

5

Torres, Terrenos e Fundações – Conceitos Gerais

Definem-se e se descrevem, de maneira breve e geral, os elementos integrantes deste estudo, ou seja, os tipos de suportes mais comuns em projetos de linhas de transmissão, o terreno da região e os tipos de fundação mais usuais nessa classe de projeto.

5.1

Torres

As estruturas de suporte das linhas de transmissão têm como finalidade sustentar os cabos condutores e pára-raios, respeitando uma distância adequada de segurança, desempenho e custo. Tais estruturas são, em geral, construídas em treliças com perfis de aço galvanizado ou em postes de aço, concreto ou madeira. No Brasil, é comum o uso de postes de madeira para tensões de 33 kV e 69 kV e postes de concreto para o intervalo de 69 a 230 kV (Santiago, 1983). Para tensões superiores a 138 kV, as estruturas mais usuais são as do tipo treliçado. Todavia, observa-se, na região norte do país, o uso de postes de concreto para tensões entre 138 kV e 230 kV.

No Brasil, as torres metálicas treliçadas são mais usuais, pois permitem, em um espaço limitado, obter uma estrutura alta, esbelta, mais leve e versátil. Além disso, as estruturas dessas torres têm composição modular, a fim de melhor se ajustarem aos locais de sua implantação. Resulta disso que o seu projeto deve considerar, necessariamente, além das diversas hipóteses de carregamento, as muitas hipóteses de composição da torre, com diferentes alturas associadas a diversas extensões das pernas, que podem estar niveladas ou com desníveis.

Vários aspectos permitem agrupar os tipos de torres metálicas existentes, sendo a funcionalidade estrutural e a forma de resistir às cargas os mais importantes para este estudo. Segundo a forma de resistir aos esforços que lhe são impostos, as estruturas são ditas autoportantes ou estaiadas. A Figura 5.1 mostra exemplos desses tipos de estruturas.

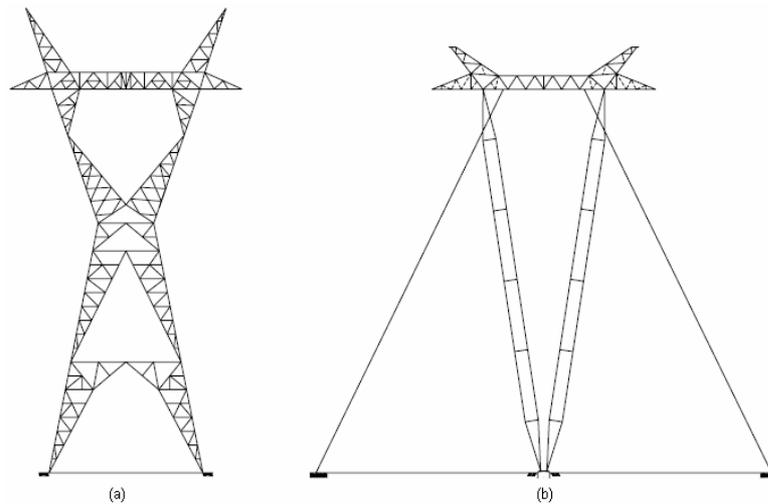


Figura 5.1 – Exemplos de torres: (a) autoportante; (b) estaiada (Garcia, 2005).

A função estrutural define estruturas de suspensão, de ancoragem, para ângulos e fim de linha, de derivação e de transposição de fases (Aguilera, 2007). As estruturas de suspensão em alinhamento ou pequenas deflexões são suportes dimensionados para resistir aos esforços verticais devido ao vento e ao peso dos cabos e dos isoladores e suas ferragens. As estruturas de ancoragem são de dois tipos: para deflexões grandes e terminais e para deflexões médias. As primeiras são utilizadas no início e no fim das linhas e em grandes deflexões, sendo mais reforçadas por serem mais solicitadas. As estruturas de ancoragem para deflexões médias são semelhantes às primeiras, porém são empregadas no meio das linhas, com trações longitudinais equilibradas, sendo menos reforçadas, pois devem resistir unilateralmente apenas aos reforços decorrentes do tensionamento dos cabos durante a montagem ou após a ruptura de alguns deles. As estruturas de transposição ou rotação de fase asseguram equilíbrio magnético da linha com rotação de fases, exigindo estruturas especiais. E, finalmente, as estruturas de derivação são utilizadas em casos de se efetuarem sangrias na linha para alimentar um ramal, sem necessidade de pátio de seccionamento e manobras.

