

## Recalques em Estacas

### Teoria da Elasticidade

A estimativa de tensões e recalques em um ponto no interior do solo, induzido por uma estaca sob carregamento vertical é um problema altamente complexo que envolve vários aspectos como: a interação solo-elemento de fundação, a deformação do solo, a deformação do próprio elemento de fundação, a mudança nas características do solo e das tensões originais, decorrentes da instalação da estaca. Para se proceder ao cálculo da parcela  $\delta_s$  (recalque na base da estaca) deve-se adotar um modelo matemático representativo do comportamento do solo.

Segundo VESIC (1975) pode-se lançar mão de três modelos:

- a) Função de transferência de carga (curvas  $t - z$ );
- b) Solução analítica do meio elástico semi-infinito, isótropo, homogêneo, caracterizado pelo módulo de elasticidade ( $E_s$ ) e pelo coeficiente de Poisson ( $\nu$ );
- c) Uso de um modelo numérico: Elementos finitos, Elemento de Contorno, Volumes Finitos, etc.

A adoção do primeiro tipo - que os apoios que o solo oferece são substituídos por molas de rigidez conhecida e obedecendo a lei reológica expressa pela função de transferência de carga; faz crer que um ponto só se desloca se ali for aplicada uma carga. Na realidade, pontos distantes do local carregado, também sofrem deslocamentos, devido à continuidade do meio. Essa continuidade do meio é melhor representado pelos modelos b e c, sendo este ultimo de aplicação pouco difundida devido à dificuldade e alto custo computacional para modelar e analisar o maciço de solo, principalmente levando-se em conta a interação com a super e a infra-estrutura.

A solução de recalques de um grupo de estacas imersas em solo foi apresentada em AOKI & LOPES (1975), como uma extensão de VESIC (1975), através da superposição dos efeitos de cargas no interior do solo utilizando a solução de MINDLIN (1936), segundo o qual as cargas que um grupo de estacas transmite ao terreno são discretizadas em um sistema estaticamente equivalente de cargas concentradas, cujos efeitos são superpostos nos pontos em estudo.

Para o cálculo de recalque imediato, utilizam-se as equações de MINDLIN (1936), considerando o solo como elástico semi-infinito, embora o solo não seja um material perfeitamente elástico, homogêneo e isótropo. Esta equação onde a carga está aplicada em profundidade fornece as expressões das tensões verticais e seus correspondentes recalques. O SISEs aborda apenas a expressão de recalque vertical  $r_z$ .

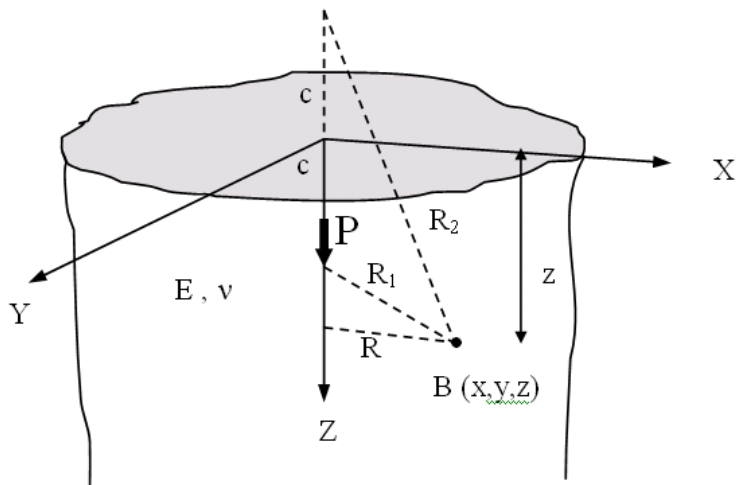


Figura 11.1 – Meio elástico semi-infinito, MINDLIN (1936).

O recalque na profundidade z no ponto B devido a carga pontual P é:

$$r_z = \frac{P(1+\nu)}{8\pi E(1-\nu)} \left[ \frac{3-4\nu}{R_1} + \frac{8(1-\nu)^2 - (3-4\nu)}{R_2} + \frac{(z-c)^2}{R_1^3} + \frac{(3-4\nu)(z+c)^2 - 2cz}{R_2^3} + \frac{6cz(z+c)^2}{R_2^5} \right]$$

onde:

$$R_1 = \sqrt{R^2 + (z-c)^2}$$

$$R_2 = \sqrt{R^2 + (z+c)^2}$$

$\nu$  = Coeficiente de Poisson

E = módulo de deformabilidade do solo, ou módulo de elasticidade;

P = carga aplicada dentro do meio contínuo;

B (x,y,z) é o ponto em estudo, onde se quer saber o recalque  $r_z$ .

