

6 Proposta dos Conjuntos Torre x Terreno x Fundação

6.1 Conjuntos torre x terreno x fundação

Para o estudo dos conjuntos torre x terreno x fundação, são selecionados os seguintes projetos de fundação de linhas de transmissão implantados na região da Bacia do Prata (Figura 6.1): LT 230 kV – Chavantes-Botucatu, localizada na região sudoeste de São Paulo; LT 525 kV – Salto Santiago-Ivaiporã-Cascavel Oeste, localizada na região oeste do Paraná; LT 525 kV – Garabi-Itá, localizada na região noroeste do Rio Grande do Sul; LT 750 kV – Ivaiporã-Itaberá-Tijucu Preto, localizada ao longo da região centro-sudoeste do Paraná até a região sul de São Paulo.

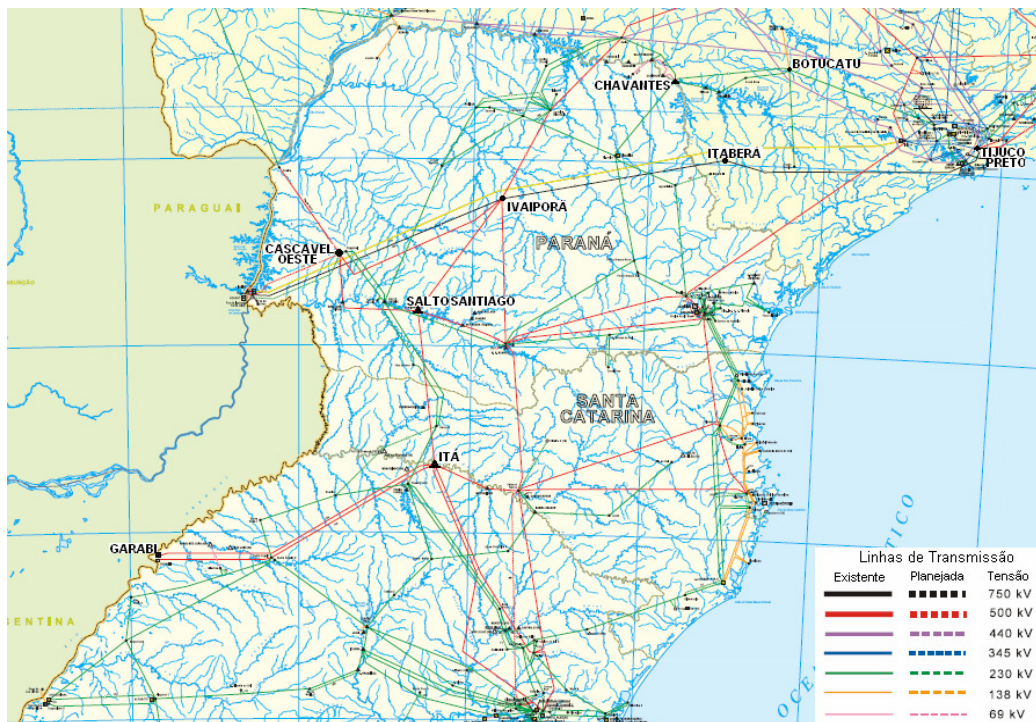


Figura 6.1 – Linhas de transmissão na Bacia do Prata (ons.gov.br).

Cada um desses projetos possui singularidades que motivam sua inclusão no presente estudo.

A linha Chavantes-Botucatu possui uma extensão de 137 km, aproximadamente, na qual estão distribuídas 302 torres autoportantes. Não existem torres estaiadas ao longo dessa linha. Outra peculiaridade é o fato das fundações das torres possuírem “stub” dobrado, mantendo o pilarete da sapata na posição vertical. No presente estudo, essa linha representa as linhas de transmissão com tensão de 230 kV.

A linha Salto Santiago-Ivaiporã-Cascavel Oeste prolonga-se por 372 km e é constituída por 765 torres, entre autoportantes e estaiadas. Nessa linha, as fundações em sapatas apresentam pilaretes inclinados para acompanhar a angularidade da torre.

A linha Garabi-Itá estende-se por, aproximadamente, 360 km, compreendendo 745 torres, também entre autoportantes e estaiadas. O projeto das fundações dessas torres inclui uma tipificação de solos bem definida e variada, além de incluir o exemplo de dimensionamento da fundação em bloco ancorado para os estais de uma torre estaiada.

Finalmente, a linha Ivaiporã-Itaberá-Tijuco Preto prolonga-se por 585 km e representa as linhas de transmissão com a maior tensão no Brasil. Outra razão para incluir tal linha no presente trabalho é a representação das fundações do tipo grelha metálica.

6.1.1 Torre

Geralmente, ao longo de uma linha de transmissão são necessárias estruturas de suspensão, de ancoragem, para ângulos e fim de linha, de derivação e de transposição de fases (Aguilera, 2007). Muitas vezes ainda se faz necessária a utilização dos dois tipos de torres: autoportante e estaiada.

Outro procedimento comum no projeto de linhas de transmissão é a composição das torres metálicas treliçadas por módulos intermediários e diferentes comprimentos de pernas, permitindo a variação de altura para o enquadramento dessas ao perfil do terreno no local de implantação. As figuras 6.2 e 6.3 apresentam, respectivamente, exemplos de torres de suspensão autoportante e estaiada constituídas por módulos intermediários e diferentes comprimentos de

pernas. Tais exemplos pertencem à linha de transmissão de energia elétrica ‘LT 525 kV Salto Santiago-Ivaiporã-Cascavel Oeste.

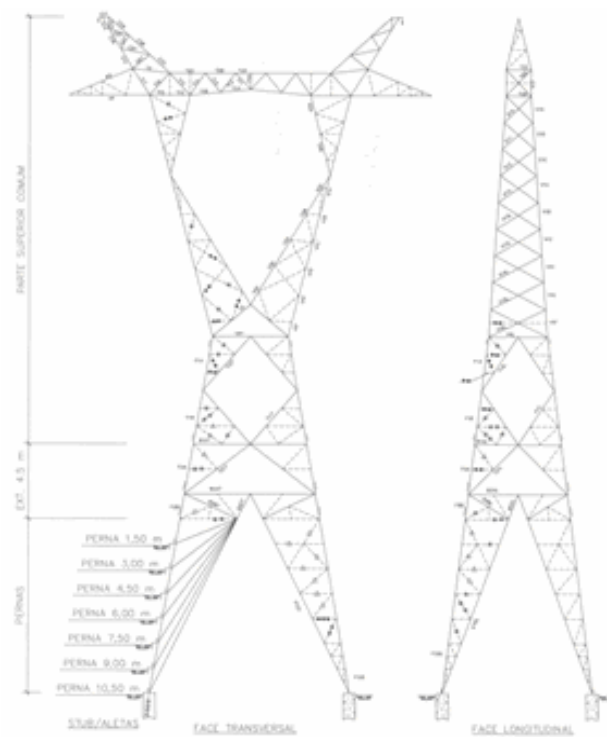


Figura 6.2 – Torre autoportante – Fluxo Engenharia.

