Capacidade de Carga - Sapatas

O cálculo da capacidade de carga, que no caso de fundações superficiais é a tensão de ruptura, depende das características do maciço de solo, da geometria do elemento de fundação e de sua profundidade de assentamento. Define-se então a tensão de ruptura ou capacidade de carga do sistema sapata-solo pela nomenclatura .

A tensão admissível do solo é obtida introduzindo-se fatores de segurança sobre a tensão de ruptura. Cada método de cálculo / autor possui seu conjunto de fatores.

A NBR 6122:1996 menciona quatro critérios que podem ser usados para a determinação da tensão admissível (σ_a):

1 - Métodos teóricos: teoria de TERZAGHI com fatores de VESIC ou outros;

2 - Prova de Carga: baseado na curva de carga-recalque;

3 - Métodos semi-empíricos: para fundação profunda, tendo-se os métodos de Aoki-Velloso, Décourt-Quaresma, etc.;

4 - Métodos Empíricos: Tabela das Tensões Básicas na NBR 6122/96 ou outras correlações (SPT).

No SISEs foram implementados os três seguintes métodos de cálculo de tensão admissível para fundações superficiais:

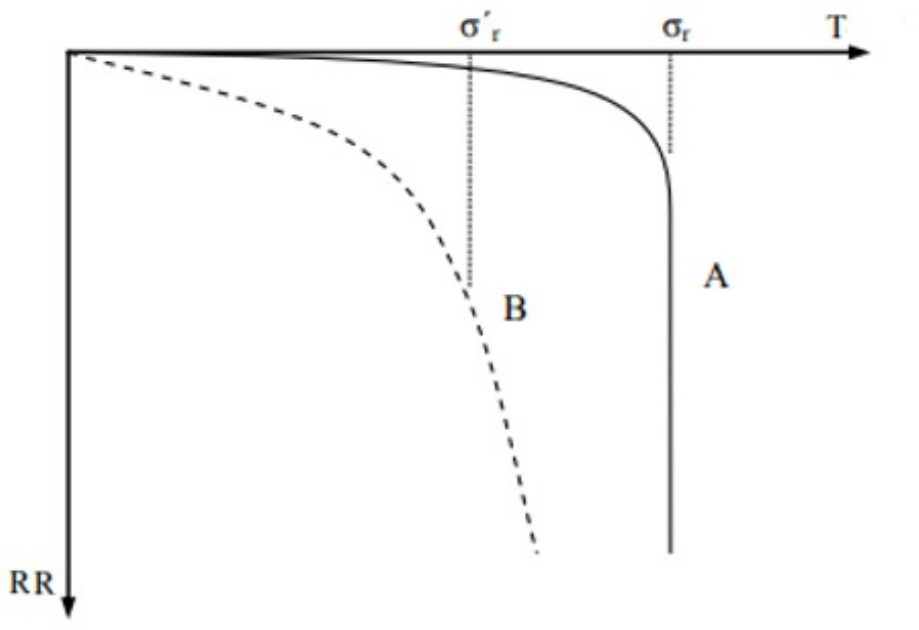
1 - Formulação Teórica por TERZAGHI & VESIC;

2 - Tabelas de Tensões Básicas da NBR 6122/96;

3 - Correlação Empírica por SPT.

Formulação Teórica de TERZAGHI e VESIC

Esta formulação foi desenvolvida por TERZAGHI (1943), onde se calcula a tensão de ruptura do solo. Nela o solo pode romper mediante dois modos: ruptura geral (ou generalizada) e ruptura local:



T=Tensão
RR=Recalque Relativo
Figura 3.1 – Curvas típicas tensão x recalque (TERZAGHI, 1943).

