

1) GENERALIDADES E HISTÓRICO

Em geral as estacas tipo raiz são estacas de pequeno diâmetro (usualmente entre 10 cm e 40 cm), implantadas no terreno através de uma perfuração revestida, a qual é prosseguida até se atingir a profundidade prevista em projeto.

As primeiras patentes foram requeridas na Itália em 1952 pela Empresa Fondedile SPA; todavia a fase de maior desenvolvimento ocorreu na década de 60.

A sua aplicação inicial foi aquela relacionada com o reforço de fundação de antigas edificações de pequeno porte. Em geral tratava-se de edifícios históricos e as estacas tipo raiz cumpriam os seguintes requisitos básicos :

- Os equipamentos eram de pequenas dimensões, o que propiciava acesso a locais exíguos e de pé direito baixo (espaço de passagem entre 1,5 e 2,0 m) e pé - direito mínimo da ordem de 3.0 m;
- A perfuração era rápida, silenciosa e sem vibração. O emprego de conjuntos movidos a eletricidade permitia a execução em locais fechados, sem os inconvenientes da fumaça oriunda do funcionamento de motores a explosão. As perfuratrizes podiam ser deslocadas ou arrastadas por operários e a tecnologia permitia atingir-se profundidade relativamente elevadas (digamos 30 m) atravessando camadas ou interferências com facilidade. Esta característica flexibilizava o dimensionamento de cargas de trabalho, determinadas muito mais pela capacidade estrutural da seção do que pela condição de suporte do subsolo.

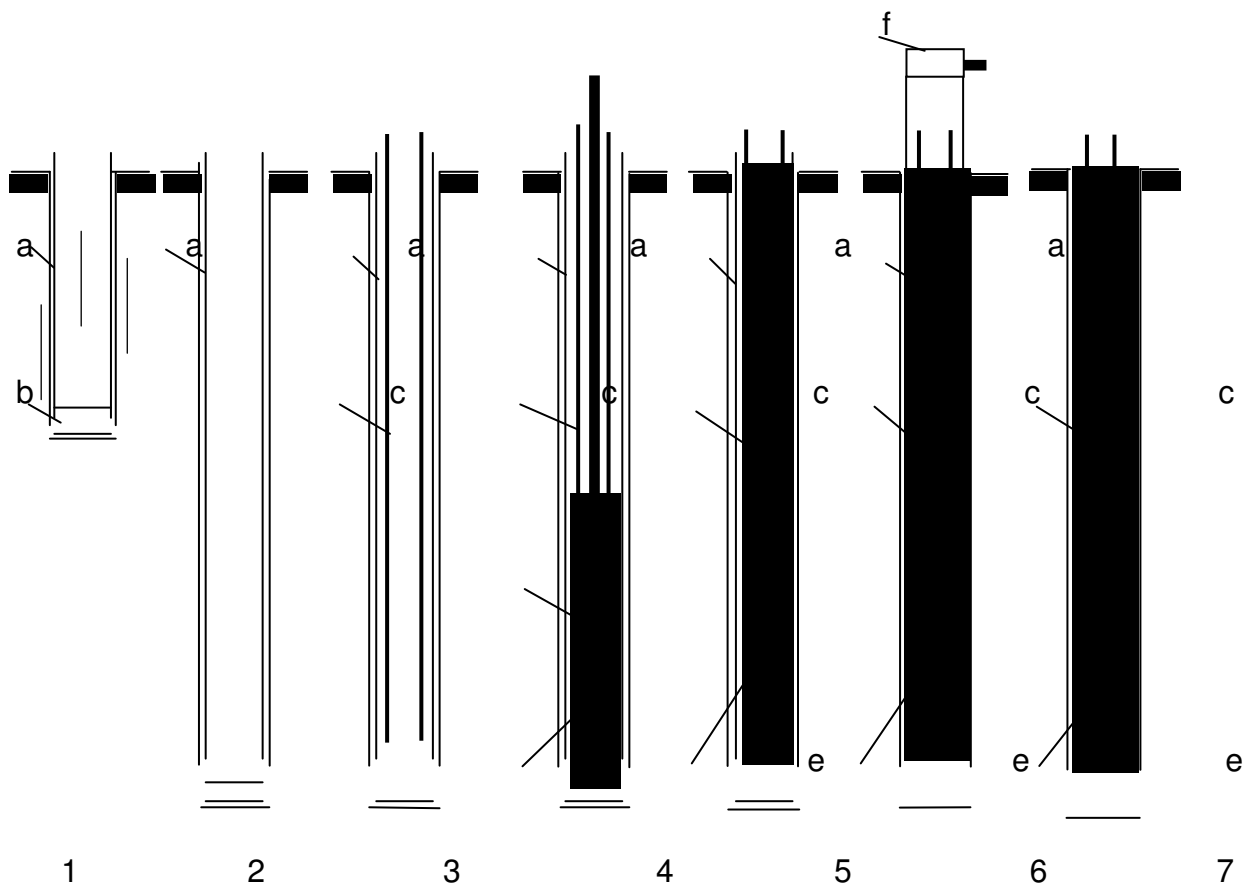
As vantagens supra - mencionadas possibilitaram um grande crescimento na utilização do produto em escala mundial. Funcionalmente a estaca tipo raiz passou a ser utilizada como solução de contenção de encostas, também em virtude de duas condições principais :

