DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.5/53

Determinação da superfície livre equivalente pela teoria de Meyerhof para cálculo da capacidade de carga do solo da região Oeste do Paraná

Décio Lopes Cardoso
Professor Doutor, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, Brasil, deciolc@gmail.com

Robenson Luiz Minski
Vice diretor de gestão de infraestrutura, Instituo Carlos Chagas - ICC - Fiocruz/PR, Curitiba, Brasil, infraestrutura.icc@fiocruz.br

Marivone Zanella Fank
Professora Doutora, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, Brasil, marivonefank@utfpr.edu.br

RESUMO: Este trabalho aborda a teoria de Meyerhof, estabelecendo a inclinação β da superfície livre equivalente, necessária para obter os fatores de capacidade de carga de fundações. Determinar a superfície livre equivalente de Meyerhof exige aplicar diferentes valores para a relação $\frac{D}{B}$ entre profundidade e largura da fundação. Dada a grande quantidade de cálculos necessários, foi desenvolvido um algoritmo de computador na linguagem de programação Object Pascal, tendo como variável a relação $\frac{D}{B}$. Os parâmetros de resistência ao cisalhamento, coesão e ângulo de atrito interno, do solo da região oeste do estado do Paraná foram obtidos por meio de ensaios triaxiais consolidados não drenados no Laboratório de Geotecnia da Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Os ensaios foram conduzidos nas pressões confinantes de 31 kPa, 52 kPA e 119 kPa, em corpos de prova nas dimensões 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura. Os resultados mostraram que, no solo estudado, para a relação $\frac{D}{B}$ igual a 5 o ângulo de inclinação da superfície livre equivalente é 90°, portanto, a partir dessa relação as fundações deverão ser dimensionadas como profundas.

PALAVRAS-CHAVE: fundações, capacidade de carga, Meyerhof.

ABSTRACT: This work addresses Meyerhof's theory, establishing the slope β of the equivalent free surface, necessary to obtain the bearing capacity factors of foundations. Determining Meyerhof's equivalent free surface requires applying different values to the D/B ratio between the depth and width of the foundation. Given the large number of calculations required, a computer algorithm was developed in the Object Pascal programming language, using the D/B ratio as a variable. The shear strength parameters cohesion and internal friction angle of the soil from the western region of the state of Paraná were obtained through consolidated undrained triaxial tests at the Geotechnical Laboratory of the State University of Western Paraná. The tests were conducted at confining pressures of 31 kPa, 52 kPa, and 119 kPa, on specimens with dimensions of 5 cm in diameter and 10 cm in height. The results showed that, in the soil studied, for a D/B ratio equal to 5, the angle of inclination of the equivalent free surface is 90°; therefore, based on this ratio, the foundations should be designed as deep.

KEYWORDS: foundations, load bearing capacity, Meyerhof.

1 INTRODUÇÃO

Os projetos geotécnicos são considerados em dois grupos distintos: a análise dos recalques ou deformações e a análise de estabilidade oi ruptura. Para o primeiro grupo o solo de fundações é caracterizado pelas relações tensão-deformação, empregando-se a teoria da elasticidade. Para a análise de estabilidade, verifica-se o equilíbrio limite pela teoria da plasticidade, desconsiderando a deformabilidade, pois as rupturas ocorrem com grandes deformações (BARATA, 1983).

A análise de estabilidade é abordada de forma mais precisa por Meyerhof, que representa um aperfeiçoamento da teoria de Terzaghi, considerando o atrito em toda a superfície de ruptura, não desprezando a resistência ao cisalhamento do solo acima da base da fundação. Esta teoria é amplamente aceita entre especialistas da área e vários estudos já comprovaram sua validade, conforme VELOSO e LOPES (1997).

Segundo VARGAS (1977), a teoria de ruptura de Meyerhof utiliza os parâmetros coesão e ângulo de atrito interno obtidos em ensaios triaxiais consolidados não drenados, construção do círculo de Mohr, estabelecimento da superfície de ruptura fixando-se a largura e a profundidade da fundação, permitindo finalmente calcular a tensão normal de ruptura e a capacidade de carga da fundação.

Na maioria dos casos, o traçado da superfície de ruptura se dá por meio de curvas complexas. Assim, para tratar o problema de maneira matematicamente mais simples tem-se procurado assimilar tais curvas a retas, círculos e espirais logarítmicas (HACHICH, 1996).

