

ESTUDO NUMÉRICO DE FUNDAÇÕES SUPERFICIAIS SOBRE SISTEMA DE DUPLA CAMADA

Vítor Pereira Faro

Pós-Doutorando, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.
Email: <pereira.faro@ufrgs.br>.

Nilo Cesar Consoli

Professor Associado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.
Email: <consoli@ufrgs.br>.

RESUMO

Foi estudado, através do Método dos Elementos Finitos, o comportamento de fundações superficiais assentes em sistemas de dupla camada, sendo a superior artificialmente cimentada, com uma largura igual a três vezes o diâmetro da fundação. Sendo H a espessura de solo cimentado e D o diâmetro da fundação, foram feitas diversas simulações para as várias relações H/D (desde zero até 4,0). Depois de confirmada a influência da relação H/D na resposta carga x recalque de fundações superficiais, foi feita uma análise paramétrica após a qual é proposta uma nova metodologia de dimensionamento de fundações superficiais assentes em sistema de dupla camada, sendo a superior cimentada. Finalmente, a capacidade de suporte de fundações superficiais assentes em camadas cimentadas foram simuladas com sucesso através da nova metodologia apresentada. Para a prática da engenharia o método proposto, através de curvas carga-recalque, fornece boas previsões para a obtenção da capacidade de suporte de fundações superficiais.

Palavras-chave: Fundações Superficiais, Solos Cimentados, Sistema Dupla Camada, Capacidade de Suporte.

INTRODUÇÃO

Na procura de soluções técnicas que tornem as obras de engenharia mais económicas, minimizando a agressão ao meio ambiente, vêm sendo estudadas técnicas alternativas que consistem em substituir as fundações profundas por fundações superficiais apoiadas em solos estabilizados ou artificialmente cimentados. A utilização desta solução alternativa passa agora a ser um problema típico de fundações sobre um sistema dupla camada, sendo a superior cimentada.

Nesse sentido, este tipo de estudo revela-se de grande importância para a prática da engenharia, uma vez que permite conhecer melhor o comportamento das fundações superficiais quan-

do assentes em camadas de solos cimentados. Só será possível a perfeita utilização em obra deste tipo de solução se houver um modo credível para determinar a capacidade de carga das fundações assentes neste tipo de sistema.

Muitos estudos foram efectuados sobre fundações superficiais assentes em sistema de dupla camada, mas a maior parte deles concentrou-se sobre camadas de areia sobre solos sedimentares argilosos moles. A título de exemplo, Tcheng (1957), Meyerhof (1974), Hanna & Meyerhof (1980), Michalowski & Shi (1995), Burd & Frydman (1997), Kenny & Andrawes (1997). Vésic (1975) e Hanna & Meyerhof (1978) alargaram o

seu estudo para casos em que ambas as camadas eram coesivo-friccionais. Consoli *et al* (1998) e Consoli & Vendruscolo (2003) realizaram estudos sobre camadas de solo em que a camada superior era constituída por solo cimentado, acabando os últimos por concluir que tem que ser desenvolvido um novo método para o cálculo da capacidade de carga de fundações superficiais assentes em solos cimentados e solos cimentados reforçados com fibras. Thomé *et al* (2005) apresentou um método semi-empírico para o dimensionamento de fundações superficiais apoiadas sobre um sistema dupla camada, no qual o estrato superior é cimentado, no entanto, o estudo foi realizado considerando a capacidade de carga de fundações superficiais igual a 2% do recalque relativo do diâmetro da fundação e, apenas para relações H/D de 0,25; 0,5 e 1,0.

No presente trabalho realizou-se um estudo da resposta carga x recalque para fundações superficiais assentes em sistema dupla camada, sendo a superior cimentada, para 3% do recalque relativo. Realizou-se também uma análise paramétrica, através do Método dos Elementos Finitos, variando os parâmetros do solo cimentado e do solo natural para as várias relações H/D , para um recalque de 3%. Na análise paramétrica foi atribuída ênfase à reprodução das curvas para a obtenção da capacidade de carga de fundações apoiadas sobre sistema dupla camada, a 3% do recalque relativo, para as várias relações H/D .

MODELO NUMÉRICO.

Através do Método dos Elementos Finitos, foi estudado o comportamento de fundações superficiais apoiadas sobre um perfil composto por duas camadas, sendo a superior cimentada, para um recalque relativo de 3%. Estudaram-se as relações H/D iguais a 0,0; 0,0625; 0,125; 0,25; 0,5; 1,0; 2,0; 3,0 e 4,0.

O modelo constitutivo utilizado para representar o solo cimentado foi o modelo elástico perfeitamente plástico, com critério de ruptura de Drucker-Prager e lei de fluxo não associada. Os parâmetros do modelo são a coesão efectiva (c'), o ângulo de atrito efectivo (f'), o módulo de elasticidade (E), o coeficiente de Poisson (n) e ângulo de dilatância (y).

A malha de elementos finitos utilizada nas simulações efectuadas é composta por elementos quadriláteros de 8 nós com 9 pontos de integração cada, num plano axissimétrico. A malha é apresentada na Figura 1.

As análises foram do tipo mista, isto é, a solicitação foi dividida em incrementos e em cada um eram realizadas iterações. A solicitação referida foi o deslocamento (para 3% do recalque relativo), aplicado ao longo da dimensão do diâmetro (placa), sobre o solo cimentado, tratando-se assim de uma fundação totalmente rígida. Nos limites da malha, apenas por baixo da placa (plano de simetria) há liberdade do movimento horizontal, o qual, para sistemas de dupla camada sendo a superior mais rígida, se torna de menor importância devido ao fato de a fundação se mover verticalmente (Griffiths, 1982).

