

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

ROBSON PEDROSO DE PAULA

**ESTUDO COMPARATIVO DE ESTRUTURAS EMPREGADAS EM
SUBESTAÇÕES ELÉTRICAS**

Porto Alegre
2022

Robson Pedroso de Paula

**ESTUDO COMPARATIVO DE ESTRUTURAS EMPREGADAS EM
SUBESTAÇÕES ELÉTRICAS**

Projeto de Diplomação II, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para a obtenção de grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro.

Porto Alegre

2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Carlos André Bulhões

Vice-reitora: Patrícia Panke

ESCOLA DE ENGENHARIA

Diretor: Carla Schwengber ten Caten

Vice-diretor: Afonso Reguly

COMISSÃO DE GRADUAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Titular: Raphael Martins Brum

Substituto: Maicon Jaderson Silveira Ramos

CIP - Catalogação na Publicação

Paula, Robson Pedroso de
ESTUDO COMPARATIVO DE ESTRUTURAS EMPREGADAS EM
SUBESTAÇÕES ELÉTRICAS / Robson Pedroso de Paula. --
2022.
96 f.
Orientador: Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Elétrica, Porto
Alegre, BR-RS, 2022.

1. Subestação. 2. Sistemas de Potência. 3.
Estruturas Metálicas. 4. Estruturas de Concreto. I.
Loureiro, Luiz Tiarajú dos Reis, orient. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Escola de Engenharia

Praça Argentina, 09 - Centro Histórico

CEP 90020-040 - Porto Alegre/RS

Fone: +55 51 3308-3336

Robson Pedroso de Paula

Projeto de Diplomação II, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para a obtenção de grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro.

Aprovado em: __/__/____

Porto Alegre, ____ de _____ de 2022.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro, UFRGS
Orientador

Prof. Me. Ben Hur Bandeira Boff, UFRGS
Examinador

Eng. Civil Moema Moraes da Silva, EMAN
Examinadora

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Deus Pai por ter me dado lugar no mistério da vida. Agradeço ao Deus Filho pelo legado do amor. Agradeço ao Espírito Santo por pavimentar o caminho da virtude através da graça manifesta na vida dos santos.

Agradeço meu pai por ensinar através do exemplo. Agradeço meu irmão e minha irmã pelo companheirismo e amizade. Agradeço aos meus sobrinhos por me inspirarem na esperança do futuro. Agradeço especialmente a minha mãe por ser minha bússola moral e uma fonte certa e acessível de amor inesgotável presente em minha vida. Agradeço a minha família unida.

Agradeço meus amigos por me darem leveza na vida. Pelas risadas que fazem a vida mais fácil.

Agradeço minha noiva, por ser o motivo dos meus sonhos e a razão dos meus planos, reafirmando que casaremos assim que ela vencer o câncer.

Agradeço a UFRGS, a Escola de Engenharia e todas as pessoas que a tornaram possível. Agradeço a filosofia do ensino público e a todas as pessoas que não apenas acreditam, mas que também lutam por ela; que construíram e constroem a faculdade de engenharia elétrica. Sejam professores, servidores, terceirizados e colegas discentes.

Agradeço ao professor Tiarajú, meu orientador, pelo auxílio na elaboração deste trabalho, pelas aulas ministradas durante minha graduação, pelos ensinamentos e pela sua paciência.

RESUMO

Analisa as estruturas que podem ser utilizadas na construção de uma subestação de energia elétrica. Contextualiza o que é uma subestação, apontando os tipos e as funcionalidades destas. Enumera os equipamentos usuais de uma subestação. Apresenta modelos dimensionais e aspectos físicos de equipamentos geralmente usados em subestações ao ar livre. Analisa aspectos físicos de construção de estruturas discernindo suas finalidades, quando para suporte de equipamentos, quando para ancoragem de cabos ou ambos. Observa argumentos elétricos, através de normas de segurança reconhecidas nacionalmente e internacionalmente e através de leis físicas estabelecidas. Observa argumentos financeiros, através da análise do mercado estabelecido, conforme disponibilidade de matéria prima e mão-de-obra para construção.

Palavras-chave: Estruturas de Concreto. Estruturas Metálicas. Sistemas de Potência. Subestação.

ABSTRACT

Analyzes the structures that can be used in the construction of an electric power substation. Contextualizes what a substation is, pointing out their types and functionalities. Lists the usual equipment of a substation. It presents dimensional models and physical aspects of equipment commonly used in outdoor substations. It analyzes physical aspects of the construction of structures, discerning their purposes, when to support equipment, when to anchor cables or both. It observes electrical arguments, through nationally and internationally recognized safety standards and through established physical laws. It observes financial arguments, through the analysis of the established market, according to the availability of raw material and labor for construction.

Keywords: Concrete Structures. Metallic structures. Power Systems. Substation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - SE CERTAJA 3; exemplo de subestação AIS	19
Figura 2 - SE Menino Deus; exemplo de subestação GIS	19
Figura 3 - Exemplo de subestação abrigada	20
Figura 4 - Pára-raios ZnO 69 kV	22
Figura 5 - Pára-raios ZnO 23 kV	22
Figura 6 - TC de 23 kV e sua placa de identificação	24
Figura 7 - TP de 23,8 kV e placa de identificação	25
Figura 8 - Seccionadora DAL 69 kV comando motorizado sem lâmina de terra	26
Figura 9 - DJ 69 kV de Tanque Vivo	27
Figura 10 - BCO 23 kV	28
Figura 11 - TF 69-13,8 kV 12,5 MVA em bacia coletora de óleo	29
Figura 12 - Cadeia de Ancoragem 69 kV, com isoladores poliméricos	31
Figura 13 - Suporte de barramento rígido 230 kV	31
Figura 14 - Descida de aterramento	32
Figura 15 - Conjunto de fixação do cabo de cobertura	33
Figura 16 - O “pé-de-galinha” formado por três conectores cunha	35
Figura 17 - Conexão de rede aérea de um TC de 69 kV	35
Figura 18 - Conectores de aterramento, desenhos para projeto	36
Figura 19 - Estruturas de diferentes materiais em SE Cruz Alta 1	46
Figura 20 - SE Marau 2, módulos com postes de seção circular	48
Figura 21 - SE Porto Alegre 8, poste para ancoragem de cabo de cobertura com seção duplo T	49
Figura 22 - Fundação tipo sapata para pórtico de concreto	51
Figura 23 - Fundação tipo sapata para pórtico de concreto	52
Figura 24 - Seccionadora 138 kV em estrutura perfilada	54
Figura 25 - Seccionadora 69 kV em estrutura treliçada	54
Figura 26 - Perfis metálicos	55
Figura 27 - Pilar treliçado, é possível observar que ele é todo composto por peças “L” ou cantoneira	56
Figura 28 - Placa de uma seccionadora 138 kV, informação de peso gravada após fabricação	61

Figura 29 - Catálogo para dimensões e pesos de perfis “U”	61
Figura 30 - Seccionadora em estrutura perfilada	65
Figura 31 - Seccionadora DAL 69 kV sem lâmina de terra. Modelo HUBBELL	66
Figura 32 - Projeto de cavalete de concreto	67
Figura 33 - Projeto de cavalete metálico perfilado	68
Figura 34 - Projeto de cavalete metálico treliçado	69
Figura 35 - Disposição da SE no terreno.	72
Figura 36 - Pórtico metálico de Alegrete 4	73
Figura 37 - Pórtico de concreto de Alegrete 4	74
Figura 38 - Fundação sapata para pórtico de concreto	75
Figura 39 - Fundação sapata para pórtico metálico	77
Figura 40 - Cavalete de concreto para SE Alegrete 4	79
Figura 41 - Cavalete metálico da SE Alegrete 4	80
Figura 42 - Fundação para cavalete de concreto	81
Figura 43 - Fundação para cavalete metálico	82

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Tensão máxima em regime permanente	39
Quadro 2 - Níveis de isolamentos faixa 1	40
Quadro 3 - Níveis de isolamentos faixa 2	41
Quadro 4 - Características Mecânicas do aço ASTM A36	52
Quadro 5 - Espaçamentos NEMA SG 6 para espaçamento em subestações	58
Quadro 6 - Espaçamentos conforme SG 6:2000 aplicado aos padrões NR-10 para proteção da vida humana em áreas onde há circulação de pedestres (referência de altura 2,25 metros: altura média de uma pessoa com braços levantados)	59
Quadro 7 - Espaçamentos conforme SG 6:2000 aplicado aos padrões NR-10 para proteção da vida humana em áreas onde há circulação de veículos	59
Quadro 8 - Carregamentos Longitudinais Mínimos por fase ou cabo para-raios para fins de dimensionamento da estrutura	60
Quadro 9 - Materiais utilizados no projeto do cavalete em concreto	67
Quadro 10 - Materiais utilizados no projeto do cavalete metálico perfilado	68
Quadro 11 - Materiais utilizados no cavalete metálico treliçado	70
Quadro 12 - Comparação entre as massas das estruturas projetadas	70
Quadro 13 - Ferragens para fundação de concreto	75
Quadro 14 - Quantidade de material utilizado para pórtico de concreto com dois pilares	76
Quadro 15 - Características do material da fundação	76
Quadro 16 - Ferros utilizados na armadura da fundação	78
Quadro 17 - Quantidade do material utilizado	78
Quadro 18 - Ferragem utilizada para a armadura do cavalete de concreto	81
Quadro 19 - Quantidades de material para fundação de cavalete de concreto	82
Quadro 20 - Ferragens para armadura do cavalete metálico	83
Quadro 21 - Quantidades de material para fundação de cavalete metálico	83
Quadro 22 - Comparação as características físicas das estruturas	85

Quadro 23 - Comparação do preço das estruturas	86
Quadro 24 - Simulações de preço para dois cenários: estruturas apenas de concreto e estruturas apenas metálicas	86
Quadro 25 - Comparativo para obtenção de estruturas no caso Alegrete 4	87
Quadro 26 - Comparativo para manutenção e durabilidade das estruturas	88

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AIS	Air Insulated Substation
BCO	Banco de Capacitores
CEEE-T	Companhia Estadual de Energia Elétrica - Transmissão
CERTAJA	Cooperativa Regional de Energia Taquari Jacuí
CPFL-T	Companhia Paulista de Força e Luz - Transmissão
DAL	Dupla abertura lateral
GIS	Gas Insulated Substation
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
NBR	Norma Técnica Brasileira
NEMA	National Electrical Manufacturers Association
NR	Norma Regulamentadora
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
RS	Rio Grande do Sul
SE	Subestação
SEP	Sistema elétrico de potência
SPDA	Sistema de proteção contra descargas atmosféricas
TC	Transformador de Corrente
TP	Transformador de Potencial
TSA	Transformador de Serviços Auxiliares

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 ESTRUTURAS UTILIZADAS EM SUBESTAÇÕES	14
1.2 OBJETIVOS	14
1.2.1 Objetivo Geral	14
1.2.2 Objetivos Específicos	14
1.3 Justificativa	15
2 REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1 Sistemas de Potência	16
2.2 Subestações de Energia Elétrica	17
2.3 Elementos de Subestação	21
2.3.1 Equipamentos	21
2.3.1.1 Pára-raios a resistor não linear	21
2.3.1.2 Transformadores de Instrumentos	23
2.3.1.3 Chaves seccionadoras	25
2.3.1.4 Disjuntores	26
2.3.1.5 Banco de Capacitores	27
2.3.1.6 Transformador de Força	28
2.3.2 Condutores	29
2.3.2.1 Condutores de rede aérea	29
2.3.2.2 Condutores de aterramento	32
2.3.2.3 Condutores de blindagem ou cabo de cobertura	32
2.3.2.4 Cabos de controle	33
2.3.3 Conectores	34
2.3.3.1 Conectores de rede aérea	34
2.3.3.2 Conectores de aterramento	36
2.3.4 Estruturas	36
2.3.9.1 Fundações	36
2.3.9.2 Materiais	37
3 NORMAS TÉCNICAS	38
3.1 Coordenação de Isolamento	38
4 PROJETO	43
4.1 Projeto Elétrico	43
4.2 Projeto Civil	43
4.3 Projeto Eletromecânico	43
5 ESTRUTURAS DE SUBESTAÇÃO	45
5.1 Fundações	45
5.2 Estruturas de Concreto	47
5.2.1 Postes	47
5.2.2 Pórticos	50
5.2.3 Cavaletes	51

5.2.4 Capitel	51
5.3 Estruturas Metálicas	52
5.3.1 Elementos Estruturais Metálicos	55
5.3.1.1 Perfis	55
5.3.1.2 Trelças	56
6 ESTRUTURAS	57
6.1 Normas para Projeto	57
6.2 Materiais	62
6.2.1 Estruturas de Concreto	63
6.2.1.1 Estruturas de concreto pré moldado	63
6.2.1.2 Estruturas de concreto moldado in loco	63
6.2.2 Estruturas Metálicas	64
6.3 Execução de Projeto	64
7 ESTUDO DE CASO	71
7.1 SE Alegrete 4	71
7.1.1 Escopo da obra	71
7.1.2 Estruturas empregadas	72
7.1.3 Obtenção das estruturas e considerações	83
7.2 Comparações Entre as Estruturas	85
8 CONCLUSÃO	89
REFERÊNCIAS	90
ANEXOS	94
ANEXO 1	94
ANEXO 1 (Continuação)	95
ANEXO 2	96
ANEXO 2 (Continuação)	97

1 INTRODUÇÃO

Um sistema de potência é constituído de maneira geral por três setores para tratamento e manipulação de energia elétrica: geração, transmissão e distribuição.

Na geração encontram-se as variadas formas de usinas, que tem por finalidade converter alguma forma de energia não elétrica em elétrica, ou ao girar mecanicamente o rotor de um gerador ou através de painéis fotovoltaicos, por exemplo. Compreende-se neste segmento usinas hidrelétricas, térmicas, eólicas, solares etc.

A distribuição é o segmento final do sistema de potência, onde encontra-se a rede que distribui energia pelas cidades e complexos industriais, que consumirão a energia convertida para seus fins.

Para que a energia elétrica proveniente da usina geradora chegue até o consumidor final, inserido em uma rede de distribuição, são necessárias certas manipulações na mesma, pois há certos aspectos que precisam ser observados, visando a qualidade e viabilidade da entrega, como por exemplo a diferença de tensão entre geração e consumo, a distância entre fonte e carga, a frequência da tensão gerada e a frequência da tensão da rede na qual a energia gerada será inserida bem como a sincronicidade de suas fases. Para solucionar estes problemas faz-se uso de um sistema de transmissão cuidadosamente projetado tendo em vista essas adversidades e é nesse contexto em que se insere a instalação de uma subestação de energia elétrica, atuando como ponto de controle e transferência no sistema de transmissão, direcionando e controlando o fluxo energético, transformando os níveis de tensão e funcionando como ponto de entrega para uma rede de distribuição.

Uma subestação conta com diversos elementos na sua construção, de elementos operacionais (que visam o controle do circuito, para manobras, proteção, medições, correções etc.) a estruturas físicas, num esforço que compreende aspectos de projetos elétricos e civis. Neste cenário, o trabalho desenvolvido ao longo deste estudo pretende esclarecer os critérios utilizados no momento de estabelecer a natureza e configuração das estruturas de uma subestação.

1.1 ESTRUTURAS UTILIZADAS EM SUBESTAÇÕES

O projeto de estruturas de uma subestação se inicia ao buscar atender as demandas solicitadas, observando os elementos que serão fixados. Isso se dá de um modo geral a partir da obtenção dos esforços longitudinais através de um memorial de cálculo dos cabos que serão ancorados e do esforço vertical devido a soma das massas dos equipamentos instalados e da própria estrutura. Há ainda esforços exigidos por normas de segurança que visam garantir a integridade da estrutura em situações adversas.

Com os esforços calculados, inicia-se então o processo de seleção da estrutura mais adequada, analisando como argumento o meio em que ela será instalada e de acordo com a situação de mercado mais favorável. A partir destas análises, escolhe-se então o material e modelo para as estruturas. Entre os materiais, pode-se citar concreto armado, concreto protendido, ligas de aço-carbono e até mesmo madeira (usual em torres de transmissão em lugares de alta salinidade).

1.2 OBJETIVOS

Os objetivos que seguem visam explicitar o propósito da pesquisa.

1.2.1 Objetivo Geral

Verificar os argumentos necessários para definir as escolhas de material e formas de construção das estruturas a serem instaladas em uma subestação de energia elétrica.

1.2.2 Objetivos Específicos

A seguir apresentam-se os objetivos específicos desta pesquisa:

- A. Identificar e classificar as formas de instalação de uma subestação.
- B. Observar os elementos que constituem uma subestação de energia. Analisar suas funcionalidades e constituição física.
- C. Verificar as estruturas necessárias para suporte de equipamentos e ancoragem de cabos. Observar as normas que devem ser seguidas. E compará-las com a observação do desenvolvimento de um projeto e da análise de estudo de caso.

1.3 Justificativa

A pesquisa justifica-se diante do fato de que o projeto de uma subestação deve levar em consideração uma série de condições para que a subestação se torne viável e operante. A estrutura a ser utilizada representa um desses fatores, com impacto considerável, pois, em obra demanda tempo para instalação e também porque impacta nos materiais adjacentes a ela, seja para fixação de cabos e equipamentos ou para material de aterramento.

Duas realidades levam a uma demanda de novos projetos na área: o aumento da carga demandada e o fato de que há uma vida útil finita e limitada por normas técnicas para os elementos que compõem a subestação. Nesse aspecto, independentemente se trata-se de uma subestação nova a ser instalada, se for uma ampliação de uma subestação existente ou apenas a substituição de algum equipamento, as estruturas, existentes ou não, devem ser estudadas pelo projetista.

A partir deste contexto, esta pesquisa pretende fazer um estudo sobre os argumentos que o projetista deve levar em consideração na hora de realizar o projeto de uma subestação. Entende-se que há vantagens e desvantagens para cada modelo, quando dentro de um universo de possibilidades viáveis. Entender estes aspectos característicos é fundamental para realizar um projeto eficiente e funcional, visando uma necessidade estabelecida. Contudo, faz-se necessário estabelecer que este trabalho dará ênfase nas estruturas mais utilizadas no mercado regional, no caso, estruturas metálicas e de concreto, nas suas variadas formas de instalação.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

No referencial teórico são abordados alguns conceitos e relações de assuntos fundamentais para a realização deste estudo, tais como: sistemas de potência; tipos, definições e etapas de projeto de subestações; elementos integrantes e normas técnicas nacionais e internacionais. Com base nestes conceitos, será possível aprofundar-se com um melhor entendimento nas demandas atendidas por estruturas bem como suas definições normativas.

2.1 Sistemas de Potência

Bichels (2017) define um sistema elétrico de potência como a soma de todas as instalações e equipamentos empregados em três segmentos distintos: geração, transmissão e distribuição de energia elétrica.

Para explicar a gênese de um sistema de potência, Bichels (2017) aponta que a necessidade de aumentar o aproveitamento de geração a maiores distâncias e com maior potência, isto devido ao crescimento de cargas e potência pelos usuários, elevaria os custos para implementação a níveis cada vez maiores, sendo vantajoso para os potenciais usuários ligados diretamente às usinas mais próximas geograficamente interligarem entre si suas redes, de forma a obter um aproveitamento maior e com maior confiabilidade no suprimento. Bichels (2017) conclui que este é o embrião de um sistema elétrico e, para o autor, a partir dessa fase já há a necessidade de uma padronização de frequência e níveis de tensão, para assim viabilizar estas interconexões.

Em suas palavras, Bichels (2017, p. 20) afirma:

O desenvolvimento de grandes projetos de geração a distância ainda maior levou à necessidade de linhas de transmissão de maiores comprimentos e mais altas tensões e causou a interligação dos pequenos sistemas formando, assim, os grandes SEP atualmente existentes, com a unificação da frequência e a padronização das tensões de transmissão, subtransmissão e distribuição e possibilitando uma maior eficiência e mais segurança no suprimento de energia com menores custos por MWh de energia suprida.