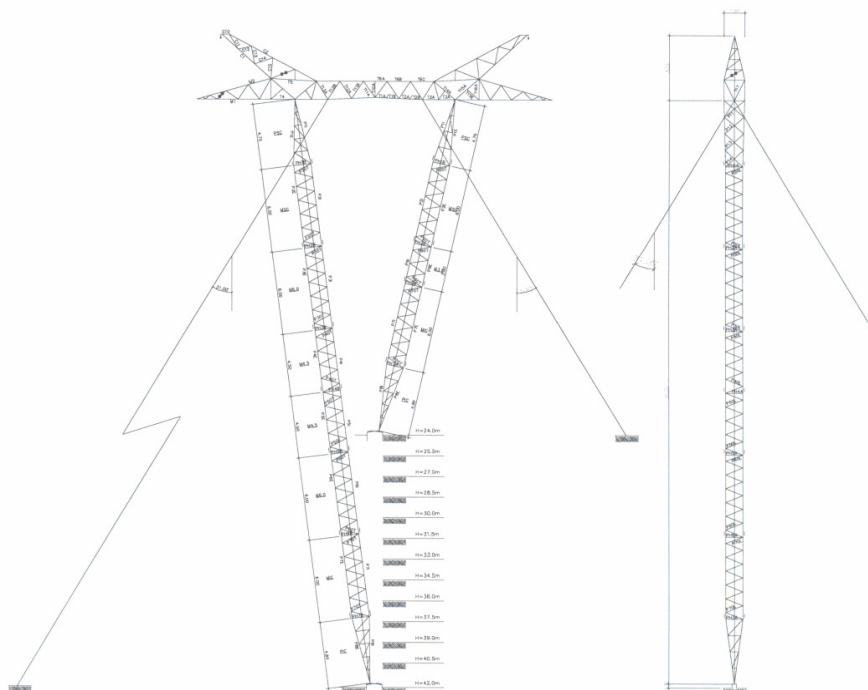


Figura 6.3 – Torre estaiada – Fluxo Engenharia.

Para o projeto das fundações, tais torres são agrupadas de acordo com a forma de resistir ao carregamento e com a função estrutural. As estruturas de suspensão, tanto autoportante quanto a estaiada, estão em maior quantidade ao longo de uma linha, devido a sua própria função estrutural. Por essa razão, do grupo relativo à função estrutural, as torres de suspensão são as únicas representadas neste trabalho.

Além disso, por ser uma metodização, estão incluídas, como exemplos, apenas as torres com maiores alturas, constituídas por todos os módulos intermediários mais altos e por pernas com maiores comprimentos.

A tabela 6.1 apresenta as torres selecionadas como exemplos de cada linha, informando as alturas máximas e o carregamento máximo à compressão e à tração.

Tabela 6.1 – Torres autoportante e estaiadas.

Projeto	Torre autoportante			Torre estaiada		
	H _t (m)	C _{max} (kN)	T _{max} (kN)	H _t (m)	C _{max} (kN)	T _{max} (kN)
S. Santiago-Cascavel O.	49,5	938,3	781,9	42,2	766,41	330,0
Chavantes-Botucatu	42,2	575,3	510,6	-	-	-
Garabi-Itá	51,2	871,6	738,6	43,9	436,6	326,4

6.1.2 Terreno

Como visto no item 3.4 do capítulo 3, a região da Bacia do Prata apresenta, no geral, boa capacidade de carga, permeabilidade moderada a alta, NA profundo e predominância de argilas e areias. Tais características geotécnicas decorrem, principalmente, devido à presença significativa de Latossolos e Argissolos.

Todavia, para a definição e dimensionamento das fundações dos suportes das LT's, são necessárias informações mais precisas quanto ao perfil solo. Essas são obtidas através de sondagem e investigações geotécnicas. A partir dessas informações, é feita uma tipificação do solo, conforme mencionado no capítulo 5 do presente trabalho, de acordo com as necessidades de cada projeto de linha de transmissão. Assim sendo, a título de ilustração, apresenta-se, na Tabela 6.2, a tipificação dos solos elaborada para as linhas de transmissão Chavantes-Botucatu, Garabi-Itá e Salto Santiago-Cascavel Oeste.

Tabela 6.2 – Exemplos de classificação dos tipos de solos dos projetos de fundação de LT's na Bacia do Prata.

Projetos	Ex	SPT	γ (kN/m ³)	ϕ (°)	C (kN/m ²)	α (°)
Garabi-Itá	1	2 a 6	10	20	10	15
	2	7 a 10	14	20	20	20
	3	>10	16	25	40	30
Chavantes-Botucatu	4	4 a 6	12 a 15	20 a 25	10 a 20	14
	5	> 6	16	30	20	25
S. Santiago- Cascavel O.	6	-	13	24	15	15
	7	-	15	29	25	20

6.1.3 Fundação

Geralmente, em uma linha de transmissão, as sapatas e os tubulões são dimensionados como “projetos-tipo”, enquanto os blocos ancorados e as estacas são dimensionados como projetos especiais. Em projetos de linhas de transmissão mais antigos, as grelhas são fundações de uso corrente. Dessa forma, as sapatas e os tubulões estão mais presentes nas fundações de LT's. Nas tabelas 6.3 a 6.5 são apresentadas informações sobre algumas fundações para os mastros e estais das torres estaiadas e para as torres autoportantes implantadas nas LT's selecionadas. Observa-se que, nessas tabelas, NA é o nível do lençol freático e NE indica que o mesmo não é encontrado até a profundidade determinada pela sondagem.

Tabela 6.3 – Conjunto torre x terreno x fundação para o exemplo de torre estaiada tipo suspensão pesada - Mastros.

Projeto	Fundação	h_e (m)	NA (m)	Tipo de Solo	B (m)	L (m)	Volume de concreto (m ³)	Consumo de aço (kg)
Santiago Cascavel	Tubulão	4,50	NE	7	1,4	-	3,99	229,9
	Sapata	1,50	NE	7	1,4	2,6	1,65	71,80
	Tubulão	5,50	NE	6	1,8	-	5,38	310,0
	Sapata	2,00	NE	6	1,9	3,2	2,87	124,8
Garabi Itá	Sapata	1,50	NE	2	2,0	2,0	1,88	81,8
	Bloco Ancorado	0,05	NE	R ¹	1,0	1,0	0,85	65,4

1 – Fundação em rocha, cujas propriedades não estão definidas no corpo da tese.

Tabela 6.4 – Conjunto torre x terreno x fundação para o exemplo de torre estaiada tipo suspensão pesada- Estais.

Projeto	Fundação	h_e (m)	NA (m)	Tipo de Solo	B (m)	L (m)	Volume de concreto (m^3)	Consumo de aço (kg)
Santiago Cascavel	Tubulão	4,23	NE	7	1,2	-	5,44	313,5
	Tubulão	4,23	NE	6	1,4	-	8,64	497,8
Garabi Itá	Tubulão	3,50	NE	2	1,8	-	7,2	-
	Tubulão	2,50	NE	3	1,8	-	4,16	-
	Bloco Ancorado	2,00	NE	R ¹	1,2	-	3,2	218,4

1 – Fundação em rocha, cujas propriedades não estão definidas no corpo da tese.

Tabela 6.5 – Conjunto torre x terreno x fundação para o exemplo de torre autoportante tipo suspensão pesada.

Projeto	Fundação	h_e (m)	NA (m)	Tipo de Solo	B (m)	L (m)	Volume de concreto (m^3)	Consumo de aço (kg)
S. Santiago Cascavel O.	Tubulão	5,90	NE	7	1,4	-	21,92	1240,0
	Sapata	3,05	NE	7	3,05	3,05	25,64	1468,0
	Bloco Ancorado	3,65	NE	R ¹	2,00	-	11,64	1424,0
	Tubulão	7,00	NE	6	1,9	-	28,72	1252,0
	Sapata	3,30	NE	6	3,3	3,3	31,04	1680,0
Chavantes Botucatu	Sapata	2,93	NE	5	2,5	2,5	23,22	1841,0
	Tubulão	6,50	NE	4	1,50	-	21,58	924,00
	Sapata	2,80	NE	5	2,5	2,5	17,13	1342,0
	Tubulão	5,70	NE	4	1,4	-	15,66	1076,0
	Estaca	9,00	2,38	S ²	1,95	2,0	13,25	1092,0
	Bloco Ancorado	3,80	NE	R ¹	1,0	2,3	18,28	1704,0
Garabi – Itá	Sapata	3,55	NE	3	2,15	2,15	12,16	1302,98
	Tubulão	7,70	NE	2	1,8	-	24,68	1649,76
	Tubulão	6,70	NE	3	1,5	-	19,72	1371,24

1 – Fundação em rocha, cujas propriedades não estão definidas no corpo da tese.