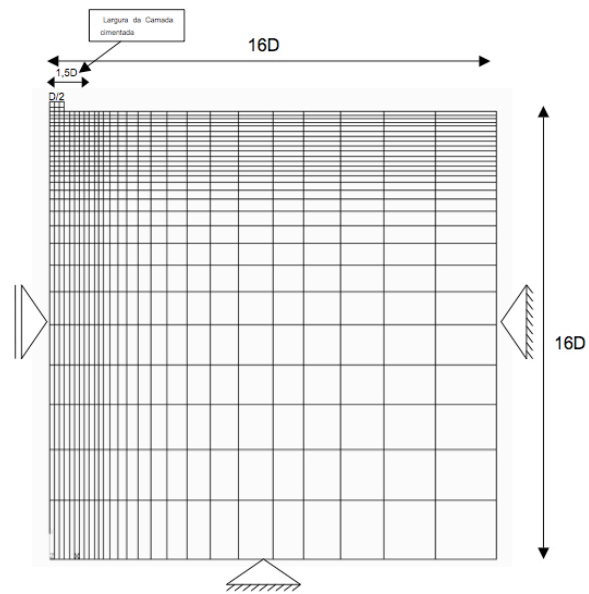


Figura 1 – Exemplo da malha utilizada.

Nesta etapa foram realizadas duas simulações para cada relação H/D (exceptuando as relações H/D iguais a zero), variando a espessura da camada de solo cimentado (H) e o diâmetro da fundação (D), mantendo a mesma relação H/D , de modo a verificar a conformidade da curva carga x recalque relativo. O Quadro 1 mostra as diferentes variações de H e D para as várias relações H/D . A nomenclatura usada foi $D \times H_y$, onde D é o diâmetro com dimensão x (em centímetros) e H a espessura da camada cimentada com dimensão y (em centímetros).

Nesta fase os valores dos parâmetros dos materiais utilizados no modelo constitutivo, para o solo cimentado (1) e para o solo natural (2), respectivamente, são os apresentados nos Quadros 2 e 3. De referir que estes valores são iguais aos utilizados por Consoli *et al.* (2009). O coeficiente de Poisson adotado foi igual a 0,25. Cudmani (1994) realizou análise paramétrica e verificou que o coeficiente de Poisson não influencia significativamente os resultados em análises numé-

ricas. Griffiths (1982) e Burd & Frydman (1997) chegaram a conclusão semelhante.

Todas as simulações foram consideradas para a condição isotrópica ($K_0=1$). Burd & Frydman (1997) analisaram fundações superficiais pelo Método dos Elementos Finitos com diferentes valores de K_0 e verificaram que este parâmetro não tinha influência nos resultados obtidos. O mesmo foi verificado para o valor do peso específico aparente (g_{nat}). Após esta constatação, no presente trabalho, foi fixado o valor do g_{nat} igual a 18 kN/m^3 para todos os materiais.

Quadro 1 – Variações do diâmetro (D) e da espessura de solo cimentado (H) para cada relação H/D .

H/D	DxHy
0,0625	D240H15
	D480H30
0,125	D120H15
	D240H30
0,25	D60H15
	D120H60
0,5	D60H30
	D120H60
1,0	D30H30
	D60H60
2,0	D60H120
	D120H240
3,0	D60H180
	D120H360
4,0	D60H240
	D120H480

Quadro 2 - Valores dos parâmetros do solo cimentado utilizados no modelo constitutivo.

c'_1 [kPa]	f'_1 [°]	E_1 [MPa]	u	γ_1 [°]
300	33,69	600	0,25	13,5

Quadro 3 - Valores dos parâmetros do solo natural utilizados no modelo constitutivo.

c'_2 [kPa]	f'_2 [°]	E_2 [MPa]	u	γ_2 [°]
10	25,0	22,5	0,25	0,0

Após duas simulações para cada relação H/D foi confirmado, para 3% do recalque relativo, que variando os parâmetros geométricos H e D , mas mantendo a mesma relação entre eles, a resposta carga x recalque relativo coincide, provando assim que o modelo está bem calibrado. A Figura 2 mostra a perfeita conformidade para as várias relações $H/D=0,0625$; $0,125$; $0,25$; $0,5$; $1,0$; $2,0$; $3,0$ e $4,0$.

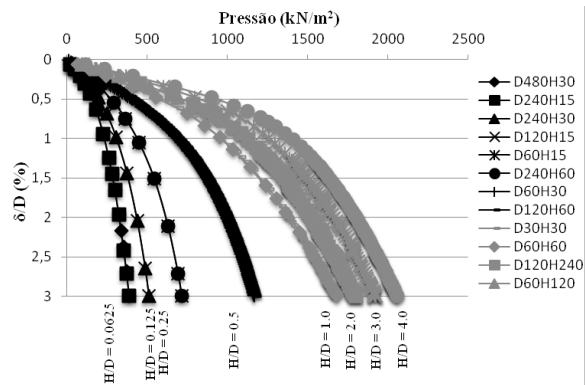


Figura 2 – Curvas pressão x recalque relativo.

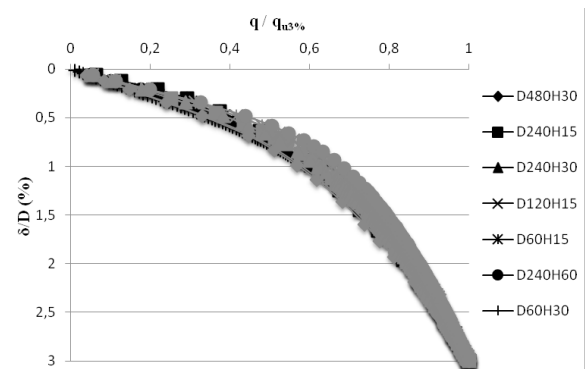


Figura 3 – Normalização ($q/q_{u3\%}$ x recalque relativo) das simulações numéricas realizadas para todas as relações H/D .