Uma dessas assimilações foi feita por Meyerhof no desenvolvimento de sua teoria para cálculo da capacidade de carga de fundações profundas, a qual, segundo VELOSO e LOPES (1997), generalizou a teoria de Terzaghi (TERZAGHI e PECK, 1987), não desprezando a resistência ao cisalhamento do solo que se encontra acima da base da fundação. A superfície de deslizamento intercepta a superfície do terreno no caso das fundações superficiais e está totalmente contida no solo, ou seja, nas paredes laterais do fuste no caso das fundações profundas.

Considerando a aceitação da teoria de Meyerhof e o baixo uso de fundações diretas na região oeste do estado do Paraná, esta pesquisa procurou uma maneira rápida e eficiente para a determinação da superfície de ruptura em fundações diretas com diferentes relações entre a largura base e a profundidade, por meio do desenvolvimento de um algoritmo de computador na linguagem de programação Object Pascal, tendo com variável a relação $\frac{D}{B}$.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O material de estudo é o solo de ocorrência predominante na região oeste do Paraná, de textura argilosa, classificado pedologicamente como Latossolo vermelho distroférrico e geotecnicamente como A-7-5 (17) pelo Sistema HRB e como CH pelo Sistema Unificado.

A amostragem do solo foi feita no Núcleo Experimental de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, em vala escavada de 100 cm x 100 cm x 100 cm no fundo da qual talhado e retirado um bloco nas dimensões 40 cm x 40 cm x 40 cm. O bloco amostral foi envolvido inicialmente com papel alumínio, revestido com musselina têxtil e aplicação de parafina fundida, de modo a formar uma tela de proteção para garantir a integridade da amostra. No laboratório o bloco foi mantido em câmara úmida até o momento da confecção dos corpos de prova.

Os corpos de prova foram esculpidos como cilindros de diâmetro 5 cm e altura 10 cm, garantindo a relação recomendada $\frac{D}{H} \geq 2$. Após confeccionados os corpos de prova foram envolvidos em filme PVC, papel filtro e colocados em bandejas plásticas contendo água até $\frac{2}{3}H$ para saturação.

Os ensaios triaxiais consolidados não drenados foram realizados na prensa de compressão triaxial, com deformação controlada (ASTM, 2006), e tomando-se leituras de carga em anel dinamométrico e leituras de deslocamento em LVDT (Linear Variable Differential Transformer), como mostrado na Figura 1. Foram aplicadas pressões confinantes de 32 kPa, 51 kPa e 119 kPa.

Os parâmetros de resistência ao cisalhamento coesão e ângulo de atrito interno, e a massa específica aparente do solo foram inseridos no programa computacional na linguagem Object Pascal (LIMA, 1983), cujo algoritmo foi desenvolvido especificamente para este trabalho.

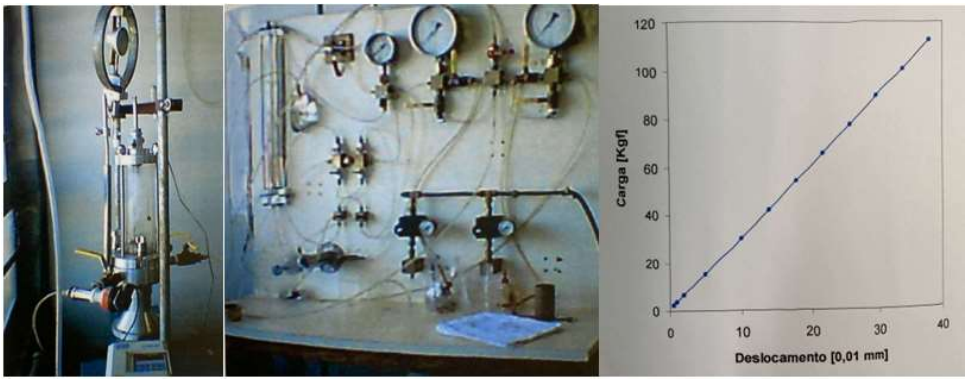


Figura 1. Prensa, painel de reversão e calibração do anel dinamométrico para os ensaios triaxiais.