2 – Fundação em solo, cujas propriedades não estão definidas no corpo da tese.

Dessas tabelas são extraídos alguns exemplos de fundações. São levados em consideração os tipos de fundação que mais se destacam entre os projetos, contemplando as torres apresentadas no item 6.1.1 e a fundação em grelha da LT Ivaiporã-Itaberá-Tijuco Preto.

Assim, para as torres autoportantes das linhas Salto Santiago-Cascavel Oeste e Chavantes-Botucatu são exemplificadas as fundações em sapata, pois são solucionadas de duas formas diferentes: a primeira com o pilarete inclinado e a segunda com o “stub” dobrado. Da linha Chavantes-Botucatu também são destacadas as fundações em bloco ancorado, tubulão e estaca para torre autoportante.

Para os mastros das torres estaiadas, exemplifica-se o tubulão, a sapata e o bloco ancorado da linha Salto Santiago-Cascavel Oeste. Para os estais, são apresentadas as fundações em bloco ancorado e em tubulão da linha Garabi-Itá.

Finalmente, o último exemplo é o da grelha metálica para torre autoportante da linha Ivaiporã-Itaberá III e Itaberá-Tijuco Preto.

Para todas as fundações apresentadas são feitas verificações no ELU que tratam da estabilidade interna dos elementos da fundação, tendo como objetos suas seções de concreto e as suas armaduras.

6.1.3.1

Exemplo 1: fundação em sapata para torre autoportante da LT 230 kV Chavantes-Botucatu

Como mencionado anteriormente, a fundação em sapata da linha Chavantes-Botucatu para a torre autoportante em suspensão possui “stub” dobrado e pilarete vertical. Outra particularidade é a viga de enrijecimento, que além de facilitar o processo construtivo, reduz o esforço no dimensionamento por não necessitar da verificação ao puncionamento. Todavia, essa solução é discutível devido ao custo associado a uma quantidade maior de forma.

No dimensionamento são consideradas as verificações no ELU que avaliam a segurança contra o arrancamento da fundação e 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.

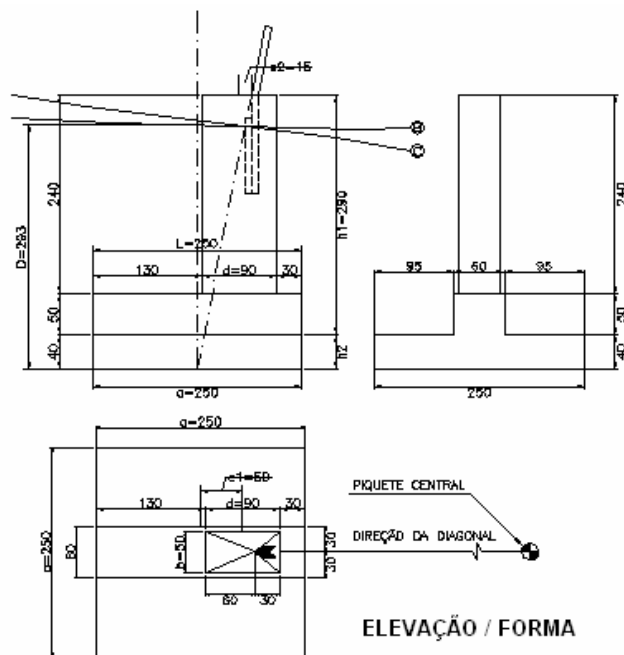


Figura 6.4 – Fundação em sapata da torre autoportante de suspensão na LT Chavantes-Botucatu.

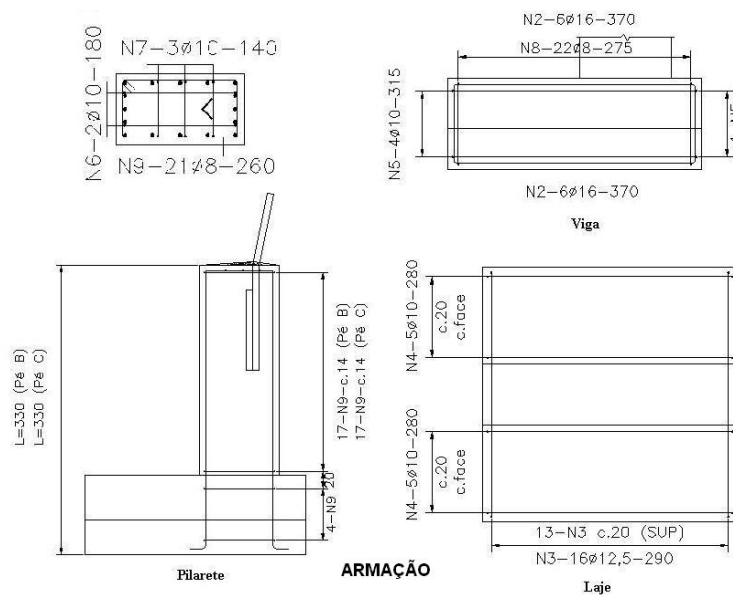


Figura 6.5 – Armadura da fundação em sapata da torre autoportante de suspensão na LT Chavantes-Botucatu.

6.1.3.2

Exemplo 2: fundação em sapata para torre autoportante da LT 525 kV Salto Santiago-Cascavel Oeste

Nessa linha, verifica-se, no ELU, a segurança contra o arrancamento da fundação e a relação entre a compressão máxima na base da sapata e a capacidade de suporte do solo. Na determinação da tensão pela equação geral de Terzaghi são

adotados fatores para a consideração da inclinação do terreno conforme recomenda Bowles (1988). Outra particularidade no dimensionamento dessa sapata é a verificação do cisalhamento na base devido ao pilarete inclinado.

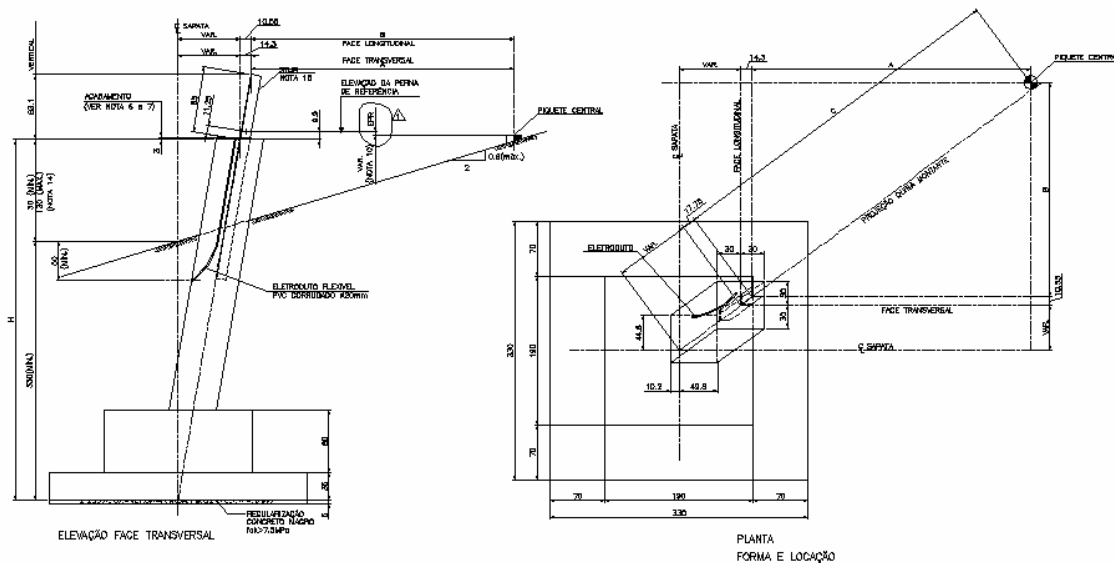


Figura 6.6 – Fundação em sapata para torre autoportante de suspensão na LT Salto Santiago-Cascavel Oeste.