Na Figura 3 é possível observar uma relação perfeita entre o recalque relativo e pressão relativa a 3% do recalque, após normalizar os resultados de acordo com Consoli *et al.* (1998).

ANÁLISE PARAMÉTRICA

Após a calibração do modelo, foi realizada uma análise paramétrica, para 3% do recalque relativo, variando os parâmetros do solo que influenciam o comportamento de fundações superficiais assentes em sistema dupla camada. Tais parâmetros foram analisados por Thomé *et al.* (2005), concluindo que os parâmetros de maior influência na capacidade de carga de fundações superficiais assentes em dupla camada são a coesão efectiva da camada cimentada (c'_1), a coesão da camada não-cimentada (c'_2), o ângulo de atrito da camada não-cimentada (f'_2) e o módulo de elasticidade da camada não cimentada (E_2).

O nível de cimentação foi correlacionado com a coesão efectiva da camada cimentada. Com isto, foram fixados três valores de c'_1 e variaram-se os demais parâmetros. Os Quadros 4, 5 e 6 apresentam, para todas as relações H/D

excepto para as iguais a zero, os valores dos parâmetros utilizados nas simulações, para os níveis de cimentação forte (F), média (M) e fraca (f), respectivamente. Para a relação H/D igual a zero, os valores dos parâmetros utilizados encontram-se nos Quadros 7. Simulou-se um exemplo chamado de base e nos demais variou-se os parâmetros c'_2 (c2x), f'_2 (fi2x) e E_2 (E2x), onde x varia de 2 a 3 e corresponde ao número de vezes que o parâmetro foi variado. Para sistemas de dupla ca-

mada (todas as relações H/D excepto H/D igual a zero), os valores são os mesmos que os usados por Thomé *et al.* (2005), apenas não foram realizadas as simulações em que havia variações nos valores dos parâmetros do solo cimentado, nomeadamente f'_1 e E_1 , pois, tal como o provado pela referido autor, não têm grande influência no valor da capacidade de carga. De salientar que nesta fase, para cada relação H/D , foi apenas utilizada uma geometria das referidas no Quadro 1.

Quadro 4 - Valores dos parâmetros dos materiais para a análise paramétrica, quando a camada superior é fortemente cimentada.

$DxHy$	c'_1 [kPa]	f'_1 [°]	E_1 [MPa]	c'_2 [kPa]	f'_2 [°]	E_2 [MPa]
baseF	450	45	600	10	25	50
c22F	450	45	600	25	25	50
c23F	450	45	600	50	25	50
fi22F	450	45	600	10	20	50
fi23F	450	45	600	10	30	50
E22F	450	45	600	10	25	10
E23F	450	45	600	10	25	100

Quadro 5 - Valores dos parâmetros dos materiais para a análise paramétrica, quando a camada superior é medianamente cimentada.

$DxHy$	c'_1 [kPa]	f'_1 [°]	E_1 [MPa]	c'_2 [kPa]	f'_2 [°]	E_2 [MPa]
baseM	100	45	600	10	25	50
c22M	100	45	600	25	25	50
c23M	100	45	600	50	25	50
fi22M	100	45	600	10	20	50
fi23M	100	45	600	10	30	50
E22M	100	45	600	10	25	10
E23M	100	45	600	10	25	100

Quadro 6 - Valores dos parâmetros dos materiais para a análise paramétrica, quando a camada superior é fracamente cimentada.

$DxHy$	c'_1 [kPa]	f'_1 [°]	E_1 [MPa]	c'_2 [kPa]	f'_2 [°]	E_2 [MPa]
basef	30	45	600	10	25	50
c22f	30	45	600	1	25	50
c23f	30	45	600	20	25	50
fi22f	30	45	600	10	20	50
fi23f	30	45	600	10	30	50
E22f	30	45	600	10	25	10
E23f	30	45	600	10	25	100

Quadro 7 - Valores dos parâmetros do solo natural para a análise paramétrica.

$DxHy$	c'_2 [kPa]	f'_2 [°]	E_2 [MPa]
base	10	25	50
c22	25	25	50
c23	20	25	50
fi22	10	20	50
fi23	10	30	50
E22	10	25	10
E23	10	25	100

Como foi referido anteriormente, na análise paramétrica foi apenas ensaiada uma geometria para cada relação H/D . Nesta fase foram feitas simulações para $H/D=0,0$; 0,0625; 0,125; 0,25; 0,5; 1,0; 2,0; 3,0; e 4,0. As geometrias usadas, respectivamente para todas as relações H/D foram: D60H0, D480H30, D240H30, D240H60, D120H60, D60H60, D120H240, D60H180 e D120H480. Através das diversas variações dos parâmetros dos solos utilizados, foram obtidos os diferentes valores para a pressão última a 3% do recalque relativo.

Thomé *et al.* (2005) confirmou, para 2% do recalque, que a capacidade de carga para uma relação H/D qualquer podia ser escrita em função de um fator de parâmetros (F). Concluiu que F podia ser escrito em função dos parâmetros que influenciam a capacidade de carga última de fundações sobre sistemas de dupla camada do seguinte modo:

$$F = \ln\left(\frac{c'_1}{Pa}\right) + \ln\left(\frac{c'_2}{Pa}\right) + \frac{1}{\cos^4 \phi'_2} + \ln\left(\frac{E_2}{Pa}\right) \quad (1)$$

Pa - pressão atmosférica;
 c'_1 - coesão da camada cimentada;
 c'_2 - coesão da camada não-cimentada;
 ϕ'_2 - ângulo de atrito interno da camada não-cimentada;
 E_2 - módulo de elasticidade da camada não-cimentada.

Deste modo, para cada simulação efectuada corresponde um valor de F . Os parâmetros coesão e módulo de elasticidade apresentam-se divididos pela pressão atmosférica de modo a serem adimensionalizados. O autor postulou também que a referida fórmula apenas é válida para a faixa de valores apresentados no Quadro 8.

