

## **Monografia**

### **"SISTEMAS DE PROTENSÃO – EDIFÍCIO SUSPENSO POR TIRANTES"**

Autor: Carlos Adriano Meira de Moura

Orientador: Prof. Aldo Giuntini de Magalhães

Maio/2013

CARLOS ADRIANO MEIRA DE MOURA

**"SISTEMAS DE PROTENSÃO – EDIFÍCIO SUSPENSO POR TIRANTES"**

Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Construção Civil  
da Escola de Engenharia UFMG

Ênfase: Tecnologia de protensão aplicada nas construções

Orientador: Prof. ALDO GIUNTINI DE MAGALHÃES

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2013

M929s Moura, Carlos Adriano Meira de  
Sistemas de protensão [manuscrito]: edifício suspenso por tirantes / Carlos  
Adriano Meira de Moura. -- 2013.  
112 f., enc.: il.

Orientador: Aldo Giuntini de Magalhães.

Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Construção Civil  
da Escola de Engenharia UFMG.

Anexos: f. 81-112.

Bibliografia: f. 80.

1. Construção civil. I. Magalhães, Aldo Giuntini de. II. Universidade Federal  
de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 69

A minha família pelo apoio, carinho e dedicação.

## **AGRADECIMENTOS**

Às empresas Mendes Junior Trading e Engenharia S.A., Construções e Comércio Camargo Corrêa S.A., Santa Bárbara Engenharia S.A., que constituíram o Consórcio construtor do Lote 1 da Cidade Administrativa de Minas Gerais, o qual foi responsável pela construção da Infraestrutura da Área Externa, do Auditório e do Palácio do Governo, sendo que o Edifício do Palácio serviu de base para a elaboração deste trabalho. De forma especial, agradeço à Mendes Junior, empresa onde exerço minhas atividades profissionais que proporcionou nossa participação na execução desta obra.

Ao Prof. Aldo Giuntini de Magalhães que nos orientou na elaboração deste trabalho.

À empresa Arcelor Mittal que nos convidou a participar deste curso de especialização e foi parceira do Consórcio na execução das obras da Cidade Administrativa.

À empresa Protende que foi parceira do Consórcio na execução dos serviços de protensão das obras da Cidade Administrativa

À empresas Rohr, Peri, Locquel que foram parceiras do Consórcio na execução dos serviços de cimbramento e formas das obras da Cidade Administrativa.

À empresa Engemonte que foi parceira do Consórcio na fabricação das estruturas metálicas das obras da Cidade Administrativa.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	15
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	17
2.1 Conceito de protensão.....	17
2.2 Histórico.....	18
2.3 Sistemas de protensão .....	19
2.3.1 Protensão com aderência inicial .....	19
2.3.2 Protensão com aderência posterior .....	19
2.3.3 Protensão sem aderência .....	19
2.3.4 Benefícios trazidos pela protensão e escolha do sistema a utilizar.....	20
2.4 Materiais utilizados nos sistemas de protensão .....	21
2.4.1 Concreto.....	21
2.4.2 Aços de protensão.....	22
2.4.3 Bainhas.....	24
2.4.4 Calda de cimento para injeção.....	24
2.5 Processos e equipamentos de protensão.....	24
2.5.1 Macacos hidráulicos .....	24
2.5.2 Ancoragem .....	25
2.6 Aplicações da protensão.....	28
2.6.1 Concreto pré-moldado .....	28
2.6.2 Pontes e viadutos .....	34
2.6.3 Silos e reservatórios .....	35
2.6.4 Lajes e pisos de edifícios.....	35
2.7 Aplicações dos tirantes.....	37
2.7.1 Tirantes em pontes e viadutos.....	37
2.7.2 Tirantes em estruturas de contenção.....	39
3. ESTUDO DE CASO .....	41
3.1 Projeto do edifício.....	41
3.2 Sequência executiva do edifício.....	45
3.2.1 Fundações.....	45
3.2.2 Estrutura dos pavimentos .....	46
3.2.3 Estrutura de sustentação.....	53
3.2.4 Estabilidade global.....	69