Tais procedimentos culminaram na obtenção da inclinação da superfície livre equivalente de Meyerhof e no cálculo da capacidade de carga, para diferentes relações entre a largura da base e a profundidade das fundações.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos ensaios triaxiais estão mostrados na Tabela 1. Para as pressões confinantes s3 de 32 kPa, 51 kPa e 119 kPa, são mostradas as deformações axiais ε_a e as tensões principais maiores σ_1 .

Tabela 1. Resultados dos ensaios triaxiais

s3	32 kPa	s3	51 kPa	s3	119 kPa
ε_a [%]	σ_1 [kPa]	ε_a [%]	σ_1 [kPa]	ε_a [%]	σ_1 [kPa]
0,00	36,80	0,00	55,76	0,00	124,22
0,10	50,46	0,10	72,31	0,10	142,37
0,20	51,98	0,20	75,32	0,20	145,67
0,30	59,55	0,30	81,33	0,30	152,27
0,39	59,54	0,41	84,34	0,40	155,57
0,49	62,55	0,51	84,34	0,50	157,19
0,59	62,54	0,61	85,83	0,60	160,49
0,69	64,00	0,71	85,81	0,70	162,09
0,79	63,95	0,81	85,78	0,80	165,36
0,89	63,94	0,91	85,74	0,90	166,95
0,99	65,39	1,02	85,71	1,00	166,90
1,48	66,88	1,52	87,15	1,51	166,82
1,97	66,83	2,03	84,07	2,01	168,35
2,47	65,29	2,54	84,02	2,51	165,00
2,96	65,28				
3,45	63,73				
3,94	63,69				
4,44	62,43				

Os valores da Tabela 1 foram plotados em gráfico único tensão-deformação mostrado na Figura 2.

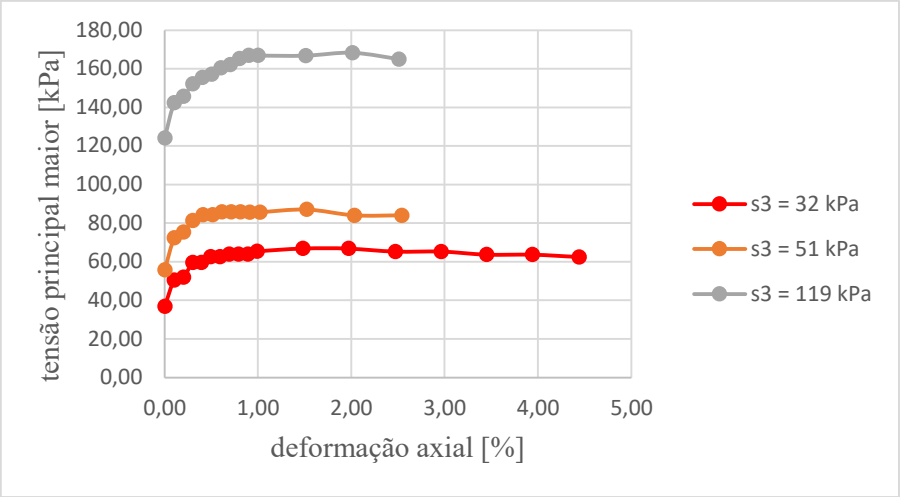


Figura 2. Curvas tensão-deformação dos ensaios triaxiais CU.

O ponto de maior ordenada de cada curva corresponde à tensão principal maior na ruptura (σ_{1f}). Os valores correspondentes às tensões principais menores (pressões confinantes) e às tensões principais maiores na ruptura são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Tensões principais menores e tensões principais maiores na ruptura

tensão principal menor s3 [kPa]	tensão principal maior na ruptura σ_{1f} [kPa]
32	66,88
51	87,15
119	168,35

Os pares ordenados foram plotados no diagrama Tau-Sigma para traçado dos círculos de Mohr e da envoltória de ruptura do solo, como mostrado na Figura 3.

