

ESTIMATIVA DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CONCRETO DE ESTACAS HÉLICE CONTÍNUA

Estimate of Elastic Modulus of Continuous Flight Auger Concrete

Paulo César de Almeida Maia^a, Lucas Venancio Waked^a, Marta Fleichman Prellwitz^a

^a Laboratório de Engenharia Civil, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Brasil

RESUMO – Em projetos de fundação modernos, a estimativa dos recalques da fundação é de fundamental importância para a determinação dos valores característicos dos esforços. No caso de obras sobre estacas hélices contínuas, a deformação elástica do elemento estrutura ganha importância especial, devido ao processo executivo e características do concreto normalmente empregado, podendo gerar materiais com elevada deformabilidade. O presente trabalho discute a estimativa do módulo de elasticidade do concreto desse tipo de fundação, baseado em ensaios em corpos de prova extraídos da fundação e no controle tecnológico do concreto. Faz-se comparação da aplicação desses procedimentos para o concreto da superestrutura. Os resultados indicam que as metodologias prescritas por normas técnicas superestimam em 60% o valor do módulo de elasticidade, no caso estudado. No entanto, estimativas do módulo de elasticidade para baixos níveis de tensão de trabalho, podem estar mais próximas da condição de campo, mas ainda gerando subestimativa dos recalques do elemento estrutural.

SYNOPSIS – In modern foundation design projects, the estimation of the foundation settlement has fundamental importance in determining the characteristic stresses. Specifically, in case of continuous flight auger (CFA) piles, the elastic deformation of the structural element has special importance, since the execution process of the piling and the properties of the concrete used can generate materials with high deformability. This study discusses the estimation of the concrete's elastic modulus in this type of foundation based on experiments on samples extracted from the foundation piles and concrete quality control testing results. The application of these procedures is compared to the concrete of the superstructure. The results indicate that the methodologies prescribed by technical standards overestimate by 60% the elastic modulus value in this case studied. However, estimates of the elastic modulus of concrete subjected to low stresses may be closer to field conditions, but still underestimating the settlement of the structural element.

Palavras Chave – Estaca hélice contínua, Módulo de Elasticidade, Estimativa.

Keywords – Continuous flight auger, Young's module, Forecast.

1 – INTRODUÇÃO

A concepção mais moderna para a elaboração de projetos de fundações exige que a estimativa das cargas características considere os recalques nas fundações. Fundamentalmente, faz-se uma estimativa inicial das cargas de fundação admitindo que não existem recalques ou atribuindo um mesmo valor de constante elástica para os pontos de apoio. Definidas as fundações para tais cargas, faz-se a estimativa dos recalques que a fundação sofrerá. Os recalques estimados são induzidos no modelo estrutural, gerando novos carregamentos característicos nas fundações. Esse processo é repetido até à convergência dos recalques estimados e, nesse momento, obtém-se as cargas

E-mails: maia@uenf.br (P. Maia), lucaswaked@gmail.com (L. Waked), mfprellwitz@gmail.com (M. Prellwitz)

características de projeto. Nas fundações profundas, particularmente, parte dos recalques estimados ocorre devido as deformações do terreno de fundação e parte ocorre pela deformação do próprio elemento estrutural, sendo que, no caso de estacas tipo hélice contínua, essa última parcela pode ser expressiva. Deste modo, a estimativa dos recalques vai exigir o conhecimento das propriedades dos materiais que compõem o terreno e os elementos estruturais, para a idealização correta dos mecanismos de transferência de carga entre a fundação e o terreno e, conseqüentemente, a boa estimativa dos recalques das fundações.

Especialmente para a estimativa dos recalques gerados pelas deformações dos elementos estruturais de uma fundação do tipo estaca de concreto moldadas *in loco* é necessária atenção na estimativa dos parâmetros dos materiais constituintes. Isso se justifica pelo procedimento de concretagem normalmente utilizado nesse tipo de fundação que, não raramente, pode gerar concretos de baixa resistência, elevada porosidade e heterogêneos.

Nesse tipo de fundação, para que o modelo estrutural seja representativo, particular atenção deve ser dada na determinação dos parâmetros que definem o comportamento tensão vs. deformação do concreto que represente de forma mais fiel a condição de campo. Nesse contexto, a bibliografia técnica destaca que a deformabilidade do concreto é afetada por diversos fatores (Mehta e Monteiro, 2014; Nunes, 2005; Montija, 2007), que podem ser visualizados no Quadro 1.

Quadro 1 – Fatores que podem afetar os parâmetros característicos do concreto.

Intrínsecos ao material	Traço	<i>Relação água-cimento</i>
		<i>Consumo de cimento</i>
		<i>Aditivos químicos</i>
	Agregados	<i>Aditivos minerais</i>
		<i>Natureza do agregado</i>
		<i>Dimensão dos agregados</i>
		<i>Fração volumétrica dos agregados</i>
		<i>Porosidade e módulo de elasticidade dos agregados</i>
	Matriz cimentícia	<i>Porosidade da matriz cimentícia</i>
<i>Características e composição da interface da zona de transição</i>		
Extrínsecos ao material	<i>Condições de cura</i>	
	<i>Umidade ou grau de saturação do concreto</i>	
Determinação dos parâmetros	<i>Método de ensaio ou de estimativa</i>	
	<i>Velocidade do carregamento</i>	
	<i>Tensões limites de elasticidade</i>	
	<i>Geometria dos corpos de prova</i>	

Com relação às estruturas de fundação, pode-se dizer, adicionalmente, que os fatores intrínsecos são controlados pelo processo de constituição do material e, a combinação deles, afeta os parâmetros do concreto lançado na obra. Por outro lado, os fatores extrínsecos estão associados sobretudo ao processo de cura e manuseio do concreto, que podem não ser bem controlados na obra, resultando concretos de baixa qualidade. Nesse caso, os fatores extrínsecos geram mudanças nos parâmetros do concreto após o lançamento na obra, o que não é detectado pelos procedimentos de controle tecnológico usualmente utilizados. Já os fatores inerentes aos procedimentos de determinação dos parâmetros, que são regidos fundamentalmente pelas exigências de obra, experiência do calculista e erros experimentais, definem quão acurada será a previsão do comportamento.