Observa-se então que a interligação de todos os sistemas de geração, transmissão e distribuição do país possibilitam uma maior confiabilidade e qualidade

no suprimento de energia, além de reduzir custos, permitindo ainda que usuários remotos, longe dos pontos de geração, façam parte do sistema.

Ao tratar-se dos níveis de tensão de operação e cargas trabalhadas, Mamede (2021) classifica o SEP da seguinte forma:

- Sistema secundário: aquele em que estão conectados consumidores com cargas geralmente iguais ou inferiores a 50 kW
- sistema primário: aquele que faz a interligação entre sistema de subtransmissão e sistema secundário. Este setor trabalha com tensões de operação variando entre 1 kV e 69 kV (o autor ressalta que a tensão de 69 kV é usada também no sistema de subtransmissão);
- Sistema de subtransmissão: descrito como sendo aquele que interliga sistemas primários a sistemas de subtransmissão. As tensões de operação mais utilizadas neste segmento são 69 kV, 88 kV e 138 kV.
- Sistemas de transmissão: aquele que interliga os sistemas de subtransmissão aos sistemas de geração. Suas tensões de operação podem ser 230 kV, 345 kV, 440 kV, 500 kV e 765 kV. Mamede (2021) ainda ressalta que estas tensões fazem parte da chamada Rede Básica do Sistema Interligado Nacional, operada pela ONS.

2.2 Subestações de Energia Elétrica

No sistema de potência, uma subestação atua como ponto de controle e transferência do fluxo energético, atuando nos três níveis da SEP.

Existem diversas formas de classificar uma subestação de energia elétrica. De acordo com McDonald (2012), por exemplo, se o critério for a finalidade da subestação, existem quatro tipos principais para subdividi-las, sendo elas:

1. Subestação de pátio de manobra em uma estação geradora: estas instalações conectam os geradores de uma usina ao sistema elétrico de potência e também fornecem energia externa à ela;
2. Subestação do cliente: funciona como fonte de fornecimento de energia elétrica para um determinado cliente comercial;
3. Subestação do sistema: envolve transferência de energia em larga escala pela rede. Estas subestações dividem-se entre as que oferecem apenas serviços de comutação, ou seja, fazem apenas

manobras sem transformar os níveis de tensão, e as que realizam o serviço de conversão de tensão. Estas grandes instalações normalmente servem como pontos finais para linhas de transmissão, oriundas de centrais de geração e fornecem energia elétrica para circuitos que alimentam subestações de transformadores.

4. Subestação de distribuição: consistem nas instalações mais comuns em sistemas elétricos de potência e alimentam os circuitos da rede de distribuição que abastece diretamente a maioria dos usuários. Estas instalações localizam-se geralmente próximas aos centros de carga, ou seja geralmente se encontram localizadas próximas às áreas povoadas as quais elas abastecem.

Também de acordo com McDonald (2012), podemos dividir as subestações conforme o tipo de material utilizado para isolar as partes energizadas, podendo o material em questão ser o ar natural ou algum gás artificial confinado nas instalações. As subestações com isolamento a ar (AIS) são as que utilizam o ar atmosférico como meio isolante entre os componentes da subestação, sem nenhum tipo de tratamento ou confinamento. As subestações com isolamento a gás (GIS) são as que utilizam algum gás com um maior poder de isolação, ou seja, mais dielétrico que o ar atmosférico natural, desta forma, uma GIS admite distanciamentos menores entre fases e fase-terra, poupando espaço. Em contrapartida, o custo de implementação de uma GIS é superior ao de uma AIS, de forma que, por vezes, ainda é mais vantajoso optar por instalações maiores AIS do que optar por uma equivalente GIS que ocupa menos espaço. O gás mais utilizado em GIS é o hexafluoreto de enxofre (SF₆). Mamede (2021) ainda cita um modelo híbrido, que faz uso tanto do ar isolante quanto do gás isolante.

Na figura 1 é apresentado um exemplo de subestação AIS a SE CERTAJA 3, em Vale Verde (RS). A figura 2 mostra a SE Menino Deus, uma subestação GIS localizada em Porto Alegre (RS).

Figura 1 - SE CERTAJA 3; exemplo de subestação AIS



Fonte: Acervo Gama Engenharia.

Figura 2 - SE Menino Deus; exemplo de subestação GIS



Fonte: Acervo Gama Engenharia.

Uma outra divisão comum para as subestações é o local da construção das instalações; se é ao tempo ou abrigada. Mamede (2021) define uma instalação abrigada como sendo aquela nas quais os equipamentos e estruturas se encontram instaladas no interior de uma edificação, protegidas de intempéries. Já instalações

ao tempo, o autor define como sendo aquelas cujos equipamentos se encontram sujeitos ao clima, portanto tendo necessidade de serem mais robustos a intempéries. Na figura 2, uma subestação abrigada: cubículos de média tensão na subestação Antônio Prado.

Figura 3 - Exemplo de subestação abrigada



Fonte: Acervo Gama Engenharia.

Mamede (2021) classifica também 4 formas de subestação de acordo com sua ação em relação aos níveis de tensão: elevadora, que eleva os níveis de tensão (tensão de saída maior que tensão de entrada); abaixadora, que diminui os níveis de tensão (tensão de saída menor que tensão de entrada) e subestação de manobra, que serve para chaveamento de trechos da rede, para fins de proteção para manutenção ou mesmo suprir falhas. Estas subestações possuem tensões de entrada e saída iguais. Além destas, Mamede (2021) cita também a subestação de compensação, que é aquela responsável por injetar energia reativa indutiva e/ou capacitiva no SEP.

2.3 Elementos de Subestação

Esta seção destinar-se-á a comentar os elementos constitucionais das subestações mencionadas na seção anterior.

Para seu funcionamento, uma subestação conta com equipamentos operacionais ligados entre si por meio de condutores e conectores. As estruturas físicas que viabilizam estas instalações também serão discutidas, explorando seus materiais constituintes e aspectos gerais de seu projeto.

2.3.1 Equipamentos

Equipamentos são os elementos que compõem o esquema elétrico da subestação. As seções a seguir apresentarão os principais equipamentos e suas principais características.

2.3.1.1 Pára-raios a resistor não linear

Pára-raios são equipamentos de proteção contra surtos de sobretensão na rede. Sobretensões podem ocorrer por diversas causas, Mamede (2011) aponta entre elas: defeitos monopolares na linha, perda de carga devido a abertura de disjuntores, surtos causados por equipamentos de manobra e descargas atmosféricas. Geralmente são instalados nas entradas e saídas da subestação, para proteção da entrada de linha e saída de alimentadores; nos barramentos, para proteção das barras; perto das buchas de alta e baixa tensão do transformador, para proteção do equipamento. Mamede (2011, pg. 1) diz:

Os pára-raios são utilizados para proteger os diversos equipamentos que compõem uma subestação de potência ou simplesmente um único transformador de distribuição instalado em poste. Os pára-raios limitam as sobretensões a um valor máximo. Este valor é tomado como o nível de proteção que o pára-raios oferece ao sistema.

O tipo mais comum de pára-raios utilizado é o que usa óxido de zinco como resistor não linear e possuem corpo polimérico, mas também podem ser encontrados, não muito comum, pára-raios ZnO em corpo de porcelana e ainda pára-raios de carboneto de silício como resistor não linear.

A figura 4 apresenta um pára-raios de 69 kV, com contador de descargas, a figura 5 apresenta um pára-raios típico de média tensão, no caso, 23 kV.

Figura 4 - Pára-raios ZnO 69 kV



Fonte: Acervo Gama Engenharia.

Figura 5 - Pára-raios ZnO 23 kV



Fonte: Acervo Gama Engenharia.

2.3.1.2 Transformadores de Instrumentos

A norma estabelecida pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) através da Norma Técnica Brasileira (NBR) de número 61869-1:2020: Transformadores para instrumento - Parte 1: Requisitos gerais, define transformador de instrumentos como equipamentos destinados a transmitir sinais de informação para instrumentos de medição, medidores e dispositivos de controle ou proteção. São divididos de duas formas, dado a natureza da sua transformação: transformador de corrente e transformador de potência.

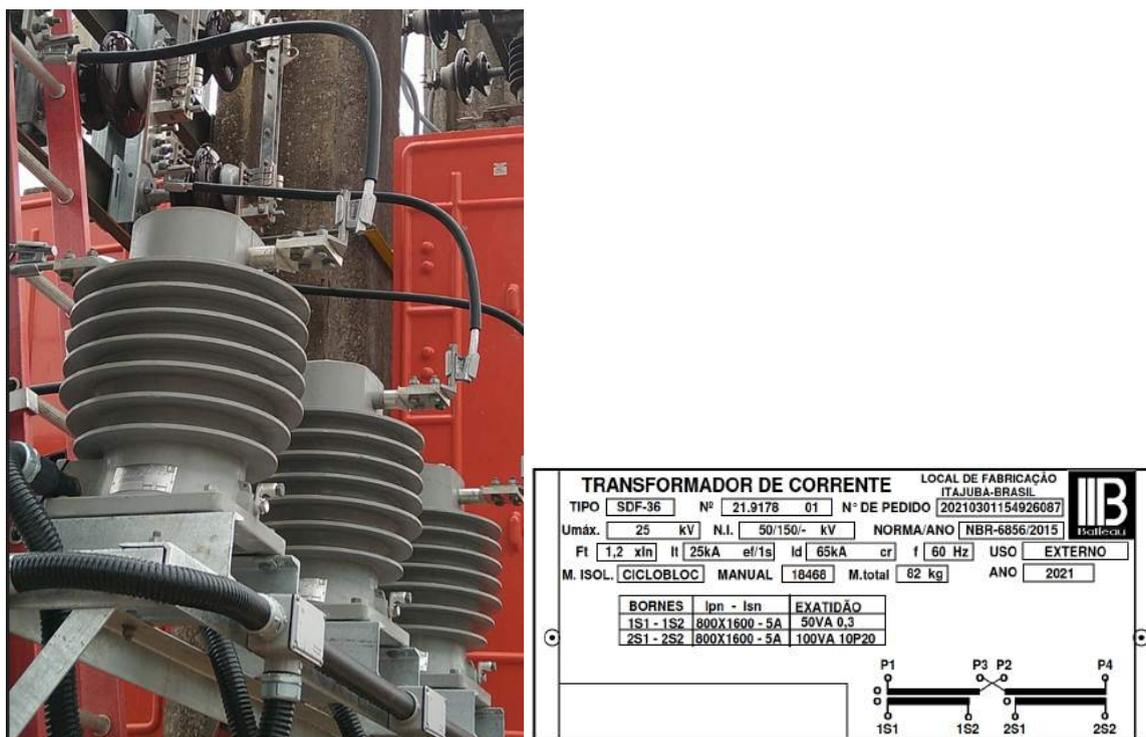
A norma desenvolvida pela *International Electrotechnical Commission* (IEC) e adaptada pela NBR número 61869-2: Transformadores para instrumento - Parte 2: Requisitos adicionais para transformadores de corrente, define transformador de corrente como o transformador para instrumentos em que o enrolamento primário é ligado em série com o circuito, e que reproduz no seu secundário uma corrente proporcional à do seu circuito primário, com sua posição fasorial mantida.

Quanto a sua aplicação, Mamede (2011, p. 157) diz:

Os transformadores de corrente são utilizados para suprir aparelhos que apresentam baixa resistência elétrica, tais como amperímetros, relés, medidores de energia, de potência, etc.

A figura 6 apresenta um terno (conjunto de três) TCs de 23 kV e a sua placa de identificação, onde consta, entre outros dados, a sua relação de transformação.

Figura 6 - TC de 23 kV e sua placa de identificação



Fonte: Acervo Gama Engenharia.

A norma NBR IEC 61869-3: Transformadores para instrumento - Parte 3: Requisitos adicionais para transformadores de potencial indutivos, define transformador de potencial como o transformador para instrumentos em que o enrolamento primário é ligado em derivação no circuito, e que reproduz no seu secundário uma tensão proporcional à do seu circuito primário, com sua posição fasorial mantida.

A respeito do uso deste equipamento, Mamede (2011, p. 192) diz:

Os transformadores de potencial são equipamentos utilizados para suprir aparelhos que apresentam elevada impedância, tais como voltímetros, relés de tensão, bobinas de tensão de medidores de energia, etc.

Também é possível classificar as seccionadoras conforme a forma de abertura da lâmina, as chaves seccionadoras de alta tensão mais comuns, por exemplo, são as chamadas tripolares de dupla abertura lateral para barramentos a cabo e as pantográficas ou semi-pantográficas para barramentos rígidos.

Na figura 8, uma seccionadora DAL de 69 kV, com comando motorizado e sem a lâmina de terra.

Figura 8 - Seccionadora DAL 69 kV comando motorizado sem lâmina de terra



Fonte: Acervo Gama Engenharia.

2.3.1.4 Disjuntores

A norma Std C37.100.1:2018: *IEEE Standard for Common Requirements for High-Voltage Power Switchgear Rated Above 1000 V* do *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE), estabelece disjuntor como dispositivo de comutação mecânico capaz de transportar e interromper correntes sob condições normais de circuito; estabelecer, transportar e interromper por um tempo especificado e interromper correntes (na ocorrência de curto-circuito).

Existem diferentes tipos de disjuntores de alta tensão, sendo característica comum a câmara de extinção do arco voltaico originário da ação de

conexão/interrupção do circuito vivo. Dentro desta câmara condiciona-se algum gás dielétrico, como o SF₆, gás mais utilizado para este fim.

O modelo de disjuntor mais usado nas subestações menores que 230 kV é o tripolar de tanque vivo, caracterizado por possuir a câmara do interruptor isolada do solo, ao contrário do disjuntor de tanque morto, a figura 9 ilustra este equipamento.

Figura 9 - DJ 69 kV de Tanque Vivo



Fonte: Acervo Gama Engenharia.

2.3.1.5 Banco de Capacitores

Segundo a norma IEC 60871-1:2014: *Shunt capacitors for a.c. power systems having a rated voltage above 1000 V - Part 1: General*, bancos de capacitores são equipamentos formados por uma combinação de unidades capacitivas e podem ser inseridas no circuito em derivação ou em série. Em derivação funciona para compensação de reativos, para controle do fator de potência. Em série servem para diminuir a reatância série em linhas de transmissão

e também diminuir a distância elétrica entre as barras terminais. Na figura 10, um banco de capacitores 23 kV.

Figura 10 - Banco de Capacitores 23 kV



Fonte: Acervo Gama Engenharia.

2.3.1.6 Transformador de Força

A norma ABNT NBR 5356-1:2007: Transformadores de Potência - Parte 1: Generalidades, define transformador de potência como o equipamento com dois ou mais enrolamentos e que por indução eletromagnética transforma um sistema de tensão e corrente em outro sistema de tensão e corrente, com valores diferentes (geralmente), mas com a mesma frequência. É o principal equipamento de uma subestação de transformação.

Os tipos mais usados em subestações de alta tensão ao ar livre são os que possuem sistemas de refrigeração baseados na circulação de óleo e ar, podendo esta circulação ser natural ou forçada.

Dada a natureza ecologicamente agressiva do óleo de refrigeração do transformador de força, é norma posicioná-lo em uma bacia com um sistema de

coleta de óleo, para que eventuais vazamentos sejam preservados e não prejudiquem o meio ambiente.

A figura 11 mostra um transformador de força com relação 69-23,8 kV de 12,5 MVA estabelecido em uma bacia coletora.

Figura 11 - TF 69-13,8 kV 12,5 MVA em bacia coletora de óleo



Fonte: Acervo Gama Engenharia.

Transformadores de serviços auxiliares (TSA) são transformadores usados para instalações na própria subestação, assim, usualmente realiza a transformação de média para baixa tensão.

2.3.2 Condutores

Em uma subestação, condutores são os materiais utilizados para o transporte de potência de um determinado ponto a outro. Nesta seção serão discutidos os tipos de condutores que podem ser encontrados em uma subestação.

2.3.2.1 Condutores de rede aérea

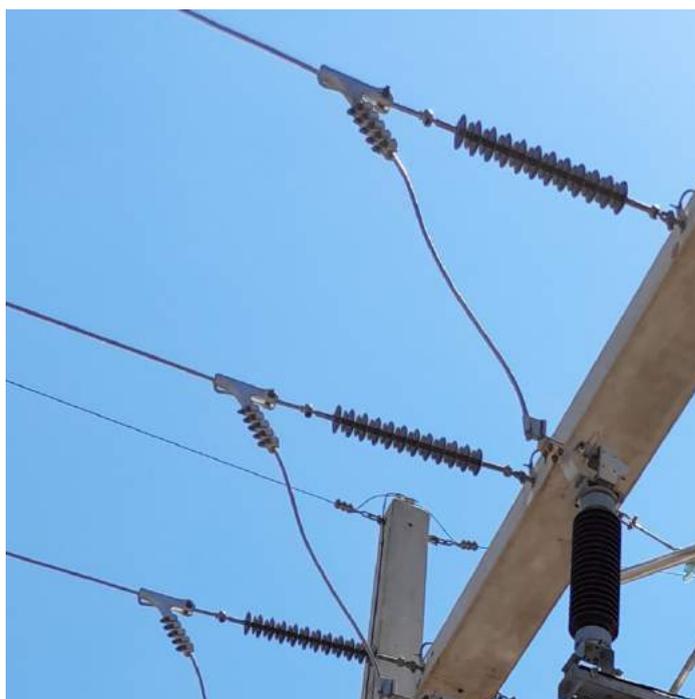
São os principais condutores, responsáveis por transportar a potência entre os equipamentos da subestação. O material mais utilizado nesses condutores é o

alumínio, por apresentar um custo menor de fabricação do que o cobre por exemplo, material eletricamente superior ao alumínio, porém mais caro. Os tipos de condutores mais comuns em uma subestação são:

- Cabos nus: cabos constituídos de fios de alumínio sem nenhum tipo de revestimento. São divididos em dois tipos;
 - Com Alma: cabos que possuem filamentos de aço no seu interior. Estes cabos possuem uma resistência maior à flexão, sendo os mais usados para linhas de transmissão ou em subestações com vãos muito grandes.
 - Sem Alma: cabos sem o reforço de aço no interior.
- Cabos protegidos: cabos revestidos com algum material não isolante, usualmente policloreto de vinila (PVC) ou polietileno reticulado (XLPE), para proteção física dos condutores.
- Cabos isolados: cabos com proteção isolante, geralmente em borracha etileno-propileno (EPR) ou borracha etileno-propileno de alto grau (HEPR);
- Tubos de alumínio: usados em barramentos rígidos.

A fixação de condutores de rede aérea é feita através de cadeias de isoladores, que tem por princípio apoiar ou fixar os condutores às estruturas, mantendo uma distância de segurança entre as partes vivas e as partes conectadas à terra (ou ainda à elementos vivos, como em cadeias de seccionamento, que tem por finalidade isolar dois cabos de um mesmo vão). Em cabos a fixação se dá através de cadeias de ancoragem, um conjunto de isoladores para dar a distância necessária da estrutura a ser isolada e um grampo, usualmente do mesmo material do condutor para prender o cabo. Para tubos, usa-se isoladores (simples, empilhados ou poliméricos de corpo único) e conectores tubo-isolador. A figura 12 mostra um terno de cadeias de ancoragem 69 kV com isoladores poliméricos para ancoragem em viga de concreto. A figura 13 mostra um conjunto de isoladores poliméricos de corpo único suportando um tubo de alumínio, em um barramento rígido de 230 kV.

Figura 12 - Cadeia de Ancoragem 69 kV, com isoladores poliméricos



Fonte: Acervo Gama Engenharia.

Figura 13 - Suporte de barramento rígido 230 kV



Fonte: Acervo Gama Engenharia.

2.3.2.2 Condutores de aterramento

São os condutores responsáveis por conectar os equipamentos e estruturas da subestação à malha de terra. Normalmente o material usado nestes condutores é o cobre eletrolítico.

Como estratégia para inibir furtos, é comum proteger as descidas de aterramento com eletrodutos até certa altura ou substituir os condutores de cobre puro por ligas menos condutoras, mas com menor valor comercial, como os bimetálicos de aço-cobre. Na figura 14, a descida de aterramento de um equipamento de pátio.