3.2.5	<i>Estrutura do Heliponto e Circulação Vertical</i> .....	71
3.2.6	<i>Remoção dos pilares provisórios</i> .....	75
3.2.7	<i>Controle tecnológico</i> .....	77
4.	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	79
5.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	80
6.	ANEXO .....	81
6.1	<i>Projetos executivos – arquitetura e estrutura</i> .....	81
6.2	<i>Planejamento e metodologia executiva</i> .....	104

## **LISTA DE FIGURAS**

Figura 2.1: Aplicação estado prévio de tensão

Figura 2.2: União de blocos pré-moldados com protensão

Figura 2.3: a) seção fletida com armadura convencional

b) com armaduraprotendida

Figura 2.4: Bobina de cordoalha nua

Figura 2.5: Bobina de cordoalha engraxada

Figura 2.6: Certificado de aço de protensão

Figura 2.7: Macaco de protensão

Figura 2.8: Ancoragem ativa por meio de cunha

Figura 2.9: Ancoragem monocordoalha

Figura 2.10: Ancoragem com porca

Figura 2.11: Ancoragem passiva tipo laço

Figura 2.12 Macaco mono tensão

Figura 2.13: Esquema de uma pista de protensão

Figura 2.14: Bancada de protensão

Figura 2.15: Cabeça de ancoragem da bancada de protensão

Figura 2.16: Ancoragens e cunhas de protensão

Figura 2.17: Passagem das cordoalhas

Figura 2.18: Fechamento da forma e colocação da armadura da mesa superior

Figura 2.19: Bomba e macaco de protensão

Figura 2.20: Corte das cordoalhas

Figura 2.21: Estocagem das vigas

Figura 2.22: Transporte e montagem de vigas pré-moldadas

Figura 2.23: Silo em concreto protendido

Figura 2.24: Ancoragens ativas

Figura 2.25: Posicionamento dos cabos

Figura 2.26: Macaco de protensão monocordoalha engraxada

Figura 2.27: Ponte estaiada sobre o Rio Pinheiros em São Paulo

Figura 2.28: Ponte de São Vicente

Figura 2.29: a) muro vertical com tirantes; b) tirantes com placas individuais; c) tirantes ancorados no maciço de fundação

Figura 2.30: Partes construtivas do tirante

Figura 3.1: Desenho ARQ 112 – Fachadas 01 a 04

Figura 3.2: Fachada 01

Figura 3.3: Fachada 03

Figura 3.4: Fachada 02

Figura 3.5: Fachada 04

Figura 3.6: Fachada 01 – noturno

Figura 3.7: Plano de concretagem dos pórticos e cobertura

Figura 3.8: a) Pilares provisórios – pavimento térreo; b) Estrutura Metálica dos Tirantes – demais pavimentos.

Figura 3.9: Pilares provisórios – pavimento térreo

Figura 3.10: a) Pilares provisórios – pavimento térreo; b) Estrutura Metálica dos Tirantes – demais pavimentos.

Figura 3.11: Estrutura metálica dos tirantes – pavimentos quarto e técnico

Figura 3.12: Estrutura metálica dos tirantes – pavimento técnico

Figura 3.13: Tirantes – Cabos de cordoalha nua e ancoragens

Figura 3.14: Vigas longitudinais – protensão em cordoalha engraxada encapada

Figura 3.15: Vigas longitudinais – cordoalha engraxada plastificada

Figura 3.16: Vigas transversais – bainha dos cabos de protensão

Figura 3.17: Passagem tirantes – cruzamento das vigas longitudinais / transversais (bainha para protensão aderente com cabos de cordoalha nua)

Figura 3.18: Estrutura metálica dos tirantes – cimbramento das lajes

Figura 3.19: Laje térreo após retirada pilares provisórios

Figura 3.20: Pilares Pórtico - 1ª Etapa

Figura 3.21: Pilares Pórtico - 2ª Etapa

Figura 3.22: Pilares Pórtico - 3ª Etapa

Figura 3.23: Pilares Pórtico - 4ª Etapa

Figura 3.24: Pilares Pórtico - 5ª Etapa

Figura 3.25: Pilares Pórtico - 6ª Etapa

Figura 3.26: Pilares Pórtico - 7ª Etapa

Figura 3.27: Pilares Pórtico - 7ª Etapa – Forma e Armação

Figura 3.28: Pilares Pórtico - 7ª Etapa – Detalhe Armação e Vista Interna do Pilar