O concreto é um material que apresenta comportamento não linear quando submetido a tensões de compressão ou de tração. Segundo Melo Neto e Helene (2002), este comportamento acontece um pouco antes de 50% da carga última e isso pode ser explicado a partir de vários estudos sobre o processo de micro-fissuração progressiva do concreto sob determinado carregamento. Apesar disso, a engenharia de fundações faz frequentemente a utilização de parâmetros elásticos, especialmente o módulo de elasticidade, para estimativa de recalques dos elementos estruturais de fundações

profundas (Poulos e Davis, 1968; Vésic, 1969; Randolph e Wroth, 1978; Aoki, 1984; Bowles, 1996). Isso se justifica pelos baixos níveis de tensões de trabalho que são adotadas em projetos de fundação profundas. No entanto, pouco se discute sobre os efeitos dos fatores listados no Quadro 1 na estimativa dos recalques, seja na fase de projeto ou através de interpretação de provas de carga, desse tipo de fundação.

Por razões de simplicidade de cálculo, definem-se em geral apenas dois módulos de elasticidade para o concreto: o módulo estático de elasticidade tangente inicial da curva tensão-deformação, E_{ci} , e o módulo estático de elasticidade secante entre dois pontos da curva, E_{cs} . A definição de qual módulo será utilizado depende de critérios relativos a níveis de tensão, níveis de deformação e tempo de cura do material, e cada norma trata o assunto de forma distinta.

Para a determinação experimental do módulo de elasticidade existem, basicamente, dois métodos de ensaios: o estático e o dinâmico. No método estático o módulo é determinado por ensaio de compressão uniaxial para certa velocidade de carregamento previamente estabelecida. Com este método é possível obter o módulo tangente na origem, o módulo secante entre dois pontos da curva e o módulo tangente em um ponto especificado. No método dinâmico, o módulo é determinado por ultrassom e equivale aproximadamente ao módulo tangente na origem. Em fundações profundas, o módulo de elasticidade do concreto pode ainda ser estimado através de prova de carga estática instrumentadas em profundidade, desde que existam medidores de deslocamento e de deformação em diferentes pontos ao longo do fuste. Tanto os ensaios de laboratório quanto a prova de carga exigem instrumentação e equipamentos especiais, o que dificulta o uso corrente de tais procedimentos.

Nesse sentido, é uma prática da engenharia utilizar formulações empíricas para estimativa do módulo de elasticidade do concreto. Para tanto, utiliza-se normalmente a resistência característica à compressão do concreto, f_{ck} , como parâmetro de correlação, sendo que, a prática corrente, faz o uso do f_{ck} especificado em projeto, para as estimativas iniciais, e a resistência média f_{cm} obtida através de controles tecnológico durante a execução da obra, para verificação da condição de campo.

No Quadro 2 são apresentadas as relações mais comuns constantes nas normas e recomendações técnicas. As formulações apresentadas pelas normas estimam a rigidez do concreto admitindo comportamento elástico e resistência limitada pelo f_{ck} . Nesse caso, o módulo E estimado por relações empíricas não é definido para níveis específicos de deformação. Nota-se que além do f_{ck} , a mineralogia do agregado também é usada na estimativa da rigidez do concreto, sendo isso exposto de forma explícita em algumas formulações empíricas (Quadros 2 e 3). Devido à natureza empírica empregada na construção de tais correlações, as características dos agregados não são consideradas normalmente na estimativa do módulo de elasticidade ou resistência à compressão do concreto (Silva, 1997; Santos, *et al.* 2006; Montija, 2007)

Para casos de estruturas de fundação, a literatura técnica geotécnica brasileira recomenda ainda o uso de valores constantes do módulo de elasticidade do concreto. Velloso e Lopes (2010), por exemplo, sugerem valores típicos de módulo de elasticidade segundo o tipo de estaca (Quadro 4). Hachich *et al.* (1998) consideram apenas dois valores de módulos de elasticidade para estacas de concreto armado, igual a 25 GPa, nos casos mais gerais de tipos de estacas, e, particularmente em estacas pré-moldadas de concreto armado ou protendido, adota-se um valor igual a 30 GPa. Hachich *et al.* (1998) sugere ainda que o valor do módulo de elasticidade do concreto pode ser definido, alternativamente, através do módulo secante, estimado em função do f_{ck} de acordo com a norma NBR6118:2014 (ABNT, 2014).

Quadro 2 – Relações das Normas e recomendações técnicas internacionais para determinação do módulo de elasticidade do concreto.

Norma	Equação	Parâmetros
NBR 6118:2014 (ABNT, 2014)	$E_{cs} = \alpha_i E_{ci}$, onde $E_{ci} = \alpha_e 5,6 f_{ck}^{1/2}$ $\alpha_e = 1,2$ para basalto e diabásio $\alpha_e = 1,0$ para granito e gnaíse $\alpha_e = 0,9$ para calcário $\alpha_e = 0,7$ para arenito	E_{cs} é o módulo de elasticidade secante E_{ci} é o módulo de elasticidade inicial α_e parâmetro em função da natureza do agregado
Eurocode 2 (EN 1992-1-1, 2004)	$E_{cm} = 22 (f_{cm}/10)^{0,3}$ $f_{cm} = f_{ck} + 8$	E_{cm} é o módulo de elasticidade f_{ck} é a resistência característica à compressão do concreto f_{cm} é a resistência média à compressão do concreto
ACI 318-14 (ACI, 2014)	$E_c = w_c^{1,5} 42,74 \times 10^{-4} f'_c^{1/2}$ para w_c entre 1400 e 2500 kg/m ³	E_c é o módulo de elasticidade estático secante a 0,45 de f_{ck} w_c é o peso específico kg/m ³ f'_c é a resistência a compressão
fib MC 2010 (FIB, 2010)	$E_{ci} = 21.5 \alpha_e ((f_{ck}+8)/10)^{1/3}$	E_{ci} é o módulo de elasticidade inicial α_e parâmetro em função da natureza do agregado f_{ck} é a resistência característica à compressão do concreto

Obs.: Módulos de elasticidade em GPa; Resistência em MPa e peso específico em kg/m³

Quadro 3 - Correlações entre E e f_c , em MPa, para diferentes agregados graúdos.