Figura 14 - Descida de aterramento



Fonte: Acervo Gama Engenharia.

2.3.2.3 Condutores de blindagem ou cabo de cobertura

São os condutores que constituem o sistema de proteção à descargas atmosféricas (SPDA) da subestação. O material mais utilizado são as cordoalhas de aço de 7 fios. Os tipos mais comuns de cordoalha são os de alta resistência (HS) e os de extra-alta resistência (EHS).

O conjunto de fixação do cabo de cobertura é mais simples que o do condutor de rede aérea, podendo ser feito através de um grampo parafusado ou uma alça preformada de aço. Na figura 15, o conjunto de fixação com parafuso olhal e grampo.

Figura 15 - Conjunto de fixação do cabo de cobertura



Fonte: Acervo Gama Engenharia.

Esse condutor bem como seu conjunto de fixação também podem ser instalados para fins de ancoragem de equipamentos de proteção para manutenção em altura, neste caso, em vez de “cabo de cobertura”, recebe o nome de “linha de vida”.

2.3.2.4 Cabos de controle

São os cabos responsáveis por conectar os equipamentos da subestação aos instrumentos de controle, proteção e medição de faturamento.

2.3.3 Conectores

São os elementos responsáveis por ligar dois elementos do circuito, fixar condutores junto às estruturas ou ainda manter uma distância determinada entre elementos.

2.3.3.1 Conectores de rede aérea

São os conectores utilizados para a conexão dos condutores de rede aérea. Podendo a conexão ser cabo a cabo, cabo a tubo ou ainda cabo a equipamento.

A ligação cabo a cabo em subestações de até 138 kV é feita geralmente por conectores do tipo cunha. Para subestações de 230 kV para cima, esses conectores podem dar ponto quente, sendo mais aconselhado conectores aparafusados, com design anti-corona. Quando existe mais de um condutor por fase, é padrão também colocar um conector espaçador entre condutores, para não ocorrer choque físico entre eles conforme ação do vento.

Nas ligações cabos a equipamentos também se encontra um amplo uso dos conectores do tipo cunha. Geralmente os equipamentos possuem chapas terminais que seguem o padrão internacional de furação NEMA. À essa furação, é conectado através de parafusos, um terminal chave-faca, que possui uma chapa com a furação semelhante ao equipamento em uma ponta e um pino na outra. O conector cunha realiza então a conexão do cabo e do pino do conector chave-faca.

A figura 16 mostra um modelo de ligação muito utilizado em ligações abaixo de 138 kV, conhecido popularmente como “pé-de-galinha”, formado por três conectores cunhas. A figura 17 mostra um conjunto de fixação rede aérea-equipamento muito comum em subestações de alta tensão, formado por cunha, terminal chave-faca e terminal do equipamento.

Figura 16 - O “pé-de-galinha” formado por três conectores cunha



Fonte: Acervo Gama Engenharia.

Figura 17 - Conexão de rede aérea de um TC de 69 kV



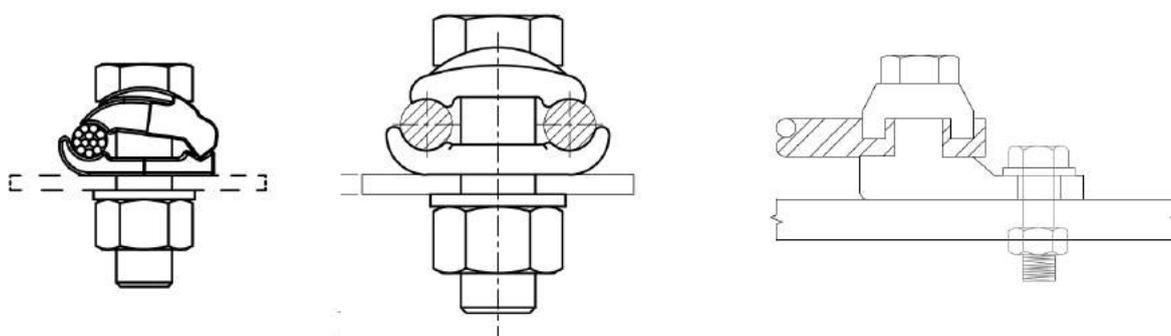
Fonte: Acervo Gama Engenharia.

2.3.3.2 Conectores de aterramento

São os conectores empregados nas descidas de aterramentos dos equipamentos e estruturas. Destacam-se entre estes os conectores tipo “unha”, que servem principalmente para fixar o cabo de aterramento à estrutura; o tipo “paralelo”, que possui a mesma função do “unha”, porém com a função adicional de conectar dois cabos distintos; o tipo “sapata”, responsável por conectar chapas de aço a um cabo de aterramento.

Na figura 18, da esquerda para direita, um conector “unha”, um conector “paralelo” e um conector “sapata”.

Figura 18 - Conectores de aterramento, desenhos para projeto



Fonte: Acervo Gama Engenharia.

2.3.4 Estruturas

São os elementos da subestação que visam abrigar, apoiar, fixar, proteger, isolar ou separar os equipamentos, condutores e conectores. São projetos de obra civil que atendem critérios eletromecânicos. Possuem diferentes modelos de construção e diversos materiais que podem ser utilizados na sua fabricação, sendo variados os critérios que devem ser observados em projeto. As seções a seguir discutirão aspectos fundamentais presentes na construção de todas estruturas: fundação (meio em que é instalada) e material constituinte.

2.3.9.1 Fundações

Para Labegalini, Labegalini, Fuchs e Almeida (1992), fundação é a estrutura de transição entre os esforços provenientes da estrutura a ser erguida e o solo subjacente. O autor afirma ainda que toda obra de engenharia assentada sobre a

superfície terrestre necessita de uma fundação e o seu dimensionamento é feito através de dois estudos fundamentais: o cálculo de todos os esforços possíveis que agirão sobre a estrutura, incluindo seu próprio peso, e o estudo das características geográficas do terreno.

Uma das etapas iniciais na realização de uma obra de subestação é a construção das fundações das estruturas que serão erguidas.

2.3.9.2 Materiais

Os materiais mais utilizados em estruturas de subestações são o concreto armado e ligas de aço carbono.

Concreto é o nome dado ao composto de cimento, água e sedimentos, como areia, brita, seixo, etc. Estruturas de concreto são caracterizadas por possuir grande resistência à flexão e a compressão, porém não apresentam uma resistência satisfatória em relação à tração. Para solucionar esta falha, uma estrutura de grandes dimensões necessita de um reforço de vergalhões de aço no seu interior chamado “armadura”. Uma estrutura de concreto que faz uso de armadura é chamado de “estrutura em concreto armado”.

ACOSNOBRE (2022) define aço carbono como um metal fabricado a partir dos elementos químicos ferro (Fe) e carbono (C). Com o carbono conferindo dureza e resistência ao material. As normas que classificam as ligas de aço carbono mais utilizadas são as normas SAE para garantir a composição química do material e a ASTM para garantir as propriedades mecânicas da composição (como tensão de escoamento e cisalhamento, por exemplo), sendo desta forma a norma indicada para definir peças estruturais.

3 NORMAS TÉCNICAS

Conhecendo as necessidades e as funções de uma subestação e estando ciente dos seus elementos constitucionais, é preciso também atentar-se às normas estabelecidas que conformam a instalação e a inserção da SE no SEP. Para isso, em projeto básico, a concessionária define os critérios de projeto executivo que nortearão o andamento do empreendimento, de acordo com as questões legais estabelecidas no país.

No Brasil as normas são definidas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) através das “normas brasileiras” (NBR). Além destas, outras normas utilizadas pelas concessionárias são as listadas abaixo:

- *AISI - American Iron and steel Institute;*
- *ANSI - American National Standards Institute;*
- *ASCE - American Society of Civil Engineering;*
- *ASTM - American Society for Testing and Materials;*
- *AWS - American Welding Society;*
- *IEC - International Electrotechnical Commission;*
- *NEMA - National Electrical Manufacturers Commission;*
- *NESC - National Eletrical Safe Code;*
- *IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers.*

O Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) através do “submódulo 2.3: requisitos mínimos para subestações e seus equipamentos” orienta, quando na falta de norma ABNT aplicável à situação, utilizar, nesta ordem de preferência, as normas IEC, ANSI, ASTM e NESC exceto quando seja explicitado diretamente de outra forma.

3.1 Coordenação de Isolamento

Outro parâmetro normatizado relevante para o projeto é o nível de isolamento adotado, que delimita as tensões suportáveis pelos equipamentos. O valor do nível de isolamento pode ser especificado como sendo um valor estatístico ou convencional: convencional quando é aplicado em isolações não auto-recuperantes, onde não se pode admitir descargas na isolação e estatístico quando aplicado em isolações auto-recuperantes, onde se admite uma probabilidade de descargas.

A definição do nível de isolamento parte do valor de tensão máxima eficaz do equipamento, que por sua vez é definida pela tensão nominal do sistema que ele compõe. O quadro 1 apresenta os dados disponibilizados no “submódulo 2.3: requisitos mínimos para subestações e seus equipamentos” da ONS, nela é possível observar as tensões nominais empregadas em subestações do SEP e a tensão máxima que os equipamentos em operação devem suportar em regime permanente.

Quadro 1 - Tensão máxima em regime permanente

TENSÃO NOMINAL DO SISTEMA (kV)	TENSÃO MÁXIMA (kV fase-fase, eficaz)
13,8	14,5
34,5	36,2
69	72,5
88	92,4
138	145
230	242
345	362
440	460
500 ou 525	550
765	800

Fonte: ONS (2022)

A norma ABNT NBR 6939:2018: Coordenação do isolamento - procedimento, especifica o procedimento para definir as tensões suportáveis para isolação fase-terra, isolação fase-fase e isolação longitudinal dos elementos. Além disso, lista também valores normalizados entre os quais as tensões suportáveis nominais devem ser escolhidas, dividindo em duas classes:

- Classe 1: equipamentos com tensões máximas iguais ou inferiores a 245 kV;
- Classe 2: equipamentos com tensão superior a 245 kV.

O quadro 2 mostra os níveis de isolamento para equipamentos da classe 3. A tabela associa à tensão máxima do equipamento valores de tensão suportável nominal de impulso atmosférico e tensão suportável nominal à frequência fundamental durante um minuto e com frequência reduzida.

Quadro 2 - Níveis de isolamentos faixa 1

Tensão máxima do equipamento Um kV (eficaz)	Tensão suportável nominal normalizada de frequência fundamental de curta duração kV (eficaz)	Tensão suportável nominal normalizada de impulso atmosférico kV (crista)
15	34	95
		110
24	50	95
		125
		145
36	70	145
		170
		200
72,5	140	325
		350
145	185	450
		230
		275
245	275	650
		325
		360
		395
		460
		750
		850
		950
		1050

Fonte: Adaptado norma ABNT NBR 6939:2018.

O quadro apresenta mais de um valor de tensões suportáveis associados à tensão máxima. A escolha nesses casos é feita levando em consideração a presença ou não de pára-raios próximo ao equipamento.

Para a classe 2, os níveis de isolamento são delimitados pela tensão suportável de impulso de manobra e pelas tensões suportáveis nominal de impulso atmosférico, conforme ilustrado pelo quadro 3.

Quadro 3 - Níveis de isolamentos faixa 2

Tensão máxima do equipamento Um kV (eficaz)	Tensão suportável normalizada de impulso de manobra fase-terra kV (eficaz)			Tensão suportável normalizada de impulso atmosférico kV (crista)
	Isolação longitudinal (kV crista)	Fase-terra (kV crista)	Fase-fase (relação para o valor de crista fase-terra)	
300	750	750	1,5	850 950
	750	850	1,5	950 1050
362	850	850	1,5	950 1050
	850	950	1,5	1050 1175
420	850	850	1,6	1050 1175
	950	950	1,5	1175 1300
420/460*	950	1050	1,5	1300 1425
525	950	950	1,7	1175 1300
525/550*	950	1050	1,6	1300 1425
	950	1175	1,5	1425 1550
550*	950	1300	1,5	1550

				1675
765	1175	1300	1,7	1675 1800
765/800	1175	1425	1,7	1800 1950
	1175	1550	1,6	1950 2100

Fonte: Adaptado norma ABNT NBR 6939:2018.

4 PROJETO

O projeto de uma subestação envolve basicamente três disciplinas que conversam entre si durante todo o processo de obra: o projeto elétrico, civil e eletromecânico. Abaixo segue uma descrição mais detalhada de cada uma destas.

4.1 Projeto Elétrico

Parte do projeto que desenvolve as características de circuito da subestação, incluindo o projeto de proteção e medição de faturamentos, além do circuito geral. Para Mamede (2021) algumas das responsabilidades desta disciplina são:

- Relatórios técnicos (memórias de cálculo);
- Diagramas unifilares e trifilares (de operação, proteção e medição);
- Diagramas de serviços auxiliares;
- Lista de cabos;
- Projeto de proteção.

4.2 Projeto Civil

Parte do projeto que estuda e fundamenta as estruturas, edificações, níveis de terreno e aspectos geológicos do solo da subestação. Entre as responsabilidades deste setor, Mamede (2021) cita:

- Seleção do terreno;
- Levantamento topográfico;
- Sondagem geotécnica;
- Levantamento da resistividade do solo;
- Projetos estruturais e edificações.

4.3 Projeto Eletromecânico

Parte do projeto que relaciona projeto civil e elétrico, responsável por posicionar os equipamentos na planta do terreno, de orçar as quantidades de materiais necessários para a instalação da subestação e definir estruturas conforme as normas de segurança estabelecidas.

Entre as responsabilidades deste setor estão:

- Planta da disposição da subestação no terreno;
- Arranjo geral e cortes;

- Projeto de conexões de rede aérea, de equipamentos e de malha de terra;
- Blindagem da subestação à descargas atmosféricas;
- Desenho das estruturas.

5 ESTRUTURAS DE SUBESTAÇÃO

No referencial teórico foram fundamentadas as características que definem uma subestação. Foram analisados os equipamentos constituintes de uma SE e as diretrizes técnicas a serem seguidas para tornar possível a conexão da SE em um SEP. Neste capítulo será aprofundado a discussão sobre estruturas, atentando de maneira mais incisiva nos critérios de projeto deste elemento presente em todos os tipos de subestação.

5.1 Fundações

A norma ABNT NBR 6122:2019: Projeto e execução de fundações, define as condições básicas a serem observadas no projeto e execução de fundações de estruturas. A norma fixa em suas definições os tipos de elementos, destacando-se para uso em subestação os itens listados abaixo:

- Elementos de fundação superficial;
 - Sapata: tensões de tração resistidas pelo emprego de armadura;
 - Bloco: tensões de tração resistidas pelo concreto;
 - Radier: elemento que abrange todos os pilares da estrutura.
- Elementos de fundação profunda:
 - Estaca: escavação do solo feita inteiramente por equipamentos;
 - Tubulão: elemento de fundação de seção circular e que, geralmente, possui a base alargada. Por ter dimensões maiores, a escavação do solo exige a descida de funcionários para mão de obra.

Além da referida norma, também devem ser seguidas as normas: ABNT NBR 6118:2014: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento, que determina os parâmetros dos produtos utilizados em obras de concreto armado; a norma ABNT NBR 8044:2013: Projeto geotécnico - Procedimento, que determina os procedimentos para caracterização do solo através de métodos de ensaio, para assim determinar as ações do terreno sob a fundação, ABNT NBR 8681:2003: Ações e segurança nas estruturas - Procedimento, que fixa os requisitos exigidos na verificação da segurança das estruturas usuais da construção civil, além de estabelecer as definições e critérios de quantificação das ações e das resistências a serem consideradas e a NR-18 que normatiza o processo da obra civil da fundação.

As fundações destinadas a estruturas metálicas devem possuir uma altura de 25 cm do nível do solo da subestação (valor “0” ou valor de referência definido pelo projeto de terraplanagem) deve ter sua face superior desempenada e deve possuir ranhuras para escoamento de água, para assim evitar acúmulos que podem danificar a estrutura.

Para as fundações destinadas a estruturas de concreto, é estabelecido que devem possuir cota superior na mesma altura do nível do solo da subestação. O espaço entre o nicho da fundação e o suporte da estrutura deve ser preenchido com areia saturada e os primeiros 10 cm abaixo do nicho devem ser preenchidos com selo de concreto. A figura 19 mostra na SE Cruz Alta 1 este critério sendo observado: três TCs de 69 kV em estruturas de concreto, cuja fundação está no mesmo nível do solo e três pára-raios e um TP de 69 kV em estrutura metálica, com a fundação acima do nível do solo, ressaltando que o nível da brita é 10 cm acima do nível do solo.

Figura 19 - Estruturas de diferentes materiais em SE Cruz Alta 1



Fonte: Acervo Gama Engenharia.

5.2 Estruturas de Concreto

Existem duas modalidades de fabricação de estruturas de concreto: estruturas pré-moldadas e estruturas moldadas *in loco*.

Estruturas pré-moldadas são aquelas que são obtidas em sua forma final em um local que não o exato local onde ela ficará instalada. Sendo pré-fabricadas, elas necessitam de algum meio de transporte até o local onde serão instaladas e necessitam também de trabalho para fixação da estrutura à fundação. Este método de fabricação é vantajoso por requerer um número menor de pessoas para sua instalação dentro da subestação, já que a estrutura pode ser feita longe do pátio da SE, podendo assim diminuir o custo pessoal de deslocamento de mão de obra e ficar livre de intempéries, no caso de obras em subestações ao ar livre. Em contrapartida, o deslocamento e instalação das estruturas pré-moldadas necessitam de equipamentos mais robustos capazes de suportar o peso de transportar a estrutura completa e de manipular a peça para sua instalação sob a fundação. A norma ABNT NBR 9062:2017: Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado define os requisitos para projetos em concreto pré-moldado.

Estruturas moldadas *in loco* são aquelas que são fabricadas já no local final onde ficarão instaladas, exigindo de transporte apenas o material necessário para a sua fabricação. Por ser moldada no local, este tipo de instalação é mais segura por não correr os riscos de sinistros no transporte e mais abertas a alterações devido imprevistos, já que durante a sua instalação é mais fácil contemplar o cenário final. Em contrapartida, esta modalidade requer um deslocamento maior de mão de obra e mais tempo de trabalho dentro da subestação, o que pode atrasar outras etapas do projeto, que poderiam ocorrer paralelamente à instalação de uma peça de concreto pré-moldada. Para grandes estruturas e em grandes quantidades, estas desvantagens intensificam-se. A norma ABNT NBR 6118:2014: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento estabelece os critérios para procedimento de projeto e execução em obras de concreto.

5.2.1 Postes

Colunas de concreto armado. Sua classificação de esforço usual é a capacidade de tração no seu topo, em decaNewton. Em uma subestação, postes de concreto são geralmente usados para setores de média tensão, para ancoragem de

cabos de SPDA, e para fixação de equipamentos de iluminação, antenas e sensores de presença.

Existem dois modelos de postes de concreto: o de seção circular e o duplo T, a norma ABNT NBR 8451-2020: Postes de concreto armado e protendido para redes de distribuição e de transmissão de energia elétrica - Parte 2: Padronização de postes para redes de distribuição de energia elétrica, apresenta as características de cada um destes elementos através das tabelas A.1 e B.1 da referida norma (anexos 1 e 2), deixando claro que uma das diferenças básicas entre os dois modelos é o fato de que o poste duplo T possui resistência à tração diferente, dependendo do lado utilizado (o lado que apresenta as aberturas), enquanto o circular possui resistência igual para qualquer lado utilizado. A figura 20 apresenta um poste de seção circular e a figura 21 um poste de seção duplo T.

Figura 20 - SE Marau 2, módulos com postes de seção circular



Fonte: Acervo Gama Engenharia.

Figura 21 - SE Tainhas, módulos com postes de seção duplo T



Fonte: Acervo Gama Engenharia.

Para fixar elementos em postes de concreto, existem três possibilidades: fixação com parafusos, fixação com cintas metálicas e fixação com fitas metálicas.

Em postes cônicos, a fixação por parafuso mais comum é utilizando parafuso com bucha oco. Em postes duplo T o parafuso mais utilizado é o parafuso com expansão.