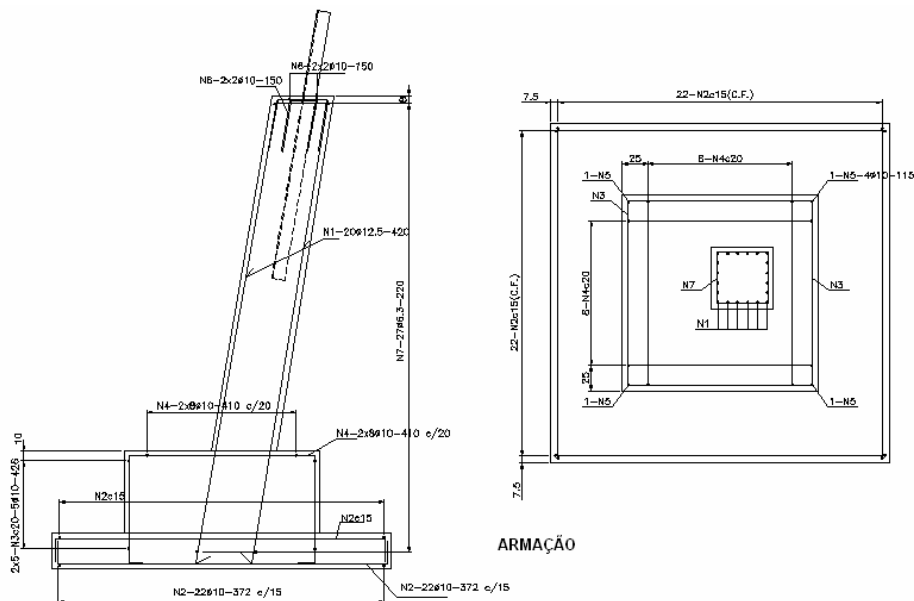


Figura 6.7 – Armadura da fundação-tipo em sapata para torre autoportante de suspensão na LT Salto Santiago-Cascavel Oeste.

6.1.3.3

Exemplo 3: fundação em tubulão para torre autoportante da LT 230kV Chavantes-Botucatu

Para essa fundação, são verificadas, no ELU, a segurança contra o arrancamento e o tombamento do elemento estrutural. Também são contrapostas as tensões exercidas pela base e pelo fuste e a resistência do solo.

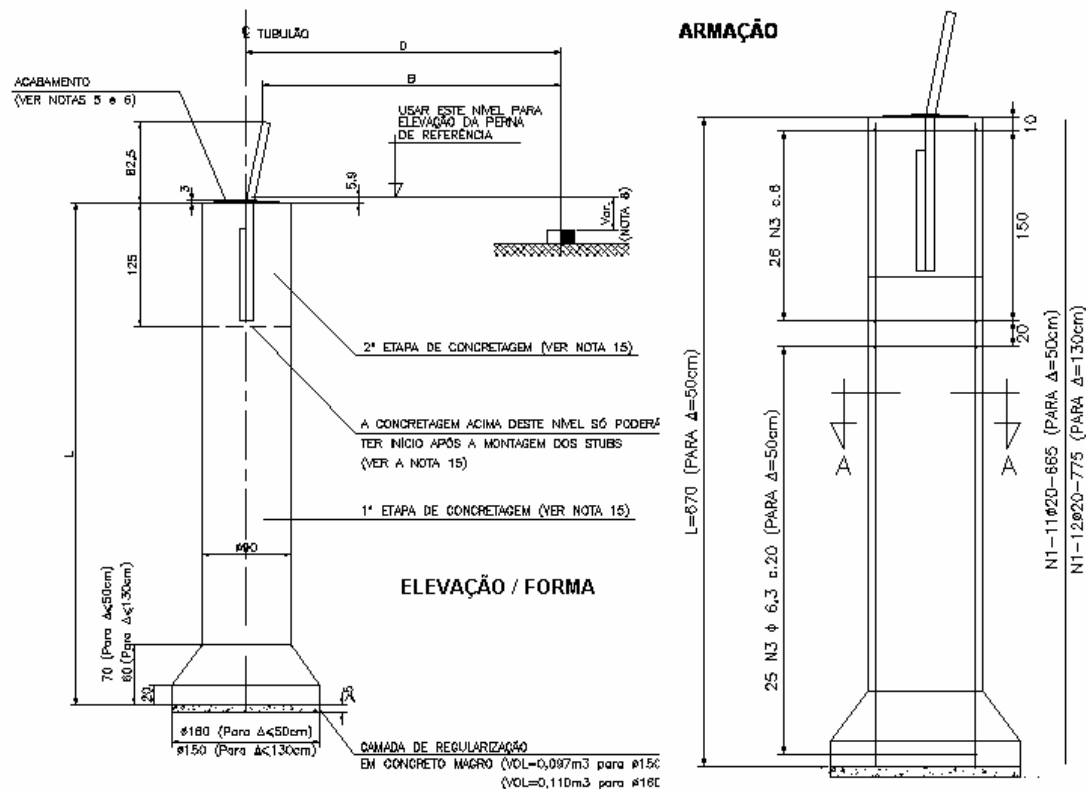


Figura 6.8 – Elevação, forma e armação da fundação em tubulão para torre autoportante de suspensão na LT Chavantes-Botucatu.

6.1.3.4

Exemplo 4: fundação em estaca para torre autoportante da LT 230 kV Chavantes-Botucatu

As estacas metálicas são implantadas nos locais onde o solo exige fundação profunda, geralmente onde é possível encontrar o lençol freático próximo à superfície, como é o caso dessa torre na linha Chavantes-Botucatu (NA = 2,38m, Tabela 6.5).

Nesse dimensionamento, prefere-se estacas metálicas H 6" x 37,1 kg/m, sendo necessárias três estacas por bloco em cada perna da torre. Posteriormente a uma análise estática do grupo de estacas, verifica-se, no ELU, a relação entre a

compressão máxima no topo das estacas e a capacidade de suporte do solo. A verificação da estabilidade interna considera o bloco de coroamento e o pilarete.

