



Reforço de fundação de torre de Linha de Transmissão de Energia elétrica de 525kV como mitigação de riscos em uma região de encosta no Rio Grande do Sul

Diego Luis Tedesco Dandolini

Engenheiro Civil – Manutenção de Linhas de Transmissão, Eletrobras CGT Eletrosul, Florianópolis/SC, Brasil, ddandolini@eletrobras.com

Cleyton Précoma Portes

Engenheiro Civil, Manutenção de Linhas de Transmissão, Eletrobras CGT Eletrosul, Florianópolis/SC, Brasil, cportes@eletrobras.com

Luciano Augusto Martinhago

Engenheiro Civil, Manutenção de Linhas de Transmissão, Eletrobras CGT Eletrosul, Florianópolis/SC, Brasil, lmartinhago@eletrobras.com

RESUMO: As mudanças climáticas têm afetado de alguma maneira a sociedade em geral em todos os cantos do mundo. Em 2024, impactaram sobremaneira o estado do Rio Grande do Sul, causando graves consequências na vida das comunidades, com reflexos nas infraestruturas públicas e privadas, como estradas, escolas, pontes, hospitais, redes de energia elétrica, usinas, linhas de transmissão, residências, comércios. Este trabalho busca apresentar o caso de uma torre de Linha de Transmissão de 525 kV, localizada na região de Caxias do Sul/RS, que teve sua estrutura comprometida pelo excesso de chuvas que atingiram o Rio Grande do Sul em meados de abril e maio de 2024, causando deslocamento do solo da fundação superficial, originalmente concebida em grelha metálica, que implicou em deformações na estrutura metálica da torre. Discute-se sobre os tipos de fundações mais usados em Linhas de Transmissão, bem como os critérios para escolha da fundação da nova torre em estaca raiz, trazendo os detalhes da concepção do projeto da nova torre e execução da obra, considerando uma maior resiliência da estrutura visando à redução de impactos adversos das mudanças climáticas, protegendo as populações, meio ambiente e estruturas existentes, garantindo o abastecimento energético em nível local e nacional para atendimento das comunidades como um todo.

PALAVRAS-CHAVE:

Mudanças Climáticas, Fundações, Linhas de Transmissão de Energia Elétrica, Estaca Raiz

ABSTRACT: Climate change has affected society in general in some way in every corner of the world. In 2024, it had a major impact on the state of Rio Grande do Sul, causing serious consequences for the lives of communities, with repercussions on public and private infrastructure, such as roads, schools, bridges, hospitals, electricity grids, power plants, transmission lines, homes, and businesses. This paper seeks to present the case of a 525 kV Transmission Line tower, located in the Caxias do Sul/RS region, which had its structure compromised by the excessive rain that hit Rio Grande do Sul in mid-April and May 2024, causing displacement of the soil of the shallow foundation, originally designed in a metal grid, which resulted in deformations in the metal structure of the tower. The types of foundations most used in Transmission Lines are discussed, as well as the criteria for choosing the foundation for the new tower in root piles, bringing details of the design of the new tower and execution of the work, considering greater resilience of the structure aiming at reducing adverse impacts of climate change, protecting populations, the environment and existing structures, guaranteeing energy supply at local and national level to serve communities as a whole..

KEYWORDS: Climate Changes, Foundations, Transmission Lines, Root piles

1 INTRODUÇÃO

As mudanças no clima estão sendo percebidas em todas partes do mundo de forma generalizada, especialmente as consequências que tais mudanças causam nas infraestruturas e vida da população, afetando todas as classes, ecossistemas e setores, indiscriminadamente. O ano de 2024 foi o ano mais quente da série



2025

histórica de 175 anos, superando pela primeira vez, a marca de 1,5º C, com relação ao período pré-industrial (1850-1900), segundo a Organização Meteorológica Mundial (SINIMBÚ, 2025). Inúmeros eventos extremos foram observados ao redor do mundo como cheias, secas, ondas de calor e incêndios. A ocorrência no Rio Grande do Sul, em meados de abril e maio de 2024, foi mais um destes exemplos, sendo causado por “chuvas com uma combinação de magnitude, duração, intensidade e abrangência espacial que jamais foi observada no Brasil” (Collischonn *et al.*, 2024, Apud ANA, 2025). Tal evento, um sistema de baixa pressão, trouxe à região, chuvas intensas e persistentes neste período que causaram a maior catástrofe climática já observada no Rio Grande do Sul, tendo sido afetados 478 municípios dos 497 existentes, com perdas irreparáveis de vidas humanas, tendo sido registrados 183 mortes, 27 desaparecidos e 803 pessoas feridas, tendo sido estimado o valor de R\$ 88,9 bilhões para reconstrução das estruturas danificadas. O maior impacto ocorreu no setor produtivo com de 68,9% de danos, perdas e custos adicionais para a reconstrução, seguido do setor de Infraestrutura (21,43%), Social (7,88%) e Meio ambiente (1,80%). Com relação à Infraestrutura, os danos foram estimados em pouco mais de R\$ 7 bilhões, sendo 14,61% para água e saneamento, 26,68 % para o setor elétrico e 58,71% para o setor de Transportes (Suárez *et al.*, 2024).

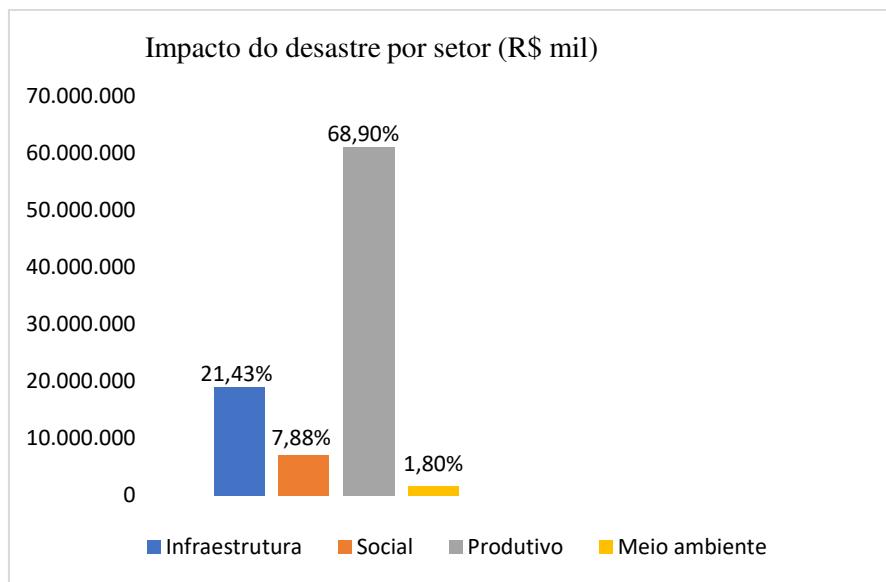


Grafico 1. Prejuízos estimados em milhares de Reais por Setor

Fonte: Adaptado pelo autor de Suárez *et. Al*, 2024

Este artigo propõe-se a apresentar o estudo de caso da Torre 24 da Linha de Transmissão da Eletrobras CGT Eletrosul que sofreu dano em sua fundação e estrutura, ocasionada pela movimentação do solo em consequência das chuvas que atingiram a região de Caxias do Sul/RS no período de abril a maio de 2024, apresentando as medidas de adaptação tomadas em face ao problema ocorrido, com a execução de novas fundações e reposicionamento da estrutura, como medida de reforço e estabilização da encosta onde a estrutura estava locada.