Figura 3.29: Pilares Pórtico - 8ª Etapa – Montagem de Cimbramento (altura = 37,5m)

Figura 3.30: Pilares Pórtico - 8ª Etapa – Montagem de Forma (altura = 37,5m)

Figura 3.31: Pilares Pórtico - 8ª Etapa – Detalhe da Armação

Figura 3.32: Vigas Longitudinais – Paredes Laterais

Figura 3.33: Vigas Longitudinais – Paredes Laterais (Interna com 1,0m e Externa com 0,25m)

Figura 3.34: Vigas Longitudinais – Bainhas (Protensão)

Figura 3.35: Vigas Longitudinais – Concretagem

Figura 3.36: Vigas Longitudinais – Concretagem

Figura 3.37: Vigas Longitudinais – Vista Interna

Figura 3.38: Vigas Transversais – Cimbramento

Figura 3.39: Vigas Transversais - Armação

Figura 3.40: Vigas Transversais – Armação e Bainhas (Protensão)

Figura 3.41: Vigas Transversais – Forma

Figura 3.42: Vigas Transversais

Figura 3.43: Vigas Transversais – Cabos Protensão

Figura 3.44: Tirantes

Figura 3.45: Tirantes protensão

Figura 3.46: Passarela de interligação Heliponto – pavimentos suspensos do edifício

Figura 3.47: Passarela de interligação Heliponto – pavimentos suspensos do edifício

Figura 3.48: Passarela de interligação Circulação Vertical – pavimentos suspensos do edifício

Figura 3.49: Heliponto - cimbramento e forma

Figura 3.50: Heliponto - cimbramento

Figura 3.51: Heliponto - Vigas radiais

Figura 3.52: Heliponto – bainhas dos cabos de protensão das vigas radiais

Figura 3.53: Heliponto

Figura 3.54: Corte e remoção dos pilares provisórios

Figura 3.55: Corte pilares provisórios

Figura 3.56: Ancoragem do tirante após a retirada dos pilares provisórios

Figura 3.57: Pavimento térreo após a retirada dos pilares provisórios

Figura 3.58: Deformação prevista para o pórtico

Figura 6.1: Desenho ARQ 112 – Fachadas 01 a 04

Figura 6.2: Desenho ARQ 102 - 1º. Pavimento

Figura 6.3: Desenho ARQ 108 – Cobertura / Heliponto

Figura 6.4 Desenho ARQ 109 – Corte AA

Figura 6.5: Desenho ARQ 110 – Corte BB, CC, DD

Figura 6.6: Desenho MET 101 – Escoramento provisório

Figura 6.7: Desenho MET 103 – Detalhe dos tirantes

Figura 6.8: Desenho de forma FOR 109 – 1º. Pavimento – parte 1

Figura 6.9: Desenho de forma FOR 110 – 1º. Pavimento – parte 2

Figura 6.10: Desenho de protensão PRO 107 – 1º. Pav. V. longitudinais

Figura 6.11: Desenho de protensão PRO 111 – 1º. Pav. V. transversais

Figura 6.12: Desenho FOR 127 – Pórticos 1 e 2

Figura 6.13: Desenho FOR 119 – Cobertura parte 1

Figura 6.14: Desenho FOR 120 – Cobertura parte 2

Figura 6.15: Desenho FOR 121 – Cortes gerais

Figura 6.16: Desenho PRO-115 – Protensão vigas longitudinais do pórtico

Figura 6.17: Desenho PRO-114 – Protensão vigas transversais da cobertura

Figura 6.18: Desenho PRO-101 – Protensão dos tirantes

Figura 6.19: Desenho FOR 122 - Heliponto – parte 1

Figura 6.20: Desenho PRO 118 – Passarelas Heliponto e Circulação Vertical

Figura 6.21: Desenho FOR 123 - Heliponto – parte 2

Figura 6.22: Desenho PRO 116 - Heliponto – parte 1

Figura 6.23: Cimbramento dos pilares

Figura 6.24: Cimbramento dos pórticos

Figura 6.25: Cimbramento dos pórticos – cortes

Figura 6.26: Forma dos pilares 1

Figura 6.27: Forma dos pilares 2

Figura 6.28: Plano de concretagem dos pórticos e cobertura

Figura 6.29: Etapas de protensão da estrutura de sustentação

Figura 6.30: Plano de protensão da estrutura de sustentação

## RESUMO

Os sistemas de protensão foram desenvolvidos a partir da idéia de se aplicar uma tensão prévia ao concreto através da armadura constituída de aços de alta resitência, visando eliminar os esforços de tração no concreto, ficando a peça totalmente comprimida, esforço ao qual o concreto resiste muito bem. Assim surgiu o concreto protendido e os diversos sistemas de protensão aplicados nas obras de engenharia.