Para o SISEs, são considerados dois modelos para cálculo do recalque para um certo ponto do maciço, o primeiro que apenas leva em consideração a influência das estacas contidas no mesmo bloco, denominado “sem efeito de grupo” e o segundo – denominado de “com efeito de grupo”- que leva em consideração a influência de todas as estacas do projeto, este último mais geral, mas também que demanda um tempo computacional bem maior que o primeiro modelo.

## Recalque sem efeito de grupo

Para o cálculo dos recalques da ponta de uma estaca i, a parcela das forças laterais e de ponta desta estaca têm, muitas vezes, mais influencia do que as forças advindas de outras estacas. Assim, este modelo leva apenas e consideração este efeito local. Uma grande vantagem deste é o baixo custo computacional, uma vez que não é necessário avaliar a influência de todas as estacas para o cálculo deste recalque na estaca i. Assim, para um bloco

que contem um total de “Nestacadobloco” estacas, a base da estaca  $i$  pode se deslocar devido às cargas aplicadas ao longo do fuste  $Q(z)$  e ou da ponta  $P_p$ . De acordo com Vesic (1975) pode-se escrever:

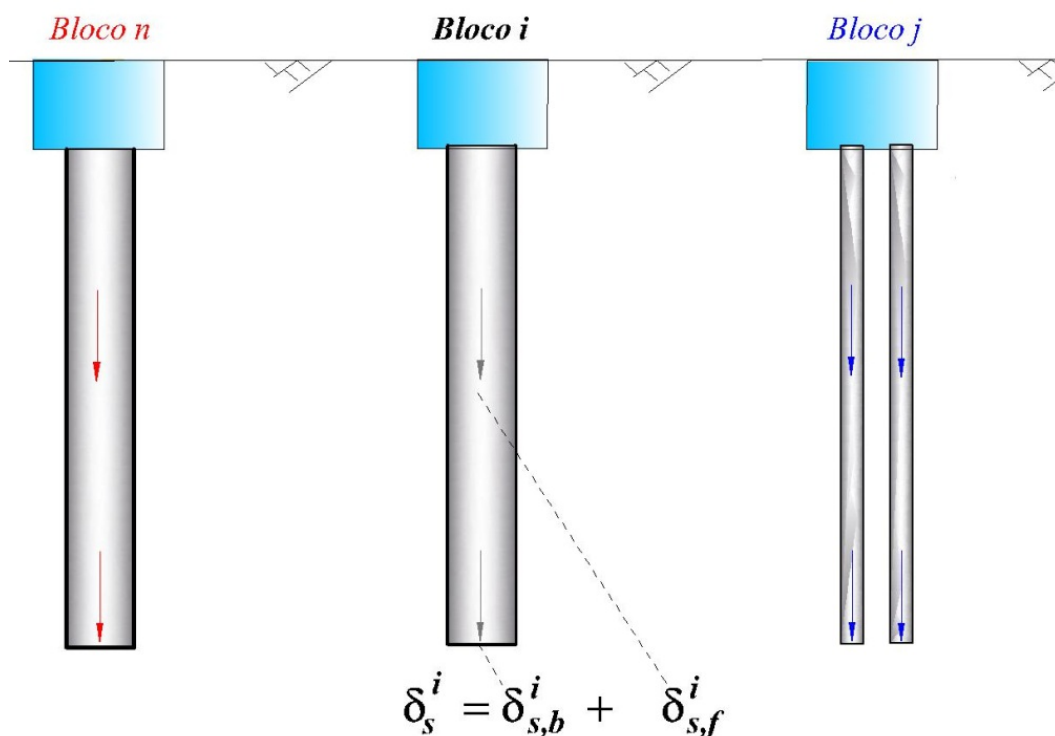
$$\delta_s^i = \sum_{j=1}^{Nestaca\ do\ bloco} \delta_{s,f}^j + \sum_{j=1}^{Nestaca\ do\ bloco} \delta_{s,b}^j$$

Com:

$\delta_{s,f}^j$  = parcela de recalque na base da estaca  $i$  devido à ação de forças de fuste da estaca  $j$  do bloco;

$\delta_{s,b}^j$  = parcela de recalque na base da estaca  $i$  devido à ação de forças da base da estaca  $j$  do bloco.

