Figura 3 representam-se os limites estimados (A1P) e no Quadro 2 apresentam-se os valores calculados para os parâmetros anteriores, tendo-se considerado um nível de confiança de  $1 - \alpha = 95\%$ , o percentil  $p = 90\%$  (indicado na norma), e a Eq. 6 para estimar o limite de tolerância. São também apresentados os resultados da regressão linear (A1L). Segundo a EN 13791, o domínio de aplicação da relação obtida é restrito à gama de valores de  $N$  utilizados na regressão, não sendo portanto permitidas extrapolações.

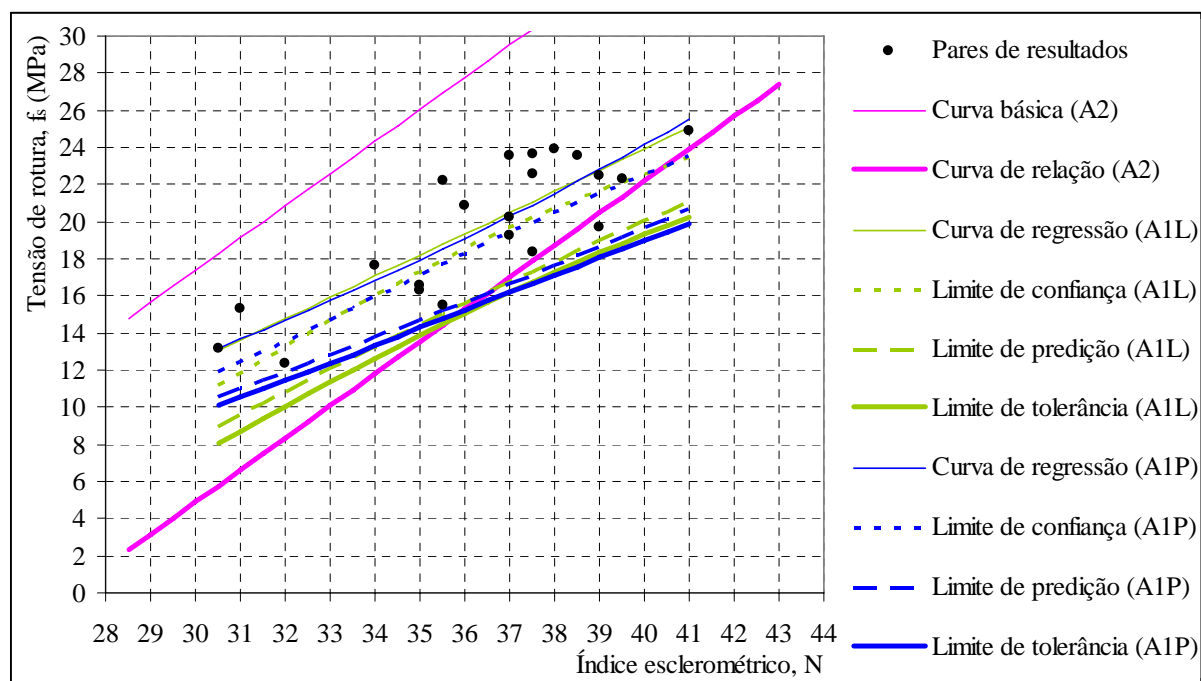


Figura 3. Representação das curvas de relação obtidas pelos diferentes métodos.

Quadro 2. Resultados da análise de regressão de potência.

Regressão	$n$	$\beta_0$	$\beta_1$	$\hat{\sigma}^2$	$S_{xx}$	$t_{\alpha, n-2}$	$\Phi^{-1}(p)$	$\Phi^{-1}(1-\alpha)$	Coefficiente de determinação, $R^2$	P-value
potência	21	-5,043	2,230	0,012	0,121	1,729	1,282	1,645	0,718	$1,25 \times 10^{-6}$
linear	21	-21,757	1,142	4,490	150,667	1,729	1,282	1,645	0,697	$2,49 \times 10^{-6}$

