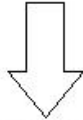




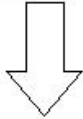
CRV – Estacas

Cálculo de CRV para Estacas e Tubulões

**Sondagens, tipo de estaca, tipo de solo, carga no topo da estaca**

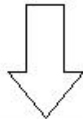


**Programa para cálculo das forças resistentes de fuste e base**



**Métodos:**

Aoki-Velloso  
Decourt-Quaresma  
Antunes-Cabral  
Antunes e Cabral SEFE III  
Philipponnat  
Pedro Paulo Velloso  
Alonso  
David Cabral



**Cálculo das forças atuantes de fuste e base**



**Modelo A de transferência**

ou

**Modelo B de transferência**



**Programa de cálculo dos recalques da base da estaca:  
Aoki-Lopes, Vesic, Mindlin, Steinbrenner**



**Sem efeito de grupo**

ou

**Com efeito de grupo**



**Cálculo de CRVs do fuste e base**

Figura 12.1 – Fluxograma geral de processamento e transferência de dados.

O CRV (coeficiente de reação vertical) pode ser entendido como rigidez do contato estaca-solo. Aplica-se no topo de cada estaca  $P_i$  o carregamento obtido pela resolução de pórtico espacial, considerando inicialmente como apoiado em base rígida. O CRV da estaca é a razão entre a carga aplicada no topo e o deslocamento sofrido na base da estaca  $\delta_i$ , que pode ser resolvido pelo modelo de Aoki-Lopes, com efeito de grupo:

$$CRV_{estaca\ i} = \frac{P_i}{\delta_i}$$

Onde  $P_i$  é carga aplicada no topo da estaca e  $\delta_i$  é o recalque na base da estaca mais a parcela de deslocamento elástico da estaca (se considerado).

Levando-se em consideração a proporcionalidade das forças distribuídas ao longo do fuste e na base da estaca, pode-se fazer seguinte relação:

Para o Coeficiente de reação vertical do fuste na profundidade  $j$  da estaca  $i$ , tem-se:

$$\frac{CRV_{estaca\ i}}{\sum_{j=1}^m F_{fuste\ j,\ i} + F_{ponta,\ i}} = \frac{CRV_{fuste\ j,\ i}}{F_{fuste\ j,\ i}}$$

ou seja

$$CRV_{fuste\ j,\ i} = \frac{CRV_{estaca\ i} F_{fuste\ j,\ i}}{\sum_{j=1}^m F_{fuste\ j,\ i} + F_{ponta,\ i}}$$

Na expressão acima, a distribuição das forças  $F_{fuste\ j,\ i}$  ao longo do fuste, depende do modelo de transferência (modelo A ou B) que for adotado, quando  $P < PL(z)$ . O denominador  $\sum_{j=1}^m F_{fuste\ j,\ i} + F_{ponta,\ i} = P_i$  pode ser entendido como carga atuante no topo da estaca. Caso esta carga seja menor ou igual a resistência lateral acumulada do fuste  $PL$ , pela teoria de VESIC(1975), fica entendido como todo o carregamento resistido pelo fuste, tornando a parcela de carga na ponta (base) zero,  $F_{ponta,\ i} = 0$ .

Para o Coeficiente de reação vertical da ponta da estaca  $i$ , tem-se:

$$CRV_{ponta\ i} = \frac{\frac{P_i}{\delta_i} F_{ponta,\ i}}{P_i} \rightarrow CRV_{ponta\ i} = \frac{F_{ponta,\ i}}{\delta_i}$$

Caso o carregamento aplicado no topo da estaca for todo absorvido pelo fuste, ou seja,  $P \leq PL$ , não terá carga na base da estaca,  $F_{ponta,\ i} = 0$ , portanto  $CRV_{ponta,\ i} = 0$ .

O somatório dos coeficientes de reações verticais do fuste e da ponta deverá resultar em coeficiente de reação da

estaca i:

$$\sum_{j=1}^m CRV_{fuste\ j, i} + CRV_{ponta, i} = CRV_{geral, i}$$

Onde  $j = 1, 2, 3, \dots, m$  da estaca  $i$

Fisicamente, a expressão acima pode ser entendida como um conjunto de “molas” que se distribuem ao longo do fuste e na base da estaca, e que estas “molas” representam proporcionalmente a distribuição de rigidezes do contato estaca-solo segundo a lei de transferência de cargas. Isso significa que se for adotado o modelo A de transferência, o carregamento será distribuído começando do topo em direção à base, onde cada “mola” será solicitada por um carregamento e caso atingir a sua plastificação será repassado para “molas” subseqüentes. Neste modelo, a carga na base da estaca só será mobilizada caso todo o contato fuste-solo atinja a sua plastificação (deslizamento). Caso for adotado o modelo B de transferência, o carregamento será proporcionalmente distribuído ao longo do fuste, e como no modelo A, só será transferido para a base da estaca quando toda a resistência lateral da estaca for vencida pelo carregamento aplicado no topo, ou seja, quando entra em plastificação.