- possibilidade de execução de estacas inclinadas com orientação tridimensional, constituindo-se nos reticulados espaciais implantados em encostas ou taludes instáveis. A concepção é aquela de uma estrutura de gravidade interna no terreno, fazendo com que o volume de solo atravessado pelas estacas, convenientemente espaçadas, trabalhasse como um muro rígido;
- resistência à tração, através da armação do fuste da estaca.

Finalmente o emprego da estaca tipo raiz generalizou-se como solução para fundações normais, com o aumento de diâmetro das estacas e do porte dos equipamentos concebidos para executá-las.

2) SEQUÊNCIA EXECUTIVA

A seqüência executiva é a ilustrada esquematicamente abaixo.



FASES DE REALIZAÇÃO

- 1 – Perfuração
- 2 – Perfuração concluída
- 3 – Colocação de armadura
- 4 – Injeção de argamassa
- 5 – Conclusão da injeção
- 6 – Retirada do tubo de revestimento
com aplicação de pressão
- 7 – Estaca raiz concluída

- a - Tubo de revestimento
- b - Sapata
- c - Armadura
- d - Tubo de injeção
- e - Argamassa
- f – Tampão de pressão

A seguir será comentada, brevemente, cada uma das principais fases executivas. Posteriormente serão discutidas particularidades e variantes acarretadas por condições específicas de subsolo.

1ª fase : Perfuração de furo

A não ser em casos excepcionais, previamente justificáveis na fase de projeto, a perfuração deve ser inteiramente revestida. Esta é composta por segmentos rosqueados em seqüência à medida que a perfuração prossegue (a dimensão mais usual varia entre 0.8 m e 1.20 m).

O revestimento do furo é efetuado mediante rotação de uma perfuratriz e de circulação de água proporcionada por bombas de alta vazão e pressão.

As funções do fluxo d'água são as seguintes:

- desagregação do solo no interior do revestimento;
- lubrificação e resfriamento da ferramenta de perfuração (sapata) ;
- desagregação do solo localizado frontalmente à coroa.;
- abertura de espaço anelar ao longo da superfície externa do revestimento. Este efeito além de diminuir o torque da perfuratriz, propicia um aumento de diâmetro da estaca mediante erosão do solo atravessado na região circunjacente à do revestimento;
- remoção de todo o solo desagregado mediante um fluxo altamente turbulento, conforme será discutido a seguir.

2ª fase : Colocação da armadura

A mesma é descida manualmente ou através de guindastes de apoio, quando a execução for a céu aberto.

Em geral para os diâmetros menores (até 16 cm) pode-se colocar barra (ou barras) centralizadas no furo. Todavia a disposição mais comum e estruturalmente mais recomendável é a da colocação de armações concêntricas solidarizadas por estribos em espiral. O número e bitola destas barras podem variar em seção e longitudinalmente para atender às premissas de projeto. Na evidência das mesmas serem mais curtas do que o comprimento do furo, deve-se sobrepô-las em transpasse, evitando-se a solda.