Caso o solo seja compacto ou rijo, tem-se a ruptura geral do maciço de solo, caracterizada por uma ruptura brusca

com pequenos recalques iniciais (Curva A). Este modelo de ruptura é empregado para areias compactas ou argilas rijas, e a expressão baseada na teoria da elasticidade é dada por:

$$\sigma_R = c \cdot N_c \cdot S_c + q \cdot N_q \cdot S_q + 0{,}5 \cdot \gamma \cdot B \cdot N_\gamma \cdot S_\lambda$$

Caso o solo seja fofo ou mole, então se tem a dita ruptura local, caracterizada pelo constante aumento de recalques, sem que haja um ponto de ruptura brusca do solo (Curva B). Este modelo de ruptura é empregado para as areias fofas e argilas moles, sendo a expressão proposta por TERZAGHI (1943):

$$\sigma_R = c^{'} \cdot N_c^{'} \cdot S_c + q \cdot N_q^{'} \cdot S_q + 0{,}5 \cdot \gamma \cdot B \cdot N_\gamma^{'} \cdot S_\lambda$$

Para ambas as formulações, temos:

S_c , S_q , S_γ : fatores de forma, Tabela 3.1;

γ : peso específico do solo, Tabela 3.2;

ϕ: ângulo de atrito interno do solo, Tabela 3.3;

c : coesão do solo, Tabela 3.4;

N_c ,N_q N_γ $N_c^{'}$,$N_q^{'}N_\gamma^{'}$: fatores de capacidade carga, ver Figuras 3.2 e 3.3;

$q_j = \sum_{i=1}^{j} \gamma_i \cdot h_i$: sobrecarga na cota de assentamento da fundação (em FL-2);

: distância da superfície do solo até a cota de assentamento da fundação;

c' = (2/3).c;

$tg\phi^{'} = (\frac{2}{3}) \cdot tg\phi \cdot$

B: menor dimensão da sapata.

Sapata	Sc	Sq	S
Corrida (L/B>5)	1,0	1,0	1,0
Circular	1,2	1,0	0,6
Retangular	1,2	1,0	0,8

Tabela 3.1 – Fatores de forma (TERZAGHI & PECK, 1967).

Descrição do solo	Compacidade/Consistência	Peso Específico (tf/m³)	
		Natural	Saturado
Areia	Fofa (SPT≤4)	1,8	2,0
Areia	Pouco compacta (4<SPT≤8)	1,8	2,0
Areia	Mediana/ compacta (8<SPT≤18)	1,9	2,1
Areia	Compacta (18<SPT≤40)	1,9	2,1

Areia	Muito Compacta (40<SPT)	1,9	2,1
Areia	Conforme SPT	*	*
Argila	Mole (SPT≤5)	1,7	1,7
Argila	Média (5<SPT≤10)	1,8	1,8
Argila	Rija (10<SPT≤19)	1,9	1,9
Argila	Dura (19<SPT)	2,2	2,2
Argila	Conforme SPT	*	*
Pedregulho	Limpo	1,6	2,0
Pedregulho	Grosso anguloso	1,8	2,1
Silte	Muito argiloso	1,7	1,7
Silte	Argiloso	1,8	1,8

Tabela 3.2 – Peso específico do solo

Descrição do solo	Compacidade/Consistência	Ângulo de atrito (graus)
Areia	Fofa (SPT≤4)	30
Areia	Pouco compacta (4<SPT≤8)	32,5
Areia	Mediana/ compacta (8<SPT≤18)	32,5
Areia	Compacta (18<SPT≤40)	35
Areia	Muito Compacta (40<SPT)	40
Areia	Conforme SPT	*
Areia	Conforme SPT (Teixeira, 1996)	*
Argila	Mole (SPT≤5)	17,5
Argila	Média (5<SPT≤10)	20
Argila	Rija (10<SPT≤19)	25
Argila	Dura (19<SPT)	30
Argila	Conforme SPT	*
Pedregulho	Limpo	37,5

Pedregulho	Grosso anguloso	40
Silte	Muito argiloso	20
Silte	Argiloso	27,5

Tabela 3.3 – Ângulo de atrito interno

Descrição do solo	Compacidade/Consistência	Coesão (tf/m²)	
		Efetiva	Não-Drenada
Areia	Fofa (SPT≤4)	0,0	0,0
Areia	Pouco compacta (4<SPT≤8)	0,0	0,0
Areia	Mediana/ compacta (8<SPT≤18)	0,0	0,0
Areia	Compacta (18<SPT≤40)	0,0	0,0
Areia	Muito Compacta (40<SPT)	0,0	0,0
Areia	Conforme SPT	*	*
Argila	Mole (SPT≤5)	1,0	1,75
Argila	Média (5<SPT≤10)	2,0	3,75
Argila	Rija (10<SPT≤19)	2,5	7,5
Argila	Dura (19<SPT)	2,5	45
Argila	Conforme SPT	*	*
Pedregulho	Limpo	0,0	0,0
Pedregulho	Grosso anguloso	0,0	0,0
Silte	Muito argiloso	1,0	1,75
Silte	Argiloso	0,0	3,0

Tabela 3.4 – Valores de coesão do solo

OBS.: os valores com o caractere (*) presentes nas tabelas são utilizados como codificação interna do programa para o cálculo da capacidade de carga.