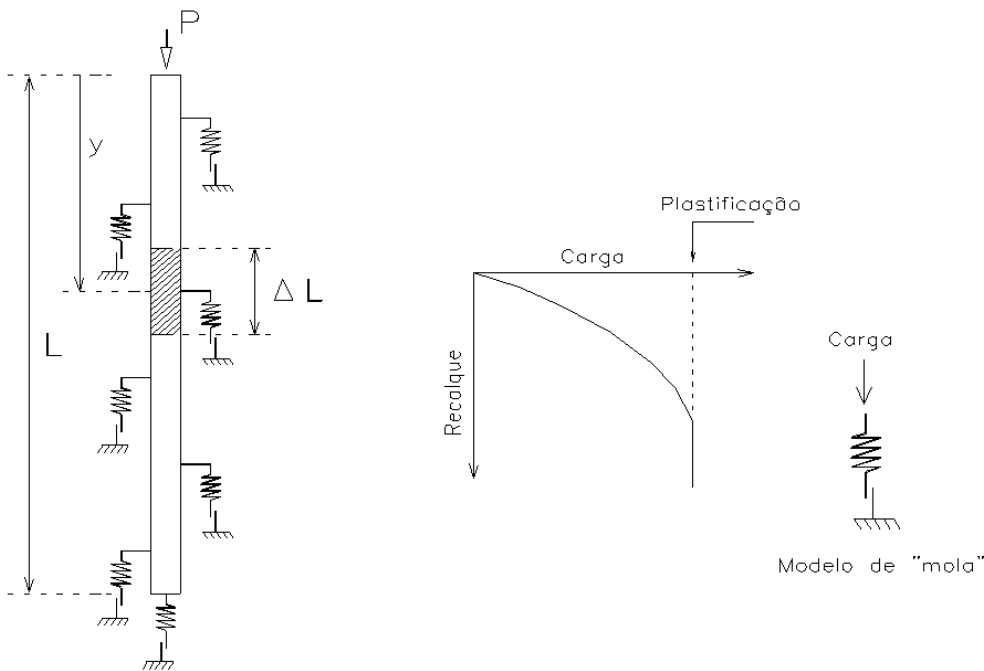


Figura 12.2 – Representação da estaca.

Vale ressaltar que o “trunfo” deste modelo é a sua simplicidade em relação aos modelos mais sofisticados (método dos elementos finitos ou elementos de contorno), facilitando sua aplicação e a representatividade. A “mola” idealizada não é a mola de Winkler, pois:

- ela varia conforme o nível de carregamento, inclusive altera a curva quando o carregamento ultrapassa a resistência lateral  $PL$  do fuste. Portanto, a “mola” representa a não linearidade do comportamento da estaca;

- ela é influenciada pelo efeito de grupo de estacas, ou seja, o carregamento de uma estaca influenciará nos recalques das demais estacas próximas.

Pontua-se ainda que não existe coeficiente de mola constante para um determinado solo. O seu valor depende da interação completa da rigidez da estrutura x solo. Por exemplo, os coeficientes de mola da fundação de um edifício sobre o solo "A" não são os mesmos se for construído sobre esse mesmo solo um edifício com outra rigidez (número de pavimentos, arranjos estruturais ou sistemas estruturais diferentes).

Na figura 12.3 apresenta-se esquematicamente o procedimento descrito nesse item, destacando que é possível incluir ou não, conforme habilitado no arquivo de critérios, o deslocamento axial (De) da estaca para o computo do recalque total.