Referência	Tipo de agregado graúdo	Equação de Correlação	Faixa de aplicação
Carrasquillo <i>et al.</i> (1981)	calcário e seixo	$E = 3320 f_c^{1/2} + 6900$	$21 \leq f_c \leq 83$
Shih <i>et al.</i> (1989)	calcário	$E = 4660 f_c^{1/2} - 1370$	$21 \leq f_c \leq 83$
Almeida (1990)	calcário e granito	$E = 5330 f_c^{1/2}$	$40 \leq f_c \leq 120$
Shehata <i>et al.</i> (1993)	gnaíse	$E = 4250 f_c^{1/2}$	$f_c \leq 90$
Gomes (1995)	traquito e gnaíse	$E = 8142 f_c^{0,37}$	-
Ferrari <i>et al.</i> (1996)	calcário e gnaíse	$E = 3691 f_c^{1/2} + 5445$	$10 \leq f_c \leq 81$
Dal Molin e Monteiro (1996)	basalto	$E = 9570 f_c^{0,31}$	$30 \leq f_c \leq 90$
Radain <i>et al.</i> (1993)	basalto	$E = 2173 f_c^{1/2} + 1456$	$40 \leq f_c \leq 90$

Quadro 4 – Valores típicos de módulo de elasticidade da estaca E_p das estacas segundo Velloso e Lopes (2010).

Tipo de Estaca	E_p (GPa)
Metálica (aço)	210
Pré-moldada vibrada	25
Pré-moldada centrífuga	30
Franki	22
Escavada	20

Fatores extrínsecos também podem influenciar significativamente o comportamento tensão vs., deformação do material. Particularmente, nas fundações do tipo estacas escavadas não revestidas, moldadas *in loco* ou do tipo Hélice Contínua Monitorada – EHC, o processo de concretagem está sujeito a diversos fatores que, frequentemente, geram problemas construtivos, como relatado por Penna *et al.* (1999). Nesse caso, o traço do concreto associado à natureza executiva da estaca, que envolve grandes volumes de material e concretagem submersa, são as principais causas de problemas executivos. Quando não há cuidados na composição do traço e/ou a definição de aditivos apropriados não é observada, verifica-se a ocorrência de perda da argamassa para o solo, a retração e/ou a exsudação do concreto. As falhas no processo de concretagem, seja no lançamento, adensamento ou cura, geram o enfraquecimento da interface entre a pasta de cimento e os agregados, proporcionando por consequência uma redução da resistência esperada, a heterogeneidade do concreto após a cura, uma elevada porosidade e baixos valores do módulo de elasticidade (Djanikian Filho, 2010; Nunes, 2005).

Consequentemente, é de se esperar que as informações obtidas através do controle tecnológico do concreto utilizado em tais tipos de fundação podem não representar de fato o material que constitui as estacas. Previsões de parâmetros do concreto nesses casos, utilizando as formulações tradicionais para concreto, podem gerar, deste modo, erros consideráveis no cálculo da deformação do elemento estrutural.

Nesse sentido, no presente trabalho apresenta-se um caso de obra em EHC, onde se faz a comparação dos parâmetros do concreto obtidos a partir de ensaios de compressão simples em corpos de prova instrumentados, extraídos *in loco* diretamente das fundações, com as estimativas empíricas sugeridas por normas e recomendações técnicas. As estimativas são baseadas nos resultados provenientes do controle tecnológico do concreto. Para efeito de comparação dos procedimentos de estimativa dos parâmetros do concreto, são analisados ainda resultados do controle tecnológico do concreto utilizado na superestrutura da obra, denominada aqui de estrutura, e de ensaio em corpo de prova moldado e instrumentado.

2 – CASO DE OBRA E PROGRAMA EXPERIMENTAL

Os corpos de prova do concreto utilizados no presente trabalho foram extraídos ou moldados da construção de um edifício residencial multifamiliar de 19 pavimentos em concreto armado.

As fundações são em estaca Hélice Contínua Monitorada, com diâmetros de 400mm e 500mm e profundidade igual a 18 metros, armadas nos seus primeiros quatro metros e capacidades de carga de 800 e 1000 kN, respectivamente. O edifício possui 82 pilares partindo das fundações, 46 estacas com 400mm de diâmetro, 235 estacas com 500mm de diâmetro, e uma estaca extra de referência para monitoramento de recalque. O maciço de fundação do edifício foi caracterizado através de 8 furos de sondagem à percussão do tipo SPT. A Figura 1 ilustra a variação do N_{SPT} médio, máximo e mínimo com a profundidade, os tipos e variação das espessuras das camadas de solo. O terreno é constituído por solos sedimentares. Pode-se notar que as estacas estão assentes em camada de argila siltosa com areia e a partir de onde ocorrem elevados valores de SPT.

Os testemunhos de concreto da fundação foram extraídos após o arrasamento da estaca até sua cota de projeto. A partir destes testemunhos moldaram-se corpos de prova cilíndricos com dimensões de altura e diâmetro iguais a 10 cm e 5 cm, respectivamente, respeitando a condição L/d igual a 2, recomendada para ensaios em corpos de prova de concreto cilíndricos (Figura 2).

Para o corpo de provas do concreto da estrutura foi utilizado testemunho moldado durante o processo de controle tecnológico da concretagem da superestrutura da obra. O procedimento de moldagem seguiu as recomendações prescritas pela norma NBR 5738:2015 (ABNT, 2015b).