5.2 Terrenos

A seleção das fundações a serem adotadas em projetos de linhas de transmissão depende principalmente do terreno. Geralmente, para cada projeto de linha de transmissão, são definidos tipos de solo e de rocha, de acordo com as

propriedades encontradas nos maciços da região. No presente trabalho a descrição dos maciços encontrados na Bacia do Prata está baseada em informações fornecidas por sondagens e análises anteriores. Portanto, como exemplo, cita-se a classificação dos solos e das rochas definida pela especificação técnica EP-5029 de FURNAS (2003). Essa EP define os tipos de solos e de rochas mais comuns nas regiões de atuação da empresa Furnas, o que inclui parte da Bacia do Prata, região eleita para o presente estudo.

Tabela 5.1 – Limites para os parâmetros geotécnicos dos solos.

Tipo de solo	SPT	Coesão (kN/m ³)	ϕ	γ (kN/m ³)	Taxa admissível à compressão (kN/m ²)	Adesão Concreto-solo/rocha (kN/m ²)	α
I	9 a 18	30 a 40	$\leq 32^\circ$	16 a 18	200 a 400	≤ 25	20° a 25°
II	6 a 12	25 a 30	$\leq 28^\circ$	15 a 17	100 a 200	≤ 20	17,5° a 22,5°
III	6 a 12	25 a 30	$\leq 25^\circ$	14 a 16	100 a 200	≤ 20	15° a 20°
IV	3 a 6	≤ 15	$\leq 20^\circ$	12 a 14	≤ 100	≤ 10	10° a 15°

- (1) A taxa admissível refere-se à profundidade do solo a 2,0 m, deve-se reportar à NBR6122 para aumento da pressão admissível com a profundidade para solos de natureza arenosa;
- (2) Valores do ângulo de arrancamento α para o dimensionamento pelo método do tronco de cone invertido (Método do Cone);
- (3) Os valores indicados são considerados minorados conforme NBR6122 (1996);

Tabela 5.2 – Limites para os parâmetros geotécnicos das rochas.

Tipo de rocha	RQD	Coesão (kN/m ³)	ϕ	γ (kN/m ³)	Taxa admissível à compressão (kN/m ²)	Adesão Concreto-solo/rocha (kN/m ²)	α
V	75 a 100	300 a 400	35 a 45	24 a 29	1000 a 3000	≤ 1600	35° a 45°
VI	25 a 75	100 a 300	15 a 35	20 a 22	600 a 1200	≤ 700	30° a 35°

- (1) Valores do ângulo de arrancamento α para o dimensionamento pelo método do tronco de cone invertido (Método do Cone);
- (2) R_{ck} é a resistência característica da rocha ou do concreto, sendo considerada a menor entre elas;
- (3) Os valores indicados são considerados minorados conforme NBR6122 (1996);

Tabela 5.3 – Descrição dos tipos de solos.