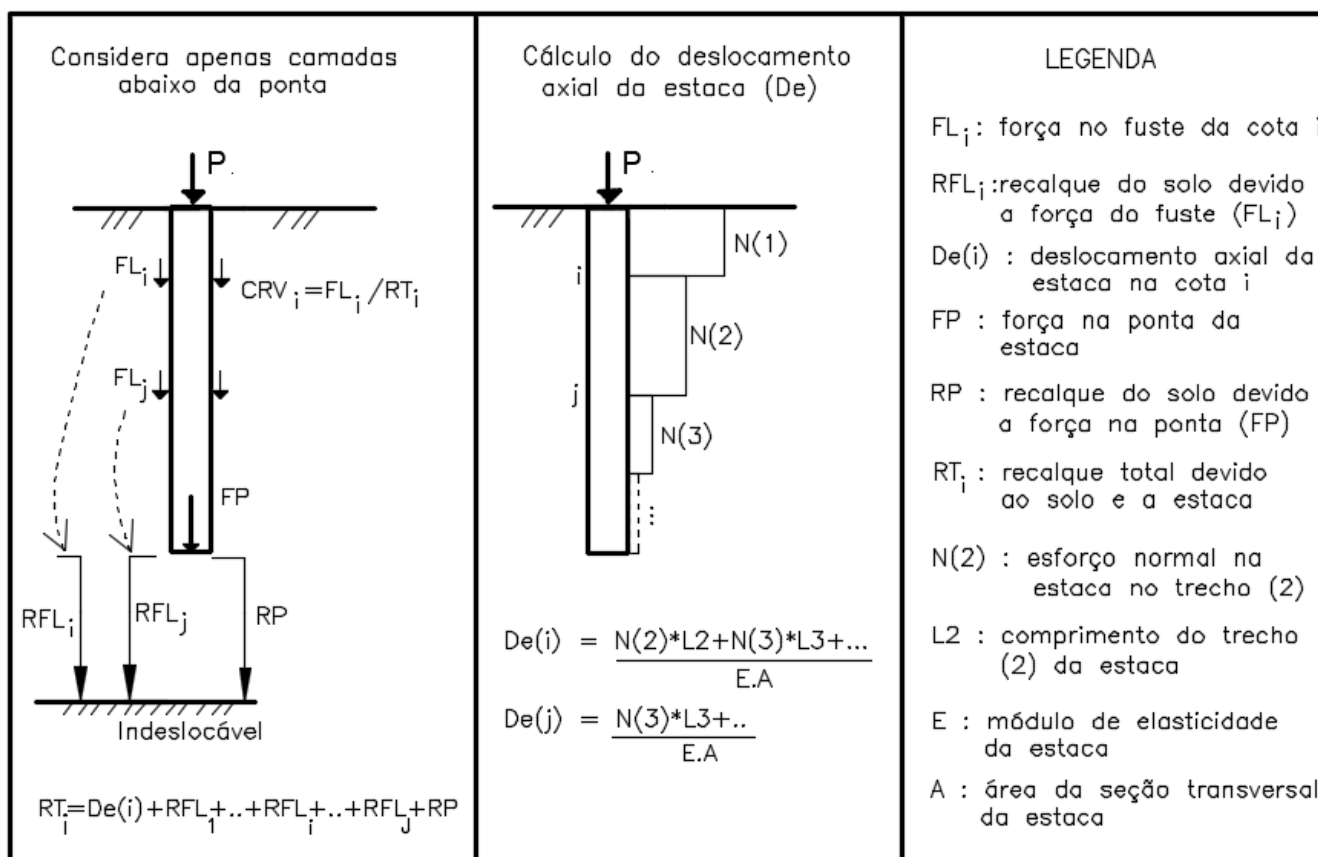


Figura 12.3 – Fluxograma geral de processamento e transferência de dados.

Ao processar o Sises, o relatório sobre CRV/CRH pode ser acessado em Visualizar → Cálculo dos CRV e CRH → "SEstCrvh.lst". Ele apresenta o layout indicado na figura 12.4, onde nas figuras 12.5 e 12.5 se amplia para uma melhor visualização. Nesse relatório é possível organizar as informações em 4 sub-blocos, indicados por A, B, C e D, vide fig. 12.4.

No sub-bloco A têm-se os valores em cada cota, de metro em metro, do módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e dos parâmetros K e alfa do solo relativos - nesse caso- ao método de Aoki-Velloso.

No quadro B, apresentam-se os valores de Capacidade de Carga obtidos com os dados e para o método definido, onde PL, PP e PTOTAL são, respectivamente, carga no fuste, ponta e a soma dessas.

No sub-bloco C, apresentam-se os valores das transferências de fuste (FLi) e de ponta (última linha da coluna de FLi). Note na fig. 12.5 que a soma das forças que foram transferidas ao solo, pelo fuste, é de 10,68 tf enquanto que a parcela de ponta tem um valor transferido de 6,18 tf, o que resulta na transferência total da força vertical de topo

(16,86 tf). O recalque total em cada metro (RecTotal) é obtido somando o valor do recalque total do fuste (RecFuste), com o valor do recalque de ponta (RecPonta) mais o deslocamento axial da estaca em cada metro (DeslAxial), ou seja, na 1a. cota seria de RecTotal (1) = 0,132+1,443+0,128 = 1,703 cm; ou RecTotal (2) = 0,132+1,443+0,112 = 1,687 cm; etc.