2 MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Conforme define a *UNCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change)*, na tradução para o Português, Painel das Nações Unidas sobre mudanças climáticas, mudança climática é aquela relacionada “direta ou indiretamente à atividade humana que altera a composição da atmosfera global e que é adicional à variabilidade climática natural observada em períodos de tempo comparáveis”. Dentre as estratégias possíveis para minimizar os efeitos causados pela mudança do clima nos ecossistemas, citam-se a mitigação e as medidas de adaptação. A primeira consiste na “redução das emissões de gases de efeito estufa — GEE, que são responsáveis pelo aquecimento global e pela alteração dos padrões climáticos do planeta”, sendo ‘o principal caminho indicado pela ciência para frear o avanço desse processo e evitar impactos ainda mais graves’ (MMA, 2025). Já as medidas de adaptação podem ser entendidas como as ações reativas em resposta às mudanças climáticas que visam a reduzir a vulnerabilidade das infraestruturas,



2025

ecossistemas, população em geral, a fim de minimizar o impacto que as mudanças climáticas podem ocasionar na vida cotidiana da população.

O Brasil atua de forma direta com relação ao tema Mudanças Climáticas, desde 1992, a partir da Rio 92, primeira convenção da ONU (Organização das Nações Unidas) para a conscientização da problemática em nível mundial. Após esta iniciativa, o Protocolo de Kyoto, em 1997, definiu metas de redução das emissões dos gases causadores do efeito estufa (GEE) como uma medida de mitigação para redução dos impactos relacionados às mudanças climáticas. Em 2015, o acordo de Paris determinou a redução de 1,5°C a temperatura global do planeta Terra até 2100. A imagem permite visualizar a linha do tempo dos principais acontecimentos acerca do assunto Mudanças climáticas no Brasil e no mundo. Pode-se perceber que a contribuição do Brasil na mitigação dos GEE está relacionada à redução dos desmatamentos e queimadas, relacionadas ao Uso da Terra e Mudança do Uso da Terra e Florestas— LULUCF (*Land Use, Land Use Change and Forestry*), na sigla em inglês, que inclui as dinâmicas de conversão de uso da terra, principalmente o desmatamento, correspondendo a 38 % do total das emissões líquidas brasileiras, seguido por Agropecuária, 28,5 % e Energia, 23,2%. (Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2022).

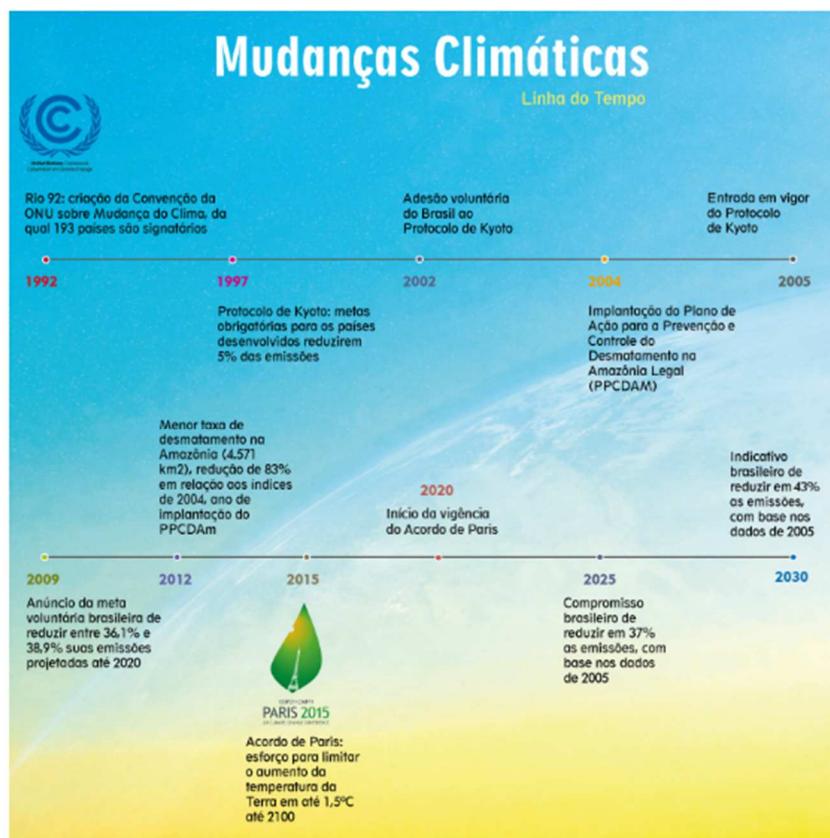


Imagen 1. Linha do tempo das Iniciativas intercontinentais acerca das Mudanças Climáticas
Fonte: Ministério do Meio Ambiente

As ações que o Brasil adotou para enfrentamento e abordagem referente ao tema mudança climática ganha corpo a partir da Lei no 12.187, de 29 de dezembro de 2009, que estabeleceu a Política Nacional sobre Mudança do Clima – PNMC, a partir da qual foi elaborado o Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima (MMA, 2016), que visa descrever as medidas de adaptação necessárias ao enfrentamento às mudanças climáticas dos vários entes da federação, em nível federal, estadual e municipal. Desenvolveu-se na sequência, a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil, instituída pela Lei no 12.608, de 10 de abril de 2012, que criou o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil – SINPDEC, o Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil - CONPDEC, e determinou a criação do sistema de informações e monitoramento de desastres, como estratégia de gestão de riscos associados às mudanças climáticas (BRASIL, 2012).

Alterações no clima relacionadas ao “aquecimento global podem alterar a frequência, intensidade, distribuição espacial, duração, sincronismo dos eventos extremos, e resultar em condições extremas até mesmo nunca antes observadas (IPCC, 2012, apud MMA, 2016). O evento ocorrido no Rio Grande do Sul



em 2024, pode ser citado como exemplo desta afirmação, já que os “acumulados de chuva superaram 700 mm na parte norte do estado e, ... em alguns casos ..., a precipitação de 2024 foi 47% maior que o recorde anterior de precipitação, tendo sido evidenciado também que “a chuva de 2024 foi mais volumosa e mais intensa que a chuva do grande evento de cheia registrado anteriormente na região, que ocorreu em 1941 (Collischonn *et al.*, 2024, apud ANA, 2025). Na região de Caxias do Sul, onde está instalada a torre objeto deste estudo, foi observado o total de 634,4 mm de chuva acumulada, entre 25 de abril e 15 de maio de 2024, na estação meteorológica Santa Maria. (ANA, 2025).

Interessante observar que o Brasil desenvolveu modelos regionais, a partir da adaptação de outros modelos de previsão climática através do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), conhecido como modelo regional ETA (PESQUERO *et al.*, 2009; CHOU *et al.*, 2012, apud MMA 2016) que é “utilizado para gerar simulações do clima usadas em estudos de impactos, vulnerabilidade e adaptação no Brasil e na América do Sul”. Importante destacar que desde 2014 o modelo ETA (Imagem 2), apresenta simulações de cenários de ‘aumento de chuvas na região Sul do país e a parte sul do Sudeste nos vários cenários (RCP 4.5 e 8.5), para o período de 2011-2040, que se intensifica até o final do século’ . (MMA, 2016).