Quadro 8 – Faixa de validade para aplicação da metodologia proposta por Thomé *et al.* (2005).

Material Cimentado	Material Não-Cimentado
$0,19 \leq c'_1/Pa \leq 4,44$	$0,01 \leq c'_2/Pa \leq 0,50$
$0,70 \leq \text{tg} \phi'_1 \leq 1,19$	$0,26 \leq \text{tg} \phi'_2 \leq 0,70$
$2\ 961,0 \leq E_1/Pa \leq 14\ 810,0$	$98,0 \leq E_2/Pa \leq 988,0$

Demonstrou que, se plotarmos num espaço o valor da capacidade de carga última para cada simulação efectuada, dividido pela pressão atmosférica, com o respectivo valor do parâmetro F , é possível fazer um ajuste exponencial entre os valores. Concluiu que através da curva obtida era possível determinar a capacidade de carga última para 2% do recalque relativo, para relações $H/D=0,25$; 0,5 e 1,0.

Utilizando a mesma metodologia proposta por Thomé *et al.* (2005), nas Figuras 4 a 12 são propostas as curvas para a determinação da capacidade de carga a 3% do recalque relativo, para variações H/D desde 0,0 a 4,0.

De realçar que para $H/D=0$, dado que existe apenas um estrato de solo (solo natural), a função de parâmetros F é “reduzida” para a seguinte expressão:

$$F = \ln\left(\frac{c'_2}{Pa}\right) + \frac{1}{\cos^4 \phi'_2} + \ln\left(\frac{E_2}{Pa}\right) \quad (2)$$

Onde, no caso de $H/D=0,0$, c'_2 , ϕ'_2 e E_2 representam os parâmetros do solo residual natural, não cimentado.

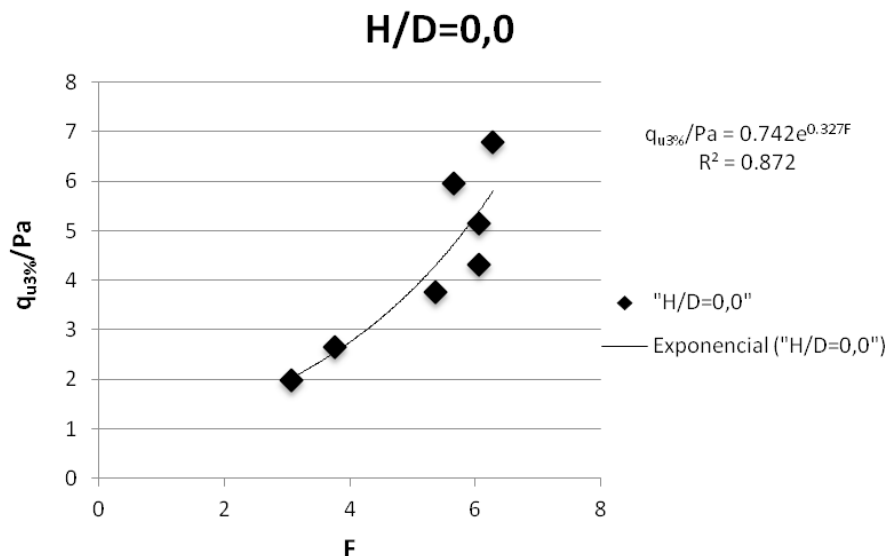


Figura 4 – Relação entre $q_{u3\%}/Pa$ x F para a relação $H/D=0,0$.

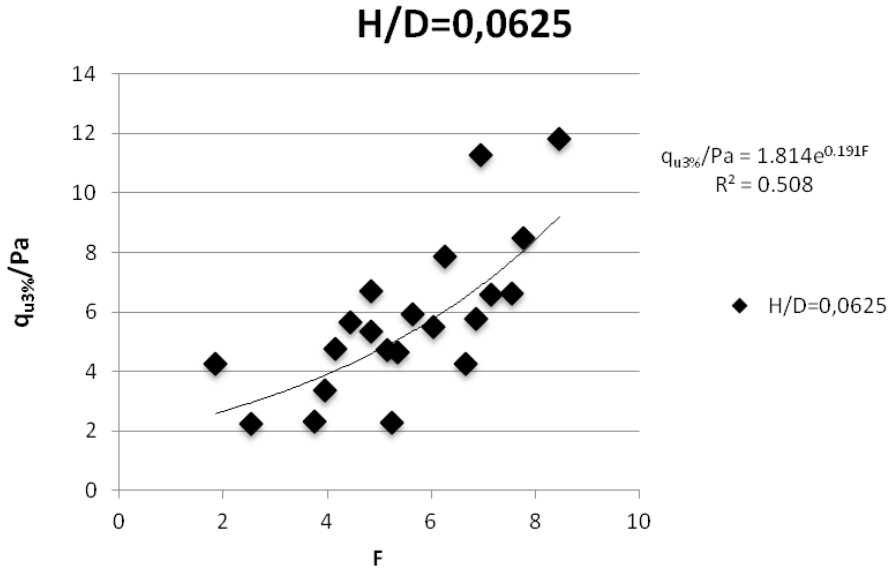


Figura 5 – Relação entre $q_{u3\%}/Pa$ x F para a relação $H/D=0,0625$.