### 3.2 Curva básica (secção 8.3 da EN 13791 - Alternativa 2)

Aplicando o método da curva básica e considerando novamente que cada pilar representa uma área de ensaio (amostra), obtém-se a seguinte expressão para a curva de relação:

$$f_{is} = 1,73 \cdot N - 34,5 + \Delta f = 1,73 \cdot N - 47,0 \quad (7)$$

sendo  $\Delta f = \delta f_{m(n)} - k_1 \cdot s = -12,5$  MPa o desvio vertical a somar à curva básica para obter a curva de relação ( $\delta f_{m(n)} = -8,62$  MPa e  $s = 2,62$  MPa são respectivamente a média e o desvio padrão das diferenças entre a resistência das carotes e a curva básica dada por  $f_{is} = 1,73 \cdot N - 34,5$ , e  $k_1 = 1,48$  é um coeficiente que tem em conta o número de pares de resultados utilizados na calibração).

De modo a que os resultados obtidos por esta alternativa sejam comparáveis com os da alternativa 1, para a determinação da Eq. 7 foram igualmente desprezadas as amostras P-2/D1 e PI/C2. A curva obtida (A2) encontra-se representada na Fig. 3, tendo-se considerado o domínio de  $N$  permitido na norma (2 unidades para além dos valores extremos de  $N$ ).



É de referir que esta metodologia é semelhante a uma análise de regressão a uma variável (menos uma que a regressão linear ou de potência), correspondendo esta à ordenada de origem da curva básica onde o declive é fixado pela norma, resultando numa metodologia mais “rígida” que a da alternativa 1.

#### **4. ANÁLISE DOS RESULTADOS**

Analisando o gráfico da Fig. 3 verificam-se diferenças significativas nas curvas de relação obtidas pelos diferentes métodos: regressão de potência (A1P), linear (A1L) e curva básica (A2). Apesar do nível de confiança adoptado nas análises de regressão ser elevado (95 %), a curva de relação obtida da calibração da curva básica revela-se bastante mais conservadora para valores baixos da resistência, verificando-se o contrário para valores elevados.

Comparando as duas curvas de relação obtidas através dos limites de tolerância, constata-se que, para valores baixos da resistência, o limite de tolerância obtido da regressão de potência é menos conservador (apesar das duas curvas de regressão serem semelhantes). Tal se deve ao facto da regressão de potência admitir um coeficiente de variação constante para os resíduos da resistência (e naturalmente da resistência) ao contrário da linear que admite um desvio padrão constante (homocedasticidade), pelo que, para valores baixos da resistência, a primeira não se afasta tanto da curva de regressão.

Outro aspecto importante é a diferença entre a inclinação das três curvas de relação obtidas. A inclinação da curva é importante para o cálculo do desvio padrão dos resultados estimados para a resistência e, naturalmente, para o cálculo da resistência característica (quanto maior for a inclinação maior o desvio padrão). Neste aspecto a curva de relação da alternativa 2 revela-se mais conservadora visto ter a maior inclinação de todas (obtiveram-se os valores de 3,25 MPa, 2,58 MPa e 4,75 MPa para o desvio padrão dos valores estimados através do limite de tolerância da regressão linear, de potência, e da curva básica calibrada, respectivamente).

Embora nos métodos anteriores se tenha contabilizado o erro da relação, admitiu-se que não existia incerteza nos resultados obtidos para a variável independente ( $\ln(N)$ ), ou seja, que os resultados obtidos em cada amostra são 100% precisos. O aumento do número de leituras em cada área de ensaio (réplicas) diminui o erro associado à repetibilidade, esbatendo a influência desta incerteza nos valores estimados da resistência, caso seja contabilizada na análise de regressão. Acrescenta-se que esta influência será tanto menor quanto maior for a precisão do ensaio indirecto em relação à do ensaio de compressão das carotes. No que diz respeito à precisão dos resultados obtidos nos ensaios, é de referir que a norma europeia [1] também não dá qualquer indicação sobre o número mínimo de carotes que devem ser extraídas em cada área de ensaio (não esquecer também que a resistência das carotes costuma apresentar coeficientes de variação superiores aos verificados em provetes moldados).