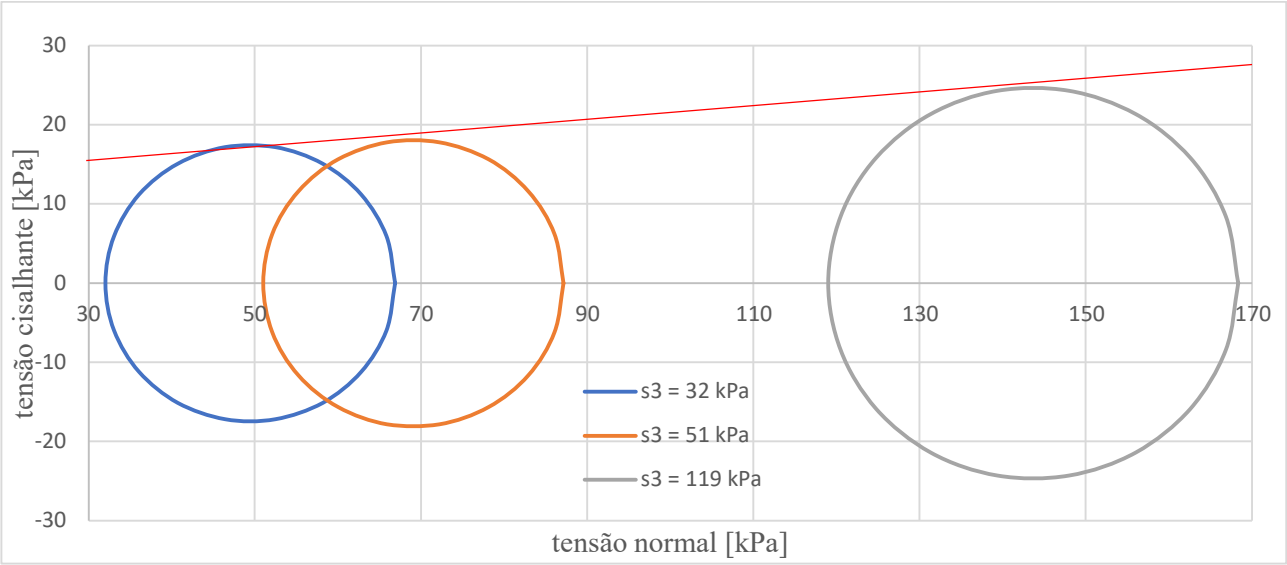


Figura 3. Círculos de Mohr e envoltória de ruptura do solo.

O intercepto da reta envoltória com o eixo das tensões cisalhantes corresponde à coesão c do solo, e o ângulo de inclinação dessa reta corresponde ao ângulo de atrito interno ϕ do solo. Tais parâmetros foram medidos como 14,26 kPa e 3,62°, respectivamente.

Outro parâmetro necessário como input no algoritmo é a massa específica aparente do solo, a qual foi determinada medindo-se o diâmetro e a altura de um corpo de prova e calculando a relação entre a massa e o volume do corpo de prova. Tal procedimento forneceu os seguintes resultados:

corpo de prova para s3 = 32 kPa: $\gamma = 1{,}74\ g/cm^3$
corpo de prova para s3 = 51 kPa: $\gamma = 1{,}66\ g/cm^3$
corpo de prova para s3 = 119 kPa: $\gamma = 1{,}80\ g/cm^3$

Na programação feita na linguagem Object Pascal estipulou-se valores para a profundidade D e para a largura B da base da fundação, e tendo os parâmetros do solo coesão c, ângulo de atrito interno ϕ e massa específica γ, já previamente inseridos no programa, este calcula a inclinação β da superfície livre equivalente de Meyerhof e finalmente a capacidade de carga σ_c da fundação.

Na Figura 4 é mostrada a tela do programa para a última iteração realizada, a qual forneceu o ângulo de inclinação de 89,91°. O valor limitante não pode ser 90°, pois o algoritmo encontraria uma singularidade matemática.

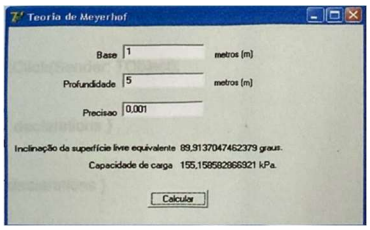


Figura 4. Tela de entrada de dados e impressão dos resultados.

Os resultados da execução do programa são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Resultados da execução do programa Object Pascal

relação da fundação D/B	inclinação da superfície livre equivalente β [°]
0,25	3,15
0,5	6,30
0,75	9,44
1,00	12,58
1,25	15,74
1,50	18,93
1,75	22,16
2,00	25,44
2,25	28,78
2,50	32,2
2,75	35,73
3,00	39,38
3,25	43,19
3,50	47,21
3,75	51,49
4,00	56,14
4,25	61,32
4,50	67,33
4,75	74,98
5,00	89,91

As coordenadas da Tabela 3 foram plotadas na Figura 5.