$\delta_s^i$  = recalque total da base da estaca  $i$ ;



### Sem Efeito de Grupo

Figura 11.2 – Cálculo de recalque sem efeito de grupo

### Recalque com efeito de grupo

Neste caso, o modelo é mais realista, pois leva em conta a influência de todas as estacas do projeto para o computo do recalque da estaca  $i$ . Desta forma, a mobilização de uma estaca influencia em todo o maciço contínuo. A desvantagem deste modelo é seu alto custo computacional. Assim, para um projeto que contem um total de “N” blocos, sendo que cada bloco contem “M” estacas, a base da estaca  $i$  pode se deslocar devido às cargas aplicadas ao longo do fuste  $Q(z)$  e ou da base (ponta)  $P_p$  devido a todas as estacas do projeto. De acordo com Vesic (1975) pode-se escrever:

$$\delta_s^i = \sum_{k=1}^{N \text{ blocos}} \left[ \sum_{j=1}^{M \text{ estaca do bloco}_k} \delta_{s,f}^j + \sum_{j=1}^{M \text{ estaca do bloco}_k} \delta_{s,b}^j \right]$$

Com:

$\delta_{s,f}^j$  = parcela de recalque na base da estaca  $i$  devido à ação de forças de fuste da estaca  $j$  do bloco  $k$ ;

$\delta_{s,b}^j$  = parcela de recalque na base da estaca  $i$  devido à ação de forças da base da estaca  $j$  do bloco  $k$ .

$\delta_s^i$  = recalque total da base da estaca  $i$ ;