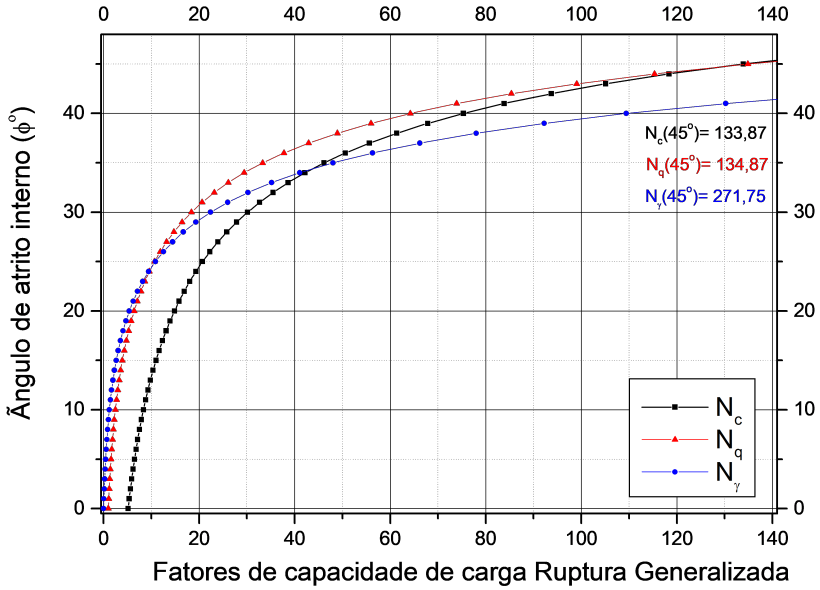


Figura 3.2 – Fatores de capacidade de carga Ruptura Generalizada

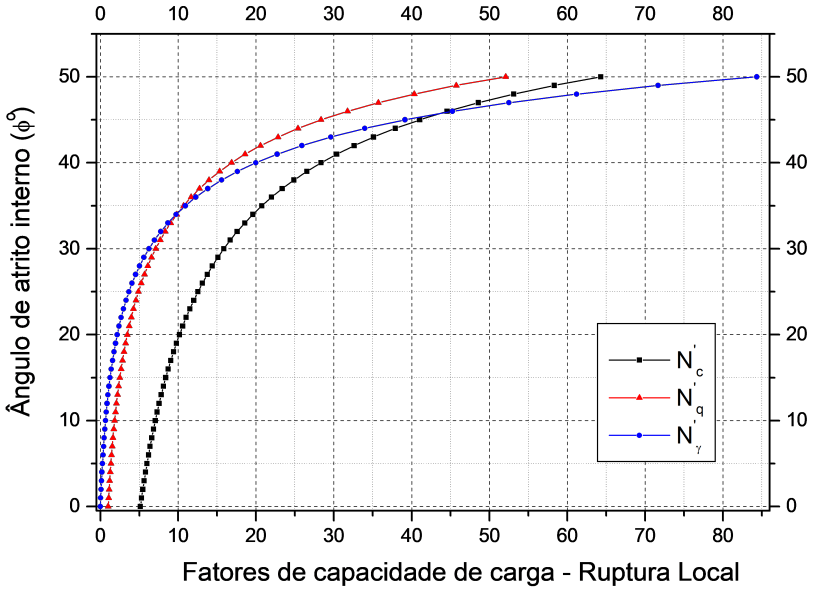


Figura 3.3 – Fatores de capacidade de carga Ruptura Local

Para o cálculo da Tensão Admissível, utilizam-se fatores de segurança sobre a tensão de ruptura:

$$\sigma_a \leq \frac{\sigma_r}{FS}$$

O valor de r é obtido conforme as equações de TERZAGHI e VESIC e usando as tabelas e figuras anteriores tanto para a ruptura geral como para a ruptura local. O valor de FS (fator de segurança) é indicado de acordo com a NBR 6122:1996:

Condição	Coeficiente de segurança
Tensão de ruptura de fundações superficiais	3,0
Capacidade de carga de estaca ou tubulões sem prova de carga	2,0
Capacidade de carga de estaca ou tubulões com prova de carga	1,6

Tabela 3.5 – Coeficientes de segurança globais mínimos – NBR 6122:1996

Ainda conforme a NBR 6122, os valores de coesão e ângulo de atrito, utilizados para a determinação da capacidade de carga do solo tem que ser reduzidos por coeficientes de ponderação:

Parâmetro	Coeficiente de ponderação
Tangente do ângulo de atrito interno	1,4
Coesão para capacidade de carga de fundações	1,6
Coesão para estabilidade e empuxo de terra	1,5

Tabela 3.6 – Coeficientes de ponderação das resistências – NBR 6122:1996

Observações

i) Para alguns tipos de compacidade ou consistência do solo, não há valores válidos neste método, assim no SISEs admitiu-se as seguintes relações:

Areia: fofa, pouco compacta e medianamente compacta, define-se como AREIA FOFA;

Areia: compacta e muito compacta, define-se como AREIA COMPACTA;

Argila: muito mole, mole e média, define-se como ARGILA MOLE;

Argila: rija e dura, define-se como ARGILA RIJA.

ii) O ângulo de atrito pode ser obtido conforme indicado por TEIXEIRA (1996), que propõe a seguinte expressão para o cálculo do ângulo de atrito interno para solo granular (areia):

$$\phi \cong 15° + \sqrt{20 \cdot NSPT}$$

iii) O termo “Conforme SPT” definido em várias tabelas do SISEs, quando escolhido pelo usuário nos “Arquivos de Critérios”, indica que o programa associa automaticamente o valor do número de golpes (SPT) da cota de assentamento, buscado no arquivo de sondagens, com o tipo de solo da tabela em questão.

Como exemplo, suponha essa escolha para a obtenção do “Peso específico do solo”, tabela 3.2. Se a cota de assentamento da fundação possui solo tipo areia com SPT de valor 10 acima no Nível de água, então o SISEs emprega o valor de 1,9 tf/m³ para o solo.

Tabela de Tensões Básicas da NBR 6122:1996

Em função do tipo de solo da camada, retira-se o valor da tensão básica conforme apresentado na Tabela 4 da NBR 6122:1996, ou na tabela 3.7 abaixo.

A tensão admissível neste caso é dada para sapatas por:

$$\sigma_a = \sigma_0^{'} + q \leq 2{,}5 \cdot \sigma_0$$

onde q é a sobrecarga efetiva até o nível de apoio do elemento de fundação, σ_0 é retirado da tabela 3.7 e $\sigma_0^{'}$ leva em conta as correções necessárias e indicadas a seguir.

Descrição do tipo de solo **	σ_0 (MPa)
Rocha sã, maciça, sem laminação	3,0
Rocha laminada, com pequenas fissuras	1,5
Solos granulares concrecionados, conglomerados	1,0
Pedregulho fofo	0,3
Pedregulho compacto a muito compacto	0,6
Argila dura (SPT >19)	0,3
Argila média (6 $\leqslant$ SPT $\leqslant$ 10)	0,1

Argila rija($11 \leqslant$ SPT $\leqslant 19$)	0,2
Areia muito compacta (SPT >40)	0,5
Areia compacta ($19 \leqslant$ SPT $\leqslant$ 40)	0,4
Areia med. compacta ($9 \leqslant$ SPT $\leqslant 18$)	0,2
Silte muito compacto (ou duros)	0,3
Silte compactos (ou rijos)	0,3
Silte médio (medianamente compacto)	0,1

** valores válidos para largura de , em outros casos deve-se fazer correção

Tabela 3.7 – Valores das Tensões básicas (NBR 6122:1996)

Os valores da tabela de tensões básicas devem ser modificados em função das dimensões e da profundidade do elemento de fundação, além do tipo de solo, conforme prescrições da NBR 6122:1996, veja as prescrições para correção nos itens 3.2.1 e 3.2.2.