Os tirantes são elementos estruturais que transmitem esforços de tração entre suas extremidades, tendo de um lado a cabeça de ancoragem ativa por onde é aplicada a carga de protensão e do outro a ancoragem passiva que está acoplada à estrutura que irá receber a carga aplicada.

Este trabalho aborda o sistema estrutural do Edifício do Palácio do Governo da Cidade Administrativa de Minas Gerais composto de dois pórticos, vigas transversais e tirantes nos quais os cinco pavimentos do edifício estão suspensos, mostrando as várias possibilidades de aplicação dos sistemas de protensão em edifícios a partir da sequência e métodos executivos adotados na fase de construção desta obra.

As diversas aplicações aqui apresentadas consagram os sistemas de protensão como grande recurso para soluções complexas de engenharia, possibilitando como resultado, estruturas mais esbeltas e leves em relação às estruturas em concreto armado convencional, estruturas com maior durabilidade em função da redução da fissuração e maior controle das deformações.

## 1.INTRODUÇÃO

A Construção Civil abrange a execução de obras de engenharia, tais como rodovias, ferrovias, aeroportos, portos, barragens, canais, estações de tratamento de água e efluentes, pontes, túneis, edifícios, casas, hospitais, templos religiosos, estádios e monumentos destinados a suportar e atender as mais variadas necessidades da humanidade, quais sejam: mobilidade, suprimento de água e energia, moradia, proteção, abrigo para atividades industriais e comerciais, manifestações religiosas, artísticas e culturais.

Para dar suporte a esta atividade participam arquitetos e engenheiros civis com a colaboração de técnicos de outras disciplinas que desenvolvem técnicas e sistemas construtivos com elevado grau de diversidade que permitem a elaboração dos mais variados tipos de construção, estando presente em todos os locais e setores do mercado produtivo.

O grande desafio da engenharia é buscar através do conhecimento técnico e planejamento, soluções que permitam realizar seus objetivos de forma prática e economicamente viável, transformando a natureza e os recursos naturais ou processados nas diversas modalidades de obras para atender as necessidades humanas, dentro do conceito de sustentabilidade.

Ao longo dos anos, a engenharia civil se desenvolveu a partir dos materiais disponíveis na natureza e dos materiais criados através da manipulação e processamento dos materiais naturais. Assim, o desenvolvimento do concreto armado e pretendido iniciou-se a partir da criação e patenteamento do cimento Portland, na Inglaterra em 1824.

O concreto armado foi obtido através da colocação de barras de aço na parte tracionada da peça construída em concreto composto de cimento e agregados, sendo considerada uma solução estrutural viável, por atender as seguintes condições:

- a aderência do concreto ao aço garante o trabalho conjunto dos materiais;
- os coeficientes de dilatação térmica dos dois materiais, é muito próxima dentro da faixa de temperatura de trabalho usual das estruturas;

- o concreto protege o aço da oxidação.

A aplicação de tensão prévia ao concreto através da armadura, visando eliminar os esforços de tração no concreto, constitui a idéia central do concreto protendido, que se viabilizou a partir da utilização de aços de alta resistência, tendo em vista que apesar das perdas de protensão causadas pela retração e deformação lenta do concreto, o aço de alta resistência ainda consegue manter a força útil necessária. Assim, surgiram os diversos sistemas de protensão aplicados nas obras de engenharia.

Os tirantes são elementos estruturais que transmitem esforços de tração entre suas extremidades, tendo de um lado a cabeça de ancoragem ativa por onde é aplicada a carga de protensão e do outro lado a cabeça de ancoragem passiva que está acoplada à estrutura de reação que irá receber a carga aplicada.

A partir deste princípio surgiram sistemas construtivos utilizando-se tirantes aplicados em obras de contenção de encostas do tipo cortina atirantada, pontes pênses e estaiadas, dentre outras.