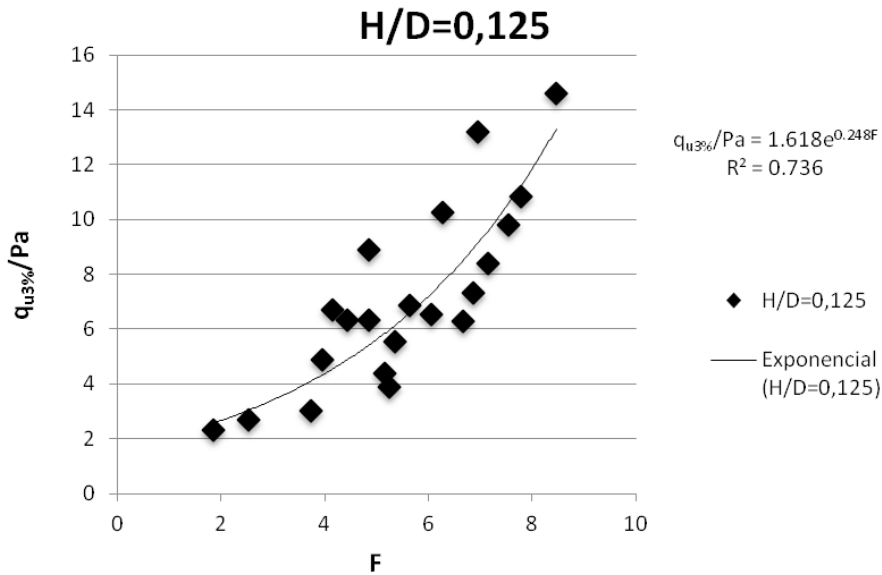


Figura 6 – Relação entre $q_{u3\%}/Pa$ x F para a relação $H/D=0,125$.

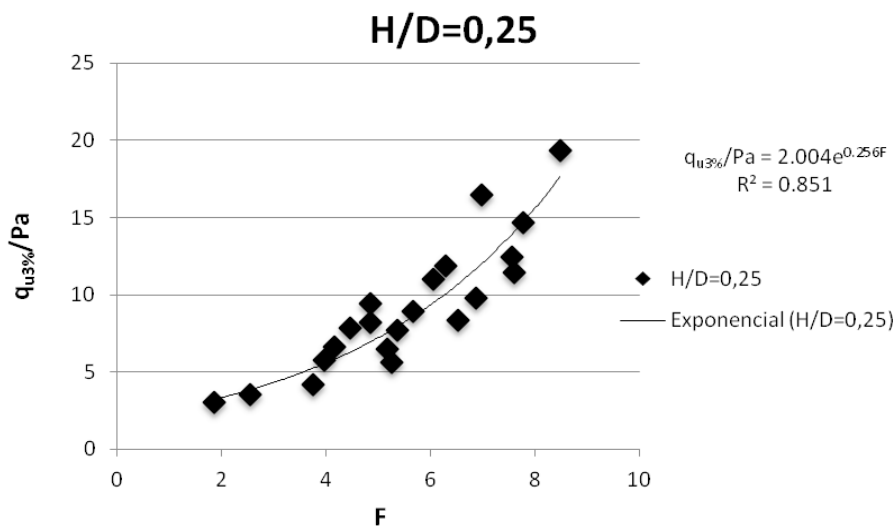


Figura 7 – Relação entre $q_{u3\%}/Pa$ x F para a relação $H/D=0,25$.

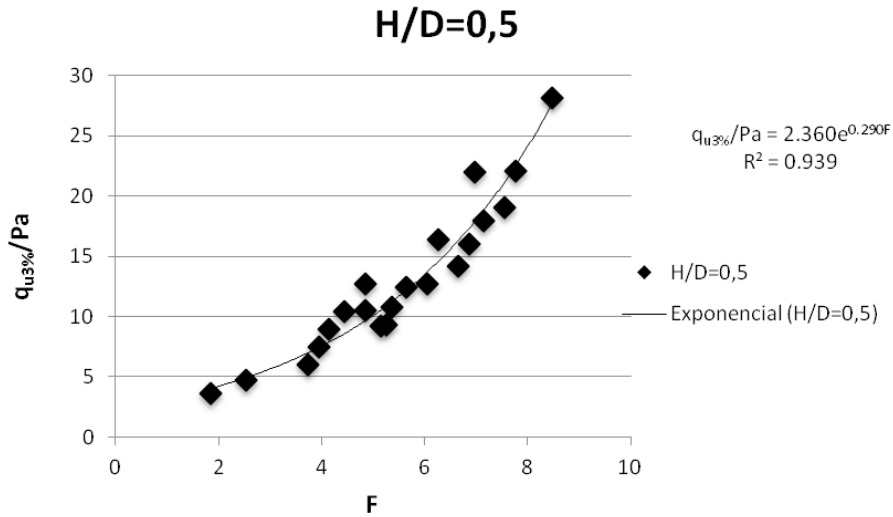


Figura 8 – Relação entre $q_{u3\%}/Pa$ x F para a relação $H/D=0,5$.

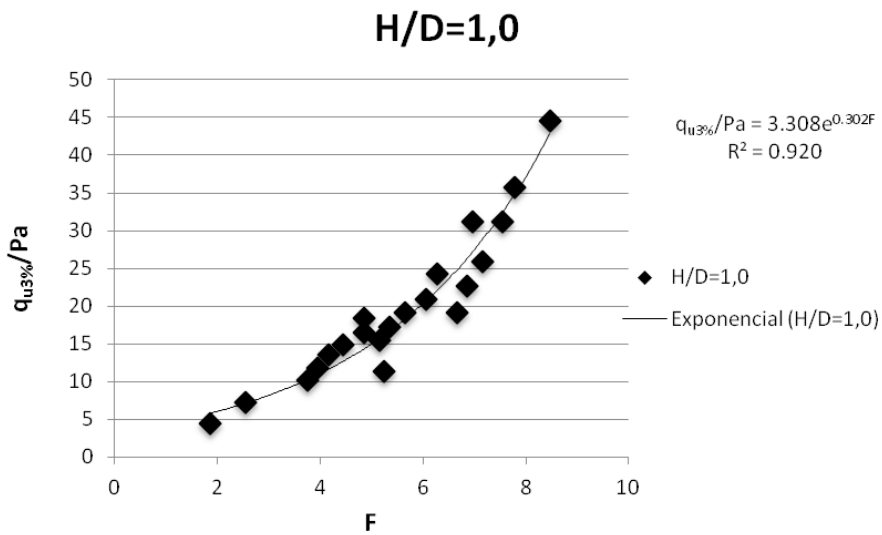


Figura 9 – Relação entre $q_{u3\%}/Pa$ x F para a relação $H/D=1,0$.