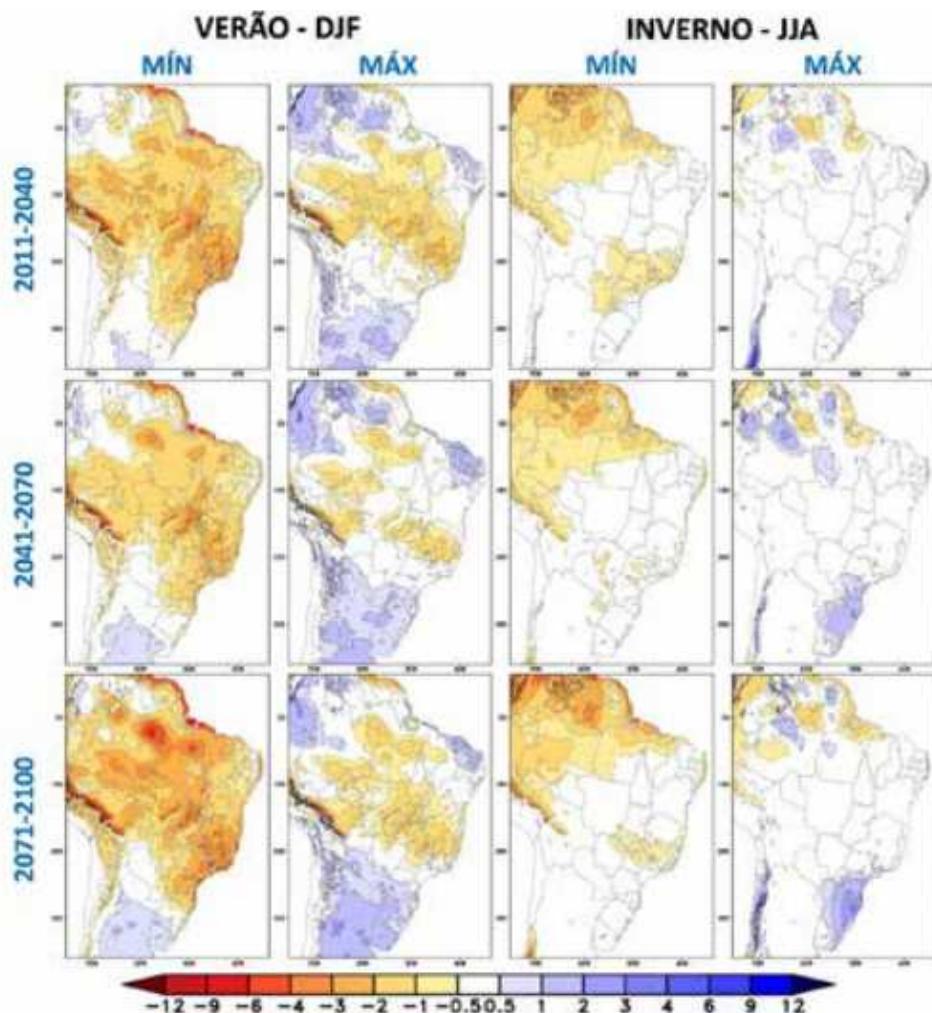


Imagem 2: Projeções regionalizadas de mudanças na precipitação (mm/dia) entre o presente e diferentes períodos futuros. Os limiares inferiores (MÍN) e limiares superiores (MÁX) das mudanças extraídas das quatro simulações do modelo ETA aninhado ao HadGEM2-ES e MIROC5, nos dois cenários RCP 4.5 e 8.5, para Dezembro-Janeiro-Fevereiro (DJF) e JunhoJulho-Agosto (JJA)

Fonte: Chou et al, 2014 apud MMA, 2016

Fica evidente a necessidade de se considerar as projeções climáticas para verificar a infraestrutura existente e trabalhar na estratégia de adaptação frente a este cenário, ao mesmo tempo em que se deve atentar a estas projeções, especialmente para novos projetos afetados pelas variáveis hidrológicas, tais como pontes, barragens e estruturas próximas a rios, ou encostas, devendo ser considerado o reforço ou alteração do



projeto ou até mesmo a relocação ou desistência da implantação. Neste contexto apresentaremos a situação encontrada da torre 24 e as ações executadas para sua recuperação.

3 LINHAS DE TRANSMISSÃO (LTs)

O sistema elétrico nacional pode ser dividido em produção, transmissão e distribuição de energia elétrica. A produção de energia elétrica ocorre nas Usinas ou parques geradores sendo as com maior representatividade na matriz elétrica do Brasil as de fonte hidráulica, eólica, solar, biomassa. As instalações de energia elétrica são classificadas em instalações de transmissão e de distribuição, sendo essas últimas sempre de propriedade de uma concessionária ou permissionária de distribuição e vinculadas à prestação de serviço público. Na distribuição, a concessionária ou permissionária explora o serviço em regime de monopólio, sendo a única responsável pela manutenção, operação e expansão da rede que gerencia. A permissão para a exploração de um sistema de transmissão de energia elétrica pressupõe a licitação, sendo precedido de Leilão, no qual os agentes do mercado que oferecerem a menor Receita anual permitida pela Linha de Transmissão (LT), recebem a concessão por explorá-la por um prazo estipulado, devendo a mesma se responsabilizar pela construção, manutenção e operação da LT pelo prazo da concessão (ANEEL, 2005).

As instalações de transmissão podem ser classificadas dentre aquelas que se destinam à formação da Rede Básica do Sistema Interligado Nacional, as de âmbito próprio da concessionária de distribuição e as de interesse exclusivo das centrais de geração. A outorga de uma Linha de transmissão a um determinado concessionário pressupõe o atendimento aos requisitos de qualidade para a construção e operação do ativo, bem como subentende que será submetido ao controle coordenado da operação da LT pelo Operador Nacional do Sistema (ONS) (ANEEL, 2005).

Uma linha de transmissão é composta basicamente de estruturas que conectam cabos aéreos que percorrem o caminho entre duas subestações permitindo o escoamento de energia elétrica de parques geradores. O projeto de uma LT incia com o estudo de viabilidade técnica, onde são levados em conta os valores da terra ao longo do traçado, a topografia, condicionantes sócio-ambientais, o capital disponível e características geotécnicas do terreno. A próxima fase define os tipos de cabos a serem usados, fase e pararaios (cabos guarda), cadeia de isoladores em função das tensões da LT e tipo de estruturas. A partir daí tem-se o projeto mecânico da LT com a definição do (1) Projeto dos cabos e da distribuição das torres sobre os perfis dos terrenos, (2) Projeto estrutural das torres, (3) Projeto das fundações, conforme pode ser melhor entendido na imagem 3 (Azevedo, 2011). Por imposição do traçado da LT e as demais condicionantes, as torres podem ser locadas em terrenos planos ou em encostas, sendo providas soluções de fundações e de contenções do terreno quando necessário.