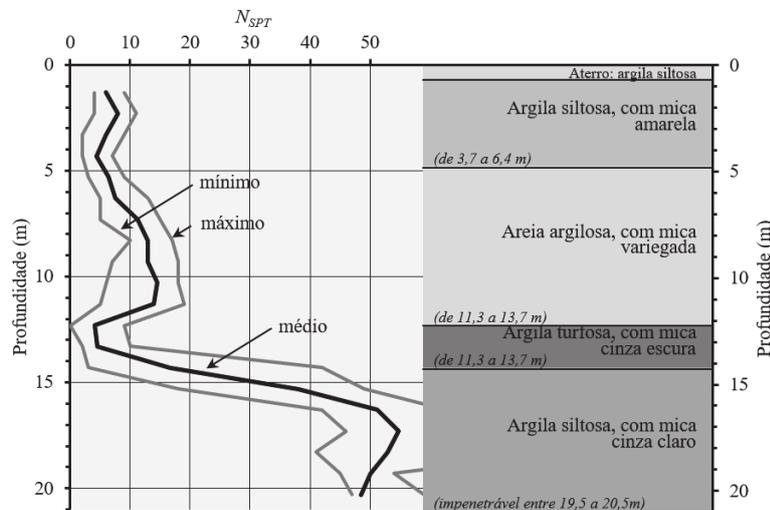


Fig. 1 – Resumo das sondagens SPT e estratigrafia do local da obra

Deve-se destacar que o concreto especificado em projeto para uso nas estacas deve possuir f_{ck} maior ou igual a 20 MPa e para a superestrutura maior ou igual a 35 MPa. No entanto, considerando as características físicas do concreto que deve ser lançado nas estacas, como prescrito pela norma NBR 6122:2010 (ABNT, 2010), é de se esperar que a resistência final seja superior à especificada em projeto.

Para determinação do comportamento tensão deformação do concreto, em cada corpo de prova foi instalado um *strain-gauge* elétrico do tipo roseta dupla a 90° e 350Ω de resistência, seguindo os procedimentos específicos de colagem, capaz de medir as deformações longitudinais e transversais durante os ensaios (Figura 2). Os *strain-gauges* foram conectados ao sistema de aquisição de dados *Lynx ADS2002* com ligação de $1/4$ de ponte e foram executados ensaios de compressão em uma prensa hidráulica EMIC com capacidade de 2000 kN até a ruptura. A velocidade de carregamento utilizada nos ensaios foi de aproximadamente 0,3 MPa/s. Com os dados obtidos, puderam-se determinar a variação da tensão σ_1 com a deformação axial ε_1 , para determinação do módulo de elasticidade de cada corpo de prova, assim como a variação da deformação radial ε_3 com a deformação axial ε_1 , para determinação do coeficiente de Poisson.

Foram realizados ainda ensaios de absorção para determinar a porosidade aparente do concreto e comparar com os valores de porosidade do concreto da estrutura e valores registrados na literatura.



Fig. 2 – Ilustração dos corpos de prova (esquerda) e da instrumentação (direita) o ensaio

3 – RESULTADOS

O Quadro 5 apresenta os valores médios das características físicas do concreto das estacas e da estrutura. Nota-se que o concreto da estrutura apresenta porosidade dentro da faixa de variação esperada para concretos com mesmas características (5 a 11%). No entanto, a estaca apresenta elevadas absorção e porosidade, o que se justifica pelo processo de execução e cura inerente ao processo executivo.

Quadro 5 – Resultados do ensaio de absorção

Propriedade	Estaca	Estrutura
Massa Específica Aparente (g/cm ³)	2,11	2,11
Absorção por saturação em água (%)	8,8	3,1
Porosidade (%)	18,5	6,6

A Figura 3 mostra as variações da tensão σ_l com as deformações axial ε_l e radial ε_r para 4 ensaios em testemunhos de concreto da fundação e 1 ensaio em corpo de prova do concreto da estrutura. Os ensaios são identificados segundo o Quadro 6. Para cada ensaio foi determinada a tensão de ruptura, os módulos de elasticidade tangente inicial o módulo de elasticidade secante e o coeficiente de Poisson (Quadro 6).

A partir do Quadro 6 é possível observar que os ensaios 3 e 4, em corpos de prova extraídos da fundação, mostram valor de resistência superior à obtida no controle tecnológico. Destaca-se que o concreto utilizado nas estacas de onde foram retirados os testemunhos para os ensaios 3 e 4 é proveniente de caminhões cujo f_{ck} é próximo ao f_{ck} máximo, determinados pelo controle tecnológico. Isso indica que os resultados dos ensaios nos corpos de prova extraídos das estacas ratificam a variação espacial dos resultados do controle tecnológico. Além disso, espera-se que haja ainda a influência do método de ensaio executado nos corpos de prova extraídos das estacas, que pode mobilizar maiores resistência em função do melhor controle na confecção dos corpos de prova e procedimento de ensaio. Tais resultados indicam que há importante variabilidade dos parâmetros de resistência e deformabilidade das estacas ao longo da obra e que o controle tecnológico pode ser usado para estimativa dessa variação espacial.