Um procedimento estatístico para ter em conta estas incertezas na curva de regressão foi desenvolvido por Mandel (1984) e encontra-se descrito na norma americana [3] que vem sendo citada.

Outro aspecto não mencionado na EN 13791 é a diferença entre os desvios padrão obtidos nos resultados do ensaio de compressão e dos ensaios indirectos. No presente caso de estudo, assim como em outros estudos efectuados no LNEC, os resultados do ensaio esclerométrico (com 9 ou 10 réplicas) apresentam um coeficiente de variação menor que o obtido no ensaio de compressão de carotes (1 ou 2 carotes em cada área de ensaio). Bungey [2] também evidencia esta tendência para o caso em que se considerem 12 réplicas para o ensaio esclerométrico e 3 réplicas para o ensaio de compressão de carotes. A norma americana [3] apresenta um método para corrigir o desvio padrão dos resultados estimados da resistência, admitindo que o quociente entre os desvios padrão dos resultados do ensaio de compressão de carotes e do ensaio esclerométrico é constante.

Relativamente ao nível de confiança a adoptar para o intervalo de confiança (não indicado na EN 13791), na norma americana [3] é referido o valor de 75 % para estruturas ordinárias, 90 % para edifícios de grande importância, e 95 % para zonas cruciais de centrais nucleares.

## **CONCLUSÕES**

No presente artigo foram aplicadas as metodologias prescritas na norma europeia EN 13791 para estabelecer a relação entre a resistência à compressão do betão de carotes e o índice esclerométrico – análise de regressão (de potência e linear) e curva básica, utilizando os resultados de ensaios realizados sobre o betão dos pilares dum edifício onde se pretendia avaliar a resistência *in situ* do betão.

A análise dos resultados revelou diferenças significativas nas curvas obtidas pelas diferentes metodologias, constatando-se que a curva obtida através da análise de regressão de potência foi a mais adequada, uma vez que permitiu obter uma melhor correlação entre as duas variáveis, bem como resultados menos conservadores (para um mesmo nível de confiança de 95 %) para valores baixos da resistência. Esta última constatação deve-se ao facto da análise de regressão de potência, ao contrário da linear, considerar que a resistência do betão tem um coeficiente de variação constante, o que normalmente se verifica nos resultados dos ensaios de compressão para esta gama de resistências.

Foram analisados aspectos não mencionados na EN 13791 (também aplicáveis a outros ensaios indirectos) que são relevantes para o estabelecimento da relação entre o índice esclerométrico e a resistência à compressão das carotes através da análise de regressão. Entre eles salienta-se a escolha do limite de tolerância (simultâneo ou não simultâneo) e do nível de confiança a adoptar para a curva de relação, bem como a diferença na precisão dos resultados dos diferentes ensaios e dos respectivos desvios padrão.

O ensaio esclerométrico pode ser bastante útil em estruturas onde se pretende avaliar um volume elevado de betão, correndo-se no entanto o risco de se obterem valores estimados da resistência inferiores aos obtidos através de ensaios de carotes.

## **REFERÊNCIAS**

- [1] EN 13791. 2007, Assessment of in-situ compressive strength in structures and precast concrete components. Brussels: CEN. 28 p.
- [2] BUNGEY, J. H. – Testing of concrete structures. 2nd Edition. London: Chapman & [3] ACI Committee 228. 2003, In-place methods to estimate concrete strength (ACI 228.1R-03). American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich. 44 p.
- [4] BS 1881: Part 120. 1983, Testing Concrete. Method for determination of the compressive strength of concrete cores. British Standard Institution, London.
- [5] MONTGOMERY, Douglas C.; RUNGER, George C. 2003, Applied statistics and probability for engineers. 3rd Edition. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- [6] Gryze, S.; Langhans, I.; Vandebroek, M. 2007: Using the correct intervals for prediction: A tutorial on tolerance intervals for ordinary least-squares regression. Elsevier.
- [7] Vardeman, S.: 1994, Statistics for engineering problem solving. PWS Publishing Company. Boston, Massachusetts.