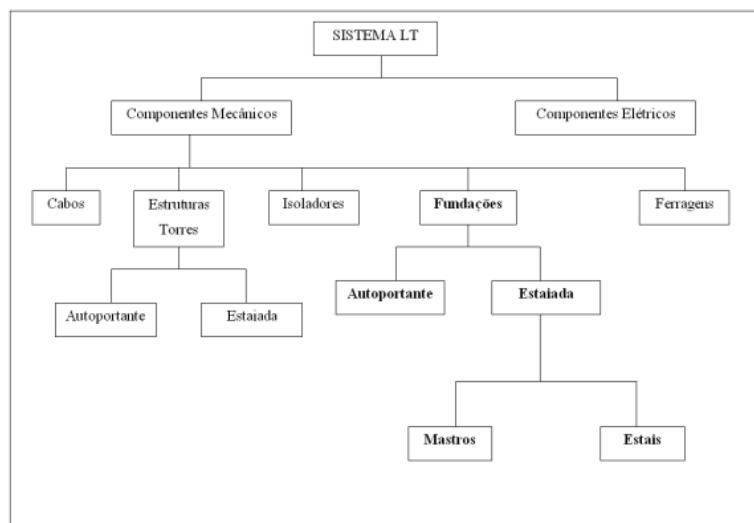


Imagen 3: Resumo sobre componentes de uma Linha de Transmissão

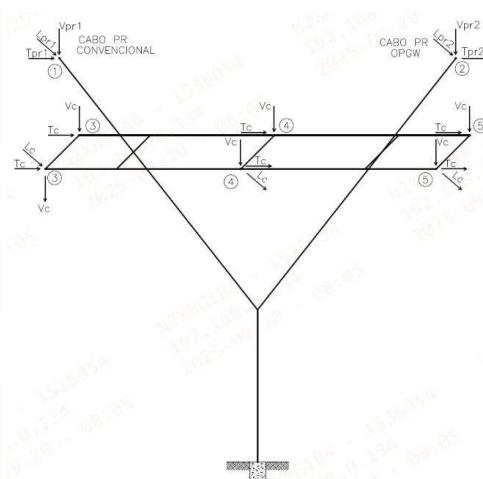
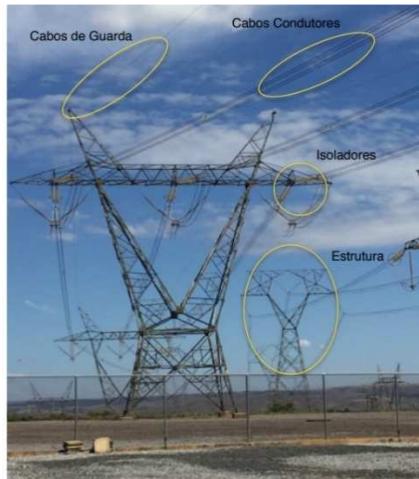
Fonte: Azevedo, 2011

O Projeto de fundações de uma Linha de Transmissão é definido a partir do tipo de torre com a 'árvore de carregamento' a que a estrutura estará submetida ao longo da sua vida útil e na situação de construção e



2 0 2 5

operação da LT. Estes esforços consideram o peso próprio da torre e dos cabos e da ação do vento sobre a torre e os cabos, que geralmente é o carregamento que condiciona o dimensionamento das fundações das torres (Paladino, 1972).



Imagens 4 e 5-Exemplo de torre autoportante e árvore de cargas de torre circuito duplo

Fonte: Eletrobras CGT Eletrosul

Devido a particularidade de uma Linha de transmissão estar distribuída em uma grande extensão territorial, da ordem de dezenas ou centenas de quilômetros, os projetos das fundações são otimizados de tal forma que o Projetista define tipos padronizados de fundação em função de várias características, tais como o tipo de torre e arranjo da cadeia dos isoladores, do material constituinte da fundação e do material de suporte, solo tipo I, II, III e IV e rocha. Conforme descreve AZEVEDO, 2011, a caracterização geológico-geotécnica do subsolo é normalmente verificada com campanha de sondagem na fase de Projeto Básico, sendo que, a priori, estudam-se todos os locais de implantação das torres, com sondagem a percussão, tipo SPT (*Standart Penetration Test*), descrita na NBR 6484/2020, e a trado, mesclando-as em função das necessidades e com base no orçamento previsto. Na sequência, para o Projeto executivo de cada torre, definem-se os tipos de fundação superficial, profunda ou especial e sua variações em função do subsolo, conforme pode-se verificar no quadro 1.

Quadro 1. Alternativas para escolha das fundações típicas em uma Linha de Transmissão em função do tipo de torres e cadeia de isoladores e características geotécnicas do terreno

		Tipo de Fundação		Tipo de terreno
Tipo de Torre	Arranjo da Cadeia	Fundação Superficial	Fundação profunda	
Autoportante	Suspensão	Sapata	Bloco	Tipo I
Estaiada	Ancoragem	Viga L	Tubulão	Tipo II
	Fim de Linha	Grelha Metálica	Tubulão ancorado em rocha	Tipo III
	Transposição	Grelha Metálica com Laje	Estaca	Tipo IV
				Rocha
Material				
		Metálica		
		Concreto Armado (in loco)		
		Concreto Pré-fabricado		



4 CASO DA TORRE 24 DA LT CAXIAS-GRAVATAÍ EM CAXIAS DO SUL/RS

A Linha de Transmissão Caxias- Gravataí foi construída na década de 1980 pela projetista Companhia Internacional de Engenharia para a então Centrais Elétricas do Sul do Brasil, hoje Eletrobras CGT Eletrosul, possuindo 78,073 Km de extensão com 148 torres autoportantes sendo que as características técnicas e tipos de fundação podem ser obtidas no quadro 2.

Quadro 2. Características gerais LT Caxias – Gravataí
Fonte: Autor (2025)

Identificação da LT – sigla operação	LT CAX-GRA C1
Tensão de Operação	525 kV
Disposição dos condutores	Três fases alinhadas de forma horizontal, com a fase central levemente mais elevada, com quatro subcondutores por fase.
Cabos Condutores	CAA - 636 KCMIL - "GROSBEAK
Cabo pararraio	CAA - "DOTTEREL"
Cabo pararraio	OPGW

Tipo de Fundação	Quantidade
Grelha	102
Grelha com Laje de concreto	6
Grelha com laje ancorada	13
Ancorada em Rocha	18
Estaca	3
Especial	6
Total	148

A torre 24 da supracitada LT, localizada em Caxias do Sul/RS, foi impactada pelas chuvas de abril e maio de 2024, sofrendo um deslizamento na base de sua fundação, com consequente danificação de algumas peças componentes da torre, conforme pode-se evidenciar nas imagens 6 e 7.



Imagen 6 e 7: Torre 24-imagem aérea e detalhe abertura do solo da encosta onde está a Fundação
Fonte: Eletrobras CGT Eletrosul (2024)

O local onde está implantada a torre 24 é uma encosta, verificado pelo desnível entre os pés, sendo que os pés A e D são mais altos para compensar o desnível existente. Os quatro pés desta torre possuem fundação que foi concebida em grelha metálica de 3,22 x 3,22 m instalada a uma profundidade de 2,80 metros. A fundação em grelha metálica é uma fundação superficial que descarrega as cargas de compressão em sua base através de perfis metálicos justapostos e paralelos, sendo que os pés das diagonais da torre são



instalados na mesma direção, uma na direção da linha e os dois outros, perpendiculares. As cargas de tração são combatidas através do peso próprio do solo deslocado a partir da “cunha de ruptura”, cujo ângulo é definido pelo projetista a partir do tipo de solo onde a fundação é implantada. Esta fundação está sujeita a sofrer recalques diferenciais e presume-se que o que tenha ocasionado a deformação nas peças da torre 24, seja proveniente deste processo devido a possível deslizamento de solo tanto em nível superficial quanto internamente até a base da fundação. Neste sentido, pode-se perceber que a fundação em grelha metálica possui vulnerabilidade frente a processo de deslizamento de solo e espera-se que a grelha metálica com laje de concreto seja menos vulnerável, bem como a grelha ancorada em rocha. A torre 24 é uma torre de suspensão, tipo P5, altura de 48,5 metros com extensão de 22,5 metros, sendo o pé A com 10m, pé B, 4metros, pé C, 2,5 metros e pé D com 8,5 metros de altura.

A partir da constatação visual das trincas de tração no solo e deformação das peças da torre foi realizado estudo sobre a estabilidade do talude da torre 24. Para definir a Topografia do terreno, foi utilizado o desenho da planta e perfil do local e a nuvem de pontos gerada em levantamento aerofotogramétrico com LIDAR, sendo gerada as curvas de nível do terreno (Imagem 8).