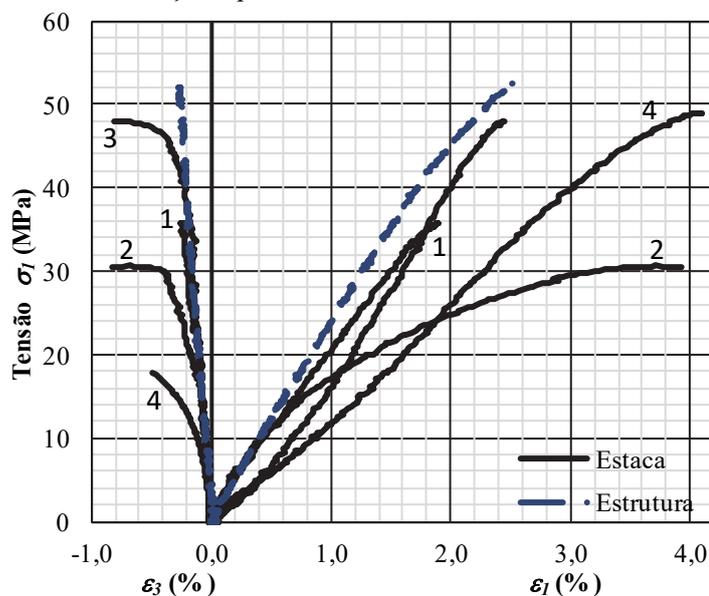
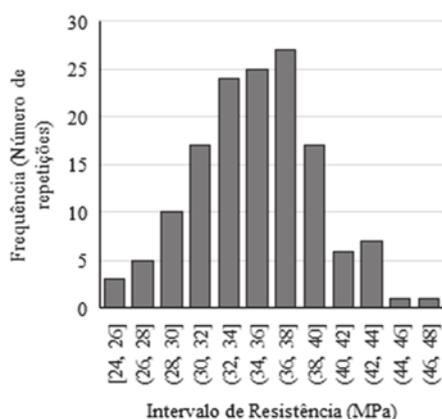


Fig. 3 – Curvas tensão axial vs. deformação axial e radial

Quadro 6 – Parâmetros determinados a partir das curvas tensão vs. deformação

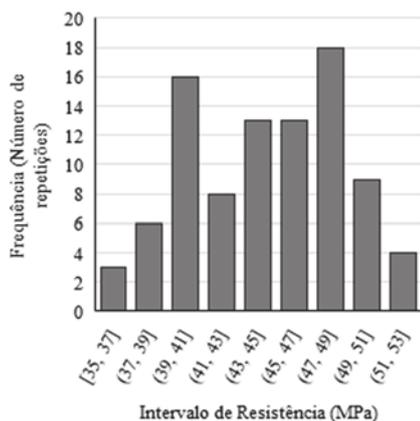
Ensaio	Resistência (MPa)		Módulo de Elasticidade (GPa)				ν	
	f_c	f_{ck}	Tangente Inicial			Secante		
			$E_{0,3f_c}$	$E_{0,4f_c}$	$E_{0,45f_c}$			
Estaca (extração)	1	35,7	37,6	21,9	21,6	21,1	19,0	0,12
	2	30,5		24,7	21,4	19,9	8,2	0,13
	3	47,9		15,5	16,5	17,4	19,8	0,10
	4	48,5		12,1	12,1	12,5	12,1	0,11
Média	40,7±9		18,5±5,8	17,9±4,5	17,7±3,8	14,8±5,6	0,11±0,01	
Estrutura (moldagem)	1	52,0	40,2	26,0	25,0	24,9	21,2	0,11



Número de ensaios:	429
Média:	35,0 MPa
Desvio padrão:	4,25 MPa
Intervalo de confiança:	0,4 MPa (*)
Mínimo:	23,5 MPa
Máximo:	46,7 MPa
f_{ck} (NBR 12655:2015):	28,0 MPa

(*) para nível de confiança de 95 %

(a) Resultados do controle tecnológico do concreto das estacas



Número de ensaios:	90
Média:	44,1 MPa
Desvio padrão:	4,3 MPa
Intervalo de confiança:	0,9 MPa (*)
Mínimo:	34,6 MPa
Máximo:	52,4 MPa
f_{ck} (NBR 12655:2015):	36,9 MPa

(*) para nível de confiança de 95 %

(b) Resultados do controle tecnológico do concreto das estrutura

Fig. 4 – Distribuição de frequência dos resultados de resistência à compressão nos corpos de prova moldados na obra do concreto das estacas e da estrutura

A Figura 4a apresenta o histograma e resumo estatístico dos valores de resistência à compressão simples, obtidas através do controle tecnológico, do concreto utilizado nas estacas e a Figura 4b do concreto aplicado na estrutura. Para o concreto das estacas são considerados os resultados de ensaios de todos os corpos de prova moldados a partir do concreto usado nas estacas. Para o concreto da estrutura, foram utilizados os resultados de ruptura apenas no período correspondente à da moldagem do corpo de prova ensaiado em laboratório.

4 – ANÁLISE RESULTADOS

O Quadro 7 mostra os valores da resistência média f_{cm} e da resistência característica f_{ck} obtidos a partir do programa experimental. Os valores da resistência característica, f_{ck} , foram determinados segundo a NBR 12655:2015 (ABNT, 2015a) e utilizando os valores de resistência obtidos no controle tecnológico (Figura 4). Nota-se que o procedimento de moldagem dos corpos de prova e de ensaio influenciaram significativamente nos valores de f_{cm} e f_{ck} . A razão entre as resistências TE/CT indica diferença significativa entre o concreto curado na estaca (TE) e o concreto moldado para controle tecnológico (CT). Tanto f_{cm} e f_{ck} são maiores para o concreto curado na estaca, comparados com o concreto moldado para o controle tecnológico. Tal diferença é da ordem de 13% para a resistência média, f_{cm} , e 34% para a resistência característica, f_{ck} . Esses resultados indicam que o processo de cura que é feito na moldagem de corpos de prova gera concreto com valores de resistência não representativos da condição real de campo no caso das estacas hélice contínua estudadas.

Pode-se observar ainda, que razão entre as resistências TE/CT para o concreto estrutural também indica diferença entre o concreto curado na estaca (TE) e o concreto moldado para controle tecnológico (CT). Nesse caso, tal diferença, que é relativamente pequena, reflete apenas o efeito do procedimento de ensaio, tendo em vista que o testemunho foi obtido a partir de um corpo de provas proveniente do próprio controle tecnológico. Mesmo com o limitado número de ensaios, pode-se concluir, como esperado, que os ensaios executados com melhor controle geram resistências ligeiramente superiores aos resultados obtidos a partir do controle tecnológico.