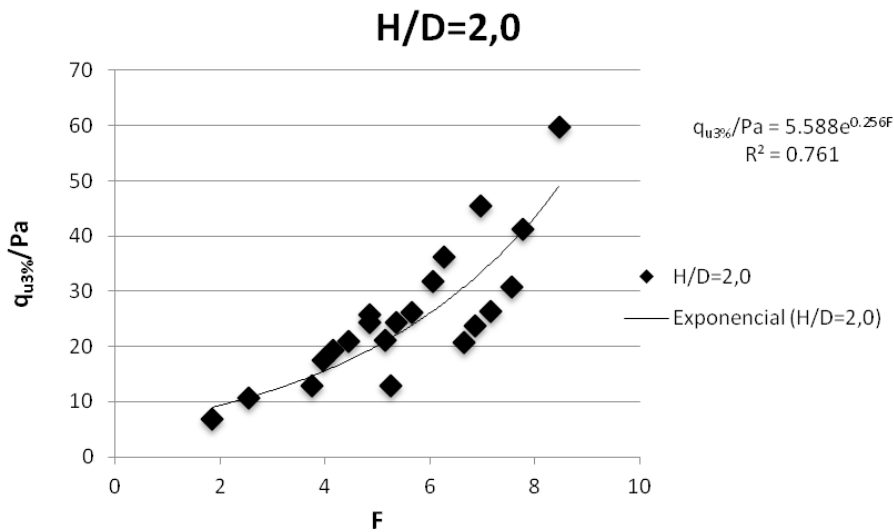


Figura 10 – Relação entre $q_{u3\%}/Pa$ x F para a relação $H/D=2,0$.

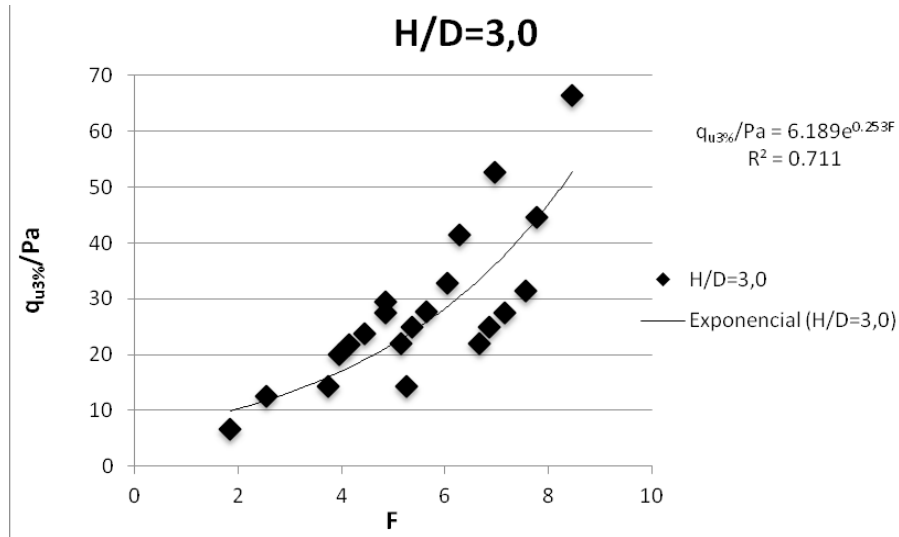


Figura 11 – Relação entre $q_{u3\%}/Pa$ x F para a relação $H/D=3,0$.

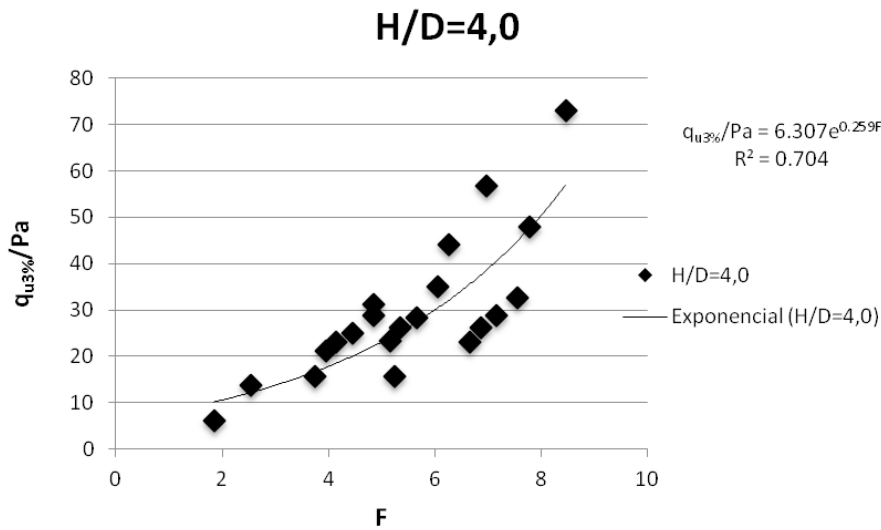


Figura 12 – Relação entre $q_{u3\%}/Pa$ x F para a relação $H/D=4,0$.

Como se pode verificar, independentemente da relação H/D , a correlação entre os valores é bastante aceitável.

Na Figura 13 estão apresentadas, em forma de ábaco, as curvas conseguidas para a obtenção da capacidade de carga a 3% do recalque, para todas as relações H/D de 0,0 a 4,0.