Tipos de solos	Descrição
I	Solos residuais jovens, passando, eventualmente, em profundidade, à rocha completamente decomposta, tendo cobertura de solo coluvial/residual maduro, de no máximo 1 m de espessura. Os solos residuais jovens apresentam, geralmente, constituição silto-arenosa ou areno-siltosa, às vezes micáceos, exibindo as feições remanescentes da rocha matriz e, tendo cores variegadas.
II	Solos residuais maduros, não porosos e não colapsíveis, podendo passar a solo residual jovem em profundidade, com cobertura de solo coluvionar de no máximo 1,5 m de espessura. Os solos residuais maduros apresentam constituição mais argilosa que os solos residuais jovens, têm coloração mais uniforme, vermelha, amarela ou rósea e confundem-se com os solos coluvionares, que, geralmente, em sua transição para o substrato, apresentam uma camada de fragmentos de quartzo.
III	Solos coluvionares ou aluvionares (transportados), não colapsíveis e não porosos, em zonas permanentemente acima do nível d'água subterrâneo. São mais argilosos que os eventuais residuais maduros sotopostos. Têm cor em geral marrom e/ou amarela. Os aluvionares, ou transportados, têm as mesmas características que os coluvionares, diferenciando-se desses pela existência de um nível de seixos rolados no contato com o substrato.
IV	Solos que, em geral, exigem fundações especiais: solos porosos e colapsíveis, em zona permanentemente acima do nível d'água subterrâneo; solos sedimentares com nível d'água alto ou subsuperficial; solos de talus com matacões e nível d'água alto; solos expansivos; solos residuais em zona cárstica (vazios em calcários), etc.

Tabela 5.4 – Descrição dos tipos de rochas.

Tipos de rocha	Descrição
V	Rocha sã ou pouco decomposta, escavável apenas com explosivos, com poucas fraturas, podendo apresentar oxidação superficial, sem ou com pouca decomposição da rocha com matriz sã.
VI	Rocha medianamente decomposta, impenetrável a picareta e escavável com rompedor, com resistência crescente com a profundidade, apresentando cobertura de solo de, no máximo, 1,5 m de espessura. Apresenta matriz rochosa decomposta e descolorida, com presença das descontinuidades e outras feições da rocha original. Habitualmente, aparece como impenetrável a percussão nas sondagens de simples reconhecimento e pode ter recuperação nula ou pequena nas sondagens rotativas.

5.3 Fundações

Os tipos de fundações de emprego corrente em estruturas de suportes de linhas de transmissão dependem, em geral, do tipo de solo e do dimensionamento da torre e seu carregamento. O carregamento proveniente dos suportes de sustentação de LT's, especialmente em torres autoportantes, pode ser transmitido às fundações através de um elemento metálico de ligação denominado “stub” (Figura 5.2). Para o dimensionamento da fundação, considera-se como ponto de aplicação desse carregamento o último furo de ligação das pernas da torre com o “stub”. Os desenhos do stub e da silhueta da torre apresentam importantes informações para o projeto das fundações, tais como composição e dimensão do stub, ângulos de inclinação das faces e dos montantes da torre e forma e dimensões dos módulos de composição da torre. Muitos desses elementos são considerados essenciais ao cálculo das cargas nas fundações.

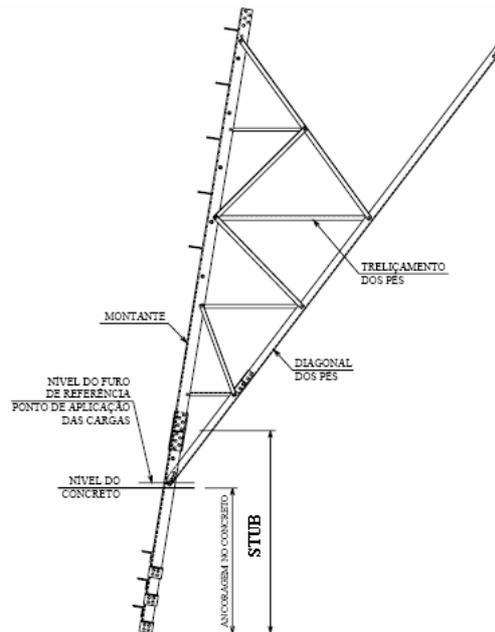


Figura 5.2 – Ligação entre a torre autoportante e a fundação em concreto, com materialização do ponto de aplicação dos esforços (Garcia, 2005).