Cintas metálicas são acessórios de aço rígido que possuem o formato do poste. Quando aberta, a cinta separa-se em duas metades, para instalar envolve-se o poste com as duas peças separadas e aperta-se uma contra a outra com parafusos. Na frente da cinta, existe uma área onde pode se colocar um parafuso para fixar acessórios à cinta ou fixar uma sela, para então fixar acessórios à sela.

Fitas metálicas são fitas flexíveis utilizadas para amarrar elementos ao poste. Vendidas em rolos, necessitam de uma presilha para lacrá-la ao poste.

5.2.2 Pórticos

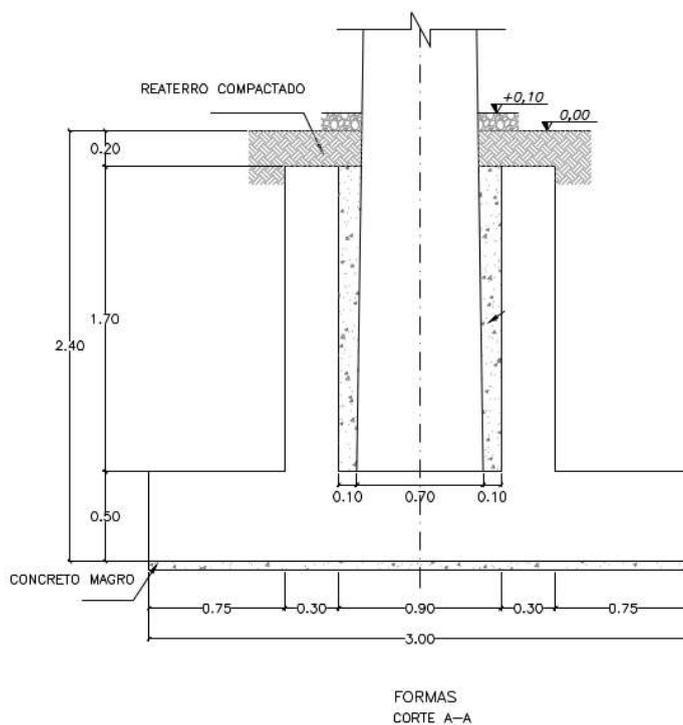
Pórticos de concreto são estruturas utilizadas principalmente para ancoragem de cabos de alta tensão. Por ter a possibilidade de garantir grandes dimensões, estas estruturas podem estabelecer distâncias seguras entre cabos de fases diferentes e entre cabos e solo e demais elementos da subestação.

São constituídos por dois elementos fundamentais: pilares e vigas. Pilares são os elementos verticais da estrutura, engastados diretamente ao solo através da fundação e vigas são elementos horizontais, engastadas ao solo através dos pilares.

No pilar usualmente fica ancorado, no topo, o cabo de cobertura da subestação e ao longo do seu corpo podem ser fixados a descida do cabo de aterramento dos elementos instalados na estrutura e acessórios variados, como luminárias, sensores de presença, isoladores, tomadas, etc. As vigas podem ser usadas para, além da ancoragem dos cabos da rede aérea, apoiar equipamentos, comumente pára-raios e chaves seccionadoras.

O tipo de fundação mais utilizado para pórticos são as sapatas e o espaço entre nicho e pilar dos pórticos de ancoragem devem ser preenchidos com graute da mesma resistência característica do concreto à compressão (f_{ck}) da fundação. Na figura 22 é possível contemplar o desenho estrutural de uma sapata para pórtico de concreto.

Figura 22 - Fundação tipo sapata para pórtico de concreto



Fonte: Acervo Gama Engenharia.

Para promover a fixação de elementos e acessórios em um pórtico é possível em projeto estabelecer pontos para futuros parafusos tirantes, além da possibilidade de utilizar parafusos com buchas de expansão.

Quando utilizado em um módulo de alta tensão, a estrutura recebe o nome de pórtico de ancoragem. Quando utilizada em barramentos, é chamada de pórtico de barramento.

5.2.3 Cavaletes

Estruturas semelhantes ao pórtico, porém com dimensões menores. Usualmente utilizado para chaves seccionadoras, nesse caso a estrutura é composta por quatro pilares e duas vigas. A figura 9 apresenta uma seccionadora dupla abertura lateral instalada em um cavalete de concreto.

5.2.4 Capitel

Capitel é o nome dado à estrutura instalada no topo de um pilar com a finalidade de servir como apoio do equipamento instalado.

Usada principalmente para instalação de transformadores de instrumento e pára-raios, como pode ser observado na figura 23, que apresenta um transformador de potencial instalado em um conjunto pilar-capitel.

Figura 23 - Transformador de Potencial 69 kV em capitel de concreto



Fonte: Acervo Gama Engenharia.

5.3 Estruturas Metálicas

Para estruturas metálicas utiliza-se ligas de aço-carbono por sua resistência e praticidade. A norma NEMA SG 6-2000: *Power Switching Equipment* orienta o uso de ligas que tenham no mínimo as características físicas que as normas ASTM classificam como A36/ A36M. O quadro 4 apresenta as características físicas e mecânicas desta liga de aço-carbono.

Quadro 4 - Características Mecânicas do aço ASTM A36

AÇO ASTM A36/A36M	
Limite Escoamento	
Mínimo (MPa)	250

Limite de Resistência (MPa)	400 a 550
Alongamento mínimo L0 = 200 mm (%)	20
Massa específica do aço (kg/m ³)	7850

Fonte: adaptado da norma ASTM A36/A36M-19.

A norma ABNT NBR 7007:2016: Aços-carbono e aços microligados para barras e perfis laminados a quente para uso estrutural - Requisitos, estabelece os requisitos para as barras e os perfis estruturais laminados a quente e para perfis formados a frio, tem-se a norma ABNT NBR 14762:2010 Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio.

Para serem instaladas em uma subestação, estas peças precisam antes passar por um tratamento de galvanização, para proteger o material da corrosão, garantindo mais durabilidade e resistência às peças.

A construção de uma estrutura metálica pode assumir duas linhas de montagem: estruturas perfiladas e treliçadas. As perfiladas são aquelas compostas por apenas um elemento principal, enquanto treliças são estruturas composta por várias peças pequenas unidas em nós, formando triângulos.

As definições e critérios para projetos de estruturas metálicas são contempladas pela norma ABNT NBR 8800:2008: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. A figura 24 mostra um cavalete de perfilado, a figura 25 mostra um cavalete treliçado, ambos da mesma subestação - SE Cruz Alta 1, em Cruz Alta - RS.

Figura 24 - Seccionadora 138 kV em estrutura perfilada



Fonte: Acervo Gama Engenharia.

Figura 25 - Seccionadora 69 kV em estrutura treliçada



Fonte: Acervo Gama Engenharia.

5.3.1 Elementos Estruturais Metálicos

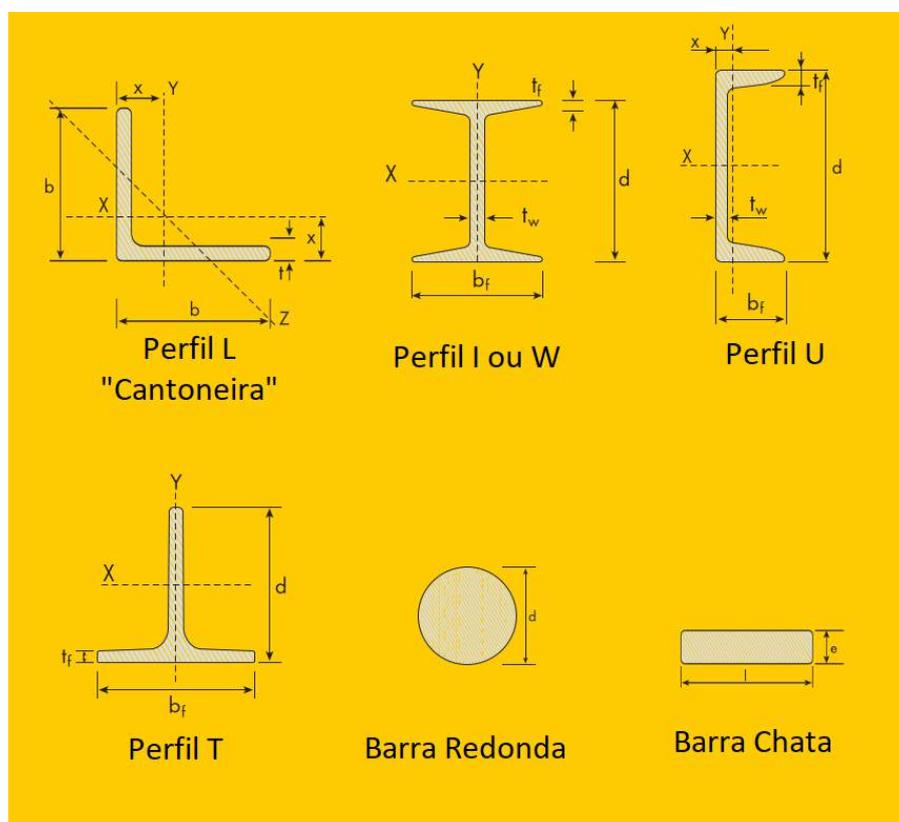
Os elementos estruturais metálicos recebem os mesmos nomes que seus equivalentes de concreto (pórticos, cavaletes, postes). Desta forma, esta seção limitar-se-á a discutir apenas os seus elementos fundamentais: perfis e treliças.

Não obstante, cabe ressaltar que a fixação de elementos às estruturas metálicas é relativamente mais simples que a fixação em elementos de concreto, já que as abas e chapas dos perfis metálicos são usualmente mais finos que as seções de estruturas em concreto. Desta forma um simples parafuso com porcas e arruelas basta para fixar acessórios com satisfatória adesão.

5.3.1.1 Perfis

A figura 26 mostra os perfis metálicos com maior disponibilidade no mercado. Eles podem ser obtidos de duas maneiras: ao serem conformados pelo processo de laminação, caracterizado por uso de rolos ou conformados pelo processo de trefilação, descrito pelo uso de uma matriz conformadora.

Figura 26 - Perfis metálicos



Fonte: Adaptação Catálogo Gerdau (2022).

5.3.1.2 Trelças

Trelças são estruturas obtidas a partir de cinco ou mais unidades triangulares constituídas de elementos retos, cujas extremidades são ligadas em pontos conhecidos como nós. Os elementos formadores das trelças mais utilizadas em subestações são os perfis “L”, como pode ser visto na figura 27.

Figura 27 - Pilar trelçado, é possível observar que ele é todo composto por peças “L” ou cantoneira



Fonte: Acervo Gama Engenharia.

6 ESTRUTURAS

Os critérios observados na etapa de projeto iniciam-se por guardar as normas apresentadas na seção anterior somadas a critérios de projetos eletromecânicos, entendendo a estrutura como um ponto de conformidade do circuito operacional da subestação ao terreno. Como exemplo, o projetista deve observar quais elementos serão contemplados pela estrutura, quais as distâncias mínimas entre fases, distâncias mínimas entre fase e terra, altura mínima de elementos eletricamente ativos em relação ao solo e critérios de segurança e facilitação para manutenção. Esta seção irá discutir essas normas bem como apontar e escrutinar o caminho para a obtenção das estruturas e como isso se aplica no projeto de estruturas.

6.1 Normas para Projeto

As normas de segurança são critérios que visam garantir condições de segurança à vida humana, aos equipamentos e circuitos da subestação. Em se tratando de estruturas, existem duas finalidades para essas padronizações: definir distanciamentos mínimos para evitar acidentes elétricos e definir características construtivas mínimas para evitar danos físicos.

A norma NEMA SG 6:2000 define os padrões para distanciamentos. Em complemento a esta norma, a Norma Regulamentadora 10 (NR-10) define raios mínimos de segurança, que distam partes vivas (energizadas eletricamente) de uma zona segura, chamada de “zona livre”. Os raios que delimitam zonas de atenção são divididos em dois: zona controlada, definida como o entorno da parte condutora energizada, não segregada, acessível, de dimensões estabelecidas de acordo com o nível de tensão, cuja aproximação só é permitida a profissionais autorizados e a zona de risco, definida como o entorno de parte condutora energizada, não segregada, acessível inclusive acidentalmente, de dimensões estabelecidas de acordo com o nível de tensão, cuja aproximação só é permitida a profissionais autorizados e com a adoção de técnicas e instrumentos apropriados de trabalho.

O quadro 5 mostra o padrão NEMA SG 6:2000 para distâncias de segurança conforme o nível de isolamento de uma subestação AIS. O quadro 6 mostra as alturas estabelecidas para segurança do trabalhador treinado, definido pela NR-10. O quadro 7 mostra os distanciamentos para circulação de veículos, também conforme NR-10.

Quadro 5 - Tabela SG 6:2000 para distanciamentos em subestação

Nº	Tensão Nominal máxima (kV eficaz)	Tensão Suportável Nominal		Espaçamento Mínimo (m) (metal-metal) entre condutores energizados suportados rigidamente	Espaçamento Fase-Terra (m)		Espaçamento recomendados entre fases centro a centro (m)			Espaçamento Mínimo entre condutores aéreos e o solo para segurança do pessoal (m)	Tensão suportável nominal a impulso de manobra (kV de pico)
		Impulso Atmosférico (onda 1,2x50 µs (kV de pico))	A 60 Hz Sob chuva 10s (kV eficaz)		Recomendado	Mínimo	Chaves com chifres e fuzíveis tipo expulsão	Chaves seccionadoras de abertura horizontal	Sup. de barramento Secc. Abert. Vert. Cond. Rígidos Fuzíveis tipo não expulsão		
1	8,25	95	30	0,18	0,19	0,15	0,91	0,76	0,46	2,44	-
2	15,5	110	45	0,3	0,25	0,18	0,91	0,76	0,61	2,74	-
3	25,8	150	60	0,38	0,3	0,25	1,22	0,91	0,76	3,05	-
4	38	200	80	0,46	0,38	0,33	1,52	1,22	0,91	3,05	-
5	48,3	250	100	0,53	0,46	0,43	1,83	1,52	1,22	3,05	-
6	72,5	350	145	0,79	0,74	0,64	2,13	1,83	1,52	3,35	-
7	121	550	230	1,35	1,19	1,07	3,05	2,74	2,13	3,66	-
8	145	650	275	1,6	1,33	1,27	3,66	3,35	2,44	3,96	-
9	169	750	315	1,83	1,56	1,47	4,27	3,96	2,74	4,27	-
10	242	900	385	2,26	1,93	1,8	4,88	4,88	3,35	4,57	-
11	242	1050	455	2,67	2,3	2,11	5,49	5,49	3,96	4,88	-
12	362	1050	455	3,02	2,69	2,13	6,1	-	4,88	5,49	650
13	362	1300	525	-	-	2,64	-	-	-	-	759
14	550	1550	620	-	-	3,15	-	-	-	-	808
15	550	1800	710	-	-	3,66	-	-	7,62	-	898
16	800	2050	830	-	-	4,22	-	-	-	-	982

Fonte: Adaptado norma NEMA SG 6:200.

Quadro 6 - Espaçamentos conforme SG 6:2000 aplicado aos padrões NR-10 para proteção da vida humana em áreas onde há circulação de pedestres (referência de altura, 2,25 metros: altura média de uma pessoa com braços levantados)

Tensão (kV)	Altura (m)	Zona Controlada (m)	Zona de Risco (m)
145	4,05	16	6
72,5	3,4	9,5	4,5
27 a 48,3	3,23	7,8	2,8
15	3,14	6,9	1,9

Fonte: Adaptado norma NR-10.

Quadro 7 - Espaçamentos conforme SG 6:2000 aplicado aos padrões NR-10 para proteção da vida humana em áreas onde há circulação de veículos

Tensão (kV)	Altura (m)	Zona Controlada (m)	Zona de Risco (m)
145	4,44	16	6
72,5	3,79	9,5	4,5
27 a 48,3	3,62	7,8	2,8
15	3,53	6,9	1,9

Fonte: Adaptado norma NR-10.

Para definir as dimensões e robustez dos elementos estruturais deve-se calcular os esforços que agem sobre a estrutura. Estes esforços são resumidos em tração dos cabos ancorados, peso próprio da estrutura e dos equipamentos, elementos fixados e ação do vento.

Para o cálculo das trações dos cabos ancorados, é necessário considerar:

1. Aspectos físicos dos condutores:
 - a. O peso e comprimento dos cabos;
 - b. O número de cabos ancorados;
 - c. O peso das cadeias de ancoragem;
 - d. A altura da ancoragem dos cabos;
 - e. A flecha máxima aceitável para o cabo.
2. Aspectos externos aos condutores:

- a. Altura do terreno em relação ao nível do mar;
- b. Temperatura média do ambiente;
- c. Velocidade média dos ventos;
- d. Índice ceráunico do local e densidade média de descargas;
- e. Incidência média de luz solar no condutor.

Por ser um cálculo complexo, com muitas variáveis que se diferenciam caso a caso, é comum as concessionárias adotarem trações mínimas tabeladas, como os valores de tração, em quilograma-força (kgf), apresentados no quadro 8.

Quadro 8 - Carregamentos Longitudinais Mínimos por fase ou cabo para-raios para fins de dimensionamento da estrutura

Tipos de cabos	Inclinação dos cabos	Tensões de Operação		
		230 kV	138 kV	69 kV
Ancoragem de Linhas de Transmissão - Condutor	0°	1500 kgf	1200 kgf	800 kgf
	15°	1125 kgf	900 kgf	600 kgf
Ancoragem de Linhas de Transmissão - Para-raios	0°	500 kgf	500 kgf	350 kgf
	15°	375 kgf	375 kgf	260 kgf
Barramentos Internos da Subestação - Condutores	0°	1000 kgf	800 kgf	550 kgf
Barramentos Internos da Subestação - Para-raios	0°	300 kgf	300 kgf	200 kgf

Fonte: Adaptado CPFL Transmissão (2022)

Além da tração produzida pelos cabos ancorados às estruturas, soma-se o peso dos equipamentos que serão instalados ao elemento e a soma do peso da própria estrutura. A figura 28 mostra a placa de uma seccionadora dupla abertura lateral contendo a informação do peso do equipamento. A figura 29 mostra os valores de catálogo para perfis U da Gerdau, como exemplo de uma das peças que podem ser usadas para montagem de uma estrutura metálica. O catálogo oferece o

peso nominal em quilos por metro de peça. Somando isso à galvanização e o peso de todas as outras peças empregadas, se obtém o peso total da estrutura metálica.

Figura 28 - Placa de uma seccionadora 138 kV, informação de peso gravada após fabricação

C.N.P.J. 43.488.105/0005-78 TATUI - SP - BRASIL

HUBBELL SECCIONADOR - MONOPOLAR TRIPOLAR **GTMS**
 SEM LÂMINA TERRA COM LÂMINA TERRA

Tipo: GTMS-DAS Fabr. Mês/Ano: (*) N° de Série: (*)

Norma/Ano: NBR-IEC 62271-102/2006 Man. Instr.: GTMS-031

Un: 138 kV In: 1250 A Encom./ Ped.: (*)
 U máx.: 145 kV Ilt: 31,5 kA/s N° Pat./ Tomb.: (**)
 Ut: 650 kV Id: 81,9 kA Código: (**)
 Uf: 275 kV M-polo: 310 kg (***)
 f: 60 Hz M-total: 1110 kg

Fonte: Acervo Gama Engenharia.