3ª fase : Injeção de argamassa, de areia e cimento.

É feita através de bombas do tipo rotor / estator ou, mais rotineiramente, através de bombas de pistão. Ambas devem ser resistentes à elevada abrasão acarretada pela argamassa.

A areia deve ser limpa e livre de pedregulhos. Em capítulo à parte serão analisadas as características da argamassa.

4ª fase : Aplicação de ar comprimido

A concepção original executiva da estaca tornava mandatória a aplicação de ar comprimido com pressões da ordem de 0.4 M Pa; porém este requisito foi sendo progressivamente abandonado, conforme será debatido a seguir. A aplicação do ar é feita através de um tampão apropriado rosqueado no topo da composição de revestimento.

5ª fase : Extração do revestimento.

O procedimento atual comporta duas variantes principais :

- extração do revestimento através da própria perfuratriz (“pull out “ do equipamento).
- extração do revestimento através de dois macacos hidráulicos verticais apoiados no terreno em posição diametralmente oposta. Tais macacos são idênticos e são acionados por uma central hidráulica (também chamada de “centralina”) e reagem contra uma travessa metálica que é solidarizada ao revestimento.

Ambos os procedimentos acima são tecnicamente equivalentes e dependem dos equipamentos colocados à disposição da obra e, também, da maior ou menor dificuldade em se sacar o revestimento.

Obviamente durante a extração há a operação de desrosquear os tubos, a qual é feita através do torque propiciado por uma “morsa” hidráulica agregada à perfuratriz ou à “centralina”.

Cabe mencionar, em complementação, que as operações de argamassagem da estaca, eventual aplicação de ar comprimido e extração do revestimento, são interdependentes.

3)EQUIPAMENTOS E UTENSÍLIOS MAIS USUAIS.

A seguir apresentamos, os equipamentos usualmente utilizados no Brasil.

A descrição é genérica e objetiva ser abrangente. Para elaborá-la baseou-se na informação de Empresas que atuam na execução do produto, em situações mais freqüentes.

3.1) Perfuratrizes: podem ser mecânicas ou hidráulicas. As perfuratrizes mecânicas são em geral de menor porte.

O mecanismo hidráulico confere às perfuratrizes hidráulicas as seguintes funções:

- locomoção em geral associada a esteiras;
- “push “e “pull out “ por cilindros de acionamento hidráulico;
- morsa e quebra-rosca;
- rotação da composição de perfuração.
- torque máximo: em geral varia entre 5000 e 15.000 Nm (500 e 1500 Kgfm), correspondendo a rotações entre 20 e 200 rpm

3.2) Bombas d’água: a disponibilidade de unidades de bombas de pressão e vazão elevadas demanda a utilização de bombas multi-estágios. O número de estágios (rotores) varia de três a cinco propiciando pressões de 0.6 a 0.9 M Pa (60 a 90 m.c.a) e vazões de 9 a 12 m³/ h.

A potência do motor elétrico varia entre 15 e 30 c.v. a 3.000 r.p.m.

3.3) Reservatórios d’água: devem ser compatíveis com a necessidade da água, espaço disponível na obra, diâmetro e profundidade da estaca. Para situar valores, as necessidades de reservação não devem ser inferiores a, digamos, 10 a 20 m³ a fim de que não ocorra interrupção dos trabalhos.

3.4) Equipamento para preparo de argamassa :

a) Misturador: necessário para a dosagem e mistura da argamassa de cimento, areia, água e aditivos (eventuais)

- motor elétrico com potência entre 3 e 10 c.v. ;
- rotação entre 1500 e 3000 r.p.m. ;
- capacidade da cuba 0.5 a 1.0 m³.

b) Agitador : recebe a argamassa misturada e mantém a homogeneização da mesma até a sua injeção.

- Motor elétrico com potência entre 3 e 5 c.v.
- rotação 20 a 50 r.p.m.
- capacidade da cuba 0.5 a 1.0 m³.