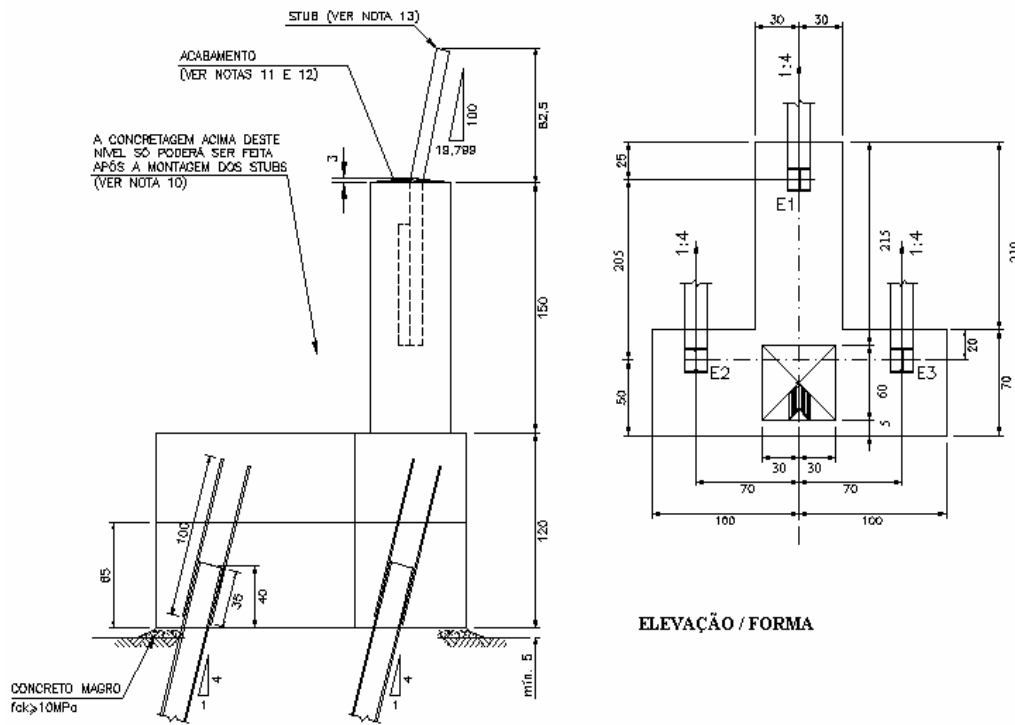


Figura 6.9 – Fundação em estaca para torre autoportante de suspensão na LT Chavantes-Botucatu.

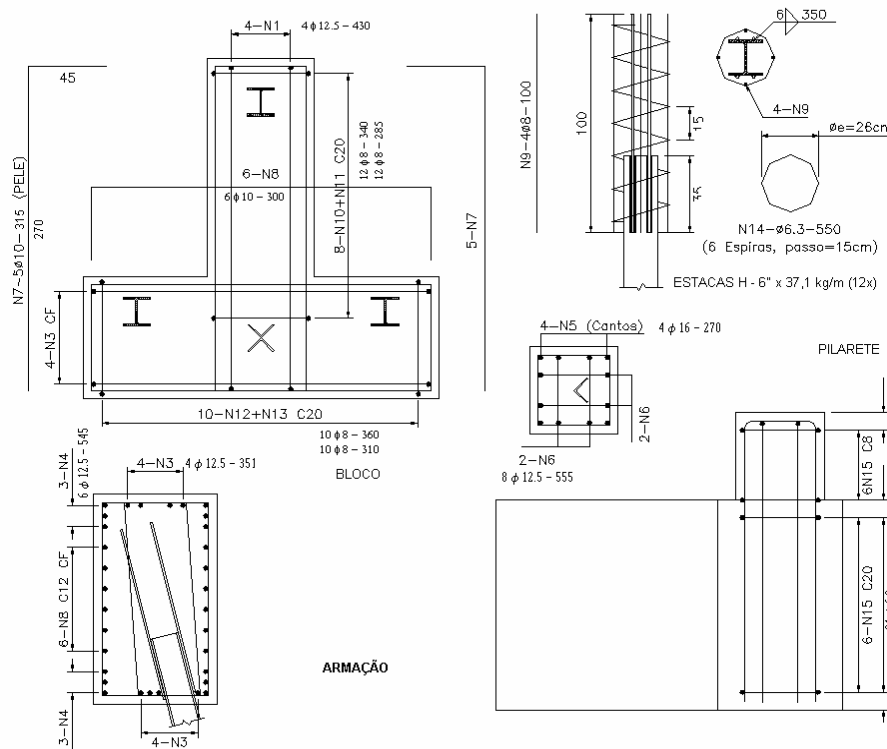


Figura 6.10 – Armação da fundação em estaca para torre autoportante de suspensão na LT Chavantes-Botucatu.

6.1.3.5

Exemplo 5: fundação em bloco ancorado para torre autoportante da LT 230 kV Chavantes-Botucatu

O pilarete dessa fundação possui eixo vertical e, junto com o bloco e os chumbadores, apresenta um arranjo simétrico em relação ao plano vertical que contém a quina do stub inclinado e do montante da torre. A distribuição das tensões na base considera as seguintes hipóteses: estágio II, com possibilidade de escoamento parcial dos chumbadores; tensões compressivas no concreto inferiores à resistência garantida na rocha do leito de fundação; e, concreto e rocha não resistentes à tração. São feitas as verificações, no ELU, da segurança contra o arrancamento do bloco e dos chumbadores e contra o deslizamento da base.

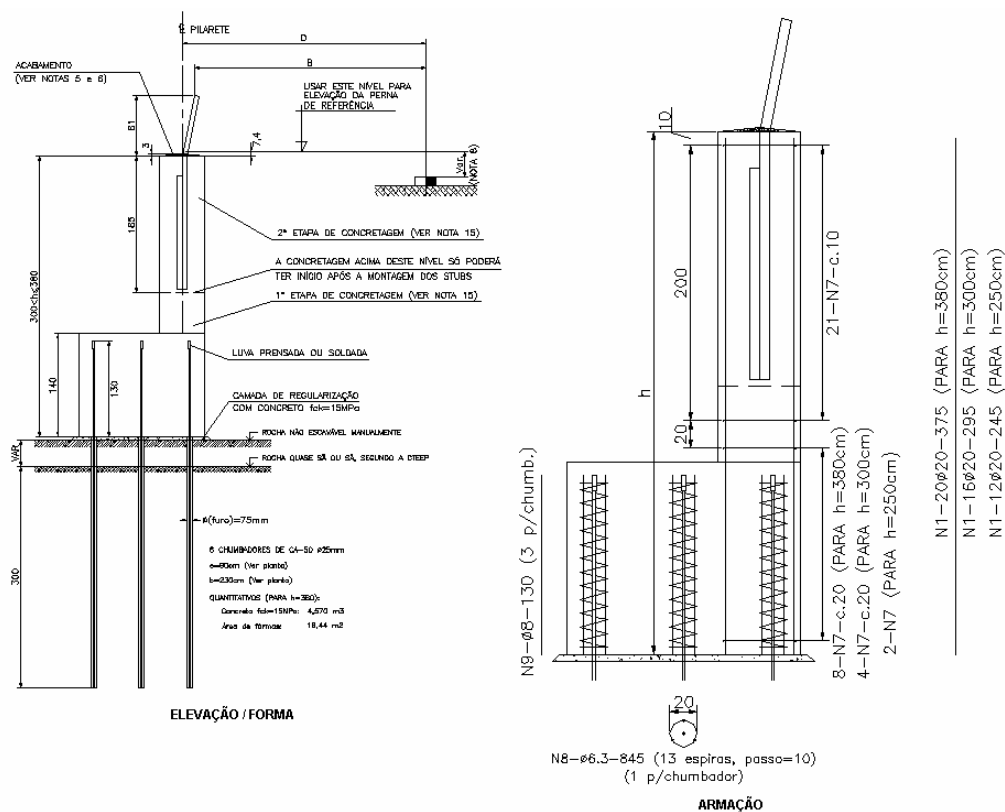


Figura 6.11 – Fundação em bloco ancorado para torre autoportante de suspensão na LT Chavantes-Botucatu.

6.1.3.6

Exemplo 6: fundação em sapata para mastro de torre estaiada da LT 525 kV Salto Santiago-Cascavel Oeste

Sapatas pré-moldadas são adotadas como solução para a fundação dos mastros das torres estaiadas nessa linha. São verificadas, no ELU, a segurança

contra o arrancamento da fundação e a relação entre a compressão máxima na base da sapata e a capacidade de suporte do solo. Assim como nas sapatas para as torres autoportantes, são adotados fatores para a consideração da inclinação do terreno na determinação da tensão pela equação geral de Terzaghi (Bowles, 1988).