Usualmente, as estruturas de suporte das linhas de transmissão são dimensionadas para suportar as seguintes cargas (FURNAS, 2003): cargas provenientes dos cabos condutores e pára-raios e da cadeia de isoladores; peso próprio da estrutura e carga de vento incidente diretamente sobre a torre. Normalmente essas cargas são agrupadas em desenhos esquemáticos, denominados “árvores de cargas”, e correspondem às várias hipóteses de carregamento da estrutura da torre

A Figura 5.3 mostra exemplos de árvores de cargas, nas quais são incluídos o peso próprio da estrutura e a carga de vento.

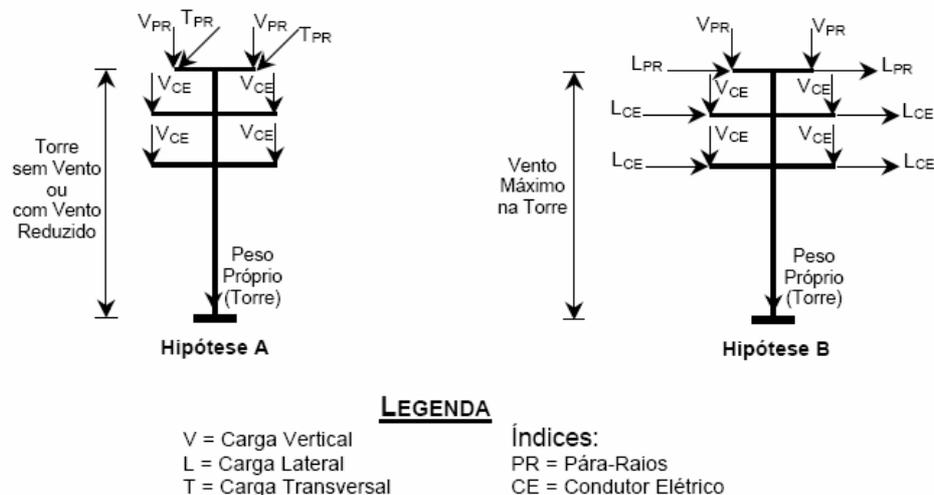


Figura 5.3 – Exemplos de árvores de carregamento.

As memórias de cálculo das estruturas fornecem as reações em seus apoios, a partir das quais são obtidas as cargas nas fundações. Os recursos de cálculo das estruturas das torres permitem que sejam resumidos os valores extremos das reações de apoio que são apresentados na memória de cálculo, em geral com a indicação das hipóteses de carregamento e composição física da torre que lhe dão origem. Para o dimensionamento das fundações, sugere-se a consideração dos seguintes valores extremos das reações (FURNAS, 2003): máxima reação vertical de compressão, máxima reação vertical de tração, máxima reação horizontal com compressão vertical e máxima reação horizontal com tração vertical. Observa-se que, normalmente, as hipóteses de máxima compressão ou de máximo arrancamento cobrem a hipótese de máximo cortante.

Os esforços podem ser considerados segundo dois eixos usuais: esforços segundo os eixos ortogonais da torre, apropriados para projeto de fundações com fustes verticais, e esforços segundo o eixo da montante (decomposição), porém com cortante agindo horizontalmente no topo da fundação. Essa última opção aplica-se para fundação com fustes inclinados, na mesma direção do montante.

As fundações das torres de uma linha de transmissão de energia elétrica são subdivididas em dois grupos conforme suas aplicações (FURNAS, 2003). As fundações de uso corrente são aquelas cujos projetos, chamados “projetos-tipo”, são de aplicação generalizada de acordo com o tipo de terreno e de torre. Já as fundações especiais são tais cujos projetos aplicam-se especificamente em determinados locais, estruturas e condições de terreno. A escolha do tipo de fundação é sempre em função das condições do subsolo e das condições de acesso ao local da estrutura.