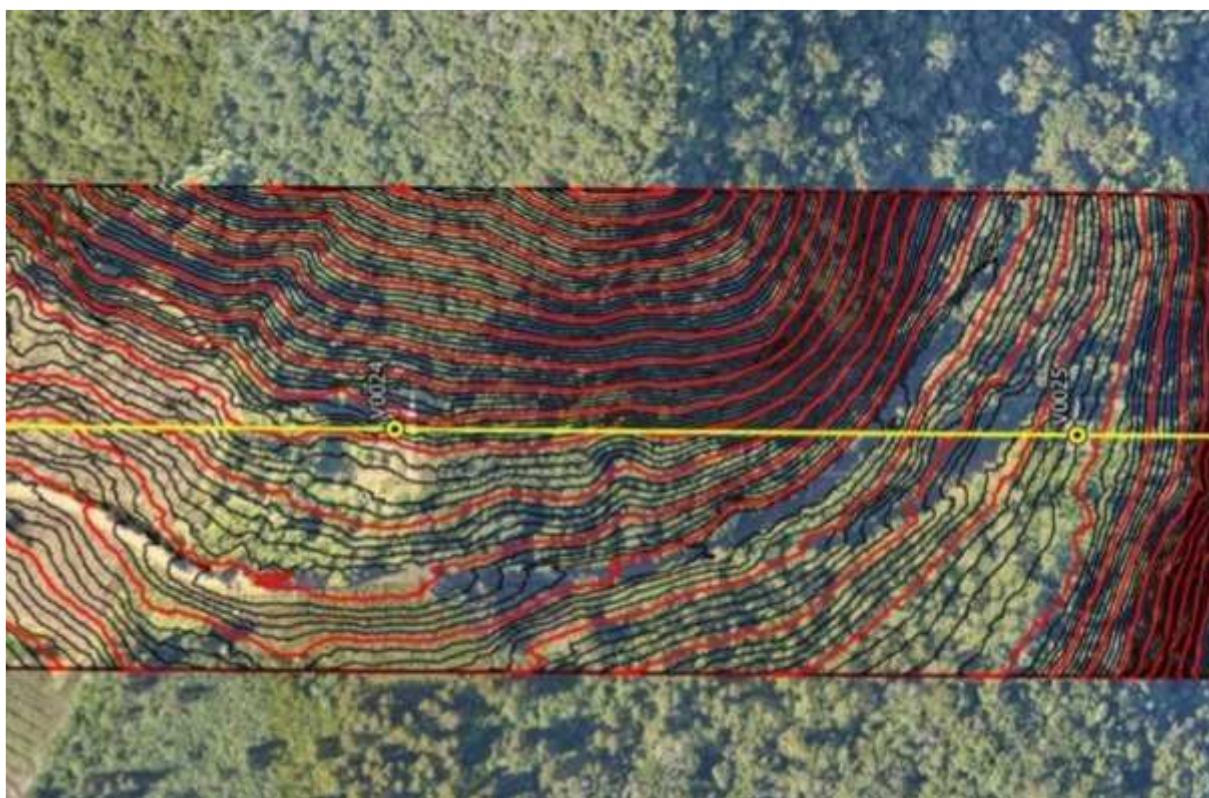


Imagem 8: Planta das curvas de nível do terreno geradas a partir de aerofotogrametria

Fonte: Eletrobras CGT Eletrosul (2024)

Para o levantamento do perfil do subsolo foram realizados 5 furos de sondagem, sendo 1 tipo SPT (Standart penetration test – imagem 9) e, a posteriori, 4 sondagens rotativas, com objetivo de investigar o substrato rochoso (imagens 10 e 11). O resumo dos dados levantados para o subsolo da região estão consolidados na Tabela 1.

Tabela 1: Resumo dos dados das sondagens realizadas

Fonte: Autor (2024)

Furo	Solo (m)	RQD	PROFUNDIDADE (m)		Coerência	Grau de alteração	Grau de fraturamento
SPT 1	3,56						
SR 1	4,20	40%	4,2	8,7	C3	A3/A2	F4/F5
SR 2	4,50	36%	4,5	7,3	C3	A2	F5
SR 3	3,05	36%	3,05	4,85	C2	A2	F4
SR 4	3,30	8%	3,3	4,8	C3	A3	F4



2025

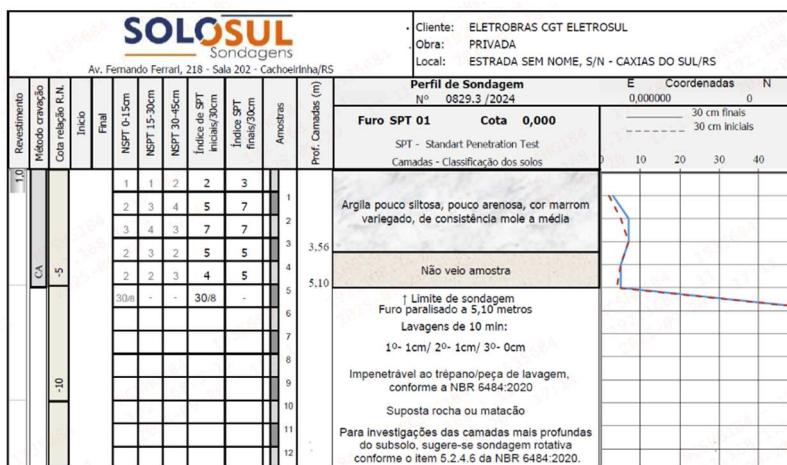
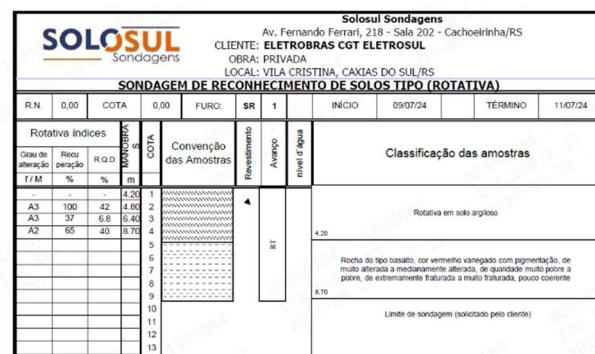


Imagen 9 – Log das Sondagens SPT – furo SPT 1

Fonte: Autor- adaptado pelo Autor a partir de Solosul Sondagens (2024)



Imagenes 10 e11 – exemplo de Log das Sondagens Rotativas SR 1 e SR2

Fonte: Adaptado pelo Autor a partir de Solosul Sondagens (2024)

Para as informações acerca das características do solo foram usados dados da região obtidas de outros estudos e disponibilizadas pelo DAER/RS para outra Linha de Transmissão da Eletrobrás CGT Eletrosul, localizada nas proximidades da torre ora estudada (Tabela 2).

Tabela 2: Dados do subsolo utilizados no estudo de estabilidade do talude de Marrecas
Fonte: Adaptado de DAER/RS (2024)

Solo	Peso específico (KN/m ³)	Coesão (KN/m ²)	Ângulo de atrito (°)
Solo	17,4	56,58	28,94
Solo 1	17,1	60,5	31,97
Saprolito	17,2	32	39,49

A partir da campanha de sondagens realizada, e emissão dos dados dos logs de sondagem, pode-se definir as camadas que iriam compor a seção de análise, como sendo de solo argiloso, saprolito, rocha fraturada e rocha sã. A definição da espessura de solo foi adotada em 4,5 metros, pois a informação da Sondagem rotativa, trazia o solo variando de profundidade 3,05m a 4,50 metros. Assim, com base nas curvas de nível do levantamento topográfico, definiu-se o perfil do terreno para a seção de análise, passando pelo ponto médio de locação da nova torre, a partir do qual foi desenhado o perfil do solo argiloso, em seguida o saprolito, com 5,0 metros de profundidade, a rocha alterada com 10,0 metros e o restante como rocha sã. Os dados de entrada dos materiais utilizados para a construção do modelo do terreno no software Slide encontram-se descritos nas primeiras duas colunas da Tabela 3. Os dados de peso específico, coesão e ângulo de atrito da argila e saprolito foram adotados valores de materiais da região, listados na tabela 2, com ajustes feitos pelo autor, conforme descritos nas colunas 3, 4 e 5 da Tabela 3. Os dados do material rochoso para peso específico foram obtidos da literatura e os de coesão e ângulo de atrito (colunas 4 e 5 da Tabela 3), foram obtidos a partir do Software RocLab.