O conceito do recalque corrigido (RecCorrig) é relativo a uma penalização do recalque total sofrido caso o valor da força vertical de topo seja maior que a de ruptura, simulando uma variação acentuada do recalque no regime plástico e com deslizamento acentuado pós carga de ruptura. Nessa filosofia, adotou-se a seguinte majoração para o recalque total:

$$RecCorrig = RecTotal \cdot \left( 1 + \frac{\Delta P}{100} \right) \quad (\text{Se } \Delta P > 0)$$

com  $\Delta P = \text{Força Vertical Topo} - \text{Capacidade de Carga Última}$ .

Para o sub-bloco D, têm-se os valores dos coeficientes de mola a serem lançados nos nós das estacas discretizadas. Assim, para exemplificar, empregando os resultados indicados nas figuras 12.5:

$$CRV_1 = \frac{FL_1}{RT_1} = \frac{0,79}{1,703} = 0,46 \text{ tf/cm} = 46 \text{ tf/m}$$

$$CRV_2 = \frac{FL_2}{RT_2} = \frac{(1,35 - 0,79)}{1,687} = 0,33 \text{ tf/cm} = 33 \text{ tf/m}$$

Força Normal (Bloco): 16.11																
ESTACA 1 DiamFuste: 25.0 DiamBase 25.0 CotaArrasam [m] -2.0 CotaAssentam [m] -13.0																
TIPO: ESCAVADA Grande Diâmetro																
SONDAGEM: SONDAGEM MAIS PRÓXIMA: SP-35																
MÉTODO CAPACIDADE DE CARGA E CÁLCULO DE CRV: AOKI-VELLOSO F1= 3.50 F2= 7.00																
DEFORMAÇÃO DO FUSTE: SIM																
MÉTODO CÁLCULO CRH: SPT/M																
NÃO CONSIDERA EFEITO DE GRUPO ENTRE AS ESTACAS																
ESTACA: 1 Força Vertical (Topo): 16.86 Capacidade de Carga Última: 18.04 Cota de arrasamento: -2.00																
SPT	E (kgf/cm <sup>2</sup> )	Poisson	COTA[m]	K (tf/m <sup>2</sup> )	ALFA(%)	PL	PP	PTOTAL	FLi	RecFuste (RFL)	RecPonta (RP)	DeslAxial (De)	RecTotal (RT)	RecCorrig (RT')	CRV(tf/m)	CRH(tf/m)
5	50.	0.30	-3.00	100.0	1.4	0.79	7.01	7.80	0.79	0.002		0.128	1.703	1.703	46.1	112.5
6	200.	0.29	-4.00	35.0	2.4	1.35	2.95	4.30	1.35	0.001		0.112	1.687	1.687	33.5	187.5
7	50.	0.22	-5.00	35.0	2.4	2.01	3.44	5.45	2.01	0.002		0.097	1.672	1.672	39.5	300.0
8	50.	0.22	-6.00	35.0	2.4	2.76	3.93	6.69	2.76	0.002		0.083	1.658	1.658	45.5	416.7
9	50.	0.22	-7.00	35.0	2.4	3.61	4.42	8.03	3.61	0.003		0.069	1.644	1.644	51.6	550.0
10	50.	0.22	-8.00	35.0	2.4	4.56	4.91	9.46	4.56	0.003		0.056	1.631	1.631	57.8	700.0
11	50.	0.22	-9.00	35.0	2.4	5.59	5.40	10.99	5.59	0.005		0.044	1.619	1.619	64.0	866.7
12	80.	0.21	-10.00	35.0	2.4	6.72	5.89	12.61	6.72	0.006		0.033	1.608	1.608	70.3	1050.0
13	80.	0.21	-11.00	35.0	2.4	7.95	6.38	14.33	7.95	0.010		0.023	1.598	1.598	76.7	1250.0
14	80.	0.21	-12.00	35.0	2.4	9.27	6.87	16.14	9.27	0.019		0.014	1.589	1.589	83.0	1430.0
15	80.	0.21	-13.00	35.0	2.4	10.68	7.36	18.04	10.68	0.078	1.443	0.006	1.582	1.582	452.4	1620.0
PONTA (FP)									6.18	0.132						
			A			B			C				D			

Figura 12.4 – Esquema do relatório dos CRV/CRH.