Para os projetos-tipo das fundações são considerados os valores extremos das reações de apoio relativos a cada tipo de torre, cobrindo as diferentes hipóteses de carregamento e de composição física da torre. Para um projeto especial, em geral com local de implantação e composição física da estrutura bem definidos, a fundação deve ser dimensionada para as cargas correspondentes à situação específica da torre, manifestada nas árvores de carga, na ação do vento sobre a torre, além, naturalmente, do seu peso próprio.

Há um princípio importante a ser considerado no projeto das fundações dessas estruturas: a segurança global da fundação deve ser maior que a da própria estrutura, razão pela qual as cargas nas fundações resultantes do cálculo da

estrutura são afetadas de uma majoração adicional, através de fatores que são apresentados mais adiante. Tal princípio é justificado pelo fato de que a recuperação de uma linha, interrompida eventualmente por colapso estrutural de uma torre, é muito mais fácil e rápida mediante a montagem de uma nova torre, desde que a fundação não tenha sido danificada.

A Norma NBR8681 - “Ações e segurança nas estruturas” define os estados ditos limite nos quais as estruturas devem ser verificadas, ou seja, os estados limites de utilização ou de serviço (ELS) e os estados limites últimos (ELU). No caso das estruturas de fundação para suportes de LT’s, são consideradas as seguintes verificações no ELS: as que tratam dos deslocamentos da fundação a fim de mantê-los abaixo dos limites aceitáveis pela superestrutura; as que consideram as tensões no solo a fim de limitá-las aos valores admissíveis compatíveis com as hipóteses de cálculo dos deslocamentos; e, as que tratam das limitações de tensão nas armaduras ou do seu detalhamento com o propósito de manter as fissuras no concreto dentro do padrão aceitável segundo a NBR6118. No ELU, consideram-se como verificações as que avaliam a segurança contra o arrancamento da fundação e as que confrontam a compressão máxima na fundação com a capacidade de suporte do solo, levados em conta o tipo de fundação, sua forma, suas dimensões e profundidade e os parâmetros geotécnicos do solo. Em certos casos, a segurança contra o tombamento da fundação também é verificada. No ELU, são realizadas, ainda, as verificações que tratam da estabilidade interna do elemento de fundação, tendo como objetos as seções de concreto e as suas armaduras.

É importante ter em conta que as estruturas dos suportes são, geralmente, dimensionados no ELU. Portanto, os valores que se encontram na memória de cálculo – os das árvores de carga, das cargas de vento e das cargas ou reações nas fundações – são os correspondentes ao ELU do suporte. As árvores de carga comumente especificam os fatores de ponderação do peso próprio da estrutura que são incluídos nos carregamentos a ela correspondentes.

Para a verificação no ELU da fundação, FURNAS (2003) recomenda os seguintes fatores para os pesos da fundação e do solo ao participarem da composição de carregamentos: 1,1 - se contribuem desfavoravelmente para a estabilidade ou 0,9 - se contribuem favoravelmente para a estabilidade.

Pelas razões expostas anteriormente, são sugeridos os seguintes fatores adicionais para as cargas procedentes da superestrutura, com seus valores correspondentes ao ELU da superestrutura, ao comporem os carregamentos para as verificações no ELU da fundação: 1,1 para fundação de suporte de suspensão ou 1,2 para fundação do suporte terminal ou de ancoragem.

Não havendo indicação, podem ser adotados os seguintes valores para as cargas de fundações no ELS:

a) Para torre de suspensão: 50% das cargas dela provenientes, correspondentes ao ELU da torre, antes da aplicação da majoração adicional correspondente ao ELU;

b) Para torre de ancoragem média (deflexão até 30°): 70% das cargas citadas anteriormente;

c) Para torre de ancoragem pesada (deflexão acima de 30°) ou terminal: 80% das mesmas cargas.