3.5) Bombas de injeção : há aquelas do tipo rotor (metálico) / estator (camisa de borracha sintética ou similar). As de maior eficiência são as de tipo duplex (dois pistões atuando em paralelo). A potência do motor elétrico varia entre 5 e 10 c.v. e a pressão situa-se em torno de 0.4 M Pa.

3.6) Compressor de ar : para pressão de 0.4 M Pa. Conforme mencionado sua utilização não tem sido mandatária no Brasil.

3.7) Mecanismo de extração do revestimento:

a) "pull out "da perfuratriz, mínimo de 50 kn

capacidade ideal: cerca de 100 kn

b) macacos mais central hidráulica: 100 a 200 kn .

Convém lembrar que uma composição de revestimento de diâmetro externo de 35,6 cm (14") para estacas acabadas de 41 cm de diâmetro tem um peso próprio não inferior a 33.000 kn.

3.8) Tubos de revestimento

Em anexo apresenta-se a tabela, contendo as bitolas mais usuais.

Os tubos de boa qualidade empregado em estaca tipo raiz tem a seguinte especificação :

Tipo : tubos de condução sem costura ASTM A 106 / A 53. São subclassificados em grau A (soldáveis) e em grau B (não soldáveis).

Recomenda-se o uso do grau A embora a resistência seja algo menor que aquela de grau B.

As tensões de escoamento e ruptura mínimos para os aços de grau A e B são :

- 106 A/A53A :

escoamento - 205 M Pa

ruptura - 330 M Pa

- 106 B/A53B :

escoamento - 240 M Pa

ruptura - 415 M Pa

A denominação rotineira destes aços é a de SCHEDULE, seguida de um número (30-40-60-80-100-120-140 e 160), o qual é indicativo da espessura da parede e a conseqüente massa do tubo em kg/m.

Os números utilizados para revestimentos variam entre 40 e 100, sendo mais freqüentes os de qualificação 40 e 80. Esta especificação procura otimizar peso (custo) com resistência e com a possibilidade da execução de roscas adequadas nas extremidades.

Para os diâmetros externos maiores da tabela 1 (acima de 168 mm) é usual o emprego de roscas executadas em ponta de schedule 80 soldados à parte central de schedule 40, com a finalidade de diminuir o peso e facilitar o manuseio durante a execução da obra.

As roscas são quadradas e tem três fios por polegada. Atualmente cresce o emprego das chamadas roscas de três entradas, assim denominadas por serem torneadas a partir de três pontos equidistantes da seção extrema do tubo.

As finalidades deste procedimento são as seguintes :

- redução acentuada do desgaste ;
- redução do tempo de aperto e desaperto ;
- facilidade de encaixe, pois o rosqueamento ocorre sempre alinhadamente.

3.9) Sapatas de perfuração

São acopladas à extremidade inferior do revestimento, sendo dotadas de sulcos semicirculares na face cortante e têm diâmetro ligeiramente maior que a composição. Podem ser aparelhadas com pastilhas de wídia soldadas proximamente aos sulcos, cuja finalidade é o aumento do poder de abrasão.

O objetivo dos sulcos é facilitar o fluxo d'água para lubrificar e resfriar a sapata e as pastilhas.

3.10) Tricones

São colocados na extremidade inferior de uma composição de hastes, quando ocorre a necessidade de limpar os testemunhos que eventualmente não são erodidos pelo fluxo d'água no interior do revestimento .

Conforme será discutido nos itens seguintes também possibilitam o prosseguimento do furo até profundidades maiores, na eventualidade indesejável de não se conseguir mais girar a composição de revestimento.

3.11) Martelos de perfuração

Destinam-se a romper materiais rochosos ou muito duros que não podem ser desagregados pelas sapatas ou pelos tricones.

Podem ser de superfície ou de profundidade (DTH - "down the hole") e podem ser acionados hidráulicamente (superficiais) ou a ar comprimido.

Devem trabalhar concêntricamente no interior da composição de revestimento.

4) PARTICULARIDADES DE EXECUÇÃO

Nos itens anteriores objetivou-se a descrição genérica da tecnologia da estaca tipo raiz.