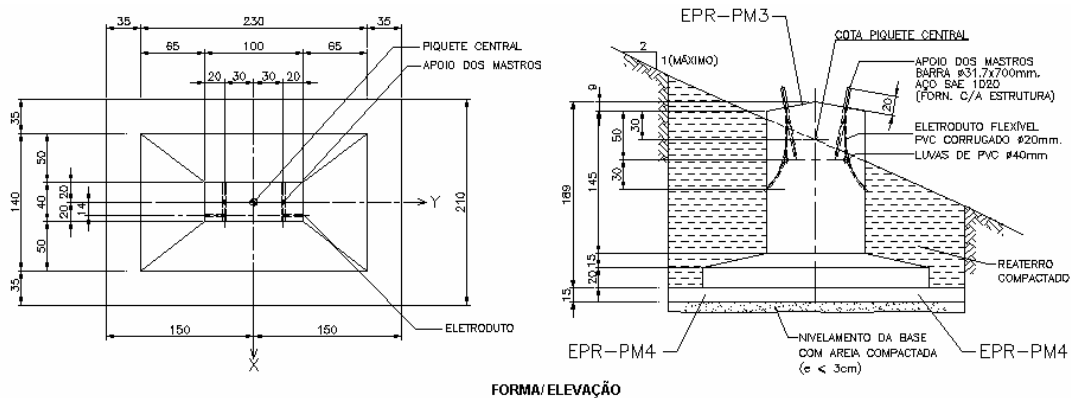


Figura 6.12 – Fundação em sapata para o mastro de torre estaiada de suspensão na LT Salto Santiago-Cascavel Oeste.

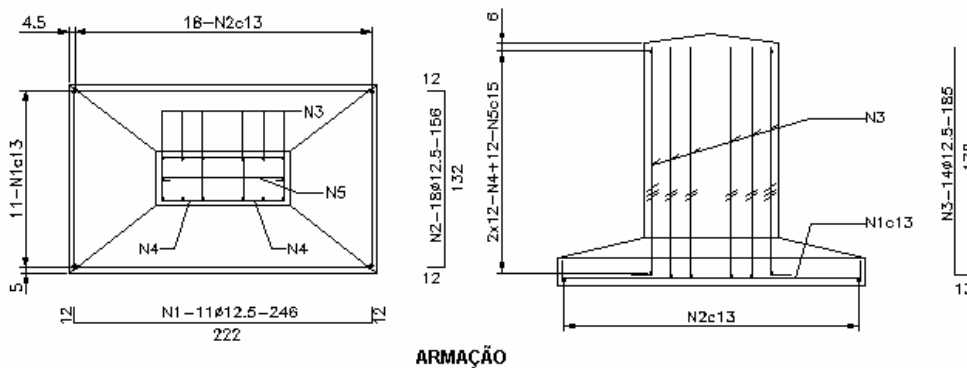


Figura 6.13 – Armação da fundação em sapata para o mastro de torre estaiada de suspensão na LT Salto Santiago-Cascavel Oeste.

6.1.3.7

Exemplo 7: fundação em bloco ancorado para mastro de torre estaiada da LT 525 kV Salto Santiago-Cascavel Oeste

Para o dimensionamento da fundação em bloco ancorado são verificadas, no ELU, a segurança contra o arrancamento do conjunto, a segurança contra o deslizamento, as tensões de compressão da base, a ancoragem do chumbador na calda ou argamassa e a ancoragem do chumbador na rocha.

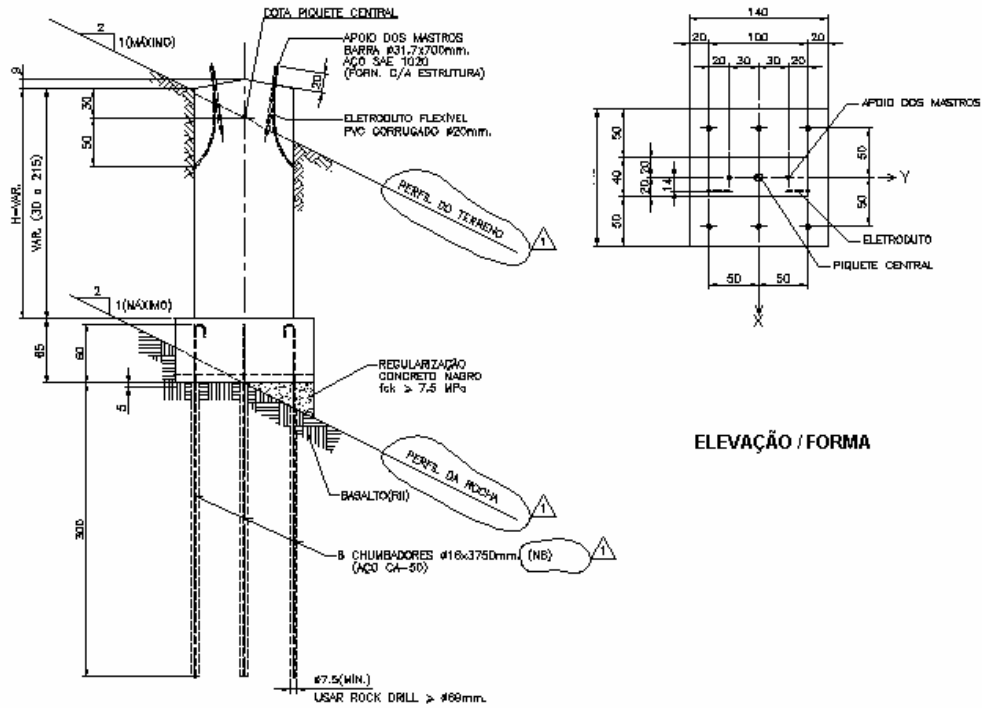


Figura 6.14 –Fundação em bloco ancorado para o mastro de torre estaiada de suspensão na LT Salto Santiago-Cascavel Oeste.

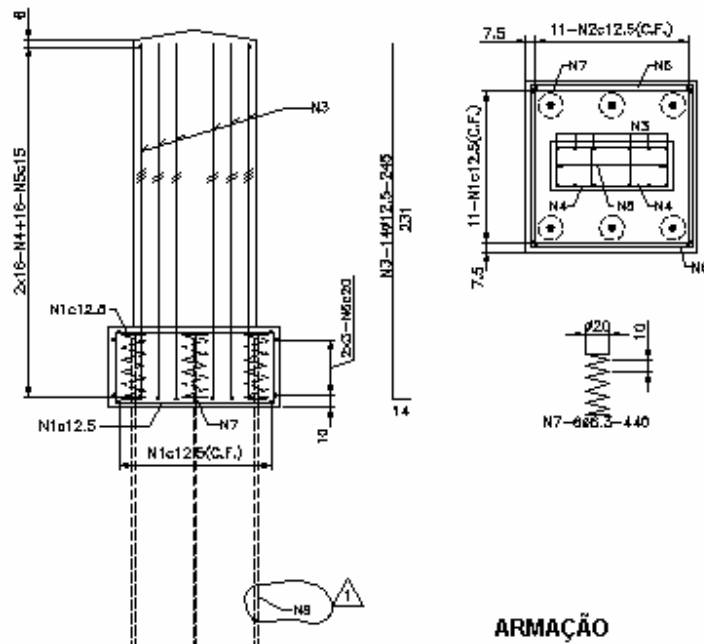


Figura 6.15 – Armação da fundação em bloco ancorado para o mastro de torre estaiada de suspensão na LT Salto Santiago-Cascavel Oeste.

6.1.3.8

Exemplo 8: fundação em tubulão para mastro de torre estaiada da LT 525 kV Salto Santiago-Cascavel Oeste

Verifica-se, no ELU, a relação entre a compressão máxima na base do tubulão e a capacidade de suporte do solo. Na determinação da tensão pela equação geral de Terzaghi também são adotados fatores para a consideração da inclinação do terreno conforme recomenda Bowles (1988). Uma particularidade dessa fundação é a verificação da estabilidade lateral no ELU e no ELS.