Tabela 3: Dados de entrada para Análise de estabilidade do Talude da Torre 24 -software Slide

Fonte: Autor, 2024

1.Material	2.Camada (m)	3.Peso específico (KN/m ³)	4.Coesão (KN/m ²)	5.Ângulo de atrito (°)	6.Critério de Ruptura
Argila	4,5	17	55,0	28	Mohr/Columb
Saprolito	5,0	16,6	33	30	Mohr/Coulomb
Basalto Alerado	10,0	22	103	23,38	Mohr/Coulomb
Basalto São	>10,0	25	605	51,2	Mohr/Coulomb

Para o material rochoso foi usado o critério de ruptura de Hoek-Brown, tendo sido obtidos através do Software RocLab, que gera excelente concordância com o critério de Mohr-Coulomb a partir do critério de ruptura de Hoek-Brown, estabelecendo os parâmetros equivalente de ângulo de atrito e coesão, conforme demonstrado nas imagens 12 e 13. O entendimento deste critério encontra-se descrito no artigo *Hoek-Brown failure criterion – 2002 edition*, Hoek et al., 2002.

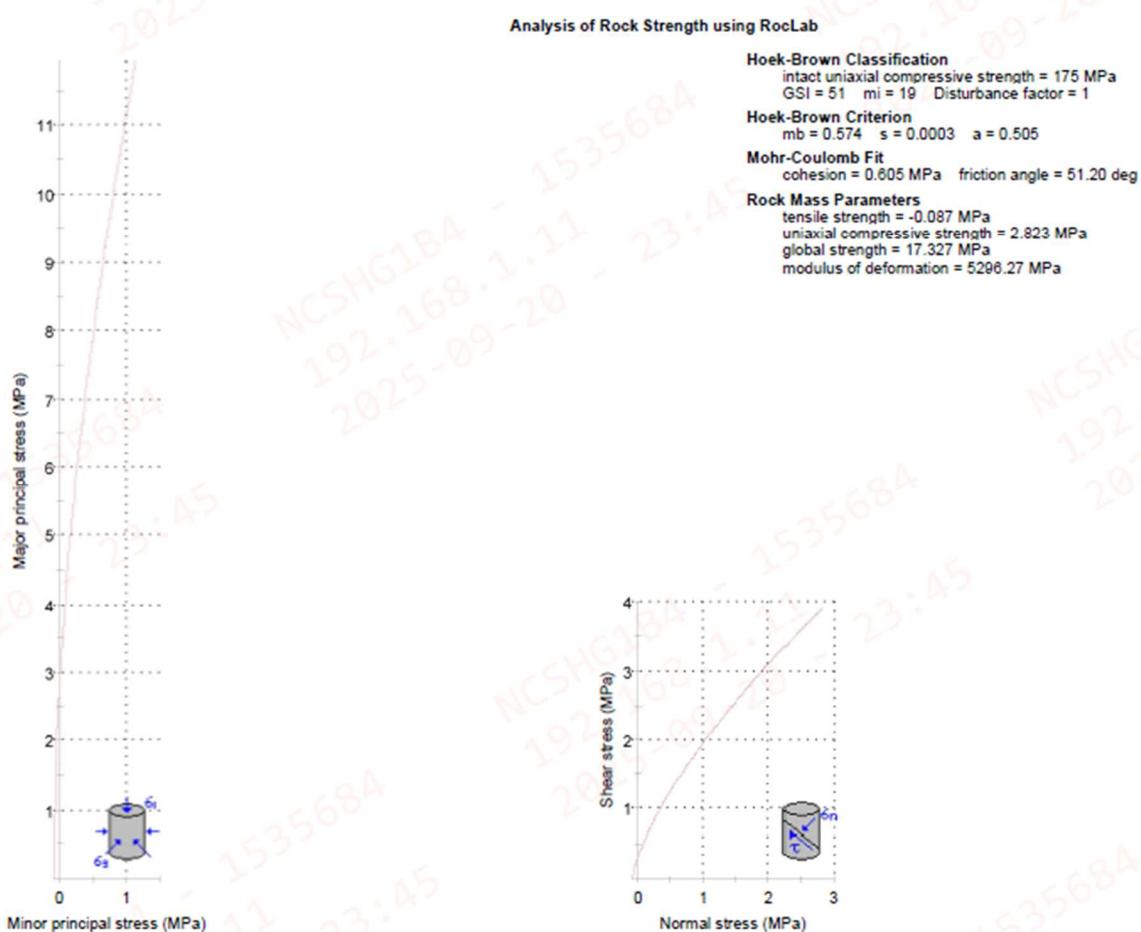


Imagen 12: Critério de Ruptura para a Rocha Sã
Fonte: Autor adaptado de Software RocLab (2024)