Como era de se esperar, os valores de f_{cm} são maiores que os valores de f_{ck} . No entanto, apenas para os resultados provenientes do controle tecnológico do concreto das estacas é aproximadamente correta a relação entre f_{cm} e f_{ck} proposta pelo Eurocode 2 (EN 1992-1-1, 2004) (Quadro 2).

Quadro 7 – Relação entre as resistências f_{cm} e f_{ck} obtidas nos ensaios e estimados pelo controle tecnológico

	Resistência (MPa)	Testemunho (TE)	Controle tecnológico (CT)	Razão de resistência (TE/CT)
<i>Estaca</i>	f_{cm}	40,7	35,04	1,16
<i>(extraído)</i>	f_{ck}	37,6	28,03	1,34
<i>Estrutura</i>	f_{cm}	52,0 (*)	44,10 (**)	1,18
<i>(moldado)</i>	f_{ck}	40,2 (*)	36,93 (**)	1,09

(*) determinado a partir de um ensaio em corpo de prova moldado; (**) determinado pelo controle tecnológico do concreto usado na estrutura

A partir da resistência obtida no controle tecnológico é possível determinar o módulo de elasticidade secante, utilizando equações empíricas sugeridas por normas e recomendações técnicas, conforme apresentadas no Quadro 2, e admitindo que os agregados são provenientes de rochas gnáissicas (Quadro 8). Como era de esperar, nota-se uma significativa variabilidade nos resultados obtidos através das previsões empíricas. O Quadro 8 mostra que o módulo de elasticidade secante obtidos em corpos de prova instrumentados é menor que os estimados empiricamente através de

resultados do controle tecnológico, sendo da ordem de 60% para o concreto utilizado nas estacas e 40% para o concreto da estrutura, em média.

Quadro 8 – Valores dos módulos de elasticidade secante segundo diferentes formulações sugeridas por diferentes normas

Metodologia ou norma	Forma de determinação	Base de dados	Módulo de Elasticidade (GPa)	
			estaca	estrutura
Eurocode 2 (EN 1992-1-1, 2004)	Empírica	Controle tecnológico	32,3	34,5
ACI 318-14 (*) (ACI, 2014)			22,6	32,7
NBR 6118:2014 (ABNT, 2014)			25,9	30,4
ASTM C 496/C 469M-14 (ASTM, 2002) NBR 5739:2007 (ABNT, 2007)	Determinação direta em corpo de provas instrumentado		14,8	21,2

(*) o Módulo de Elasticidade é calculado para nível de deformação igual a $0,45f_{ck}$

O Quadro 9 apresenta estimativas do módulo de elasticidade considerando diferentes tipos de agregados através de equações sugeridas pela bibliografia técnica, para a faixa de valores de f_{ck} da obra da ordem de 35MPa (Quadro 4) e rochas gnáissicas. Os resultados nesse caso estão dentro da faixa de variação dos estimados empiricamente, apresentados no Quadro 8.

Deve-se destacar, no entanto, que o nível de tensões adotado em projeto para esse tipo de fundação é consideravelmente inferior à resistência característica do concreto. Deste modo, utilizando os valores de módulo de elasticidade secantes para menores níveis de tensão, com por exemplo a 30, 40 ou 45% da resistência média (Quadro 6), da ordem de 18GPa, nota-se que a estimativa empírica ainda resulta superior ao valor determinado em corpos de prova instrumentados, da ordem de 20%.

Quadro 9 – Módulos de elasticidade segundo diferentes formulações sugeridas pela bibliografia para diferentes tipos de agregados

Referência	Tipo de agregado graúdo	Faixa de aplicação	E (GPa)	
			estaca	estrutura
Shehata et al. (1993)	gnaisse	$f_c \leq 90$	22,50	25,83
Gomes (1995)	traquito e gnaisse	-	27,95	30,95
Ferrari et al. (1996)	calcário e gnaisse	$10 \leq f_c \leq 81$	24,99	27,88

5 – EXEMPLO

Para exemplificar o efeito da estimativa do módulo de elasticidade do concreto no cálculo do recalque de uma fundação profunda tipo hélice contínua, selecionou-se então um caso de obra onde foram medidos os recalques durante a construção. A estaca selecionada é a mesma onde foram extraídos os testemunhos de concreto.

Na análise, além da influência da estimativa do recalque devido variações do módulo de elasticidade da estaca fez-se ainda, para fins comparativos, a avaliação da influência das variações do módulo cisalhante do maciço.

A Figura 5 apresenta a variação de $w_{estimado} / w_{estaca}$ com a variação de $E_{estimado} / E_{estaca}$, sendo:

- i. w_{estaca} o recalque da estaca onde foram retirados os testemunhos de concreto. O valor de w_{estaca} é igual a 7,48mm no final da construção das estruturas de concreto da obra, determinado por monitoramento de recalques por Waked (2018). Nessa etapa estima-se, por modelo numérico da estrutura como pórtico espacial, que a carga na estaca é igual a 816kN;
- ii. $w_{estimado}$ é o recalque calculado a partir do método de Randolph (1985);
- iii. E_{estaca} é o módulo de elasticidade da estaca, igual a 14,8GPa (Quadro 8);
- iv. $E_{estimado}$ é o módulo de elasticidade da estaca estimado. Na figura considera-se uma variação de $E_{estimado}$ de 10 a 40GPa, que corresponde ao espectro de valores obtidos a partir de correlações empíricas, apresentadas nos Quadros 2 e 3, com a resistência proveniente do controle tecnológico do concreto, mostrado na Figura 4. No cálculo de $w_{estimado}$ admite-se que o módulo cisalhante do maciço no trecho do fuste próximo da ponta (G_L) é diferente do módulo cisalhante do maciço abaixo da ponta da estaca (G_P). Para cálculo do módulo cisalhante do maciço na meia profundidade da estaca ($G_{L/2}$) adotou-se um módulo equivalente correspondente à média ponderada dos módulos de cada camada e a espessura de cada camada como fator de ponderação. A determinação dos módulos cisalhantes do maciço é feita considerando correlação da Teoria da Elasticidade: $G = E / (2 (1+\nu))$. O módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson foram obtidos através das correlações com os valores de N_{SPT} , propostas por Teixeira e Godoy (1996).