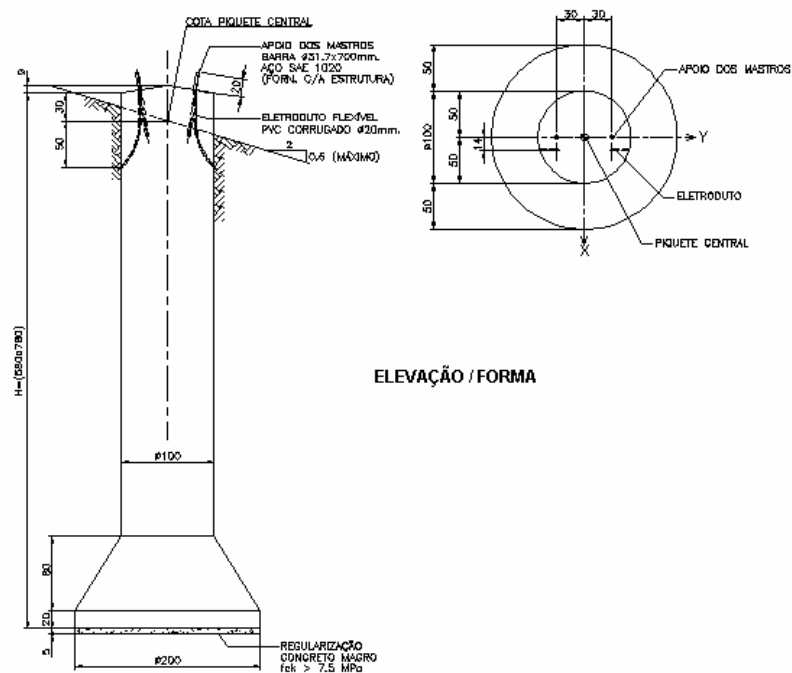


Figura 6.16 – Fundação em tubulão para o mastro de torre estaiada de suspensão na LT Salto Santiago-Cascavel Oeste.

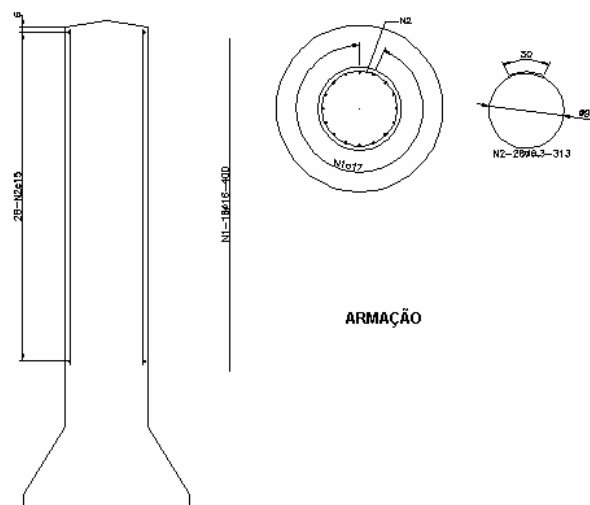


Figura 6.17 – Armação da fundação em tubulão para o mastro de torre estaiada de suspensão na LT Salto Santiago-Cascavel Oeste.

6.1.3.9

Exemplo 9: fundação em tubulão para estais de torre estaiada da LT 525 kV Garabi-Itá

Para essa fundação, verifica-se, no ELU, a segurança contra ao arrancamento, a estabilidade do fuste e da base, o engastamento da âncora dos estais no concreto e o tracionamento da barra de ancoragem.

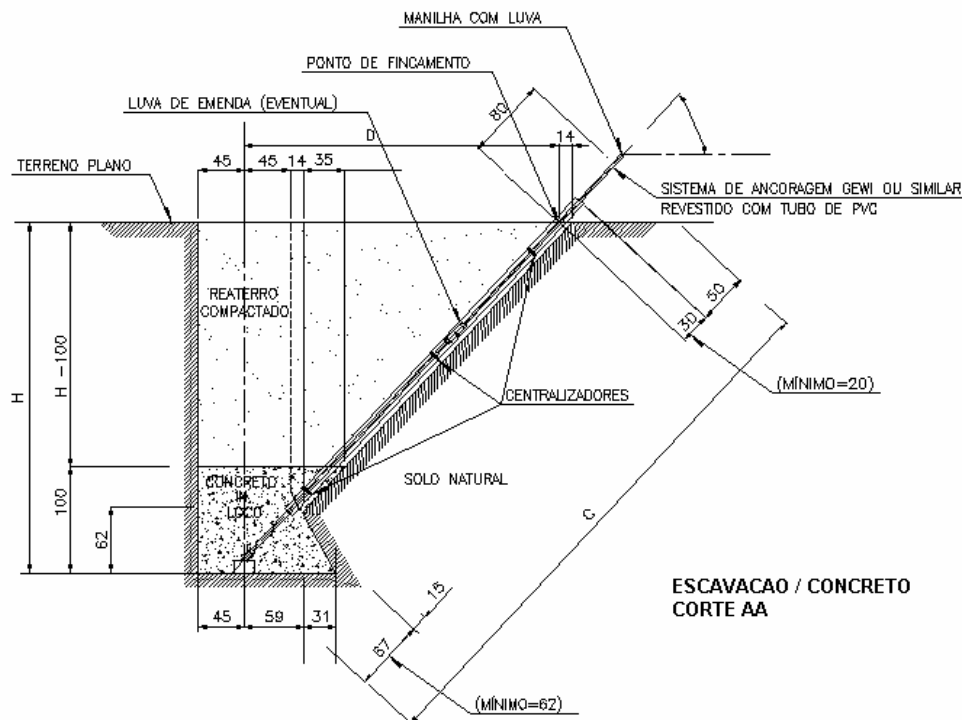


Figura 6.18 – Fundação em tubulão para estais de torre estaiada de suspensão na LT Garabi-Itá.

6.1.3.10

Exemplo 10: fundação em bloco ancorado para estais de torre estaiada da LT 525 kV Garabi-Itá

Para essa fundação, são feitas as seguintes verificações no ELU: segurança contra o arrancamento do bloco e dos chumbadores; segurança contra o deslizamento da base; resistência do bloco e chumbadores; aderência dos chumbadores; engastamento da âncora; e, verificação ao puncionamento.

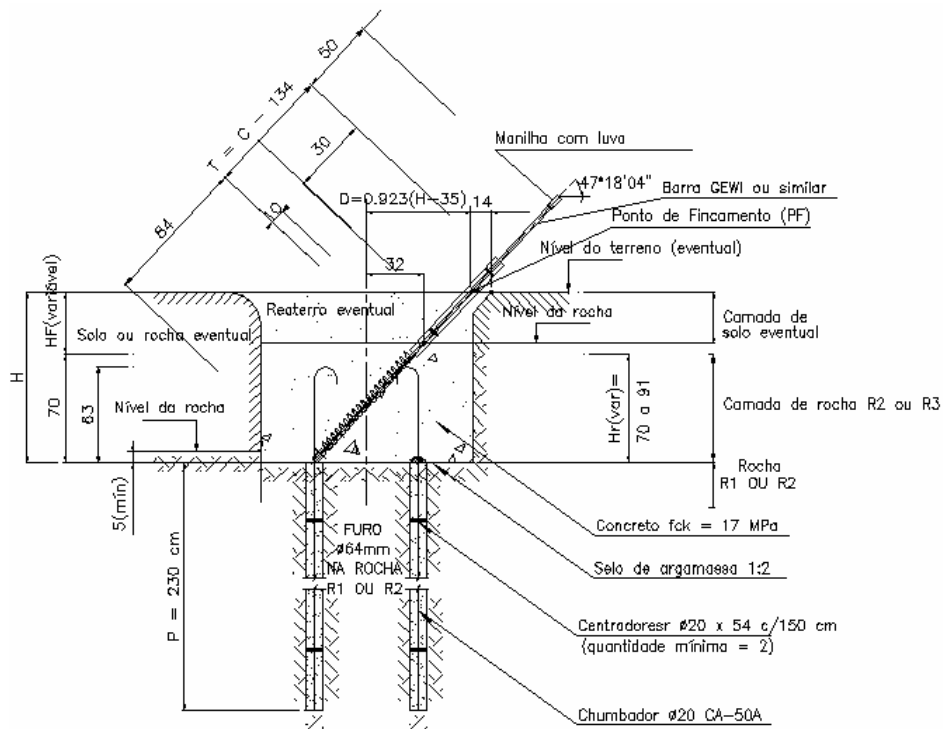


Figura 6.19 – Fundação em bloco ancorado para estais de torre estaiada de suspensão na LT Garabi-Itá.