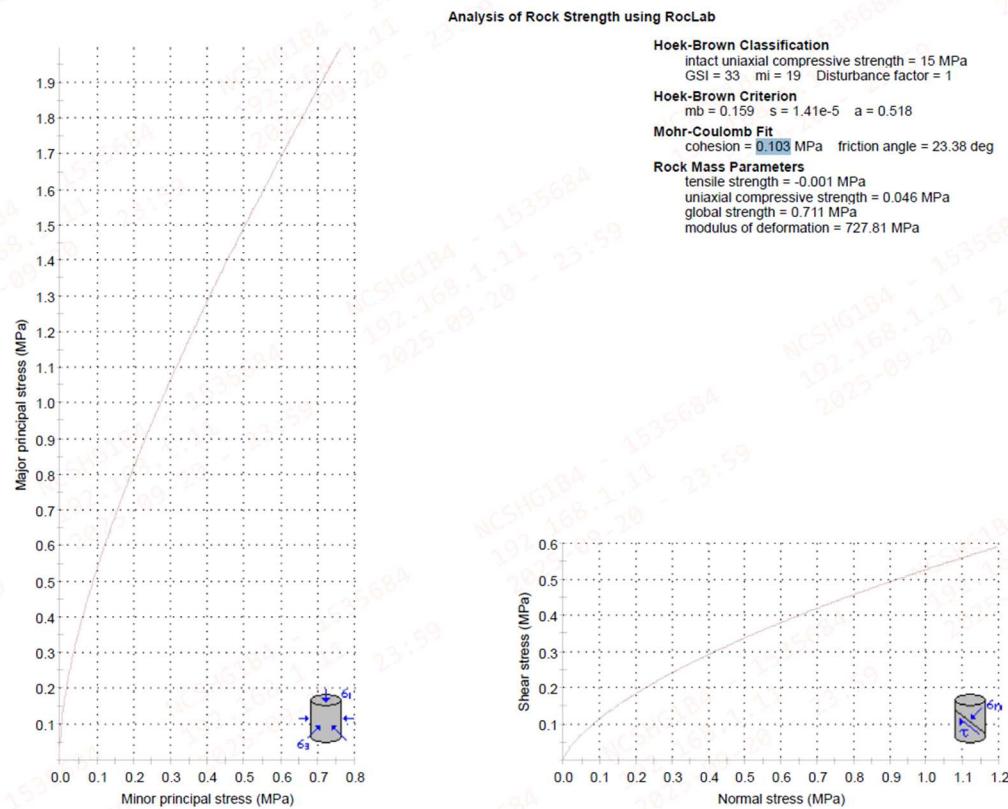


Imagen 13: Critério de Ruptura para a Rocha Fraturada

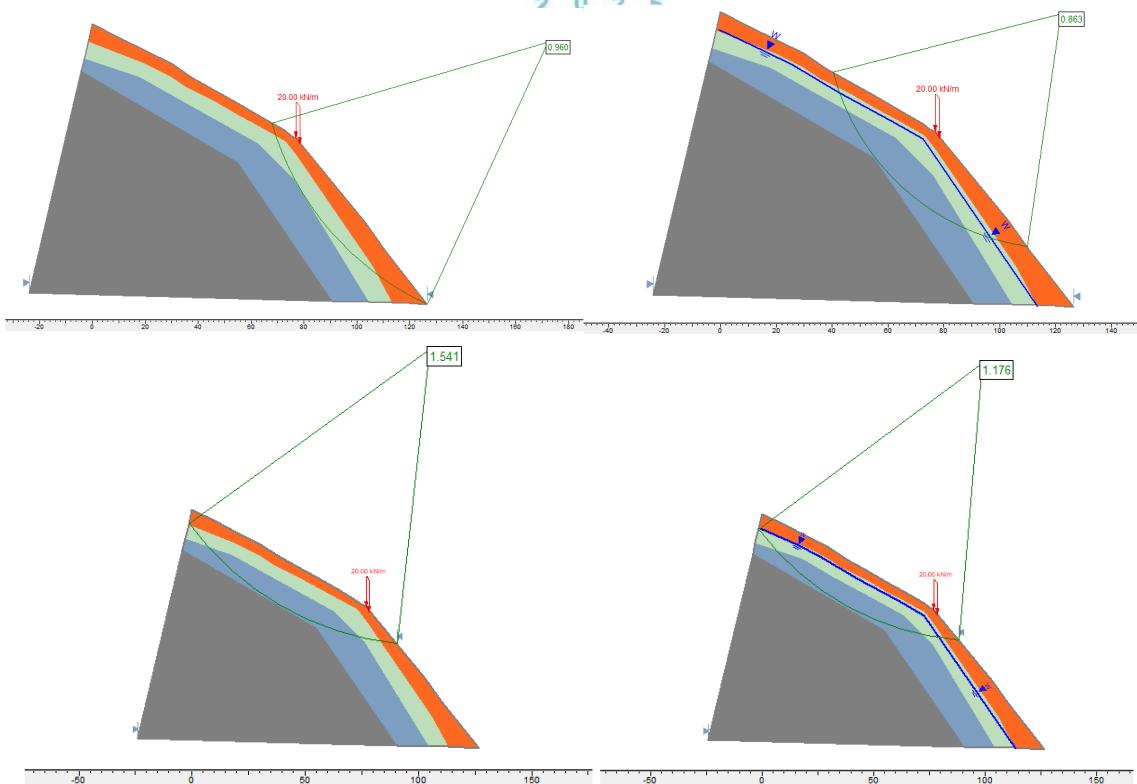
Fonte: Autor adaptado de Software RocLab (2024)

Com base nestas informações foram avaliados vários cenários para verificar a melhor condição a ser adotada para a situação. Devido ao excesso de chuvas que atingiram a região, foi considerado um cenário com a presença de nível dágua atuando no sub-solo no contato entre as camadas de solo e saprolito. Para estabilidade global, onde foi considerado o Talude como um todo, desde a porção superior até a mais baixa, os fatores de segurança calculados indicavam ruptura do mesmo ($FS \leq 1,0$). Considerando a análise local, na área próxima à torre, o reforço da fundação representou um ganho no fator de segurança, de tal forma a possibilitar a montagem das estruturas em segurança. A tabela 4 e as imagens 14 a 21, ilustram estas informações.

Tabela 4: Cenários descritos para o Estudo de estabilidade do Talude Torre 24

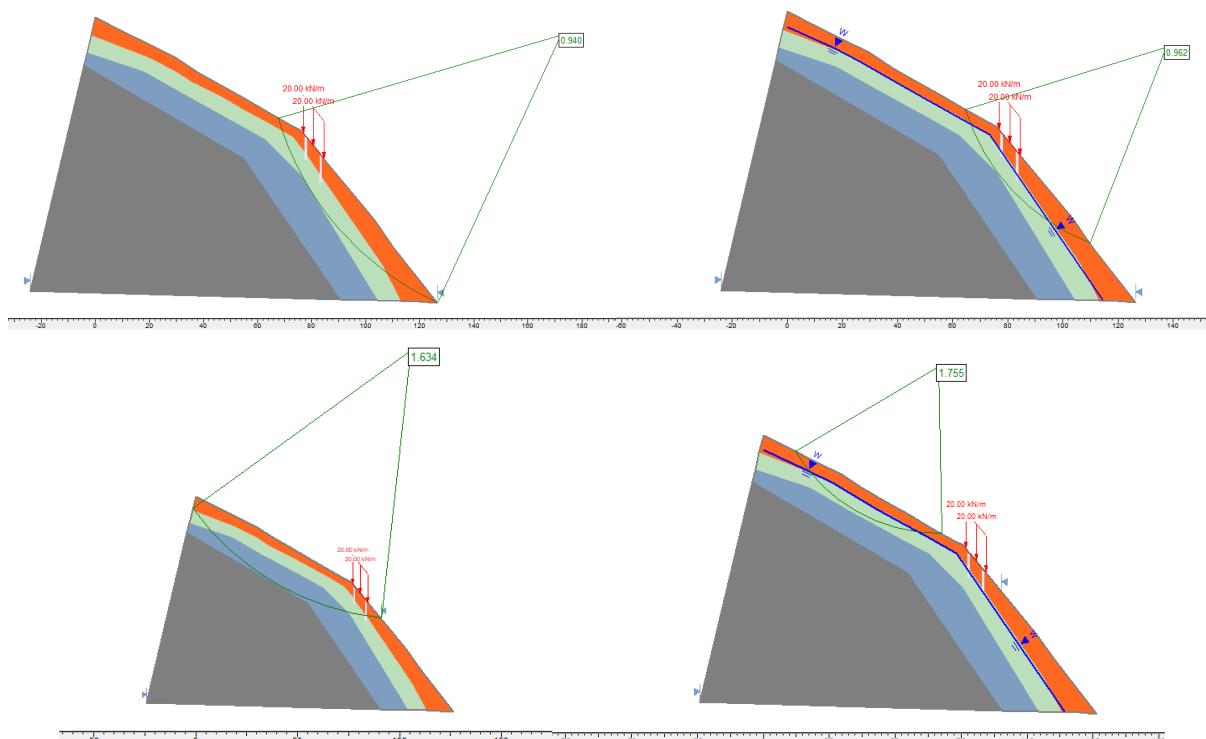
Fonte: Adaptado pelo Autor a partir do software Slide (2024)

Cenário Talude TO24	Fator de Segurança			
	Ruptura Global		Ruptura Local	
	Sem NA	Com NA	Sem NA	Com NA
Sem Reforço	0,96	0,86	1,54	1,17
Com Reforço	0,94	0,96	1,63	1,75



Imagens 14, 15, 16 e 17: Fatores de segurança para o Cenário do talude Sem reforço

Fonte: Adaptado pelo Autor a partir do software Slide (2024)



Imagens 18, 19, 20 e 21: Fatores de segurança para o Cenário do talude com reforço

Fonte: Adaptado pelo Autor a partir do software Slide (2024)



4.1 MEDIDA DE REFORÇO E ESTABILIZAÇÃO DA ENCOSTA E TORRE 24

A partir da situação encontrada, dado que a torre se encontrava estável, porém com propensão a sofrer colapso, estudaram-se algumas possibilidades para reforçar a fundação e possibilitar a troca de peças. Devido à constatação de tratar-se de fundação superficial, cuja execução de reforço exigiria escavação, concluiu-se que poderia ocorrer o agravamento da estabilidade da torre como um todo. Assim, partiu-se para o estudo de relocação da torre.