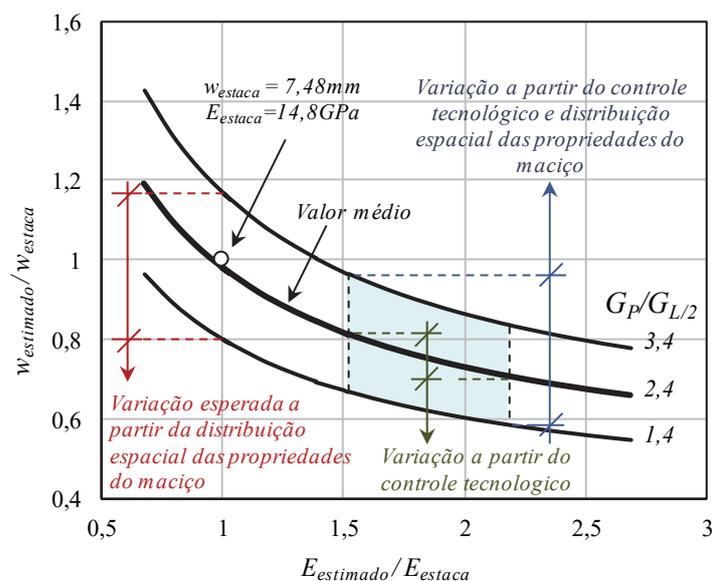


Fig. 5 – Variação na estimativa do recalque

O efeito da variação do módulo cisalhante do solo para estimativa do recalque da estaca, w_{estaca} , é feita considerando a variabilidade dos valores de G_P , G_L e $G_{L/2}$. Para isso, foi utilizado o método de Monte Carlo, onde foram geradas 10000 combinações aleatórias entre esses parâmetros, admitindo distribuição normal de frequência para cada parâmetro. Das combinações aleatórias foi determinado que a relação $G_P/G_{L/2}$ é igual a $2,4 \pm 1,0$.

Como era de se esperar observa-se que a estimativa do recalque é influenciada pela variação espacial dos parâmetros do maciço e da estaca. Nota-se que a relação $w_{estimado} / w_{estaca}$:

- i. varia de 0,8 a 1,18 quando se considera a variabilidade dos parâmetros do maciço e módulo de elasticidade determinado diretamente de corpos de prova. Isso representa uma variação da ordem de 20% do valor médio do recalque;
- ii. varia de 0,7 a 0,8 quando se considera a resistência do concreto da estaca obtido a partir do controle tecnológico e correlações empíricas. Isso representa uma variação de 10% do valor médio, mas subestimativa da ordem de 20 a 30%;
- iii. varia de 0,6 a 0,95 quando se considera a variabilidade dos parâmetros do maciço e a resistência do concreto da estaca obtido a partir do controle tecnológico do concreto e correlações empíricas. Isso representa uma variação de até 40% do valor médio e subestimativa da mesma ordem de grandeza.

6 – CONCLUSÃO

O presente trabalho apresenta resultados de programa experimental onde é possível observar que a estimativa do módulo de elasticidade do concreto de fundações tipo hélice contínua a partir do controle tecnológico pode estar sujeito a erros consideráveis. Através de formulações sugeridas por normas técnicas, o módulo de elasticidade foi superestimado em aproximadamente 60%.

Tal erro na estimativa do módulo de elasticidade provocado principalmente pela limitação das equações que são sugeridas pela bibliografia, que relacionam normalmente a resistência do concreto ao módulo de elasticidade. Como os valores de resistência característica do concreto utilizado nas estacas é consideravelmente superior ao especificado em projeto ($\geq 20\text{MPa}$), as estimativas do módulo de elasticidade também serão superestimadas.

Os elevados valores de resistência do concreto das estacas se justificam naturalmente pelas características física do traço especificado para esse tipo de obra, que envolve normalmente elevada fração de cimento. Também como consequência do traço, o concreto curando *in loco* nas estacas é consideravelmente mais poroso que o concreto da estrutura, o que confere maiores deformabilidade e, como notado nesse caso de estudo, uma acentuada não linearidade do comportamento tensão vs. deformação. A elevada porosidade aparente do concreto das estacas pode estar associado aos fatores intrínsecos e extrínsecos descritos no Quadro 1, alguns desses frequentemente observados no processo de concretagem desse tipo de fundação.

Admitindo, no entanto, baixos níveis de tensão, a estimativa do módulo de elasticidade é mais próxima da experimental, porém com valores ainda 20% maiores, o que resultaria ainda na subestimativa dos recalques pela deformação estrutural.

Assim, considerando a natureza das estimativas empíricas do módulo de elasticidade do concreto, seja baseada na resistência, no tipo do agregado e/ou através de valores prescritos, os recalques estimados devido à deformação do elemento estrutural de fundações profundas concretadas *in loco* devem ser tratados com cuidado. Tal aspecto é evidente no exemplo apresentado onde se constata erros que podem chegar a 30% do recalque medido e 40% se adicionada a variabilidade do maciço.

Recomenda-se, portanto, a determinação do módulo de elasticidade do concreto através de ensaios diretos, observando o nível de tensão de trabalho do concreto, nos casos onde esta parcela do recalque seja expressiva, ou onde seja um parâmetro relevante, como na interpretação de provas de carga.