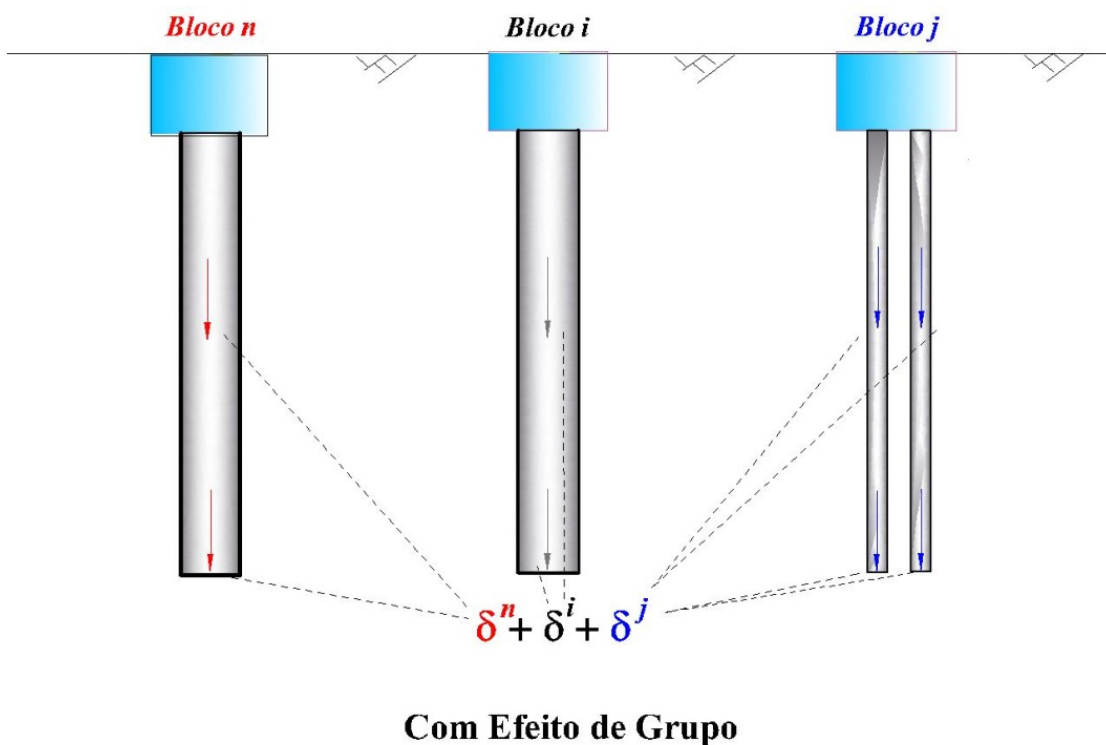


Figura 11.3 – Cálculo de recalque com efeito de grupo

As fórmulas apresentadas por Mindlin (1936) partem da hipótese de que o solo é um meio homogêneo e semi-infinito, o que não corresponde à realidade do solo natural que apresenta estratificação e camada indeslocável em uma determinada profundidade. Para levar em conta estes problemas, pode-se recorrer ao artifício proposto por STEINBRENNER (1934), ainda considerando o solo como semi-infinito e com o uso de MINDLIN (1936) calcula-se:

- o recalque  $r_i^\infty$  na profundidade “i” no nível entre a superfície e o indeslocável;
- o recalque  $r_h^\infty$  na profundidade “h” escolhido como nível indeslocável.

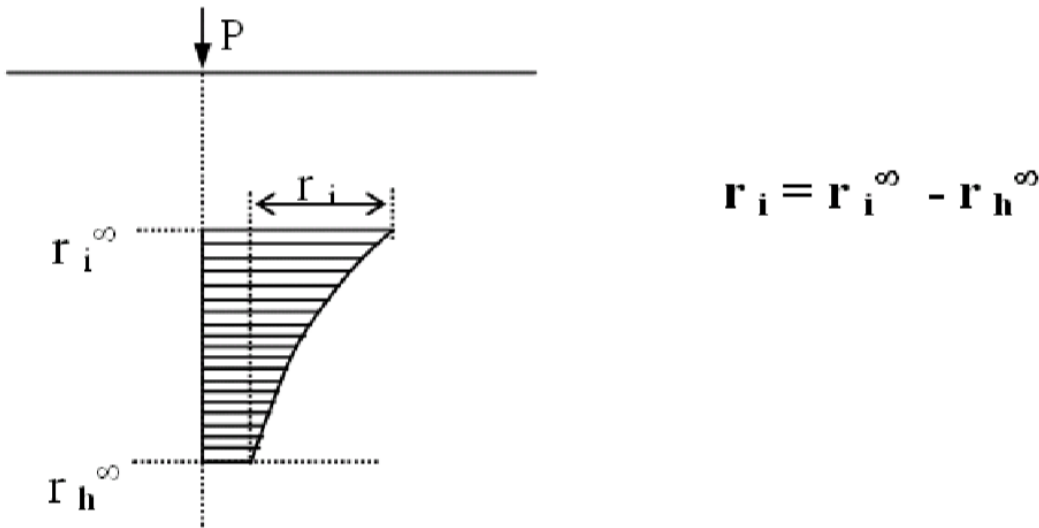


Figura 11.4 – Procedimento de STEINBRENNER (1934).

Como no nível indeslocável o recalque é teoricamente nulo, qualquer recalque no nível “i” que esteja no nível acima será obtido pela diferença entre os recalques dos dois níveis:

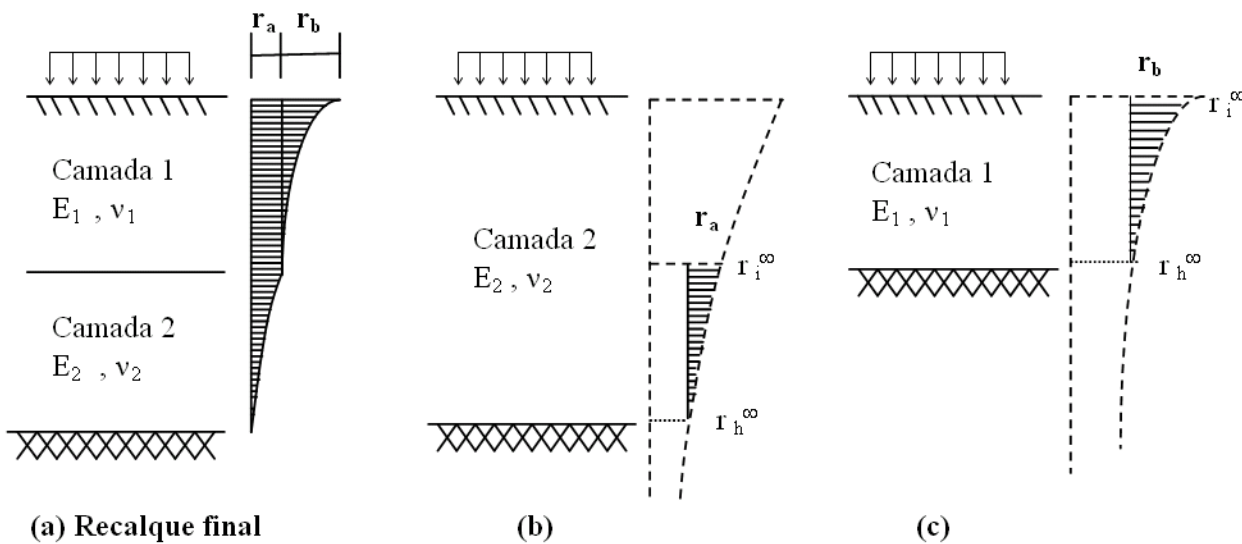


Figura 11.5 – Aplicação do procedimento para várias camadas.

A proposição de Steinbrenner pode ser generalizada para o caso em que existem várias camadas antes do indeslocável. O cálculo é feito da camada de baixo para cima, admitindo-se que todo o solo, do indeslocável para cima, seja do mesmo material da camada 2. Em seguida, calcula-se o recalque  $r_i^{\infty}$  no topo da camada 2 e  $r_h^{\infty}$  no nível do indeslocável. O recalque nesta camada será  $r_a$ :

$$r_a = r_i^{\infty} - r_h^{\infty}$$

O procedimento é repetido, levando-se o indeslocável para o nível da camada já calculada e utilizando-se as características do solo imediatamente acima calculando o recalque  $r_b$ . O recalque no nível da aplicação da carga será obtido pela superposição dos recalques  $r_i$  das camadas.

Aplicando o mesmo raciocínio para caso de estacas imersas no solo, tem-se:

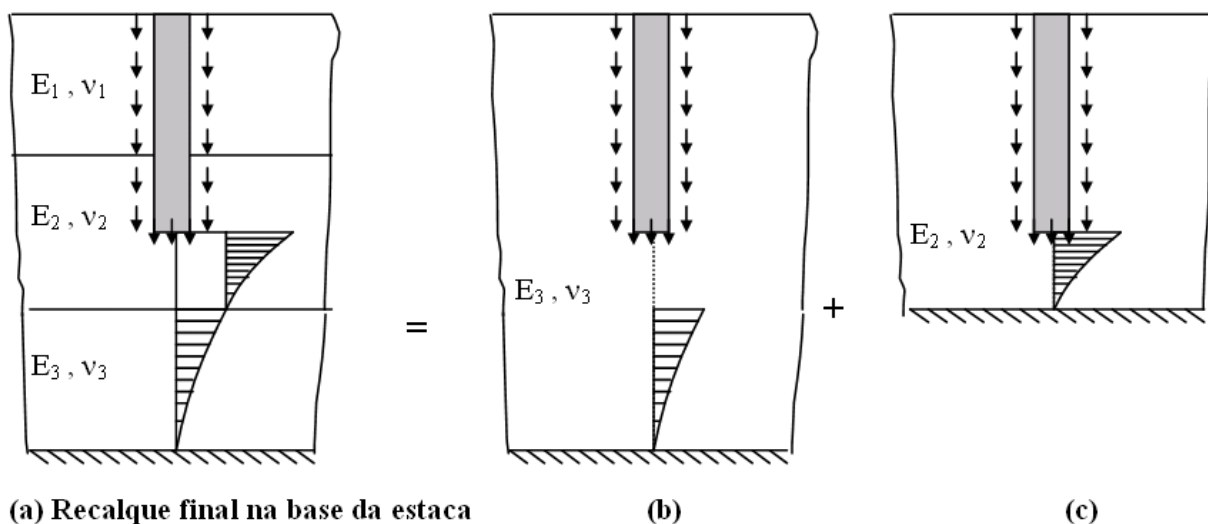


Figura 11.6 – Procedimento de STEINBRENNER para estacas.