O objetivo deste trabalho é descrever e analisar o desempenho dos diversos sistemas de protensão associados ao sistema de tirantes aplicados na construção de um edifício suspenso.

A realização deste trabalho se justifica para mostrar as várias possibilidades de aplicação dos sistemas de protensão e atirantamento em edifícios, anteriormente restritos à construção de silos, tanques, viadutos, pontes e contenções.

Destaca-se que com a introdução do sistema de protensão com cordoalha engraxada plastificada não aderente no Brasil a partir do ano 1997, a protensão ampliou a sua aplicação em edificações de pequeno e médio porte, comerciais ou residenciais, possibilitando espaços mais amplos, redução da quantidade de vigas, redução de formas e maior versatilidade arquitetônica, solução que já era adotada no mundo desde 1960.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Conceito de protensão

Protensão ou pré-tensão consiste em aplicar em uma estrutura um estado prévio de tensão capaz de aumentar sua resistência quando submetida a determinadas condições de carga.

Um exemplo clássico, é a aplicação de uma força horizontal que comprima os livros (Figura 2.1), produzindo força de atrito entre eles capaz de suportar o peso próprio do conjunto para que possam ser levantados sem cair.

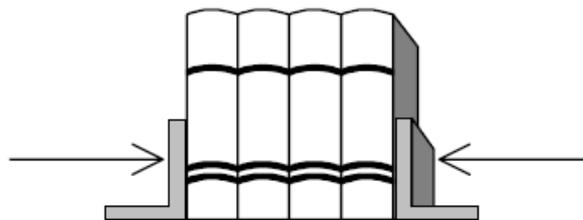


Figura 2.1: Aplicação de um estado prévio de tensão (VERÍSSIMO e CÉSAR Jr, 1998)

De acordo com Pfeil (1983), a protensão aplicada ao concreto “consiste em introduzir esforços que anulem ou limitem drasticamente as tensões de tração no concreto”. Desta forma o concreto trabalha na faixa de compressão, na qual o material é eficiente.

O artifício da protensão possibilita a criação de diversos sistemas construtivos para vencer de forma criativa e econômica os desafios que se apresentam à engenharia todos os dias. Mostramos na Figura 2.2, a solidarização das partes pré-moldadas de uma estrutura, usual em aduelas de pontes executadas em balanços sucessivos.

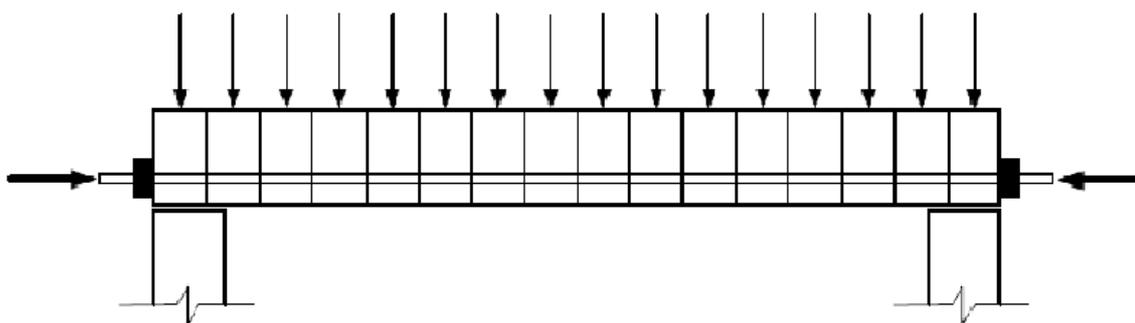


Figura 2.2: União de blocos pré-moldados com protensão (VERÍSSIMO e CÉSAR Jr, 1998)

## 2.2 Histórico

1824 – Josef Aspidin – Inglaterra – Patente do cimento Portland.

1855 – Lambot – França – Barras de aço na parte tracionada de peças feitas com argamassa de cimento para construção de barcos.

1861 – Monier – França – fabricação de jarro de flores chegando ao concreto armado que hoje conhecemos, obtendo patentes para construção de tubos, lajes, pontes.

1902 – Mörsh – Alemanha – primeira teoria com base científica e normas para cálculo e construção em concreto armado.