Prescrição Especial para Solos Granulares

Se solo abaixo até 2 vezes a largura da cota de apoio do elemento de fundação é do tipo (solo granular e areias), corrige-se a tensão básica em função de sua largura (B), de duas maneiras:

1 - Construções não sensíveis a recalques,

Realiza-se uma redução proporcional à menor largura da fundação, com o uso da expressão:

$$\sigma_0^{'} = \sigma_0 \left[1 + \frac{1,5}{8}(B-2) \right] \leq 2,5 \cdot \sigma_0 \quad (B \leq 10m)$$

2 - Construções sensíveis a recalques

Caso B > 2m, a NBR 6122/96 recomenda fazer uma verificação dos eventuais efeitos de recalques. Não se corrige as tensões básicas.

Caso B < 2m, emprega-se a redução proporcional indicada em “Construções não sensíveis a recalques”.

Dentro do SISEs, no arquivo de critérios de projeto, é possível definir se a construção é sensível ou não a recalques, conforme indicação do usuário (default: é sensível a recalque).

Prescrição Especial para Solos Argilosos

Para solos que sejam argilosos (conforme definido pelo usuário em sondagem), devem-se reduzir os valores da

tabela com a expressão:

$$\sigma_0^{'} = \sigma_0 \cdot \sqrt{\frac{10}{A}}$$

A: área da fundação (A $\geq$ 10 m²).

Esta redução pode ser rigorosa em alguns casos, e no SISEs, seguindo recomendações indicadas na versão anterior da norma de Fundações, caso este valor reduzido seja menor que a metade do valor da tabela, usa este último como redução:

$$\sigma_0^{'} = \sigma_0 \cdot \sqrt{\frac{10}{A}} \leq \sigma_0 / 2$$

Correlação Empírica por SPT

Este método é muito aplicado no meio técnico, onde o valor médio do SPT considerado é a média dos valores dentro do bulbo de pressões, estimado até uma distância de 2 vezes a largura da sapata (Figura 3.4).