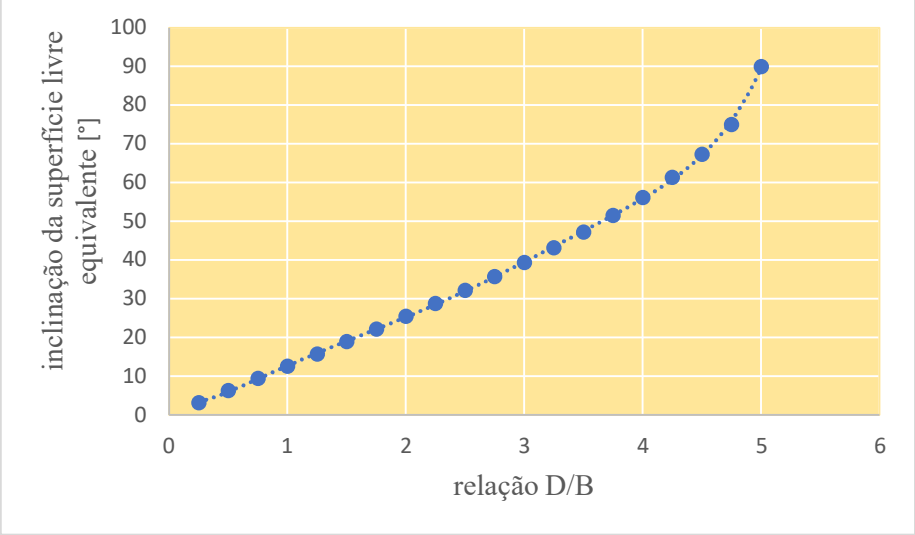


Figura 5. Inclinação da superfície livre equivalente de Meyerhof.

Observa-se comportamento exponencial para a curva, o que significa que para grandes variações iniciais da relação da fundação há pouco acréscimo no ângulo de inclinação. Por exemplo, o intervalo de relação entre 0,25 e 4 correspondente a 80 % do total ocorrem 56,14 % da inclinação, e os restantes 20 % do intervalo, de 4 a 5, ocorrem 33,77 % da inclinação.

A curva mostra ainda que, para o solo estudado, a relação $\frac{D}{B}$ igual a 5 delimita a fronteira entre fundações diretas e fundações profundas.

Os resultados do cálculo da capacidade de carga da fundação são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4. Capacidade de carga da fundação

B [m]	D [m]	σ_c [kPa]
1,0	0,5	97,00
1,5	1,0	104,42
1,5	1,5	113,04
2,0	1,5	111,07
2,5	2,0	117,42
3,0	2,0	116,38
3,5	2,5	122,72
4,0	3,0	128,95
4,5	3,0	128,33
5,0	3,5	134,55

4 CONCLUSÃO

O algoritmo desenvolvido para aplicação da teoria de Meyerhof para cálculo da capacidade de carga de fundações do solo da região oeste do estado do Paraná apontou a relação $\frac{D}{B}$ igual a 5 como valor que delimita a fronteira entre fundações diretas e fundações profundas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM International (2006). ASTM D2166: Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil.

Barata, F.E. (1983) Propriedades mecânicas dos solos. Rio de Janeiro: Livros técnicos e científicos LTDA, 1983.

Hachich, W. Fundações – teoria e prática. São Paulo: Pini, 1996.

Lima, V.L.S. Linguagem Pascal. Rio de Janeiro: Campus, 1983.

Meyerhof, G. G. The ultimate bearing capacity of foundations. Géotechnique, v. 2, n. 4, p. 301-332, 1951.

Terzaghi, K., Peck, R.B. (1948) Soil Mechanics in Engineering Practice, 2nd ed., McGraw Hill, New York, NY, USA, 685 p.

Vargas, M. Introdução à mecânica dos solos. São Paulo: Mcgraw-Hill do Brasil, Ed. USP, 1977.

Velloso, D. e Lopes, F.R. Fundações. 2ª edição. Rio de janeiro: COPPE/UFRJ, 1997.