Figura 29 - Catálogo para dimensões e pesos de perfis “U”

PERFIL U GERDAU														
Bitola	Peso	ALMA		ABA		area	EIXO X			EIXO Y				
		Nominal	d	t _w	b _f		t _f	l	W	r	l	W	r	x
poL	kg/m	mm	mm	mm	mm	mm	cm ²	cm ⁴	cm ³	cm	cm ⁴	cm ³	cm	cm
3"	6.10	76.20	4.32	35.81	6.93	7.78	68.90	18.10	2.98	8.20	3.32	1.03	1.11	
	7.44		6.55	38.05	6.93	9.48	77.20	20.30	2.85	10.30	3.82	1.04	1.11	
4"	8.04	101.60	4.67	40.23	7.52	10.10	159.50	31.40	3.97	13.10	4.61	1.14	1.16	
	9.30		6.27	41.83	7.52	11.90	174.40	34.30	3.84	15.50	5.10	1.14	1.15	
6"	12.20	152.40	5.08	48.77	8.71	15.50	546.00	71.70	5.94	28.80	8.16	1.36	1.30	
	15.60		7.98	51.66	8.71	19.90	632.00	82.90	5.63	36.00	9.24	1.34	1.27	
8"	17.10	203.20	5.59	57.40	9.50	21.68	1344.30	132.70	7.87	54.10	12.94	1.42	1.47	
	20.50		7.70	59.51	9.50	25.93	1490.00	147.50	7.59	62.40	14.09	1.42	1.42	
10"	22.77	254.00	6.10	66.04	11.10	29.00	2800.00	221.00	9.84	95.00	19.00	1.81	1.61	
	29.76		9.63	69.57	11.10	37.90	3290.00	259.00	9.31	117.00	21.60	1.76	1.54	

Fonte: Adaptação Catálogo Gerdau (2022).

Conforme a norma ABNT NBR 5422:1985: Projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica, as estruturas devem ser dimensionadas para sustentar, além dos esforços mencionados, a tração proveniente da ação do vento e o peso de dois homens suspensos (para isso, no mínimo 200 kg).

Outra norma que deve ser observada é a ABNT NBR 6120:2019: Ações Para o Cálculo de estruturas de edificações, que estabelece as ações mínimas a serem consideradas no projeto de estruturas de edificações em geral.

6.2 Materiais

Essa seção trata da escolha de estruturas e observar as opções do mercado para fornecimento de estruturas no estado do Rio Grande do Sul.

O processo para definição do material da estrutura se inicia a partir do projeto básico, etapa em que são definidos:

- Tipo da subestação quanto a instalação;
 - Se a subestação for abrigada ou ao tempo. Isso ditará a exposição da estrutura à intempéries;
- Espaço disponível para obra;
 - Se a subestação contar com pouco espaço, necessitará de estruturas que sejam mais dinâmicas e com maior facilidade para fixação de outros elementos da SE. Esta característica é comum a metálicas e concretos moldados *in loco*;
- Escopo da obra;
 - Se a subestação for uma ampliação ou mesmo *retrofit*, é necessário analisar o cenário atual da SE, por exemplo, para ampliar um pórtico de ancoragem, o mais indicado é continuar usando o mesmo material e modelo de construção, para que os módulos fiquem simétricos, já pensando em futuras ampliações;
- Tensões nominais da SE e Isolamento;
 - Esta definição ditará as distâncias entre os elementos da subestação. Conforme visto nas seções anteriores, quanto maior a tensão nominal, maior a distância para isolamento. Isto também se estende ao meio isolante empregado na SE: subestações GIS permitem uma distância menor entre os elementos, logo as dimensões das estruturas (desconsiderando os esforços) podem ser menores.
- Cabos, equipamentos e demais materiais;
 - A partir do projeto básico já é possível visualizar os condutores e equipamentos que deverão ser utilizados, logo já se pode ter uma noção dos esforços que agirão sob as estruturas (apesar dos elementos definitivos só serem definidos no decorrer do projeto executivo);
- Análise topográfica do terreno e geolocalização da SE.

- Análise de critérios como desníveis e natureza do solo (se argiloso, rochoso etc.), por exemplo, se o solo possuir baixa capacidade para, é recomendado utilizar uma fundação tipo radier.

A partir destes critérios, é necessário também planejar a etapa de execução de obra, estudando o mercado de fornecimento de estruturas bem como a mão de obra que será empregada. As seções a seguir discutirão estes processos, aplicado a cada material.

6.2.1 Estruturas de Concreto

6.2.1.1 Estruturas de concreto pré moldado

Para peças em concreto pré-moldado, as dimensões necessárias e os esforços exigidos na estrutura (conforme as normas discutidas nas seções anteriores e conforme a finalidade do elemento) são enviados para a fornecedora, que por sua vez faz os cálculos de resistências do concreto que será empregado e a partir desta informação realiza a memória de cálculo que determina a disposição das armaduras. Desta forma, obtém-se a viabilidade, o peso e o preço de custo da peça. Destacam-se neste setor, atuando no Rio Grande do Sul as empresas Indaial, Berlim, Certel e Romagnolli. Dependendo da ordem de grandeza de valor, essas empresas geralmente se responsabilizam pelo frete das peças, porém raramente fazem a descarga e instalação da estrutura sob fundação, ficando tal mão de obra a cargo da contratante.

6.2.1.2 Estruturas de concreto moldado *in loco*

Nesta modalidade de construção, cabe à projetista o desenvolvimento das memórias de cálculos que determinarão as dimensões da estrutura e disposição das armaduras na mesma, fica então sob responsabilidade da empreiteira executora da obra a compra dos materiais (cimento, areia, brita etc,) e sua mistura para obtenção de concreto, bem como a construção e colocação do concreto nas matrizes que conformarão as estruturas já sob a fundação.

É possível também a compra do concreto ponto, levado à obra através de caminhões betoneiras.

6.2.2 Estruturas Metálicas

Para obtenção de peças metálicas, o estado do Rio Grande do Sul dispõe de dois grandes fornecedores do cenário mundial: a Gerdau e a ArcelorMittal. Estas duas empresas, porém, trabalham apenas para pedidos de larga escala, além de não tratarem os perfis, ficando a cargo do comprador cortes, furações e galvanização.

Quando se trata de obras de menor porte, cenário típico de obras de subestações, é mais vantajoso procurar o serviço de uma distribuidora, que faz o serviço de preparação da peça conforme projeto do cliente. No Rio Grande do Sul, figuram entre as empresas distribuidoras que fazem esse serviço: RNJ, Ferros Bonamigo, Aços Riograndenses e GECAR Indústrias Metalúrgicas.

Depois de obtidas as peças, elas são submetidas ao processo de galvanização a fogo. A precificação neste processo é feita da seguinte maneira: pesa-se a peça antes do processo e depois do processo. O preço será baseado na diferença de peso. Quando em obra a peça acaba por ser submetida a um novo corte ou furo, deve ser realizado nela um novo processo de galvanização, podendo neste caso específico ser feita a frio, usando o produto CRZ (spray ou tinta). A galvanização a frio não é tão eficaz quanto a de fogo, mas em pequenas áreas é suficientemente satisfatória. Algumas empresas que realizam este serviço (de galvanização a fogo) no Rio Grande do Sul são: Galvânica Beretta, JJD Revestimentos Técnicos, SIMECAN e a Galvanizadora Bento Sul.

As peças vendidas pelas fornecedoras são precificadas por toneladas, enquanto os produtos oferecidos pelas distribuidoras são vendidos por quilo. Na data referente à elaboração deste trabalho, o preço do quilo das peças nas distribuidoras variava em torno de 45 reais. Já o preço médio da galvanização a fogo ficava em torno de 4 reais por quilo.

6.3 Execução de Projeto

Com os esforços e dimensões calculados a partir das normas e das necessidades do projeto (elementos que serão contemplados pela estrutura) e definição do material (a partir das análises da seção anterior), dá-se o início do projeto eletromecânico das estruturas.

Como exemplo, toma-se o projeto de um cavalete para seccionadora dupla abertura lateral de 69 kV, sem a lâmina de terra, de 495 quilos, distância entre fases de 1,75 metros e distância entre os isoladores (das mesmas fases) de 1,75 metros. Os cavaletes foram projetados para garantir as mesmas distâncias e receber os mesmos esforços garantindo as mesmas requisições nas peças. Os desenhos foram produzidos através do *software AutoCAD* e os modelos de construção foram baseados nos mais utilizados pelas concessionárias, exceto a estrutura perfilada, que por não ser um padrão muito usual nas concessionárias do Rio Grande do Sul, foi feita com base no desenho de um modelo internacional, encontrado no *site da Insultec* (2022), apresentado na figura 30.

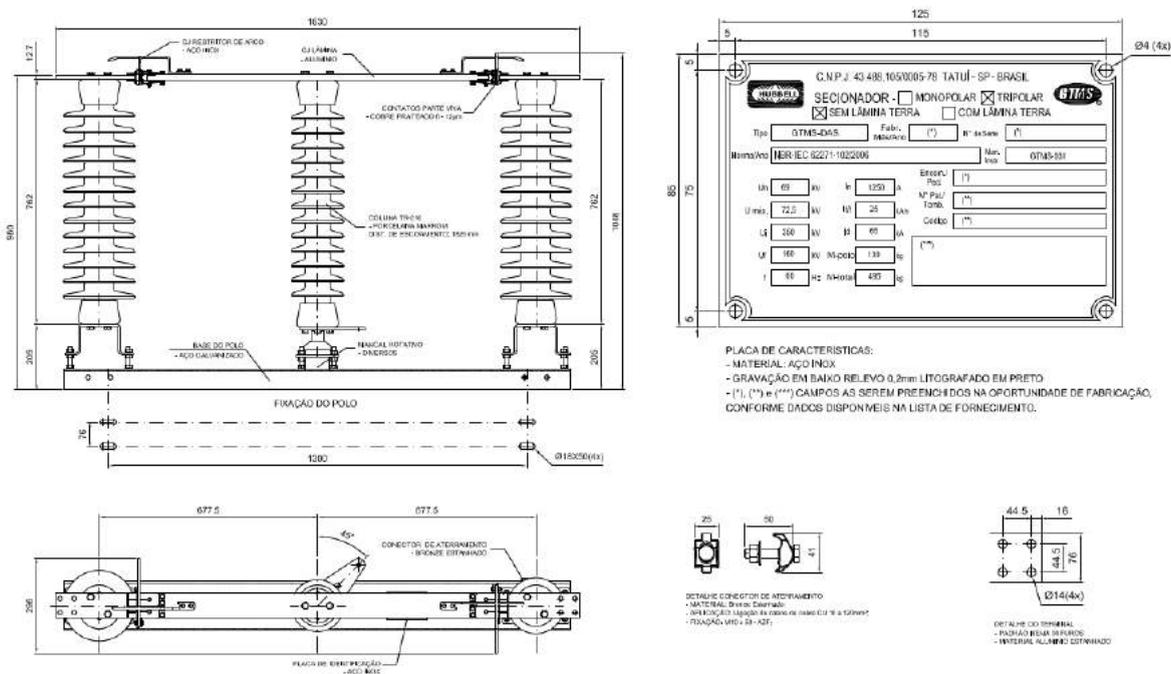
Figura 30 - Seccionadora em estrutura perfilada



Fonte: Insultec (2022).

A figura 31 mostra o desenho de um dos polos do equipamento, bem como a sua placa constando o peso total.

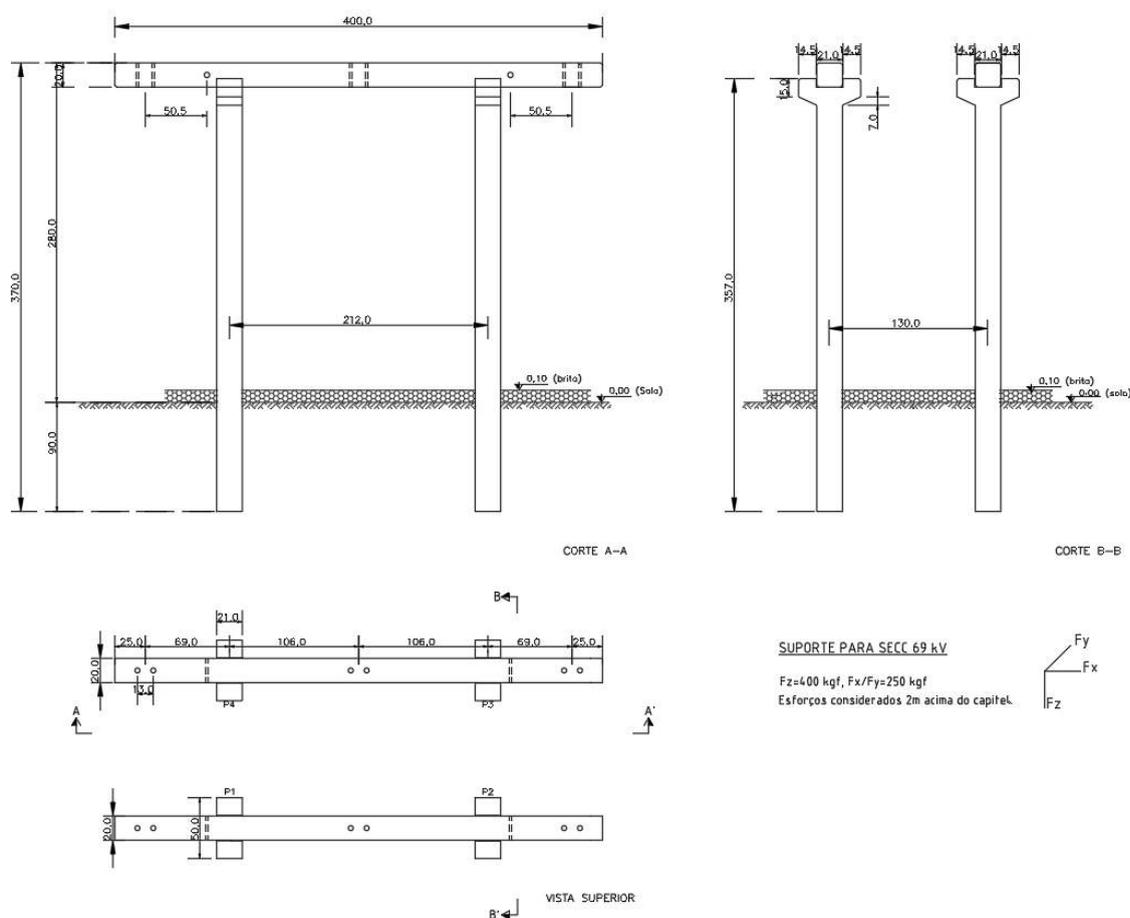
Figura 31 - Seccionadora DAL 69 kV sem lâmina de terra. Modelo HUBBELL



Fonte: Hubbell.

A figura 32 mostra o projeto em cavalete de concreto, desenhado em AutoCAD.

Figura 32 - Projeto de cavalete de concreto



Fonte: O autor (2022).

O quadro 9 mostra as peças que foram utilizadas para a construção do cavalete, bem como a sua massa.

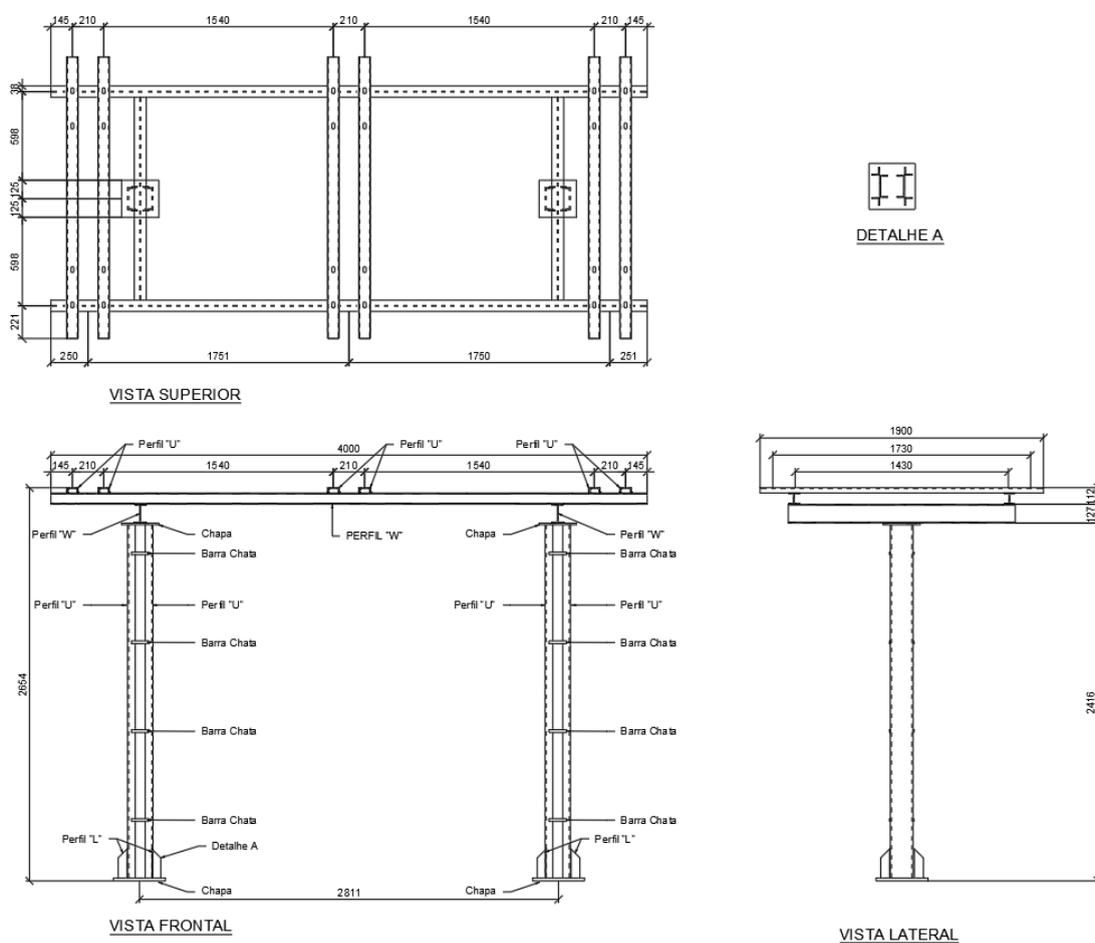
Quadro 9 - Materiais utilizados no projeto do cavalete em concreto

Peças	Quantidade	Massa Unitária (kg)	Massa Total (kg)
Pilar	4	430	1720
Viga	2	900	1800
PESO TOTAL DO CONJUNTO			3520

Fonte: O autor (2022).

A figura 33 apresenta o cavalete perfilado, em aço ASTM A36.

Figura 33 - Projeto de cavalete metálico perfilado



Fonte: O autor (2022).

O quadro 10 mostra as peças que foram utilizadas para a construção do cavalete metálico perfilado, bem como a sua massa, considerando a galvanização, e preço.