ESTACA: 1 Força Vertical (Topo): 16.86 Capacidade de Carga Última:

SPT	E(kgf/cm <sup>2</sup> )	Poisson	COTA[m]	K(tf/m <sup>2</sup> )	ALFA(%)	PL	PP	PTOTAL
5	50.	0.30	-3.00	100.0	1.4	0.79	7.01	7.80
6	200.	0.29	-4.00	35.0	2.4	1.35	2.95	4.30
7	50.	0.22	-5.00	35.0	2.4	2.01	3.44	5.45
8	50.	0.22	-6.00	35.0	2.4	2.76	3.93	6.69
9	50.	0.22	-7.00	35.0	2.4	3.61	4.42	8.03
10	50.	0.22	-8.00	35.0	2.4	4.56	4.91	9.46
11	50.	0.22	-9.00	35.0	2.4	5.59	5.40	10.99
12	80.	0.21	-10.00	35.0	2.4	6.72	5.89	12.61
13	80.	0.21	-11.00	35.0	2.4	7.95	6.38	14.33
14	80.	0.21	-12.00	35.0	2.4	9.27	6.87	16.14
15	80.	0.21	-13.00	35.0	2.4	10.68	7.36	18.04

PONTA (FP)

**A** **B**

18.04 Cota de arrasamento: -2.00

FLi	RecFuste (RFL)	RecPonta (RP)	DeslAxial (De)	RecTotal (RT)	RecCorrig (RT')	CRV(tf/m)	CRH(tf/m)
0.79	0.002		0.128	1.703	1.703	46.1	112.5
1.35	0.001		0.112	1.687	1.687	33.5	187.5
2.01	0.002		0.097	1.672	1.672	39.5	300.0
2.76	0.002		0.083	1.658	1.658	45.5	416.7
3.61	0.003		0.069	1.644	1.644	51.6	550.0
4.56	0.003		0.056	1.631	1.631	57.8	700.0
5.59	0.005		0.044	1.619	1.619	64.0	866.7
6.72	0.006		0.033	1.608	1.608	70.3	1050.0
7.95	0.010		0.023	1.598	1.598	76.7	1250.0
9.27	0.019		0.014	1.589	1.589	83.0	1430.0
10.68	0.078		0.006	1.582	1.582	452.4	1620.0
6.18	0.132	1.443					

**C** **D**

Figura 12.5 – Esquema do relatório dos CRV/CRH ampliado.

## Observações Sobre o CRV

O método Aoki e Lopes (1975) à luz da teoria da elasticidade com o uso de solução de Mindlin (1936) e processo de Steinbrenner(1934) tornou possível a análise dos efeitos de ações de grupos de elementos de fundações, sem a necessidade de discretização do meio envolvente (maciço de solo), como é feito mediante o uso do Método dos Elementos Finitos. Porém a transferência de cargas para o solo adjacente é feita como se fosse meio contínuo, incluindo o espaço preenchido pelas estacas, não considerando a descontinuidade do maciço. Esta 'lacuna' só é resolvida com o uso de ferramentas mais sofisticadas como a combinação de método dos elementos de contorno e método dos elementos finitos discretizando tanto o maciço de solo como elementos de estacas para simular a existência de diferentes materiais (estaca x solo) e a introdução de elementos de contato para simular o deslizamento relativo estaca/solo.

Seria interessante verificar mediante a comparação dos dois métodos, se esta descontinuidade ocupada pelas estacas até que ponto é realmente significativa ou não. Também é importante enfatizar que nem todos os resultados

numéricos mais 'sofisticados' são verdadeiros para o uso prático, pois o solo é um material que dificilmente se pode simular com realismo, devido a suas intrínsecas características de difícil mensuração e simulação numérica.

Outra simplificação do modelo é o diagrama de transferência de carregamento da estaca ao longo do fuste. A resistência máxima do contato fuste – solo pode mudar com o efeito do grupo de estacas devido à deformação do solo adjacente provocados pela interação do conjunto. Este efeito é de difícil quantificação, e no momento não está sendo considerado no modelo.

Após alguns testes com as rotinas de cálculo, chegou-se a seguinte conclusão:

- quanto menor o número de subdivisões ( $n_1$ ,  $n_2$ ,  $n_3$ ), menos precisão terá os recalques nos pontos desejados. Do contrário, quanto mais discretizado, melhor será a representação da distribuição de cargas na estaca, pois o nosso objetivo é tentar simular a integração numérica através de subdivisões.
- o processo possui convergência, ou seja, após certo número não há mais melhora dos resultados. Por "default" o sistema opera com valores  $n_1 = 8$ ,  $n_2 = 4$  e  $n_3 = 30$ , por apresentarem resultados satisfatórios.