1912 – Mörsh e Könem – Alemanha – conceberam a aplicação de tensão prévia no concreto, porém não conseguiram contornar as perdas desta tensão.

1928 – Freyssinet – França – conseguiu com a adoção de aços de alta resistência, contornar as perdas de protensão produzidas pela retração e deformação lenta do concreto, apresentando trabalho consistente sobre concreto protendido.

1949 – a partir desta data, com o desenvolvimento dos materiais, técnicas e equipamentos ampliou definitivamente a aplicação dos diversos sistemas de protensão.

## **2.3 Sistemas de protensão**

### **2.3.1 Protensão com aderência inicial**

No sistema de protensão com aderência inicial, a armadura ativa é posicionada nas bancadas ou pistas de protensão, ancorada nas cabeças ou blocos localizados nas extremidades das pistas onde é aplicada a força de protensão.

As fôrmas são fechadas e as peças concretadas. Após a cura e atingida a resistência do concreto, as fôrmas e equipamentos de protensão são liberados, e as cordoalhas ou fios são cortados com equipamento de corte oxiacetileno (distância mínima da cunha de 20 mm), disco abrasivo ou tesoura hidráulica, transferindo a força de protensão para o concreto através da aderência. Este sistema é amplamente usado na fabricação de peças pré-moldadas.

### **2.3.2 Protensão com aderência posterior**

Neste sistema, a peça de concreto é moldada com bainhas no seu interior para a passagem dos cabos constituídos por cordoalhas. Após o concreto adquirir a resistência de projeto, a força de protensão é aplicada por meio de macacos hidráulicos especiais sendo o cabo ancorado nas placas de ancoragem fixadas nas cabeças das próprias peças.

Existem processos nos quais as placas de ancoragem utilizam cunhas metálicas de cravação e processos que usam porcas especiais. Posteriormente a aderência é obtida através da injeção de calda de cimento no interior das bainhas com bombas injetoras.

### **2.3.3 Protensão sem aderência**

Este sistema se assemelha ao sistema com aderência posterior, porém sem a injeção da calda de cimento. Após aplicação da protensão, as bainhas são injetadas com graxa para proteção da armação contra a corrosão.

Para reforço de estruturas existentes o sistema sem aderência pode ser utilizado externamente à peça de concreto já moldada, reforçando as vigas com tirantes externos.

#### 2.3.4 Benefícios trazidos pela protensão e escolha do sistema a utilizar

O concreto armado convencional é o resultado da combinação do concreto, material que possui grande resistência à compressão e pequena resistência à tração (cerca de 10% da resistência à compressão) e do aço que possui resistência tanto à tração quanto à compressão. Desta forma, em vigas de concreto armado o concreto irá resistir à compressão e o aço aos esforços de tração.

Através da protensão, usamos o aço para comprimir o concreto na parte tracionada para que esta tração se anule ou pelo menos que seja limitada, conforme Figura 2.3.

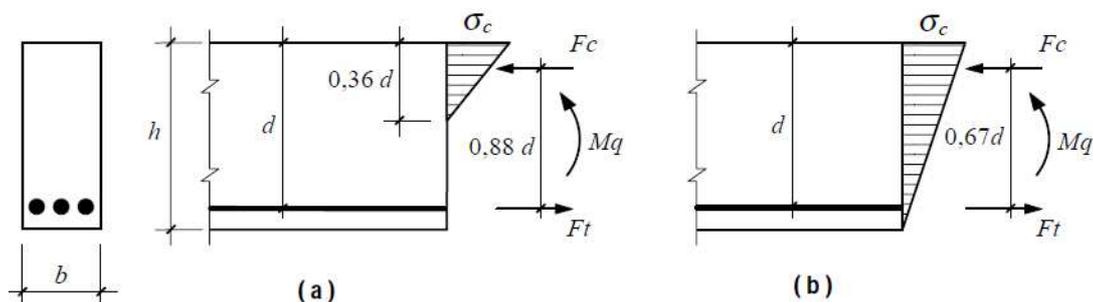


Figura 2.3: a) seção fletida com armadura convencional; b) com armadura protendida (VERÍSSIMO; CÉSAR Jr, 1998)

Desta forma, a protensão traz vários benefícios à estrutura:

- conduz a uma estrutura mais esbelta em relação a peças equivalentes em concreto armado e mais econômica sobretudo para execução de grandes vãos;
- evita a fissuração da peça, representando maior durabilidade da estrutura, pois anula ou reduz drasticamente as tensões de tração,
- permite controlar a deformação elástica;
- maior resistência à fadiga pois a variação de tensão no aço é menor;

A definição do sistema de protensão a ser empregado no projeto é feita através da avaliação das vantagens de cada sistema. Segundo Veríssimo e César Jr (1998), as vantagens do sistema com aderência são:

*“aumento da capacidade das seções no estado limite último, melhoria do comportamento da peça entre os estágios de fissuração e de ruptura e a falha de um cabo tem consequências restritas (incêndio, explosão, terremoto).”*

Da mesma forma, Veríssimo e César Jr (1998), registram que as vantagens do sistema sem aderência são:

*“permite posicionar os cabos com excentricidades maiores, permite a proteção do aço contra corrosão fora da obra, permite a colocação dos cabos de forma rápida e simples, perdas por atrito muito mais baixas e eliminação da operação de injeção.”*

## **2.4 Materiais utilizados nos sistemas de protensão**

### **2.4.1 Concreto**

As estruturas protendidas devem ser projetadas com concreto de maior resistência ( $f_{ck}$  maior ou igual a 25 MPa) pelas razões que apresentamos a seguir:

- a força de protensão pode levar a solicitações prévias mais altas que as solicitações de serviço;
- concretos e aços de maior resistência reduzem a dimensão das peças;
- concretos de maior resistência possuem, em geral módulo de elasticidade mais elevado, diminuindo as deformações e por consequência a perda de protensão por retração e fluência do concreto;

A norma NBR 6118 (ABNT, 2007), indica para o concreto protendido cobrimentos das armaduras superiores aos do concreto armado para a mesma classe de agressividade.

### 2.4.2 Aços de protensão

Os aços usados nas estruturas protendidas caracterizam-se por elevada resistência e ausência de patamar de escoamento. Os aços de protensão são fornecidos nas formas descritas abaixo:

- fios trefilados de aço carbono, diâmetro de 3 a 8 mm, em bobinas;
- cordoalhas de fios trançados, diâmetro de 12,7 mm e 15,8 mm, em bobinas;
- cordoalhas engraxadas plastificadas, diâmetro de 12,7 mm e 15,8 mm, em bobinas;
- barras de aço de alta resistência laminadas a quente, com comprimento definido.