6.1.3.11

Exemplo 11: fundação em grelha metálica para torre autoportante da LT 750 kV Ivaiporã-Itaberá-Tijuco Preto

Para as grelhas metálicas são verificadas, no ELU, a segurança contra o arrancamento e as tensões na base.

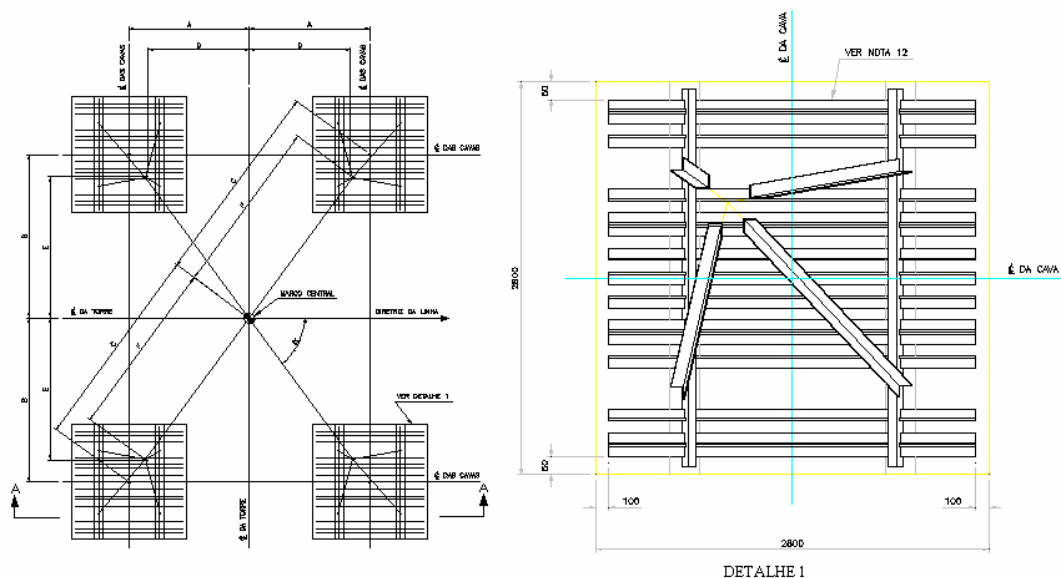


Figura 6.20 – Planta e detalhe da fundação em grelha para torre autoportante de suspensão na LT Ivaiporã-Itaberá-Tijuco Preto.

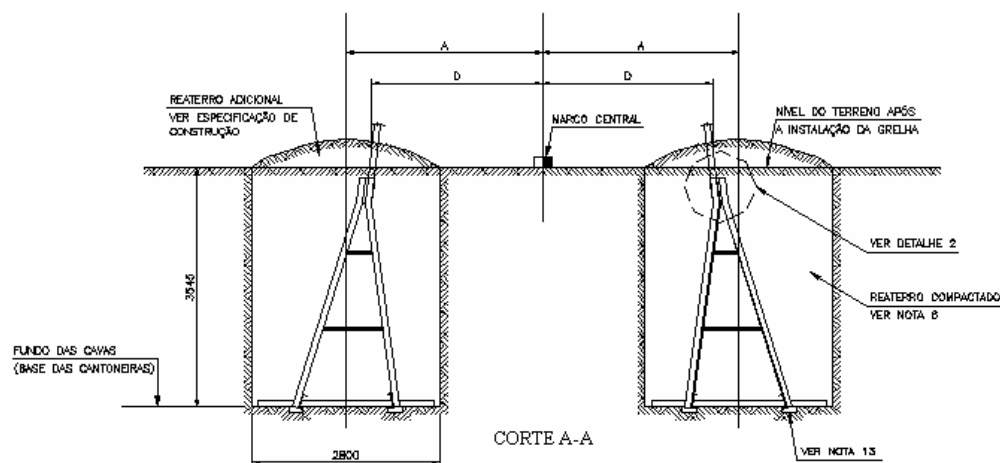


Figura 6.21 – Corte da fundação em grelha para torre autoportante de suspensão na LT Ivaiporã-Itaberá-Tijuco Preto.

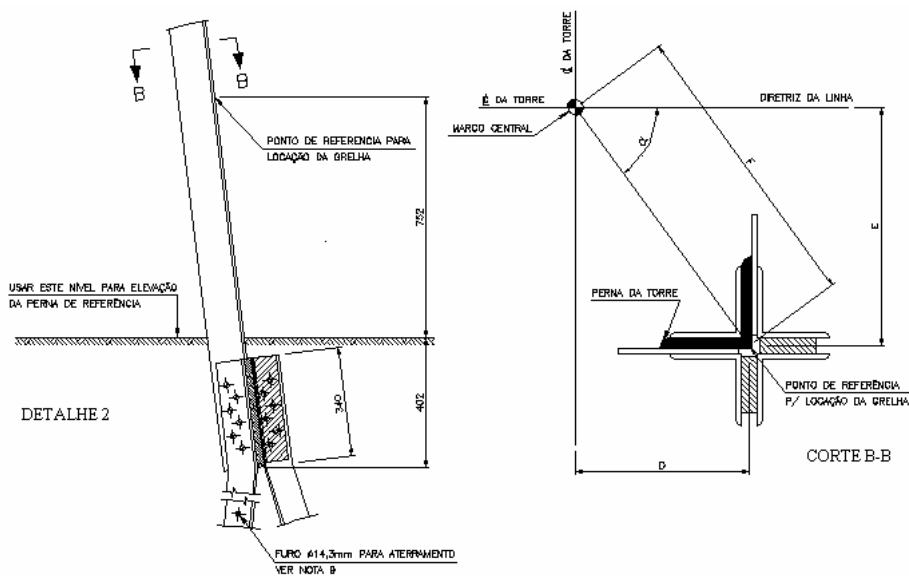


Figura 6.22 – Detalhe e Corte da fundação em grelha para torre autoportante de suspensão na LT Ivaiporã-Itaberá-Tijuco Preto.

6.2

Comentários finais sobre os conjuntos torre x terreno x fundação

Dos conjuntos torre x terreno x fundação pode-se inferir que as fundações de torres de linhas de transmissão são basicamente de cinco tipos: sapata, tubulão, bloco ancorado, estaca e grelha, havendo algumas variações e particularidades em cada tipo. A definição do tipo a ser adotado é função das cargas atuantes, características do terreno e das condições de execução.

Os modelos utilizados para o dimensionamento das fundações baseiam-se nas verificações da estabilidade interna e externa, comumente no ELU. Em alguns casos especiais, são feitas verificações no ELS, como no caso do tubulão para o mastro de torre estaiada do exemplo 8 (item 6.1.3.8).