Em seqüência pretende-se discutir alguns pormenores que são fundamentais no dia a dia da execução; são também condições que afetam a capacidade de carga das estacas, bem como a velocidade executiva.

4-1) Cabe à empresa executora atentar para as seguintes indicações do projeto:

- comprimento e seção acabada da estaca;
- cotas de ponta e de arrasamento;

- carga de trabalho e eventual necessidade de prova de carga;
- elementos geométricos, tais como disposição dos blocos de capeamento, travamento e alavancas ;
- detalhes do concreto da estaca (fck mínimo) e da armação (quantidade e disposição das barras de aço).

Estes dados devem estar em concordância com a NBR 6122.

4-2) Durante a execução das estacas iniciais sobrevêm as primeiras diferenças em relação às previsões iniciais. A seguir são enumeradas algumas diferenças:

4-2-1) A maneira de atingir-se a cota de ponta prevista com a perfuração revestida depende de:

a) pressão e vazão da bomba da circulação d'água. Paralelamente a obra deve dispor de volume d'água suficiente para possibilitar a perfuração rápida e contínua de cada estaca. Infelizmente ocorre usualmente suprimento insuficiente, levando a direção da obra a tentar a reutilização da água com detritos de solo. Deve-se evitar esta reutilização uma vez que as bombas multi estágio com rotores fechados entopem-se e desgastam-se com facilidade quando se circula água suja. Os rotores tem espessura fina e são constituídos por placas paralelas que trabalham com um ajuste muito fino em relação à carcaça e aos acoplamentos ou vedações.

As vedações são constituídas por selos mecânicos, os quais perdem rapidamente a eficiência na presença de folgas ou obstruções.

b) capacidade da perfuratriz :

Às vezes são empregadas perfuratrizes leves, dotadas de “ push “ e “ pull “ de menor magnitude. Na tabela em anexo (n.º 1) apresentamos algumas características de perfuratrizes usuais. O torque das mesmas são inferiores a 1200 kgf m (12.000 N m) a cerca de 500 rpm. Tais valores são indicativos da condição da perfuratriz girar a composição de revestimento. Assim sendo, caso não haja um jato d'água de energia elevada, a composição de revestimentos tenderá a “ travar “ ou a “ prender “, no jargão de obra.

Conforme será discutido adiante, a capacidade da perfuratriz é sempre o elo mais fraco na tentativa de se evitar a prisão do revestimento. Evitá-la envolve, sem dúvida, a habilitação e coordenação da equipe, uma vez que a operação é interrompida a cada metro para colocação de novos segmentos de revestimento.

c) Condições e tipo de ferramenta de perfuração; Natureza do subsolo:

Ferramentas desgastadas ou inadequadas ao material a ser atravessado (solo, rocha alterada ou rocha sã) acarretam uma queda de produção ou mesmo a impossibilidade de se prosseguir a perfuração.

Os problemas acentuam-se potencialmente para diâmetros superiores a 15 – 20 cm de diâmetros 1 externo do tubo e podem ser dramáticos para perfurações com 27 e 35 cm. Nestas condições as equipes devem ser de alto nível, além de demandarem supervisão de qualidade.

d) Qualidade dos tubos de revestimentos e das roscas:

Na tabela 2 apresenta-se um cálculo de torques limites para tubos A 106 ou A 53, do tipo mais usado no Brasil que é o Mannesmann. O uso mais recomendável deve ser o de categoria A (tubos soldáveis) com tensão de escoamento de 205 M PA. O torque correspondente a esta tensão é de no mínimo

28,6 kN m para o diâmetro interno de aproximadamente 4" – schedule 80. Para as roscas em estado de novo a resistência é de 50% deste valor. Idem para os tubos de espessura schedule 40.

O cálculo é simples, considerando-se uma hipótese de cisalhamento puro ou mesmo assumindo-se um "push " ou "pull out " entre 50 e 100 kN aplicada pela perfuratriz. Conclui-se que a condição de flexão composta tem influência pouco significativa.

O cálculo ilustra o fato de que a ruptura no tubo maciço schedule 40 ou 80 é improvável (tubos em bom estado de conservação).