7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (2007). NBR 5739:2007 – *Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- ABNT (2010). NBR 6122:2010 – *Projeto e execução de fundações*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

- ABNT (2014). NBR 6118:2014 – *Projeto de estruturas de concreto*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- ABNT (2015a). NBR 12655:2015 – *Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- ABNT (2015b). NBR 5738:2015 – *Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- ACI (2014). ACI 318-14 – *Building Code Requirements for Structural Concrete*.
- Almeida, I. R. (1990). *Betões de alta resistência e durabilidade. Composição e características*. Tese de doutorado em Engenharia civil. Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa, set., 740p.
- Aoki, N. (1984). *Previsão de Curva Carga - Recalque*. Palestra Proferida na Escola de Engenharia de São Carlos – USP, São Carlos.
- ASTM (2002). ASTM C 496/C 469M-14 – *Standard test methods for static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression*. Annual Book of ASTM Standards 2001, Volume 04.08.
- Bowles, J. E. (1996). *Foundation analysis and design*. The McGrawHill Companies. Inc., New York.
- Carrasquillo, R. L.; Nilson, A. H.; Slate, F. O. (1981). *Properties of high strength concrete subject to short-term loads*. ACI Journal, maio/junho, v. 78, n.3, p. 171-178.
- Dal Molin, D. C. C.; Monteiro, P. J. M. (1996). *Estudo do módulo de deformação de concretos de alta resistência com e sem adições de sílica ativa*. 1st International Congress on High Performance Concrete, and Performance and Quality of Concrete structures, Florianópolis, Brasil, Florianópolis: Rocha Gráfica e Editora Ltda, p. 213-224
- Djanikian Filho, J. G. (2010). *Controle do Módulo de Elasticidade do Concreto na Estrutura com o Uso de Célula de Fluência*. Monografia de Especialista em Tecnologia e Gestão na Produção de Edifícios Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 78p.
- EN 1992-1-1 (2004). *Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for building*.
- Ferrari, A. A.; Flor, J. M.; Calixto, J. M. F. (1996). *Propriedade mecânica do concreto de alto desempenho fabricado com diversos materiais*. 1st International Congress on High Performance Concrete, and Performance and Quality of Concrete structures, Florianópolis, Brasil, Florianópolis: Rocha Gráfica e Editora Ltda, p. 15-26
- FIB (2010). *fib Model Code 2010 – Comitê Euro Internacional do Betão*.
- Gomes, P. C. C. (1995). *Estudo dos parâmetros que influenciam a produção e as propriedades dos concretos de alta resistência*. Dissertação de mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 179p.
- Hachich, W.; Falconi, F. F.; Saes J. L.; Frota, R. G. Q.; Carvalho, C. S.; Niyama, S. (1998). *Fundações–Teoria e prática*, 1ª. Edição, PINI, São Paulo.
- Mehta, P.K.; Monteiro, P.J.M. (2014). *Concrete: microstructure, properties, and materials*. New York: McGraw-Hill.
- Melo Neto, A. A.; Helene, P. R. L. (2002). *Módulo de elasticidade: dosagem e avaliação de modelos de previsão do módulo de elasticidade de concretos*. In: 44º Congresso Brasileiro do Concreto, Belo Horizonte, 16p.

- Montija, F. C. (2007). *Aspectos da variabilidade experimental do ensaio de módulo de deformação do concreto*. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Construção Civil e Urbana, Universidade de São Paulo, São Paulo. 261 f.
- Nunes, F. W. G. (2005). *Resistência e Módulo de Elasticidade de Concretos Usados no Rio De Janeiro*, Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 129p.
- Penna, A. S. D., Caputo, A. N., Maia, C. M., Palermo, G., Gotlieb, M., Paraíso, S. C.; Alonso, U. R. (1999). *Estaca Hélice-Contínua a Experiencia Atual*. ABMS/ABEF. São Paulo, São Paulo-SP.
- Poulos, H. G.; Davis, E. H. (1968). *The settlement behaviour of single axially loaded incompressible piles and piers*. Geotechnique, 18(3), 351-371.
- Radain, T. A.; Samman, T. A.; Wafa, F. F. (1993). *Mechanical properties of high strength concrete*. 3th Symposium on Utilization on High Strength Concrete. Lillehammer, Norway, p.1209-1216.
- Randolph, M. F.; Wroth, C. P. (1978). *Analysis of deformation of vertically loaded piles*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 104 (ASCE 14262). p.1465-1488.
- Randolph, M.F. (1985). *Theoretical methods for deep foundations*. In: Simpósio Teoria e Prática de Fundações Profundas. Porto Alegre. Vol 1, p 1-50.
- Santos, S. B.; Gambale, E. A.; Andrade, M. A. S. (2006). *Modelos de predição do módulo de elasticidade do concreto*. 48º Congresso Brasileiro do Concreto, Rio de Janeiro.
- Shehata, L. C. D.; Martins P. C. R.; Pereira, S. S. R. (1993). *Classificação e propriedades do concreto e do aço*. III Simpósio EPUSP Sobre Estruturas de Concreto. São paulo, 24p.
- Shih, T. S.; Tee, G. C.; Chang, K. C. (1989). *On static modulus of elasticity of normal-weight concrete*. Journal of Structural Engineering, oct, 1989. V. 115, n.10, p. 2579-2587
- Silva, E. F. (1997). *Concreto de Alto Desempenho: Estudo de Propriedades Mecânicas*. Dissertação de Mestrado, Departamento e Engenharia Civil, Universidade de Brasília.
- Teixeira, A. H.; Godoy, N. S. (1996). *Análise, projeto e execução de fundações rasas*. In: Hachich et al. Fundações: teoria e prática. São Paulo: PINI. 1996. Cap.7 p. 227-264
- Velloso, D. A.; Lopes, F. R. (2010). *Fundações: Fundações Profundas*. 1.ed. São Paulo, Oficina de textos, 352p.
- Vésic, A. S (1969). *Experiments with instrumented pile groups in sand*. Performance of Deep Foundation, ASTM - SPEC Techn. Publ., no 444, p.177-222.
- Waked, L.V. (2018). *Transferência de Carga de Estacas Hélice Contínua Monitorada em Maciço Sedimentar Durante a Construção de um Edifício*. Dissertação de Mestrado. UENF/LECIV, Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro, p110.