Quadro 10 - Materiais utilizados no projeto do cavalete metálico perfilado

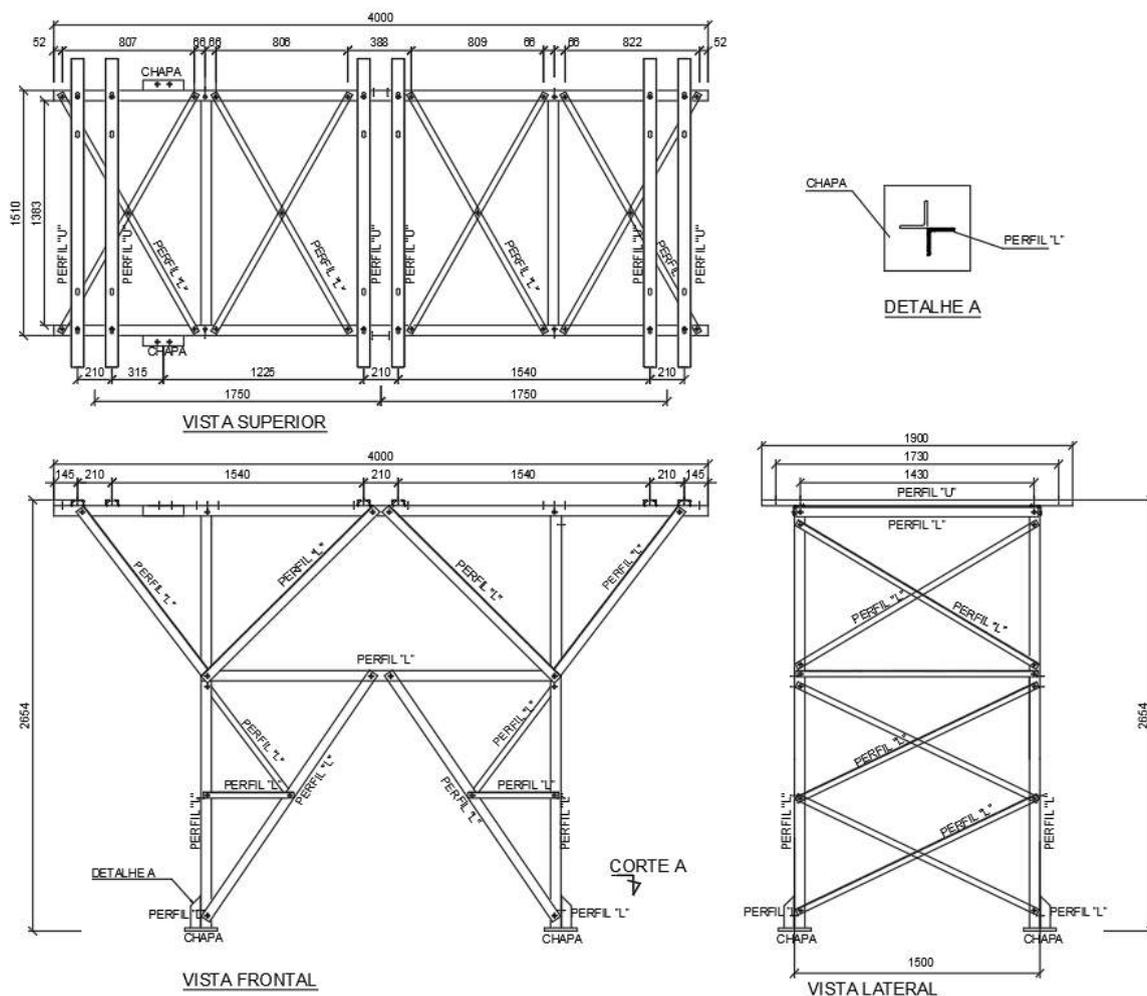
Peças	Quantidade	Massa (kg)
Perfil "L"	8	7,6
Perfil "U"	10	234,58
Perfil "W"	4	132,16
Chapa	4	31,64
Barra Chata	16	1,52

MASSA TOTAL DAS PEÇAS	407,5
MASSA DA GALVANIZAÇÃO (3% das peças)	12,22
MASSA TOTAL DO CONJUNTO	419,72

Fonte: O autor (2022).

A figura 34 apresenta o cavalete metálico treliçado, em peças de aço ASTM A36.

Figura 34 - Projeto de cavalete metálico treliçado.



Fonte: O autor (2022).

O quadro 11 mostra as peças que foram utilizadas para a construção do cavalete metálico, bem como a sua massa, considerando a galvanização.

Quadro 11 - Materiais utilizados no cavalete metálico treliçado

Peças	Quantidade	Massa (kg)
Perfil "L"	58	358,24
Perfil "U"	6	69,54
Chapa	4	3,08
MASSA TOTAL DAS PEÇAS		430,86
MASSA DA GALVANIZAÇÃO (3% das peças)		12,93
MASSA TOTAL DO CONJUNTO		443,79

Fonte: O autor (2022).

As informações da massa por peça foram obtidas através do catálogo da Gerdau.

O quadro 12 lança uma comparação entre as massas totais das estruturas, indicando que as estruturas feitas com a liga de aço-carbono ASTM A36 possuem uma massa aproximadamente 8 vezes menor do que a feita de concreto.

Quadro 12 - Comparação entre a massas das estruturas projetadas

ESTRUTURA	MASSA (kg)
CONCRETO PRÉ-MOLDADO	3520
METÁLICA PERFILADA	419,72
METÁLICA TRELIÇADA	443,79

Fonte: O autor (2022).

7 ESTUDO DE CASO

Este capítulo analisou os elementos utilizados pelos projetistas para a escolha das estruturas empregadas, aplicando os critérios abordados no decorrer deste trabalho.

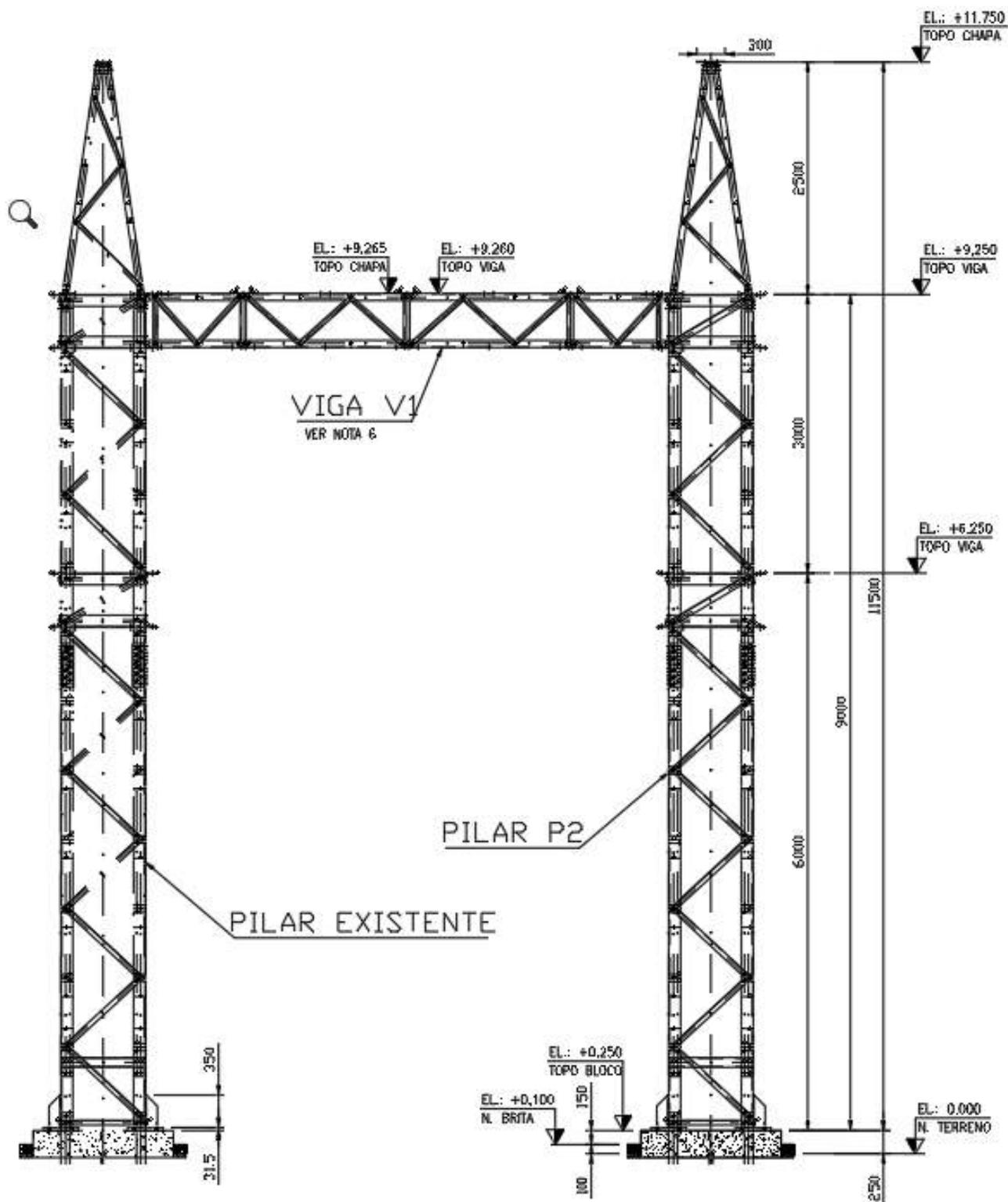
7.1 SE Alegrete 4

A subestação SE ALEGRETE 4, com projeto da empresa Gama Engenharia e execução da empresa EMAN Engenharia constitui um ótimo quadro para análise do uso de estruturas, pois possui ambos os materiais em sua constituição. Essa seção apresenta essa obra como estudo de caso.

7.1.1 Escopo da obra

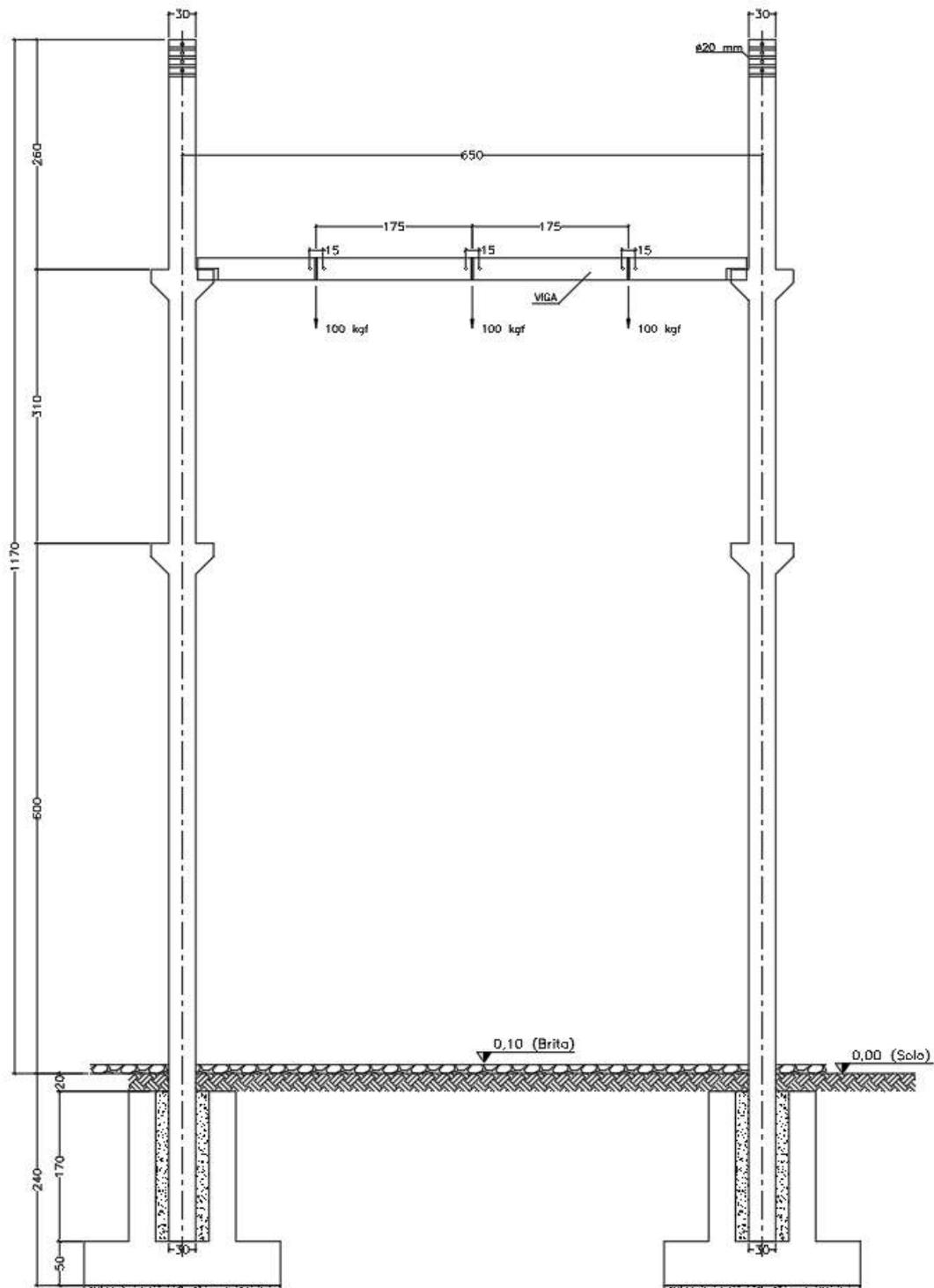
Substituição de transformador de força existente, inclusão de transformador para interligação de barras 23 kV com 13,8 kV, ampliação de barramentos AT e MT, substituição de equipamentos de manobra, proteção e controle, infraestrutura para transformador reserva. A planta de disposição da SE no terreno pode ser contemplada na figura 35, com destaque para a área de ampliação, região destacada em cinza na imagem.

Figura 36 - Pórtico metálico de Alegrete 4



Fonte: Acervo Gama Engenharia.

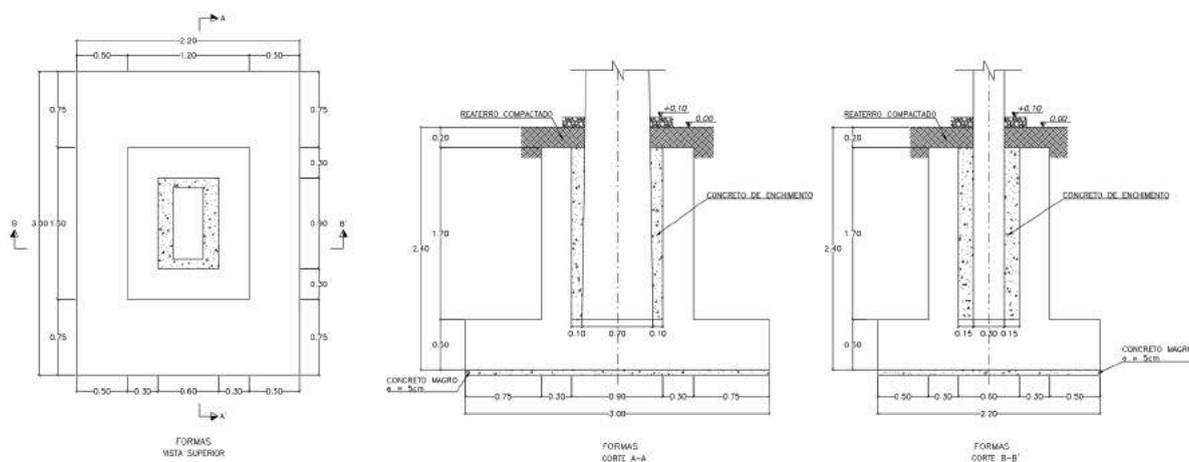
Figura 37 - Pórtico de concreto de Alegrete 4



Fonte: Acervo Gama Engenharia.

A figura 38 apresenta a fundação sapata utilizada no pórtico de concreto.

Figura 38 - Fundação sapata para pórtico de concreto



Fonte: Acervo Gama Engenharia.

O quadro 13 apresenta a lista de ferragens utilizadas na armadura da fundação. O quadro 14 apresenta a quantidade de material utilizado em uma sapata. O quadro 15 apresenta as características do concreto utilizado na obra.

Quadro 13 - Ferragens para fundação de concreto

LISTA DE FERROS (1 FUNDAÇÃO)							
No.	QUANT.	COMP. UNIT. (cm)	COMPRIMENTO (m)				
			DIÂMETROS (mm)				
			16	12,5	10	8	6,3
1	16	473			75,68		
2	40	284				113,60	
3	40	344				137,60	
4	14	321		44,94			
5	20	241		48,20			
COMP.TOTAL (CA-50)				93,14	75,68	251,20	
PESO P/ BITOLA (kg)				89,69	46,69	99,22	
PESO TOTAL (kg)			236				
PESO TOTAL + 10% (kg)			259				

Fonte: Acervo Gama Engenharia.

Quadro 14 - Quantidade de material utilizado para pórtico de concreto com dois pilares

QUANTIDADES PARA UM CONJUNTO			
TIPO	VOLUMES (m ³)		
	ESCAVAÇÃO	CONCRETO ESTRUTURAL	CONCRETO MAGRO
SAPATA	15,18	5,95	0,35

Fonte: Acervo Gama Engenharia.

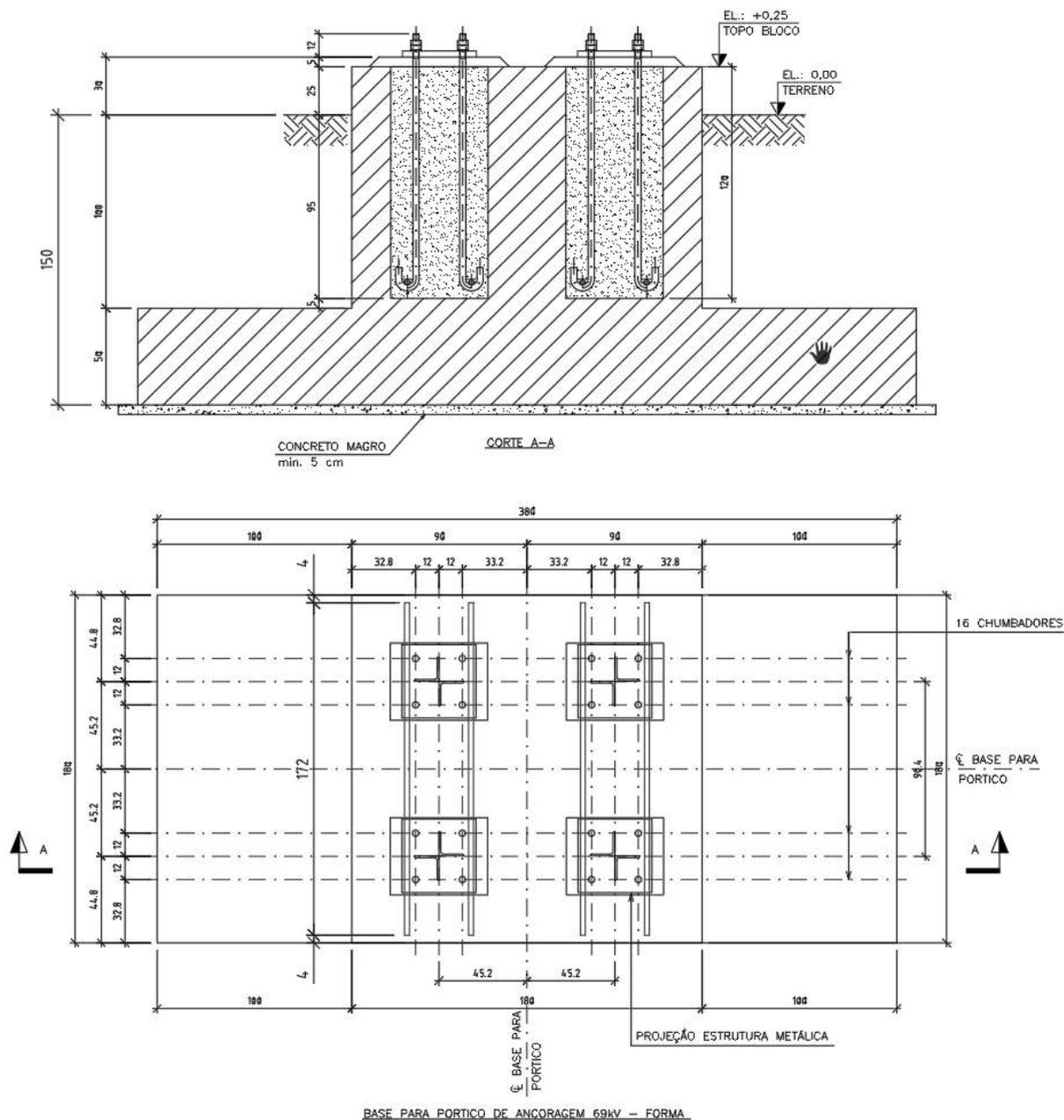
Quadro 15 - Características do material da fundação

CARACTERÍSTICAS DO MATERIAL					
CONCRETO ESTRUTURAL (MPa)	CONSUMO MÍNIMO DE CIMENTO (kg/m ³)	RELAÇÃO ÁGUA X CIMENTO	SLUMP (cm)	AGREGADO (mm)	AÇO
30	280	≤0,55	12+–2	Brita 1 D _{máx} = 19	CA–50

Fonte: Acervo Gama Engenharia.

A figura 39 apresenta a fundação sapata utilizada para o pilar metálico.

Figura 39 - Fundação sapata para pórtico metálico



Fonte: Acervo Gama Engenharia.

O quadro 16 apresenta os ferros que foram utilizados na fundação. O quadro 17 mostra a quantidade de concreto utilizado. As características dos materiais são análogas às da fundação do pórtico de concreto, já mostrados pelo quadro 15.