A ruptura ocorre quase sempre na rosca devido ao desgaste da mesma após uso excessivo. O formato da ruptura assume uma das seguintes feições :

- estreitamento da rosca macho e alargamento em forma de sino da rosca fêmea. Ocorre porque o desgaste arredondou as roscas e diminuiu a altura das mesmas.
- ruptura das paredes as quais se tornaram muito finas
- ovalamento ou amassamento devido ao esforço excessivo das morsas
- amassamento das extremidades por manuseio inadequado

Conclui-se em fecho que atribuir-se à coluna de revestimento o fato de não se conseguir a profundidade necessária não condiz com a realidade ou com a boa técnica executiva. Assim sendo, para estacas tipo raiz ou as mesmas devem ser revestidas ou deve-se prever, por ocasião do projeto, a execução de uma perfuração parcialmente revestida baseando-se sempre em uma boa investigação de sub superfície.

5) VARIANTES EXECUTIVAS

Caso ocorra a impossibilidade prática de se implantar, o revestimento até a cota prevista, é possível adotar-se um dos procedimentos seguintes:

5-1) Prosseguir a perfuração com o emprego de uma composição interna de hastes, dotada de um "tricone" ou ferramenta de perfuração na mesma extremidade. Deve-se levar em consideração que havendo pedregulhos no subsolo, não haverá a certeza de limpeza do fundo do furo.

5-2) Após a execução descrita em (5-1), podem ser adotadas duas seqüências :

1ª seqüência : "telescopagem" do furo, descendo-se um revestimento interno de diâmetro menor. Pode ser previsto em projeto, porém a velocidade de execução sofre um decréscimo acentuado. Por exemplo, pode haver a necessidade de perfurar os 5m inferiores da estaca no interior de um revestimento de maior diâmetro com 20m de profundidade. Para atingir-se os 25m, haverá a obrigatoriedade de rosquear e desrosquear 20m a mais de tubos.

2ª seqüência : prosseguir com o revestimento original após alívio frontal do avanço devido à perfuração interna com o tricone. Em geral torna-se viável também devido à limpeza de um testemunho que tenha eventualmente permanecido no interior do revestimento.

5-3) Há casos em que ocorre camada de rocha. Neste caso o mais recomendável é o uso de roto-percussão por dentro do revestimento.

Posteriormente não haverá a necessidade de se revestir o furo em rocha. Em geral empregam-se martelos de fundo (DTH).

5-4) Na eventualidade de ocorrerem matacões, a execução passa a ser extremamente trabalhosa com combinação de “DTH”, “telescopagem” e composição tricône. Tais situações embora complicadas podem vir a ser as únicas viáveis, o que atesta a versatilidade da estaca tipo raiz no enfrentamento de situações inusitadas.

6) CONSIDERAÇÕES SOBRE A ENERGIA DO FLUXO D'ÁGUA NAS ESTACAS TIPO RAIZ

Com a finalidade de avaliar-se este tópico, efetuaram-se algumas estimativas hidrodinâmicas que ilustrassem o efeito do fluxo d'água descendente (interior da tubulação) e ascendente (através do anel entre a parede de solo e a face externa do revestimento).

Da hidrodinâmica sabe-se que:

- os fluxos d'água podem ser laminares, intermediários ou turbulentos, dependendo de como as moléculas de líquido fluem paralelamente ou erraticamente. Sabe-se que na natureza a maioria dos fluxos é turbulenta e as condições laminares ocorrem em laboratório ou em simulações ideais.

Na percolação em solos, o fluxo é em geral laminar devido às baixas velocidades (da ordem de mm/s) e também devido às dimensões capilares dos vazios dos mesmos.

- para analisar numericamente o assunto Osborne Reynolds (físico inglês) atribuiu um número para delimitar três situações (chamado numero de Reynolds Re):
- fluxo laminar: Re inferior a 2.000
- fluxo transicional (intermediário): Re varia entre 3.000 e 4.000
- fluxo turbulento: Re acima de 4.000

$$Re = \frac{VD}{\nu}, \text{ sendo :}$$

V = a velocidade média do fluxo , em m/s

$$D = \text{diâmetro hidráulico} = \frac{4 \times \text{Área da seção}}{\text{Comprimento molhado da seção}}, \text{ em m}$$

ν = viscosidade cinemática do líquido circulante. É sensivelmente dependente da temperatura deste líquido.