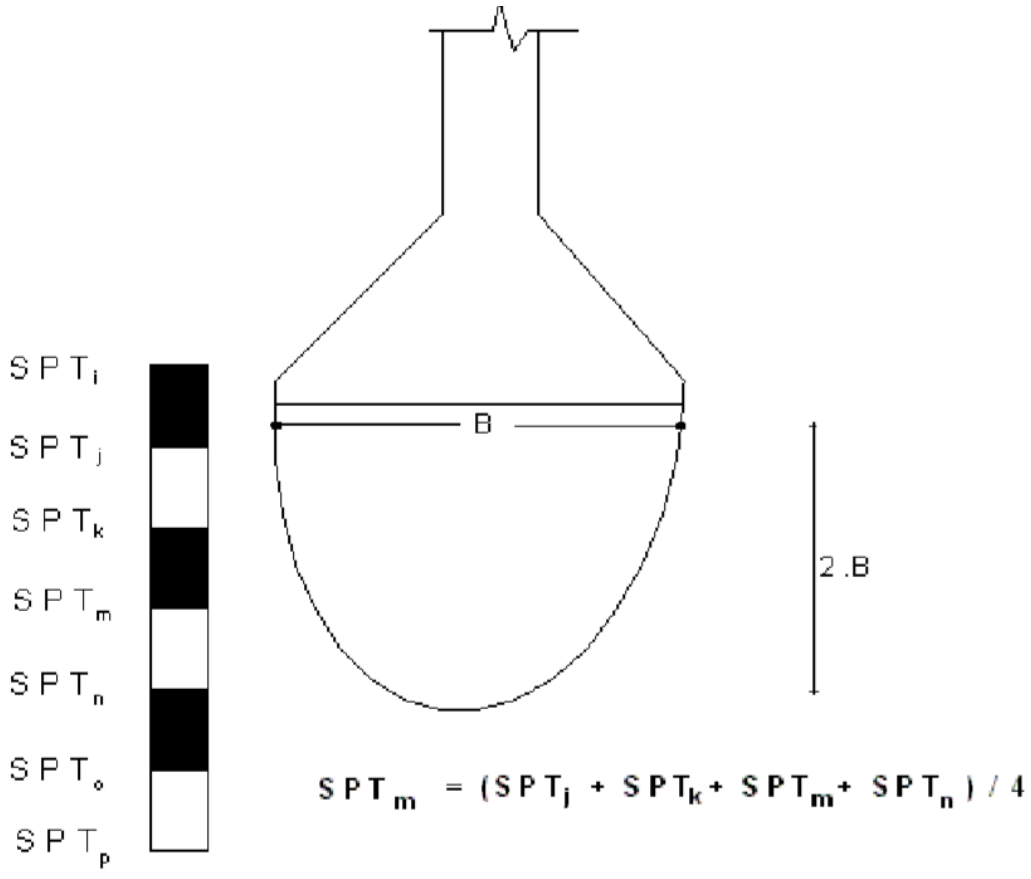


Figura 3.4 – Cálculo do SPT médio dentro do bulbo de pressões

A relação da tensão admissível é dada por:

$$\sigma_a = \frac{SPT_m}{5{,}0} + q \quad (kgf/cm^2)$$

com

$$5 \leq SPT_m \leq 20$$

onde q é sobrecarga efetiva no nível de apoio do elemento de fundação.

A recomendação do intervalo do SPT_m não é seguida no SISEs, sendo aplicado a relação anterior para quaisquer valor.

Observações

Essas observações servem tanto para os elementos de fundação rasas (sapatas/radiers) como para os tubulões.

Conforme SPT

Nos arquivos de critérios as tabelas que se referem ao item 'Conforme SPT" indica que, para cada metro da sondagem, o SISEs associa o valor do SPT desta cota com os valores de compacidade (areia) ou consistência (argila) mediante a relação clássica que é reproduzida na tabela seguir.

Desta forma, em função do tipo de areia ou argila associado ao SPT, busca-se o valor, quer na tabela de peso específico, de coesão, de tensões básicas, etc.

Compacidade	Intervalo do SPT
Areia fofa	SPT ≤ 4
Areia pouco compacta	4 < SPT ≤ 8
Areia medianamente compacta	8 < SPT ≤18
Areia compacta	18 < SPT ≤40
Areia muito compacta	SPT > 40
Consistência	
Argila muito mole	SPT ≤ 2
Argila mole	2 < SPT ≤ 5
Argila média	5 < SPT ≤ 10
Argila rija	10 < SPT ≤19
Argila dura	SPT > 19

Tabela 3.8 – Relação entre SPT com compacidade e consistência

Sobrecarga q

No cálculo da tensão admissível por um dos métodos descritos anteriormente, a sobrecarga q é obtida mediante o somatório dos efeitos do peso próprio em cada camada acima da cota de assentamento da fundação, onde o SISEs busca automaticamente os pesos específicos na tabela 3.2, conforme SPT de cada cota.

Método de Cálculo Adotado

No arquivo de critérios, o usuário define o método de cálculo das tensões admissíveis, clicando em "Capacidade de Carga", podendo ser 1, 2 e até 3 escolhas, para o caso de fundação superficial ou 1 e 2 procedimentos para o caso de tubulão.

Além desses métodos de cálculo descritos, é possível também que o usuário imponha um valor de tensão admissível, devendo ser em kgf/cm², nessa mesma tela de "Arquivos de Critérios" o qual valerá para todos os elementos de fundação do mesmo tipo.

Ou dentro do "Editor de Fundação" da pasta infra, definir um valor de tensão admissível para cada elemento de fundação de forma independente.

Com esses valores de tensões admissíveis, o SISES, após a geração e processamento e a emissão de resultados, apresenta relatórios comparando-os com as tensões atuantes em cada ponto da fundação para cada um dos casos de cálculo adotados.

Relatórios de Tensão

A impressão dos resultados comparativos de tensões admissíveis com atuantes segue a seguinte etapas:

Cada elemento de fundação (EF) conduz a um σ_a, denominado de Tensão Admissível Local;

Determina-se uma tensão admissível representativa para toda a obra (σ_a mínimo) – denominado de Tensão Admissível Global; o qual é calculado para cada método escolhido tomando-se o menor valor dentre todos os EF de um mesmo tipo da obra.

Calcula-se a porcentagem de área de cada EF que está acima da tensão admissível local e global.

Calcula-se a tensão média aritmética atuante que é comparada com TAL e TAM.