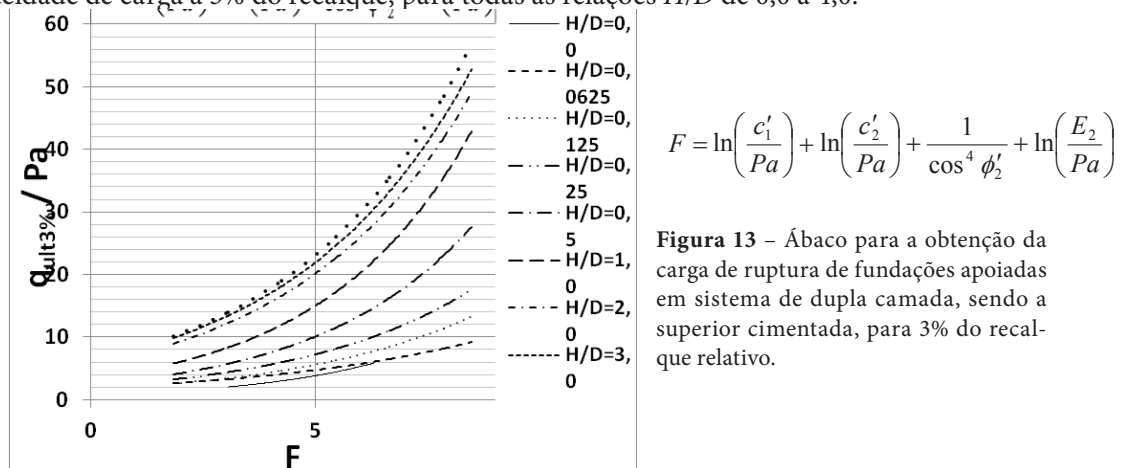


Figura 13 – Ábaco para a obtenção da carga de ruptura de fundações apoiadas em sistema de dupla camada, sendo a superior cimentada, para 3% do recalque relativo.

As equações exponenciais representativas destas curvas estão apresentadas nas equações seguintes:

Para $H/D = 0,0$,

$$\frac{q_{u3\%}}{R} = 0,742e^{0,327F} \quad (3)$$

Para $H/D = 0,0625$,

$$\frac{q_{u3\%}}{R} = 1,814e^{0,191F} \quad (4)$$

Para $H/D = 0,125$,

$$\frac{q_{u3\%}}{R} = 1,618e^{0,248F} \quad (5)$$

Para $H/D = 0,25$,

$$\frac{q_{u3\%}}{R} = 2,004e^{0,256F} \quad (6)$$

Para $H/D = 0,5$,

$$\frac{q_{u3\%}}{R} = 2,360e^{0,290F} \quad (7)$$

Para $H/D = 1,0$,

$$\frac{q_{u3\%}}{R} = 3,308e^{0,302F} \quad (8)$$

Para $H/D = 2,0$,

$$\frac{q_{u3\%}}{R} = 5,588e^{0,256F} \quad (9)$$

Para $H/D = 3,0$,

$$\frac{q_{u3\%}}{R} = 6,189e^{0,253F} \quad (10)$$

Para $H/D = 4,0$,

$$\frac{q_{u3\%}}{R} = 6,307e^{0,259F} \quad (11)$$

De forma semelhante ao postulado por Tcheng (1957), quando do seu estudo sobre fundações corridas apoiadas sobre dupla camada, sendo a camada superior composta de areia e a inferior composta de solo puramente coesivo (argila), em que verificou que a influência da camada de argila inferior torna-se sem importância para $H^3 \geq 3,5B$ (B é a largura da fundação), pode observar-se que as relações (10) e (11), respectiva-

mente para $H/D=3,0$ e $4,0$, são muito semelhantes e portanto para valores de H/D superiores a $4,0$ a camada de solo natural tem pouca influência na capacidade de carga da fundação.

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

De modo a reforçar as equações das curvas propostas (equações 3 a 11) para o dimensionamento de fundações superficiais, para 3% do recalque relativo, assentes em sistema de dupla camada, sendo a camada superior cimentada, foram comparados os resultados obtidos com os obtidos em ensaio de campo por Consoli *et al.* (2009).

A comparação foi feita através da plotagem das capacidades de carga últimas obtidas no presente trabalho numérico e as obtidas por Consoli *et al.* (2009) em ensaios de carga em placa. Nos gráficos apresentados é ajustada uma recta com início na origem e inclinação de 45° , de modo a verificar a conformidade das estimativas propostas.

Foi feita a comparação para dois tipos de estratos superiores diferentes. No primeiro caso foi utilizada uma mistura de areia compactada com cinza e cal de carbureto para o estrato superior do sistema dupla camada. No segundo caso foi utilizado como estrato superior, solo residual cimentado. A comparação dos resultados é verificada nas Figuras 14 e 15.

Conforme mostram as Figuras 14 e 15, a correlação observada entre os valores é bastante boa para o caso em que a camada superior é constituída por solo residual cimentado e razoável para a mistura com areia compactada – cinza – cal de carbureto. No primeiro caso, os valores foram comparados para as relações $H/D=0,25$, $1,0$, e $2,0$. No segundo caso, a comparação foi feita para $H/D=0,5$ e $1,0$.

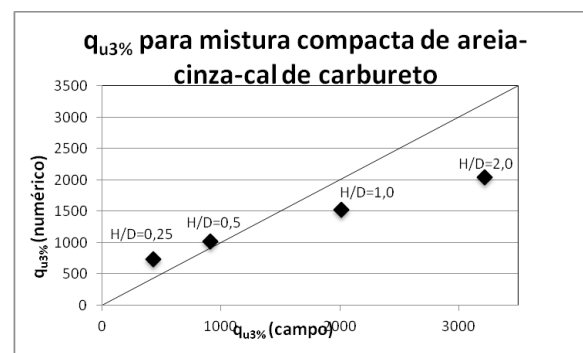


Figura 14 – Comparação dos resultados obtidos através das curvas propostas pelo presente trabalho com os obtidos em ensaios de carga em placa por Consoli *et al.* (2009) para uma mistura de areia compactada com cinza e cal de carbureto.