Algumas simulações procedidas considerando-se as bombas e tubos descritos nos capítulos anteriores resultaram em velocidades internas de 0,20 a 0,30 m/s e velocidades anelares de 0,40 a 0,80 m/s. Nesta simulação não é possível diferenciar a rugosidade do revestimento e do solo. Resultaram nos seguintes valores para RE:

Re no interior do revestimento : de 13 a 60 mil.

Re no espaço anelar : de 07 a 30 mil.

Vem daí a necessidade de se imprimir grande velocidade e pressão à água, resultando fluxo altamente turbulento, formando um turbilhão que erode as paredes do solo. A elevada energia cinética desmonta e transporta o solo na direção do fluxo, tendo o efeito acumulativo de limpeza do furo, aumento do diâmetro da estaca e lubrificação do revestimento (desta maneira aumentando a velocidade de execução).

As zonas mais erodíveis são removidas, abrindo-se um fuste de conformação irregular o qual tem a tendência a conferir à estaca terminada uma capacidade de carga superior à de outras soluções de seção transversal equivalente (para estacas de pequeno diâmetro). Considera-se esta a razão pela qual a implantação do revestimento é a operação principal que diferencia a estaca tipo raiz.

Convém enfatizar este ponto, pois há as vezes a compreensão equivocada de que o revestimento serve apenas para manter o furo estável.

A injeção posterior de argamassa penetra discretamente na zona de solo com superfície irregular limpa, possibilitando uma boa solidarização solo – estaca.

7) COTA DE ARRASAMENTO.

Quando se deseja que a estaca fique arrasada em uma cota inferior em relação à superfície do terreno, tem-se que executar a estaca até a superfície e posteriormente demolir-se a parte superior que não será incorporada ao bloco de fundação.

Isto porque a extravasão da nata pelo espaço anelar é essencial para que se assegure da continuidade da argamassagem do fuste.

8) CONSIDERAÇÕES SOBRE A INJEÇÃO DA ARGAMASSA

Originalmente empregava-se ar comprimido para melhorar a penetração da nata da argamassa no solo e para assegurar a continuidade da argamassagem do fuste.

Modernamente, no Brasil, a injeção de ar vem sendo substituída pela injeção da própria bomba de argamassa, a qual tem o mesmo efeito, caso executada com o mesmo procedimento e cuidado de campo.

A funcionalidade e eficácia destes procedimentos é tanto maior quanto maior a fluidez e homogeneidade da argamassa, a qual será tratada em capítulo à parte.

Tabela 1 : Estacas tipo raiz – tubos de revestimentos e diâmetros de martelos de fundo.

Diâmetro nominal da estaca (mm)	100	120	150	160	200	250	310	410
Diâmetro externo do tubo (pol)	3	3 1/2	4 1/2	5	6	8	10	14
Diâmetro externo do tubo (mm)	89	102	127	141	168	220	273	356
Espessura da parede (mm)	8	8	9	9.5	11	13	13	13
Massa por metro linear (kg/m)	15	19	28	31	43	65	81	107
Diâm. do martelo de fundo (pol)	-	-	3 1/2	3 1/2	5 1/8	7 5/8	9 1/8	9 1/8

Tabela 2: Torques máximos para escoamento de tubos schedule 80, tipo Mannesman, grau A, $\tau_{esc} = 205 \text{ MPa}$ (2.050 kgf/cm^2)

Diâmetro externo do tubo (pol)	Torque máximo para escoamento kN.m
4"	28,6
5"	50,0
6"	81,9
8"	164,6
10"	306,4
14"	659,3

Tabela 3: Torques usuais de alguns equipamentos de acordo com catálogos

Equipamentos	Torque máximo	
	Kgf.m	N.m
CR-10 (Cló Zironi)	500	5000
CR-12 (Cló Zironi)	1100	11000
SM-400 (Soil Mec)	1198	11980
Acker Hologator	795	7950

Engº Ivan Grandis

Engº Helvio Tarozzo