Onde se determina para cada nível da camada o correspondente  $r_i$  com características daquela camada em estudo. Portanto, o recalque  $\delta_s$  é o somatório de todos os recalques de n camadas abaixo do nível da base da estaca, lembrando-se que os recalques na base da estaca devem levar em conta os efeitos de outras estacas j além da própria estaca i. Feito isso, o recalque no topo da estaca i é a soma do recalque na base da estaca  $\delta_s$  e o deslocamento do fuste  $\delta_p$ :

$$\delta o_i = \delta s_i + \delta p_i$$

A validade do processo que utiliza STEINBRENNER (1934) é comprovada em alguns trabalhos; entre eles destaca-se o relatório apresentado em KUSAKABE et al. (1989).

## Módulo de Elasticidade do Solo

Estimar o módulo de elasticidade (o termo correto para o solo é módulo de deformabilidade) é um dos assuntos mais difíceis da engenharia de fundação. Por sua natureza de material heterogêneo, o módulo de deformabilidade do solo varia conforme o nível de carregamento aplicado, saturação e de região onde está sendo utilizado. Uma formulação que vale para uma região pode não valer mais na outra. A sua escolha correta é o que determina a estimativa de recalque o mais próximo da realidade. Seguem-se algumas fórmulas e tabelas para estimar a ordem de grandeza:

SOLO	VALORES TÍPICOS(kgf/cm <sup>2</sup> )
Silte arenoso residual de São Paulo	E = 1,15 Rp
Silte argiloso residual de São Paulo	E = 2,40 Rp
Aterro compactado de silte argiloso	E = 3,00 Rp
Areia normalmente adensada	E = 5 (SPT + 5)

Areia sobreadensada	$E = 180 + (7,50 \text{ SPT})$
Argila terciária de São Paulo	$E = 55,4 + (25,9 \text{ SPT})$
Argila muito mole (nº. SPT $\leq 2$ )	10
Argila mole (nº. SPT 3 a 5)	20
Argila média (nº. SPT 6 a 10)	50
Argila rija (nº. SPT 11 a 19)	80
Argila dura (nº. SPT $> 19$ )	150
Areia fofa (nº. SPT $\leq 4$ )	50
Areia pouco compacta (nº. SPT 5 a 8)	200
Areia medianamente compacta (nº. SPT 9 a 18)	500
Areia compacta (nº. SPT 19 a 40)	700
Areia muito compacta (nº. SPT $> 40$ )	900

Tabela 11.1 – Estimativas de módulo de deformabilidade do solo, PENNA (2004).

Na Tabela 11.1,  $R_p$  é a resistência do terreno ao avanço da ponta de cone, em unidade de tensão ( $\text{kgf/cm}^2$ ), força dividida pela área do cone, de  $10\text{cm}^2$ . Além dessa tabela, para solos arenosos, MELO (1971) apud ALBIERO (1993) apresenta uma expressão empírica para previsão do módulo de deformabilidade ES em função do número do SPT:

$$E = 220 \times 10^{(1,224 + 0,405 \log N)} \quad (\text{kPa})$$

Onde N é o número de SPT da sondagem.

Diferentemente do módulo de deformabilidade do solo, o coeficiente de Poisson tem pouca influência para o recalque. Quanto aos valores do coeficiente de Poisson, têm-se as seguintes estimativas:

SOLO	POISSON
Argila saturada	0,50
Argila não-saturada	0,30
Areia	0,35

Silte	0,30
-------	------

Tabela 11.2 – Estimativa dos coeficientes de Poisson do solo, PENNA (2004).

## Modelo de Distribuição de Cargas Pontuais na Estaca

A idéia básica utilizada pelo sistema SISEs é distribuir as cargas no fuste e na ponta (base) da estaca em cargas estaticamente equivalentes, de modo que represente o mais próximo possível a realidade da obra. Dentro deste conceito, quanto maior a discretização feita, melhor será a representatividade dos resultados.

### Carga na base

A carga na base da estaca é admitida como sendo uniformemente distribuída, sendo transformada em um sistema estaticamente equivalente de cargas pontuais atuando em cada uma das subáreas divididas em  $n_1 \times n_2$  partes iguais. Sendo  $n_1$  (nº de divisões da circunferência) e o  $n_2$  (nº de divisões do raio da base  $R_b$ ).

### Carga no fuste

Para a carga no fuste da estaca admite-se uma distribuição linear. A circunferência, de raio  $R_s$  é subdividida em  $n_1$  partes iguais e o trecho do fuste entre as profundidades ( $D_2 - D_1$ ) é subdividido em  $n_3$  partes iguais. Sendo  $i, k$  os índices da posição do ponto  $I_{i,k}$  da superfície do fuste.