Apresenta-se, a seguir, a descrição das fundações mais adotadas em cada tipo de suporte segundo a especificação técnica de FURNAS (2003). Verifica-se que, no caso das estruturas estaiadas, são projetadas fundações diferentes para o mastro central e para os estais, enquanto que para as estruturas autoportantes é comum o uso de um mesmo tipo de fundação para cada pé da torre.

5.3.1

Fundações aplicáveis a estruturas autoportantes (FURNAS, 2003)

- Sapata de concreto armado

Esse tipo de fundação é constituído por uma placa de concreto armado, em geral quadrada, encimada por pilar, também de concreto armado, que recebe o “stub”. O pilar da sapata costuma ter a mesma inclinação do stub e da perna da torre, pois os momentos atuantes na sua base são menores, reduzindo o custo da fundação (Ashcar, 2001). Pode, no entanto, ser vertical, quando em geral resulta a necessidade de maiores dimensões para a fundação.

A viabilidade desse tipo de fundação ocorre quando: o solo, a profundidade não maior que 2 a 3 metros, apresenta condições de receber a base de uma fundação direta, tendo, preferencialmente, a resistência crescente com a profundidade; a posição do NA subterrâneo situa-se abaixo do leito da fundação;

o local não está sujeito à erosão; e, o local está sujeito a eventuais alagamentos, situação em que o projeto deve necessariamente levar em conta a variação do NA.

As sapatas são mais adotadas para as torres de suspensão, em virtude dos menores esforços horizontais na fundação.

- Bloco ancorado em rocha

Os blocos ancorados são prismas retos de dimensões, em planta, menores e de maior altura que as sapatas, associados a chumbadores constituídos por barras de aço. São utilizados na ocorrência de rocha não escavável manualmente a pequena profundidade (até cerca de 2,5 m). Como as sapatas, os blocos podem ter pilares de concreto armado para receber os “stubs”.

Em virtude dos valores reduzidos das dimensões desse tipo de fundação, é importante a atenção para a reserva de espaço para a colocação do “stub”. Nesse tipo de fundação, os esforços de arrancamento são transmitidos ao maciço de fundação pelos chumbadores.

- Tubulões

O tubulão é uma fundação profunda de concreto armado, de forma cilíndrica, em geral escavado a céu aberto e com base alargada, destinado a transmitir ao maciço de fundação, os esforços da superestrutura.

O tubulão com base alargada é utilizado em solos com resistência crescente com a profundidade e, em geral, que tenham condições de escavação a céu aberto. Sua profundidade varia de 3,0 m a 10,0 m, dependendo do tipo de solo e dos esforços na fundação (Ashcar, 2001). A atual NBR6122 estabelece a base alargada tronco-cônica com até 1,8 m de altura e com um trecho inicial cilíndrico de, no mínimo, 20 cm.

Eventualmente, podem ser utilizados tubulões sem a base alargada, quando escavados em rocha, em geral branda, sã ou pouco decomposta ou quando em solos com profundidades de 10 m ou maiores, escaváveis com equipamento mecânico. Em solo submerso, por exemplo, tem-se dado preferência à fundação cilíndrica, sem alargamento da base, com uso de camisas metálicas ou de concreto (sem bolsa), mas com profundidade maior que o tubulão com a base alargada.

- Estacas

Sempre que o maciço de fundação só tenha capacidade para receber as cargas em profundidade e/ou as condições do nível d'água subterrâneo impeçam o uso de outro tipo de fundação, recorre-se ao uso de estacas.

As fundações estaqueadas geralmente são constituídas de estacas verticais e/ou inclinadas, sendo essas destinadas a combater também os esforços horizontais (Ashcar, 2001). São constituídas, em geral, por um bloco de coroamento e um pilar de concreto armado (vertical ou inclinado segundo a perna da torre) sobre um número variável de estacas. O pilar deve receber o stub e, portanto, pode ter suas dimensões condicionadas pelas daquela peça. Eventualmente, as quatro pernas das torres autoportantes com fundações em estacas podem ter os blocos de coroamento ligados por vigas de concreto armado.