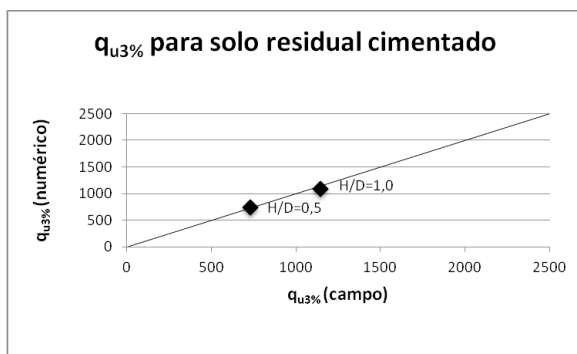


Figura 15 – Comparação dos resultados obtidos através das curvas propostas pelo presente trabalho com os obtidos em ensaios de carga em placa por Consoli *et al.* (2009) para uma mistura de solo residual com cimento.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após o estudo numérico efectuado e com base nos resultados obtidos é possível concluir que:

- ♦ A utilização de camadas artificialmente cimentadas sobre solos residuais pode ser uma boa alternativa para assentar fundações superficiais, ao invés da utilização de fundações profundas, para suportar cargas leves a moderadas.
- ♦ A resposta pressão x recalque relativo para 3% do recalque relativo é única para a mesma relação H/D.
- ♦ Mesmo para relações de H/D tão altas quanto 4,0, a presença da camada não cimentada ainda tem influência sobre a resposta pressão x recalque relativo das fundações assentes sobre sistema dupla-camada, sendo a superior cimentada.
- ♦ O valor da capacidade de carga a 3 % de recalque relativo, de fundações superficiais apoiadas em sistema de dupla camada, sendo a superior cimentada, pode ser obtido a partir da metodologia semi-emírica proposta.

AGRADECIMENTOS

Os autores desejam expressar sua gratidão à Agência Brasileira de Energia Elétrica (ANEEL – Projeto P&D CEEE-GT/UFRGS #9936455) e ao CNPq-MCT pelo suporte financeiro ao grupo de pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Burd, J., Frydman, S. (1997). Bearing capacity of plane-strain footings on layered soil. *Canadian Geotechnical Journal*, 34, 241-253.
- Consoli, N. C., Schnaid, F., Vendruscolo, M. A., Sales, L. F. P. (1998). Interpretação de provas de carga de fundações superficiais assentes em camadas de solo-cimento. *Solos e Rochas*, 21, 39-50.
- Consoli, N. C., Vendruscolo, M. A., Prietto, P. D. M. (2003). Behavior of plate load tests on soil layers improved with cement and fiber. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 129, 1, 96-101.
- Consoli, N. C., Dalla Rosa, F., Fonini, A. (2009). Plate load tests on cemented soil layers overlaying weaker soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE. 135, 12, 1846-1856.
- Cudmani, R. O. (1994). *Estudo do comportamento de sapatas assentes em solos residuais parcialmente saturados através de ensaios de placa*. (Master's thesis Engineering) Porto Alegre: Escola de Engenharia. Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 150p.
- Griffiths, D. V. (1982). Computation of bearing capacity on layered soils. *Proceedings of conference on numerical methods in geomechanics*, 1, 163-170, Edmonton.
- Hanna, A. M., Meyerhof, G. G. (1978). Ultimate bearing capacity of foundation on layered soils under inclined load. *Canadian Geotechnical Journal*, 15(4), 565-570.
- Hanna, A. M., Meyerhof, G. G. (1980). Designs charts for ultimate bearing capacity of foundation on sand overlying soft clay. *Canadian Geotechnical Journal*, 17(2), 300-303.
- Kenny, M. J., Andrawes, K. Z. (1997). The bearing capacity of footing on sand layer overlying soft clay. *Géotechnique*, 47(2), 339-345.
- Meyerhof, G. G. (1974). Ultimate bearing capacity of footings on sand layer overlying clay. *Canadian Geotechnical Journal*, 11(2), 223-229.

- Michalowski, R. L., Shi, L. (1995). Bearing capacity of footings over two-layer foundation soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, 121(5), 421-428.
- Tcheng, Y. (1957). Shallow foundation on stratified soil. Proceedings of international conference of soil mechanics and foundation engineering. *Butherworths Scientific*, 1, 449-452, London.
- Thomé, A., Donato, M., Consoli, N. C., Graham, J. (2005). Circular Footings on a Cemented Layer Above Weak Foundation Soil. *Canadian Geotechnical Journal*, 42(6), 1569-1584.
- Vésic, A. S. (1975). Bearing capacity of shallow foundations. *Foundation engineering handbook*, New York, 121-147.

ABSTRACT

It was studied by the finite element method, the behavior of shallow foundations on double layered system, when top layer is artificially cemented, with a width equal to three times the diameter of the foundation. H being the thickness of soil cement and D the diameter of the foundation, several simulations were made for various ratios H/D (from zero to 4.0). After confirmed the influence of H/D ratio in response to load x settlement surface, parametric analysis is carried out and a new methodology for design of shallow foundations on a double-layer system, with cemented top layer is proposed. Concluding, the results presented by the new method are successfully compared with field results obtained from plate load tests bearing on cemented top layers. For the engineering practice the method proposed by the curves load x settlement provides good predictions to obtain bearing capacity of shallow foundations.

Keywords: Shallow foundations, Cemented Soils, Double Layered System, Load Resistance.