Outra alternativa considerada foi a modificação do traçado da linha de transmissão (LT), criando um traçado alternativo, visando à remoção definitiva da estrutura do local. No entanto, essa opção foi descartada logo no início dos estudos, devido às características topográficas da região, que tornariam a relocação economicamente inviável. Além disso, a execução dessa alternativa exigiria um processo de licenciamento ambiental, o que implicaria em custos e prazos adicionais para a realização das obras.

Descartada a alternativa de relocação do traçado, os estudos seguiram com a manutenção do traçado original da LT. O grande desafio foi encontrar a melhor solução, pois, além da contenção do solo e da nova fundação, havia toda a preocupação em atender às distâncias elétricas, bem como respeitar os carregamentos da nova torre.

Devido às dificuldades locais para a montagem da torre, considerou-se locar a nova estrutura próxima à existente, deslocando-a cerca de 20 a 25 metros à vante. O estudo foi elaborado com base nessa premissa, sendo atendidas as exigências de projeto para os cabos, confirmando a relocação da torre em 20 metros no sentido vante, conforme levantamento topográfico.

Para a definição da fundação da torre, foi realizada uma campanha de sondagem para aferir as condições geológico-geotécnicas locais, tendo sido encontrada argila média até a profundidade de 3,56 metros, onde se verificou o impenetrável. Diante deste resultado foi necessário de realizar sondagens rotativas, a fim de se obter informações da rocha de subsolo. Foram realizados 4 furos de sondagem rotativa nas proximidades das novas fundações da torre 24, conforme imagens 22 e 23. O resumo das campanhas de sondagens realizadas encontra-se descrito na Tabela 3.



Imagen 22: local dos furos de Sondagem realizados com a imagem da antiga Torre 24

Fonte: Eletrobras CGT Eletrosul (2025)

A partir dessas informações, optou-se pela utilização de estacas raiz, devido à necessidade de perfurar material rochoso e a baixa vibração gerada na fundação e na estrutura da torre existente, que permaneceria em operação com linha energizada (imagem 24). Adotou-se também o intertravamento dos blocos de ancoragem das estacas para aumentar a rigidez do conjunto, sendo executadas vigas no sentido perpendicular e diagonal aos pés da torre.



Imagen 23: Equipamento de sondagem modelo SS21-SONDEQ e caixa de testemunho

Fonte: Solosul Sondagens (2024)

Foram consideradas as mesmas hipóteses de carga existentes na memória de cálculo das fundações da torre original para o dimensionamento da nova fundação. Inicialmente, considerou-se um arranjo de 6 estacas de 250 mm, que foi descartado, tendo sido escolhido o arranjo com 8 estacas de 200 mm, por questões econômicas. O arranjo contemplou uma inclinação de 15° nas estacas, conforme pode-se observar nas imagens 24 e 25.

A execução das obras teve início em novembro de 2024, com a preparação dos acessos e montagem de ferragens e formas. A execução das estacas raiz foi iniciada em 25 de novembro, sendo concluída a montagem da torre em dezembro de 2024, o que trouxe maior resiliência à estrutura da linha de transmissão frente aos desafios impostos pelas mudanças climáticas.



Imagen 24 – Execução de estaca raiz de 200 mm, inclinadas 15° com a vertical

Fonte: Autor, 2024

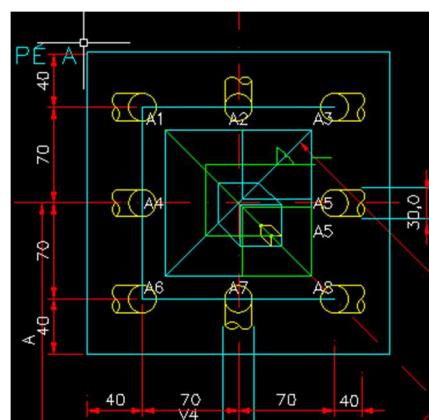


Imagen 25 – arranjo típico da fundação de um pé da nova torre 24

Fonte: Autor, 2024



Imagen 26 e 27 – Desmontagem da torre antiga e nova torre pronta com fundação em estaca raiz

Fonte: Autor (2024)

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil). Acesso e uso dos sistemas de transmissão e de distribuição / Agência Nacional de Energia Elétrica. - Brasília: ANEEL, 2005. 57 p. : il. - (Cadernos temáticos ANEEL; 5)

Azevedo, Crysthian Purcino Bernardes. Fundações para linhas de transmissão: dimensionamento e execução. – Belo Horizonte: Fundac-BH, 2009. 411 p.: il.; 21 cm.

BRASIL, Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). As enchentes no rio grande do sul - lições, desafios e caminhos para um futuro resiliente. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Brasília: ANA, 2025. 57 p.,il.

BRASIL. Lei nº 12.608, de 10 de abril de 2012. Presidencia da República. Dispõe sobre o sistema nacional de proteção e defesa civil - sinpdec e o conselho nacional de proteção e defesa civil - conpdec; autoriza a criação de sistema de informações e monitoramento de desastres. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2011-2014/2012/lei/l12608.htm. Acesso em 02 jul. 2025

BRASIL. MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES.. Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/estimativas-anuais-de-emissoes-gee>. Acesso em 05/07/2025.

Brasil. MMA - Ministério do Meio Ambiente. Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima: volume 1: estratégia geral : portaria MMA nº 150 de 10 de maio de 2016 / Ministério do Meio Ambiente. --. Brasília : MMA, 2016. 2 v. 44 p., il.

BRASIL. MMA- Ministério do Meio Ambiente, 20XX. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/component/k2/item/15164-linha-do-tempo-das-medidas-envolvendo-mudan%C3%A7as-clim%C3%A1ticas.html>. Acesso em 02/07/2025.

Hoek, E., Carranza-Torres, C, Corkum, B (2002). *Hoek-Brown failure Criterion – 2002 edition.*

IPCC, 2019: Annex I: Glossary [van Diemen, R. (ed.)]. In: *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems* [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (eds.)]. [Disponível em <https://www.ipcc.ch/srccl/chapter/technical-summary/>. Acesso em:03 jul. 2025.]



Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Diretrizes para a Elaboração de Projetos Básicos para Empreendimentos de Transmissão Estudos Elétricos, Especificação das Instalações, de Equipamentos e de Linhas de Transmissão. 2019.

Paladino, Ladislau, 1972. Fundações para torres de Linhas de Transmissão. Grupo de Estudos de Transmissão. Seminário Nacional de produção e geração de energia elétrica.

SINIMBÚ, Fabíola (2025). AGÊNCIA BRASIL. ONU Confirma 2024 como ano mais quente em 175 anos. Disponível em: [https://agenciabrasil.ebc.com.br/meio-ambiente/noticia/2025-03/onu-confirma-2024-como-o-ano-mais-quente-em-175anos#:~:text=A%20Organiza%C3%A7%C3%A3o%20Meteorol%C3%B3gica%20Mundial%20\(OMM,175%20anos%20de%20registro%20cient%C3%ADfico.](https://agenciabrasil.ebc.com.br/meio-ambiente/noticia/2025-03/onu-confirma-2024-como-o-ano-mais-quente-em-175anos#:~:text=A%20Organiza%C3%A7%C3%A3o%20Meteorol%C3%B3gica%20Mundial%20(OMM,175%20anos%20de%20registro%20cient%C3%ADfico.)

SOLOSUL SONDAGENS, Relatório de Sondagem Rotativa para Simples reconhecimento. Cachoeirinha/RS, 2024.

Suárez, Ginés et al (2024). Avaliação dos efeitos e impactos das inundações no Rio Grande do Sul. Banco Interamericano de Desenvolvimento (“BID”), Comissão Econômica para a América Latina e o Caribe das Nações Unidas (“CEPAL”) e Banco Mundial (“BM”). Nota técnica do BID; 3039.

SOLOSUL SONDAGENS, Relatório de Sondagem SPT para Simples reconhecimento. Cachoeirinha/RS, 2024