Quadro 16 - Ferros utilizados na armadura da fundação

LISTA DE FERROS (1 FUNDAÇÃO)						
No.	QUANT.	COMP. UNIT. (cm)	COMPRIMENTO (m)			
			DIÂMETROS (mm)			
			25	16	12,5	6,3
1	10	455			45,50	
2	10	455		45,50		
3	40	255			102,00	
4	7	700				49,00
5	21	182				38,22
6	60	197		118,20		
7	4	172	6,88			
COMP.TOTAL (CA-50)			6,88	163,70	45,50	87,22
PESO P/ BITOLA (kg)			26,51	258,32	43,82	21,37
PESO TOTAL (kg)			350,01			
PESO TOTAL + 10% (kg)			284,15			

Fonte: Acervo Gama Engenharia.

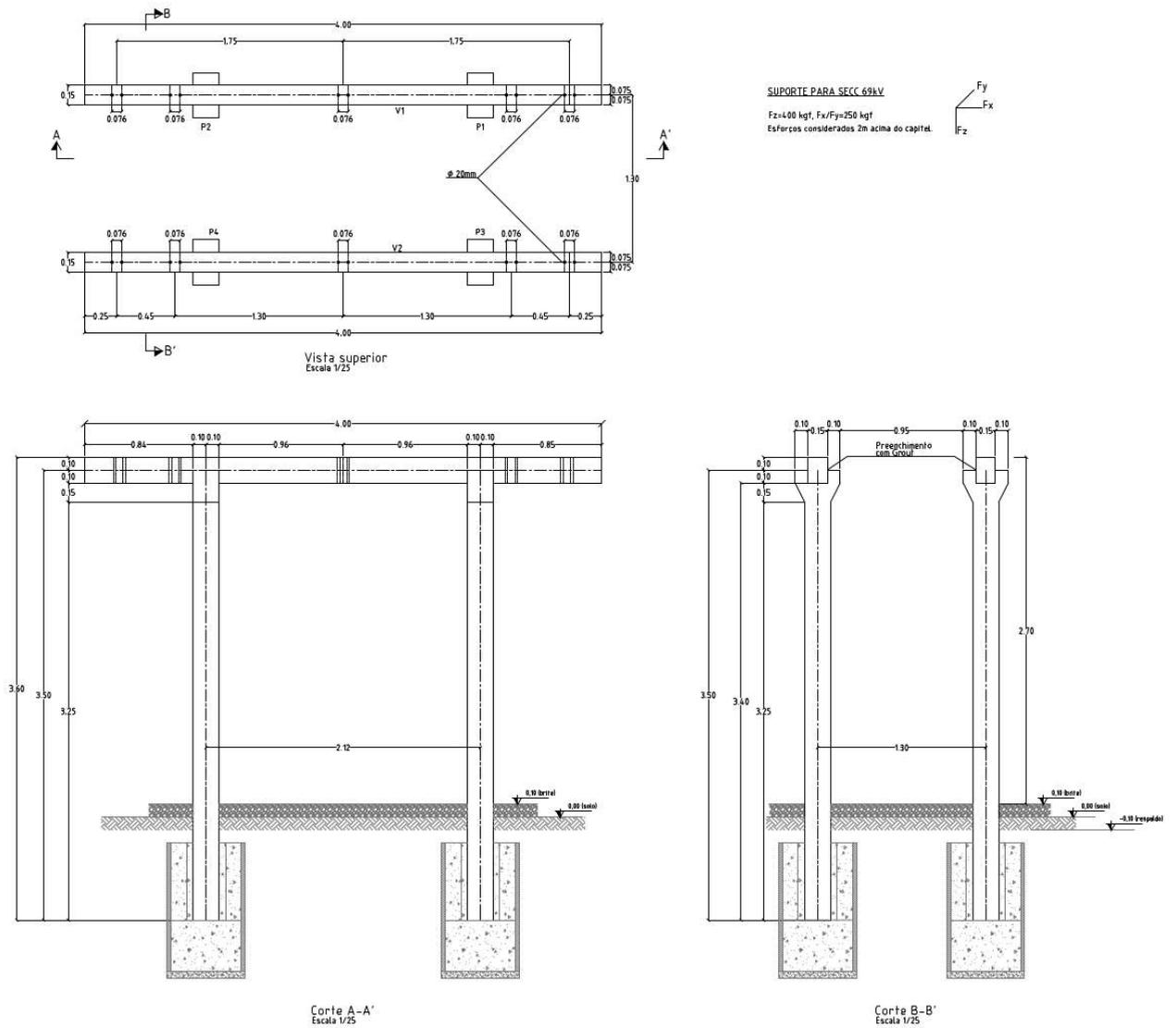
Quadro 17 - Quantidade do material utilizado

QUANTIDADES PARA UM CONJUNTO			
TIPO	VOLUMES (m ³)		
	ESCAVAÇÃO	CONCRETO ESTRUTURAL	CONCRETO MAGRO
SAPATA	32,00	7,50	0,40

Fonte: Acervo Gama Engenharia.

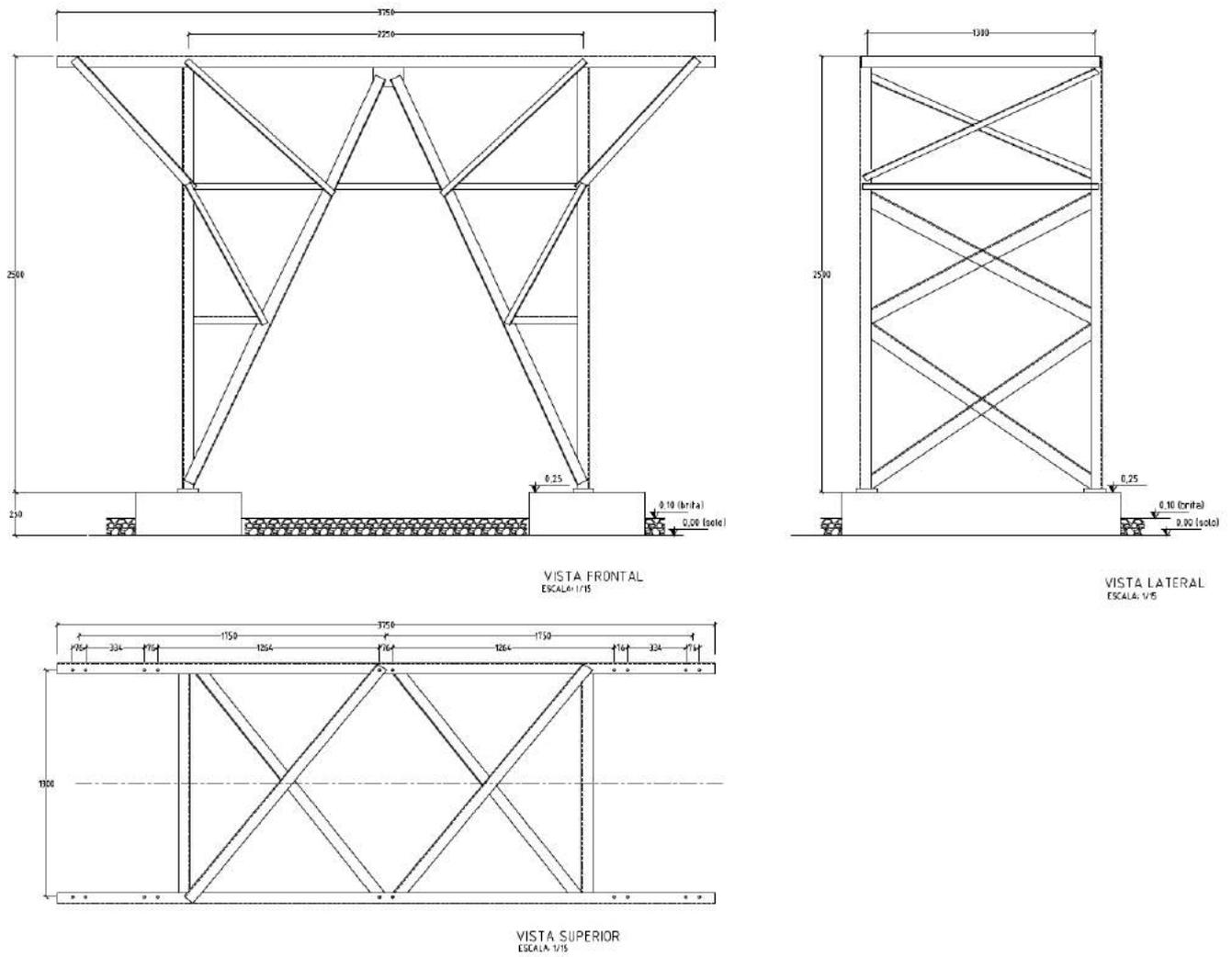
Para a instalação de chaves seccionadoras no setor de 69 kV foi utilizado cavalete de concreto pré-moldado no módulo novo. No módulo existente, foi aproveitado o cavalete metálico existente. A figura 40 mostra o projeto do cavalete de concreto. A figura 41 apresenta um desenho do cavalete metálico feito a partir das dimensões levantadas em campo.

Figura 40 - Cavalete de concreto para SE Alegrete 4



Fonte: Acervo Gama Engenharia.

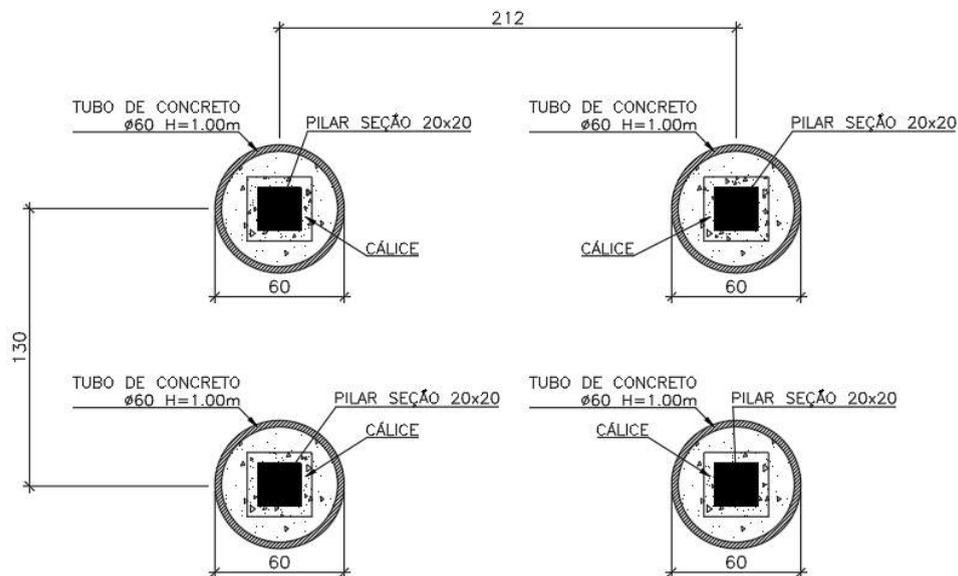
Figura 41 - Cavalete metálico da SE Alegrete 4



Fonte: Acervo Gama Engenharia.

No cavalete de concreto foram utilizadas fundações tipo tubulão nos 4 pilares, como apresenta a figura 42.

Figura 42 - Fundação para cavalete de concreto



PLANTA

Fonte: Acervo Gama Engenharia.

O quadro 18 apresenta as ferragens utilizadas para a armadura da fundação. O quadro 19 mostra a quantidade de material utilizado por tubulão.

Quadro 18 - Ferragem utilizada para a armadura do cavalete de concreto

LISTA DE FERROS (1 CONJUNTO)							
No.	QUANT.	COMP. UNIT. (cm)	COMPRIMENTO (m)				
			DIÂMETROS (mm)				
			16	12,5	10	8	6,3
1	68	91		61,88			
2	24	162					38,88
COMP.TOTAL (CA-50)				61,88			38,88
PESO P/ BITOLA (kg)				59,59			9,53
PESO TOTAL (kg)			69.12				
PESO TOTAL + 10% (kg)			76.03				

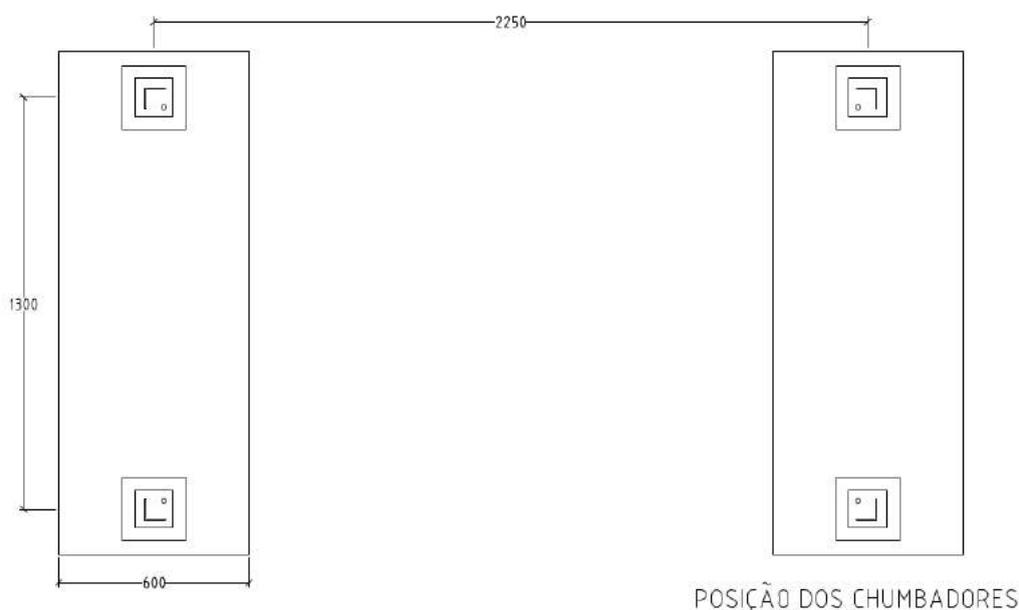
Fonte: Acervo Gama Engenharia.

Quadro 19 - Quantidades de material para fundação de cavalete de concreto

QUANTIDADES PARA UM CONJUNTO				
TIPO	VOLUMES (m ³)			MATERIAL (UNID.)
	ESCAVAÇÃO	CONCRETO ESTRUTURAL	CONCRETO MAGRO	TUBULÃO Ø60 H=100cm
TUBULÃO	6,10	4,76	0,08	4,00

Fonte: Acervo Gama Engenharia.

As dimensões da fundação sapata do cavalete metálico foram aferidas em campo e estão representadas na figura 43.

Figura 43 - Fundação para cavalete metálico

Fonte: Acervo Gama Engenharia.

Por ser uma fundação existente, a GAMA Engenharia não possui a lista de materiais que foram utilizados para essa fundação, porém com base em fundações já utilizadas em outras obras com solo semelhante, construiu-se o quadro 20, para ferragens da armadura e o quadro 21, para materiais utilizados.

Quadro 20 - Ferragens para armadura do cavalete metálico

LISTA DE FERROS (1 CONJUNTO)				
No.	QUANT.	COMP. UNIT. (cm)	COMPRIMENTO (m)	
			DIÂMETROS (mm)	
			10	6,3
1	8	644	51,52	
2	22	340		74,80
3	10	604	60,40	
COMP.TOTAL (CA-50)			111,92	74,80
PESO P/ BITOLA (kg)			69,05	18,33
PESO TOTAL (kg)			87,38	
PESO TOTAL + 10% (kg)			96,12	

Fonte: Acervo Gama Engenharia.

Quadro 21 - Quantidades de material para fundação de cavalete metálico

QUANTIDADES PARA UM CONJUNTO					
TIPO	VOLUMES (m ³)			MATERIAL (UNID.)	ÁREA (m ²)
	ESCAVAÇÃO	CONCRETO ESTRUTURAL	CONCRETO MAGRO	CHUMBADORES	FÔRMAS
SAPATA	4,80	3,70	0,20	8,00	12,40

Fonte: Acervo Gama Engenharia.

7.1.3 Obtenção das estruturas e considerações

As peças de concreto pré-moldado foram obtidas junto à empresa Certel. As peças metálicas foram obtidas com a RNJ, com galvanização da Galvânica Beretta.

A Certel cobrou pelos elementos do pórtico de concreto: R\$ 6.336,00 por viga e R\$ 11.100,00 por pilar, totalizando R\$ 23.772,00 (dois pilares, uma viga) fora o frete de Teutônia até Alegrete. A fundação para dois pilares foi feita *in loco* e foi orçada no valor de R\$ 41.650,00. O valor total do pórtico de concreto com sua fundação foi de R\$ 65.422,00.

Para o cavalete de concreto, a Certel cobrou R\$ 3.550,00 pelo conjunto de 4 pilares e duas vigas. A fundação foi feita *in loco* e foi orçada no valor de R\$ 16.660,00. O valor total do cavalete com fundação saiu no total de R\$ 20.210,00.

O pilar metálico foi composto por 135 peças, totalizando um peso de 1777 kg, com a galvanização das peças o peso foi a 1850 kg. A viga teve 113 peças com um peso total de 356 kg, com a galvanização o peso foi de 370 kg. A RNJ cobrou desta forma R\$ 96.615,00 (R\$ 45,00 o kg) e a Galvânica Beretta cobrou R\$ 348,00 para galvanizar as peças (R\$ 4,00 por kg de galvanização). É preciso ser incluído nesse orçamento o custo do transporte das peças de Porto Alegre (RNJ) até Nova Santa Rita (Galvânica Beretta) e de Nova Santa Rita até Alegrete. Antes de ser instalado no seu local definitivo, o pórtico metálico foi pré-montado (montado em um lugar reservado, sem dar aperto total nos parafusos) a fim de aferir a sua compatibilidade com o projeto, assim que foi constatado que estava exatamente como o projetado, ele foi desmontado e montado novamente, porém no seu local final de instalação. A fundação do pilar metálico foi feita *in loco* e foi orçada no valor de R\$ 26.250,00. O valor total do pórtico metálico e sua fundação foi de R\$ 123.213,00.

Para o cavalete metálico, com base no material dimensionado em campo e considerando os mesmos valores cobrados para o pórtico, estima-se como sendo R\$ 19.388,70 o valor total das peças e R\$ 51,72 o valor da galvanização, totalizando R\$ 19.440,42. Nessas mesmas condições, o valor da fundação seria R\$ 12.950,00. Se fosse optado por utilizar cavaletes metálicos semelhantes aos existentes, as peças e fundação sairiam com o preço total de R\$ 32.390,42.

O caso da SE Alegrete 4 mostra como a diferença de preços é um fator impactante na escolha da estrutura, mas cabe destacar alguns outros aspectos observados durante o projeto, como por exemplo a fixação de acessórios em estruturas metálicas é mais simples do que em estruturas de concreto, já que a galvanização a frio em furos novos de peças metálicas é uma proteção satisfatória à corrosão. Porém fazer furos novos em estruturas de concreto é um ato desencorajado por algumas concessionárias, por diminuir a vida útil da estrutura ao deixar as armaduras mais próximas de estarem expostas. Inclusive algumas como a CEMIG de Minas Gerais não costumam aceitar furação em campo em elementos de concreto.

Também tem o fato de que o aço ASTM A36 possui uma resistência elétrica consideravelmente menor que o concreto, então é possível usar menos pontos de aterramento na estrutura.

Todavia, além da diferença do preço, uma vantagem das estruturas de concreto (especialmente as pré-moldadas) é que a responsabilidade técnica da fabricação cabe à construtora contratada (no caso da SE Alegrete 4, a empresa Certel), enquanto as estruturas metálicas não possuem um serviço equivalente no Rio Grande do Sul, ficando a cargo da empreiteira a obtenção de peças e montagem e a cargo da projetista a memória de cálculo, no caso da SE Alegrete 4, respectivamente, EMAN e Gama engenharia.

Em resumo, é possível afirmar que o que motivou a escolha do pórtico e cavalete de concreto foi o preço e praticidade para obtenção do elemento, enquanto o que motivou a escolha do pórtico metálico foi a compatibilidade com o pórtico existente na subestação.