Os tipos mais utilizados em linhas de transmissão são as estacas pré-moldadas de concreto armado ou protendido e as metálicas (Ashcar, 2001).

Entretanto, antes da seleção de estacas, deve-se observar, no campo, as condições de acesso para o equipamento de cravação ou de execução da fundação, no caso das estacas injetadas.

Quando o maciço em que as estacas se apóiam estiver em profundidades que impeçam o prosseguimento da execução das mesmas sem que se alcance a resistência ao arrancamento necessária, as seguintes soluções podem ser tomadas: atirantamento do bloco de coroamento; fundação em caixa estaqueada ou estacas tipo raiz para embutimento no terreno resistente. O sistema em caixa estaqueada utiliza, em geral, uma caixa de concreto armado cheia de terra compactada e apoiada em estacas. A caixa provê o peso necessário para que sejam evitados ou minimizados os esforços de tração nas estacas.

- Grelha metálica

Esse tipo de fundação pode ser aplicado nas mesmas condições em que são empregadas as sapatas de concreto armado, com a desvantagem de apresentar menor resistência à agressividade do terreno natural. Portanto, devem ser tomadas medidas de proteção adicionais, além da galvanização das peças metálicas, especialmente em locais de solos agressivos. Por outro lado, as principais vantagens da grelha consistem na rapidez de execução da fundação (escavação,

montagem e reaterro) e na facilidade de transporte, principalmente em locais de difícil acesso para o uso de concreto (Ashcar, 2001).

Embora em desuso, esse tipo de fundação está em operação em linhas de transmissão mais antigas e ainda é utilizada em casos de emergência, por exemplo, quando é necessária a instalação de uma torre provisória para reparos na torre permanente ou na sua fundação. Justifica-se, assim, a inclusão da grelha metálica como um dos tipos de fundação ainda em pauta.

5.3.2

Fundações aplicáveis a estruturas estaiadas (FURNAS, 2003)

- **Fundações para o Mastro**

Para suportar os esforços de compressão (verticais e horizontais) que atuam sobre o mastro central das estruturas estaiadas, podem ser selecionadas fundações em sapatas e blocos de concreto armado. As sapatas e blocos podem ser de concreto pré-moldado ou concretados no local da estrutura. O emprego dessas fundações é feito nas mesmas circunstâncias em que tais fundações são escolhidas para as torres autoportantes. No entanto, admitem-se, aqui, condições menos severas para os recalques sob as cargas de serviço, em razão do sistema estrutural e da consequente possibilidade de ajustes dos estais pelos serviços de manutenção.

Em solos fracos podem ser utilizadas as fundações em tubulões ou em estacas, com as mesmas características previstas para as estruturas autoportantes. Na ocorrência de rocha não escavável manualmente a pequena profundidade (até cerca de 2,5 m), recorre-se aos blocos ancorados, também com as mesmas características previstas para as estruturas autoportantes.

- **Fundações para os Estais**

Os estais são peças alongadas constituídas por cabos de aço associados a barras que se ligam a peças enterradas. As peças enterradas suportam os esforços de tração nos cabos provenientes da outra extremidade e são ligadas ao mastro central da estrutura.

As fundações para os estais podem ser placas de concreto armado pré-moldadas, com forma poligonal ou circular. Outra forma de ancoragem dos cabos dos estais é feita mediante uso de tubulões curtos, desde que o solo local permita a

escavação a céu aberto. Essa solução tem sido preferida em virtude de exigir menor volume de escavação e é feita aproveitando as vantagens da escavação e concretagem em poço de seção circular. Outras soluções podem ser utilizadas para a ancoragem dos estais como, por exemplo, blocos ancorados, no caso de rocha não escavável manualmente a pequena profundidade (até cerca de 2,5 m).