Para reforçar a análise, é interessante imaginar outros cenários, como por exemplo: se na SE Alegrete 4 fosse empregado somente estruturas metálicas. Neste caso, o preço total de compra dos pórticos e suas fundações subiria de 188.635,00 R\$ para R\$ 427.486,20. Um aumento de mais de 125% no preço final, enquanto o custo para os 3 cavaletes constantes na ampliação subiria de R\$ 60.630,00 para R\$ 97.171,26. Um aumento de 60,27%.

7.2 Comparações Entre as Estruturas

Nesta seção apresenta-se um estudo comparativo feito através dos resultados da análise do estudo de caso da subestação Alegrete 4.

O quadro 22 apresenta um comparativo entre as características físicas dos materiais analisados.

Quadro 22 - Comparação as características físicas das estruturas

ESTRUTURA	QUANTIDADE DE CONCRETO ESTRUTURAL NA FUNDAÇÃO (m³)	MASSA DAS FERRAGENS DA FUNDAÇÃO (kg)	MASSA DA ESTRUTURA (kg)
PÓRTICO DE CONCRETO	5,95	259	11900
PÓRTICO METÁLICO	7,5	284,15	2220

CAVALETE DE CONCRETO	4,76	76,03	3520
CAVALETE METÁLICO	3,7	96,12	443,79

Fonte: O autor (2022).

O quadro 23 apresenta a comparação entre os preços das estruturas.

Quadro 23 - Comparação do preço das estruturas

ESTRUTURA	PREÇO FUNDAÇÃO	PREÇO ESTRUTURA	PREÇO TOTAL
PÓRTICO DE CONCRETO	R\$ 41.650,00	R\$ 23.772,00	R\$ 65.422,00
PÓRTICO METÁLICO	R\$ 26.250,00	R\$ 96.963,00	R\$ 123.213,00
CAVALETE DE CONCRETO	RS 16.660,00	R\$ 3.550,00	R\$ 20.210,00
CAVALETE METÁLICO	R\$ 12.950,00	R\$ 19.440,42	R\$ 32.390,42

Fonte: O autor (2022).

O quadro 24 apresenta uma simulação se fosse utilizado apenas um dos materiais.

Quadro 24 - Simulações de preço para dois cenários: estruturas apenas de concreto e estruturas apenas metálicas

PREÇO REAL	R\$ 249.265,00
PREÇO APENAS CONCRETO	R\$ 164.213,00
PREÇO APENAS METÁLICO	R\$ 524.657,46

Fonte: O autor (2022).

O quadro 25 por fim mostra o caminho para a obtenção da estrutura final.

Quadro 25 - Comparativo para obtenção de estruturas no caso Alegrete 4

ESTRUTURAS METÁLICAS	ESTRUTURAS DE CONCRETO
<ul style="list-style-type: none"> ● Análise eletromecânica das estruturas; ● Definição das dimensões; ● Envio do projeto para distribuidora; <ul style="list-style-type: none"> ○ RNJ; ● Preparo das peças conforme projeto; <ul style="list-style-type: none"> ○ Cortes e furações; ● Envio das peças para galvanizadora <ul style="list-style-type: none"> ○ Galvânica Beretta; ● Galvanização de todas as peças estruturais e envio para projeto; ● Montagem primária para checar as peças conforme projeto; ● Montagem definitiva. 	<ul style="list-style-type: none"> ● Análise eletromecânica das estruturas; ● Definição das dimensões; ● Envio do projeto para fabricante; ● Elaboração de memória de cálculo; <ul style="list-style-type: none"> ○ Sob responsabilidade da fabricante; ● Envio das peças para obra; ● Montagem definitiva.

Fonte: O autor (2022).

Quanto à vida útil e necessidade de manutenção das estruturas, cabem as seguintes observações:

A norma ABNT NBR 6118:2014 - Projeto de estruturas de concreto — Procedimento, estabelece que se seguido os critérios fixados para ferragem de armaduras e recobrimento destas em concreto conforme o ambiente, a vida útil da estrutura atinge o mínimo de 50 anos, sendo esse limite dado pela corrosão da armadura. Nesse caso, para garantir esse período mínimo, a manutenção necessária seria a conservação do recobrimento definido pela norma.

A norma ABNT NBR 8800:2007 - Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios, indica que uma estrutura metálica deve ter uma vida útil mínima garantida de 50 anos, sendo o prazo limitado pela corrosão das peças. Porém, se as peças forem galvanizadas conforme a norma ABNT NBR 6323:2007 - Galvanização de produtos de aço ou ferro fundido - Especificação, esse problema seria sanado e a vida útil seria dada então pela validade da galvanização. Se garantido através de manutenção periódica a galvanização das peças, a vida útil de uma estrutura metálica não tem um prazo definido.

Em resumo, as normas citadas estabelecem que as estruturas devem ser dimensionadas considerando-se um período convencional de referência de 50 anos. O mesmo valor também é fixado na norma ABNT NBR 15575:2013 - Norma de desempenho, onde afirma-se que para alcançar a Vida Útil de Projeto (VUP) para a estrutura e seus elementos, devem ser previstas e realizadas manutenções

preventivas sistemáticas e manutenções corretivas, quando necessário, realizadas assim que o problema se manifestar, impedindo que pequenas falhas progridam.

Com o que foi discutido a respeito de durabilidade e manutenção, obtém-se o quadro 26, sendo procedimento de manutenção preventiva a realizada para antecipação de defeitos, e procedimento de manutenção corretiva a realizada posteriormente à constatação de um problema na estrutura.

Quadro 26 - Comparativo para manutenção e durabilidade das estruturas

Estrutura	Vida útil de Referência	Procedimento de Manutenção Preventiva	Procedimento de Manutenção Corretiva	Durabilidade Com Manutenção (Mínimo Esperado)
Concreto Armado	50 anos	Inspeção periódica	Recobrimento da armadura	50 anos
Metálica	50 anos	Inspeção periódica	Galvanização	Indefinido

Fonte: O autor (2022).

8 CONCLUSÃO

Com o estudo de caso conclui-se que as estruturas de concreto são preferíveis por questões de preço e mão de obra, apesar de estruturas metálicas oferecerem maior resistência, durabilidade e dinamicidade. Destaca-se que essa conclusão é válida para as condições atuais do mercado.

Para uma abrangência deste estudo, buscando torná-lo mais completo, sugere-se diversificar a experiência em estudos de caso, bem como estudar outros materiais, desde mais simples como madeira (muito utilizado em regiões de alta salinidade) até mais modernos, como estruturas de concreto com vergalhão de vidro.

REFERÊNCIAS

AÇOS NOBRES. **Tudo Sobre o Aço A36**. 2022. Disponível em: <https://acosnobre.com.br/blog/aco-a36/> Acesso em: 08 nov. 2022.

BICHELS, A. **Sistemas Elétricos de Potência: Métodos de Análise e Solução**. 22. ed. Curitiba: EDUTFPR, 2017

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 14762: **Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio**. 2010

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15575: **Norma de Desempenho**. 2013

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 5356-1: **Transformadores de Potência - Parte 1: Generalidades**. 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 5422: **Projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica**. 1985

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6118: **Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**. 2014

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6120: **Ações Para o Cálculo de estruturas de edificações**. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6122: **Projeto e execução de fundações**. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR IEC 61869-1: **Transformadores para instrumento - Parte 1: Requisitos gerais**. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR IEC 61869-2: **Transformadores para instrumento - Parte 2: Requisitos adicionais para transformadores de corrente**. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR IEC 61869-2: **Transformadores para instrumento - Parte 2: Requisitos adicionais para transformadores de corrente**. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR IEC 61869-3: **Transformadores para instrumento - Parte 3: Requisitos adicionais para transformadores de potencial indutivos**. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR IEC 62271-102: **Equipamentos de alta-tensão - Parte 102: Seccionadores e chaves de aterramento**. 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6323: **Galvanização de produtos de aço ou ferro fundido - Especificação**. 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6939: **Coordenação do isolamento - procedimento**. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7007: **Aços-carbono e aços microligados para barras e perfis laminados a quente para uso estrutural - Requisitos**. 2022.

:

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 8044: **Projeto geotécnico - Procedimento**. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 8451-2: **Postes de concreto armado e protendido para redes de distribuição e de transmissão de energia elétrica - Parte 2: Padronização de postes para redes de distribuição de energia elétrica**. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 8681: **Ações e segurança nas estruturas - Procedimento**. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 8800: **Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 9062: **Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado**. 2017.

CPFL. **ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS**. 2022. Disponível em: <https://www.cpfl.com.br/especificacoes-tecnicas> Acesso em: 08 nov. 2022.

International Electrotechnical Commission IEC 60871-1: **Shunt capacitors for a.c. power systems having a rated voltage above 1000 V - Part 1: General**. 2014.

GERDAU. **CATÁLOGO BARRAS E PERFIS: TABELA DE BOSLO**. 2022. Disponível em: <https://www2.gerdau.com.br/publicacao/catalogo-barras-e-perfis-tabela-de-bolso/> Acesso em: 08 nov. 2022.

Institute of Electrical and Electronics Engineers IEEE Std. C37.100.1 - **IEEE Standard for Common Requirements for High-Voltage Power Switchgear Rated Above 1000 V**. 2018.

INSULTEC. **SUBSTATION DISCONNECTORS**. 2022. Disponível em: <https://insulect.com/products/substation-disconnectors> Acesso em: 08 nov. 2022.

LABEGALINI, PAULO ROBERTO *et al.* **PROJETOS MECÂNICOS DAS LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO**. 2. ed. SÃO PAULO - SP - BRASIL: EDGARD BLÜCHER LTDA., 1992. 548 p. v. 1. ISBN 8521201877.

FILHO, João Mamede. **MANUAL DE EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS**. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011. 778 p. v. 1. ISBN 9788521614364.

FILHO, João Mamede. **SUBESTAÇÕES DE ALTA TENSÃO**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2021. 380 p. v. 1. ISBN 9788521637271.

MCDONALD, J. D. **Electric Power Substations Engineering**. 2. ed. [S.l.]: CRC Press, 2007

National Electrical Manufacturers Association NEMA SG 6: **Power Switching Equipment**. 2000.

ONS. Procedimentos de Rede. Submódulo 2.3: **Requisitos mínimos para subestações e seus equipamentos**. 2022. Disponível em: <http://www.ons.org.br/%2FProcedimentosDeRede%2FM%C3%B3dulo%202%2FSubm%C3%B3dulo%202.3%2FSubm%C3%B3dulo%202.3%20-%202020.06.pdf>. Acesso em: 08 nov. 2022.

ANEXOS

ANEXO 1

Tabela A.1 – Características padronizadas dos postes de concreto de seção circular (continua)

Comprimento nominal		Carga nominal	Momento fletor no plano de aplicação da C_n	Força adicional no plano de aplicação da C_n	Massa ^a aproximada	Dimensões						
Item	$L \pm 0,05$ m					Tipo	C_n daN	$M_A^{c,d}$ daN . m	F_A^e daN	A ± 5	B ± 5	
		(A) ^b	(B) ^b									
mm												
01	9,00	C-14	150	225	75	670	140	320	275	75	1 000	1 500
02			200	300	99	670						
03		C-17	300	450	149	820	170	350	305			
04			400	600	199	820						
05		C-19	600	900	298	1 000	190	370	325			
06		C-23	1 000	900	579	1 160	230	410	365			
07	10,00	C-14	150	225	78	750	140	340	290	975	1 100	1 600
08		C-17	300	450	156	910	170	370	320			
09			400	600	208	910	170	370	320			
10		C-19	600	900	312	1 090	190	390	340			
11		C-23	1 000	900	592	1 350	230	430	380			
12		C-29	1 500	900	942	1 900	290	490	440			
13	10,50	C-14	150	225	79	800	140	350	297	1 375	1 150	1 650
14		C-17	300	450	159	940	170	380	328			
15		C-19	600	900	317	1 130	190	400	347			
16		C-23	1 000	900	597	1 500	230	440	387			
17	11,00	C-14	200	300	107	870	140	360	305	1 875	1 200	1 700
18		C-17	300	450	161	1 030	170	390	335			
19			400	600	215	1 030						
20		C-19	600	900	322	1 260	190	410	355			
21		C-23	1 000	900	602	1 600	230	450	395			
22		C-29	1 500	900	952	2 100	290	510	455			

ANEXO 1 (Continuação)

Tabela A.1 (conclusão)

Comprimento nominal		Carga nominal	Momento fletor no plano de aplicação da C_n	Força adicional no plano de aplicação da C_n	Massa ^a aproximada	Dimensões						
Item	$L \pm 0,05$					Tipo	C_n	$M_A^{c,d}$	F_A^e	$A \pm 5$	$B \pm 5$	
	m		daN	daN . m	daN	kg	mm					
23	12,00	C-17	300	450	165	1 130	170	410	350	2 775	1 300	1 800
24			400	600	221	1 130						
25		C-19	600	900	331	1 440						
26		C-23	1 000	900	611	1 770						
27		C-29	1 500	900	960	2 450						
28		C-33	2 000	900	1 311	3 000						
29		C-43	3 000	900	2 011	4 150						
30	13,00	C-17	300	450	165	1 280	170	430	385	2 775	1 400	1 900
31			400	600	225	1 280						
32		C-19	600	900	330	1 680						
33		C-23	1 000	900	610	1 920						
34		C-29	1 500	900	968	2 700						
35		C-33	2 000	900	1 310	3 500						
36		C-17	400	600	230	1 450						
37	14,00	C-19	600	900	345	1 900	190	470	400	2 775	1 500	2 000
38		C-23	1 000	900	624	2 100						
39		C-29	1 500	900	974	2 950						
40		C-33	2 000	900	1 310	3 500						
41	15,00	C-19	600	900	328	2 100	190	490	415	2 775	1 600	2 100
42		C-23	1 000	900	608	2 300						
43		C-33	2 000	900	1 308	4 100						
44	18,00	C-19	600	900	325	2 500	190	550	460	2 775	1 900	2 400
45		C-23	1 000	900	605	3 300						
46		C-33	2 000	900	1 305	5 500						
47	20,00	C-23	1 000	900	603	3 700	230	630	530	2 775	2 100	2 600
		C-33	2 000	900	1 303	6 200	330	730	630			

^a As massas são aproximadas para conicidade de 20 mm/m e possuem sentido orientativo, não podendo ser requerida a sua observância, inclusive na inspeção.

^b (A) conicidade de 20 mm/m e (B) conicidade de 15 mm/m.

^c A distância do plano de aplicação de M_A ao topo do poste é de 100 mm.

^d Os valores da coluna M_A foram obtidos experimentalmente.

^e Os valores de F_A foram calculados pela expressão $F_A = (0,7 M_E - M_A)/h$, onde M_E é o momento de engastamento ($M_E = C_n \cdot hu$).

^f As cotas F e J referem-se aos furos de entrada e saída do cabo de aterramento, podendo ser utilizadas as configurações de acordo com a ABNT NBR 8451-1:2020, 5.8.3.

ANEXO 2

Tabela A.2 – Características padronizadas dos postes de concreto de seção duplo T (continua)

Comprimento nominal		Carga nominal		Momento fletor no plano de aplicação C_n a, b		Força adicional no plano de aplicação C_n c		Massa aproximada d	Dimensões										
Item	$L \pm 0,05$ m	Tipo	daN		daN.m		daN		kg	mm									
			C_n		M_A		F_A			Face A		Face B		$F \pm 20^e$	$J \pm 20^e$	$e \pm 15$	$T \pm 20$	$M \pm 15$	
			Face A	Face B	Face A	Face B	Face A	Face B		Topo	Base	Topo	Base						
			$a \pm 5$	$A \pm 5$	$b \pm 5$	$B \pm 5$	$a \pm 5$	$A \pm 5$		$b \pm 5$	$B \pm 5$								
01	9,00	D	75	150	150	225	32	75	470	120	264	100	190	75	1 000	1 500	3 025	3 000	
02			100	200	200	300	43	89	470										
03		B	150	300	300	400	64	156	750										
04			200	400	300	400	99	226	750										
05			300	600	400	600	156	339	750										
06	B-1.5	500	1 000	600	900	269	578	1 028	182	434	140	320							
07	10,00	D	75	150	150	225	34	78	550	120	280	100	200	975	1 100	1 600	3 025	3 000	
08			150	300	300	400	69	162	900										
09		B	200	400	300	400	104	232	900										
10			300	600	400	600	162	348	900										
11			B-1.5	500	1 000	600	900	278	592	1 150	182	462	140						340
12	10,50	D	75	150	150	225	35	79	600	120	288	100	205	1 475	1 150	1 650	3 025	3 000	
13			150	300	300	400	71	164	980										
14		B	300	600	400	600	164	351	980										
15			B-1.5	500	1 000	600	900	281	597	1 300	182	476	140						350
16			B-4.5	1 000	2 000	600	900	631	1 297	2 500	266	560	200						410
17	11,00	D	100	200	200	300	48	107	680	120	296	100	210	1 875	1 200	1 700	3 025	3 000	
18			150	300	300	400	72	167	1 050										
19		B	200	400	300	400	107	237	1 050										
20			300	600	400	600	167	355	1 050										
21			B-1.5	500	1 000	600	900	285	602	1 450	182	490	140				360		
22	12,00	D	100	200	200	300	50	110	780	120	312	100	220	2 775	1 300	1 800	4 525	4 500	
23			B	150	300	300	400	78	170										1 210
24		B	200	400	300	400	110	240	1 210										
25			300	600	400	600	170	361	1 210										
26			B-1.5	500	1 000	600	900	291	611	1 900	182	518	140						360
27		B-4.5	1 000	2 000	600	900	641	1 311	2 500	266	602	200	440						
28		B-6	1 500	3 000	600	900	991	2 011	3 000	308	644	230	470						
29	13,00	B	150	300	300	400	78	174	1 400	140	504	110	370	2 775	1 400	1 900	4 525	4 500	
30			200	400	300	400	113	243	1 400										
31			300	600	400	600	174	365	1 400										
32	13,50	B	300	600	400	600	175	368	1 850	140	518	110	360	2 775	1 450	1 950	6 025	6 000	
33			B-1.5	500	1 000	600	900	298	621										2 300
34		B-4.5	1 000	2 000	600	900	648	1 321	2 980	266	644	200	470						
35		B-6	1 500	3 000	600	900	998	2 021	3 800	308	686	230	500						

Tabela A.2 (continuação)

ANEXO 2 (Continuação)

Tabela A.2 (conclusão)

Comprimento nominal		Carga nominal	Momento fletor no plano de aplicação C_n , a, b		Força adicional no plano de aplicação C_n , c		Massa aproximada ^d	Dimensões										
Item	$L \pm 0,05$ m		Tipo	daN		daN.m		kg	mm									
				C_n		M_A			F_A		Face A		Face B		$F \pm 20$ ^e	$J \pm 20$ ^e	$e \pm 15$	$T \pm 20$
		Face A		Face B	Face A	Face B	Face A		Face B	Topo	Base	Topo	Base					
								$a \pm 5$	$A \pm 5$	$b \pm 5$	$B \pm 5$							
36	15,00	B	300	600	400	600	179	373	1 800	140	560	110	410	2 775	1 600	2 100	4 525	4 500
37		B-6	1 500	3 000	600	900	1 003	2 030	4 800	308	728	230	530					
38	18,00	B	300	600	400	600	184	381	2 750	140	644	110	470	2 775	1 900	2 400	4 525	4 500

^a Valores para distância do plano de aplicação de M_A ao topo do poste:
— Face A – menor inércia (cavada) – 150 mm;
— Face B – maior inércia (lisa) – 100 mm.

^b Os valores da coluna M_A foram obtidos experimentalmente.

^c Os valores de F_A foram calculados pela expressão $F_A = (0,7M_E - M_A)/h$, onde M_E é o momento de engastamento ($M_E = C_n \cdot h_u$).

^d As massas são aproximadas e possuem sentido orientativo, não podendo ser requerida a sua observância, inclusive na inspeção.

^e As cotas F e J referem-se aos furos de entrada e saída do cabo de aterramento, podendo ser utilizadas as configurações de acordo com a ABNT NBR 8451-1:2019, 5.8.3.