Figura 2.4: Bobina de cordoalha nua



Figura 2.5: Bobina de cordoalha engraxada

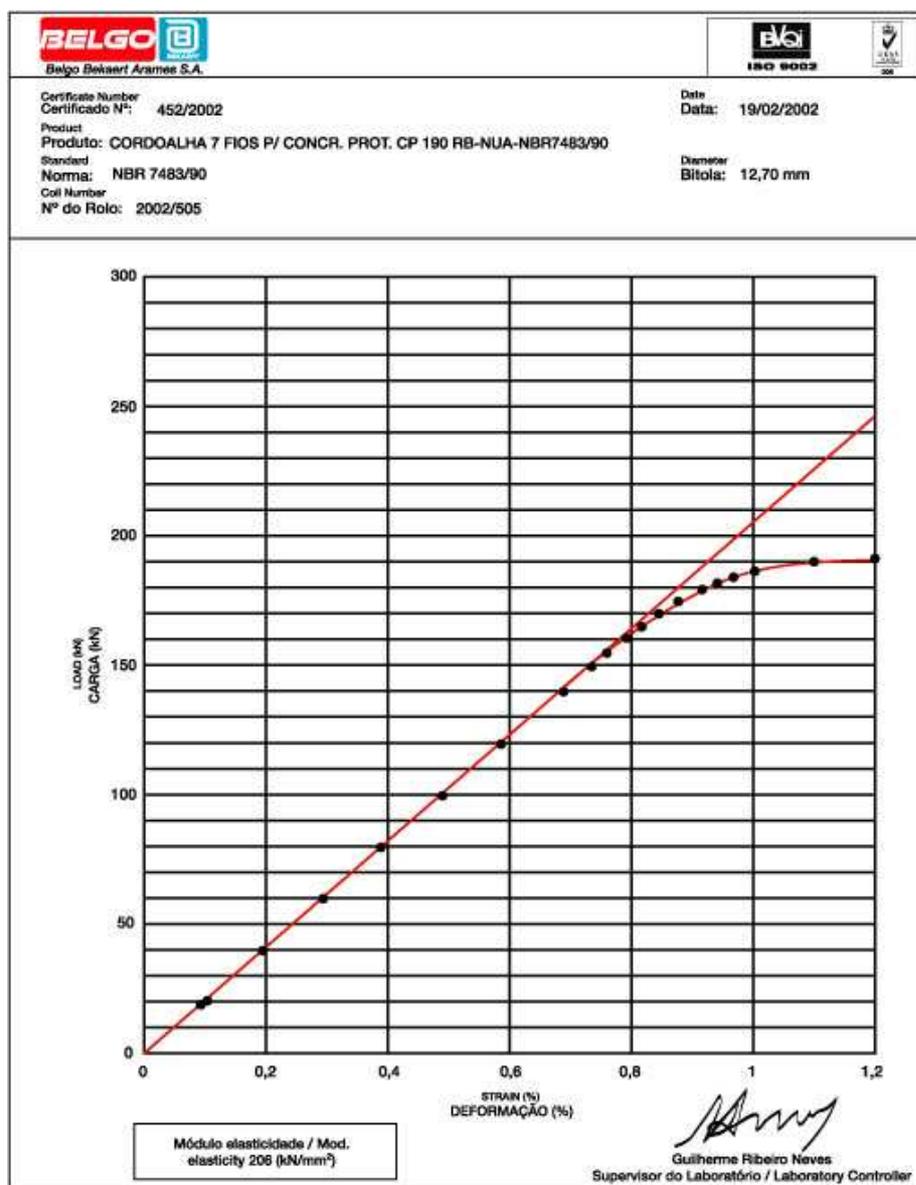


Figura 2.6: Certificado do aço de protensão

Em relação à corrosão, devem ser tomados cuidados superiores aos aplicados aos aços usados no concreto armado convencional, tendo em vista que trabalhando em tensões elevadas o aço é mais vulnerável à corrosão, além dos fios utilizados nos cabos apresentarem bitolas menores.

### **2.4.3 Bainhas**

As bainhas são tubos dispostos de forma orientada dentro da peça de concreto a ser construída, dentro das quais são passados os cabos compostos de cordoalhas, fios ou aço a serem protendidos. Podem ser construídas em chapas de aço com ondulações para o sistema aderente ou em plástico liso para o sistema não aderente.

Para a injeção da calda de cimento são colocados em pontos determinados da bainha os purgadores ou respiros para saída de ar, sendo os pontos de injeção localizados nos locais mais baixos e os purgadores nos pontos mais altos do cabo.

### **2.4.4 Calda de cimento para injeção**

A calda de cimento é injetada para promover a aderência da armadura de protensão com o concreto da peça e protegê-la contra a corrosão. O fator a/c da calda deve ser de 0,35 a 0,44, sendo definido pela fluidez mínima necessária para permitir a execução da injeção, antes que se inicie a pega da calda. Normalmente é usado aditivo retardador e plastificante para obter boa fluidez e o tempo necessário à aplicação.

## **2.5 Processos e equipamentos de protensão**

Os processos de protensão são normalmente patenteados em função das particularidades das ancoragens e equipamentos envolvidos no sistema. Nesta linha temos os processos: VSL, Freyssinet, Diwidag, dentre outros.

Para aplicar a carga de protensão nas peças de concreto com baixas perdas de carga, são necessários equipamentos especiais: macacos hidráulicos, placas de ancoragem dos cabos, bombas de injeção, dentre outros.

### **2.5.1 Macacos hidráulicos**

Os macacos hidráulicos acoplados a bombas de alta pressão com capacidade variável em função da quantidade de cordoalhas que formam o cabo são projetados para promover a carga necessária a ser aplicada à estrutura através do alongamento dos

cabos de protensão e fazer a interface destes cabos com as ancoragens componentes do processo. O peso destes macacos pode variar de 100 a 900 kg. Os macacos monotensão para o sistema de cordoalhas plastificadas engraxadas, normalmente utilizados em edificações são de menores dimensões com peso da ordem de 20 kg.

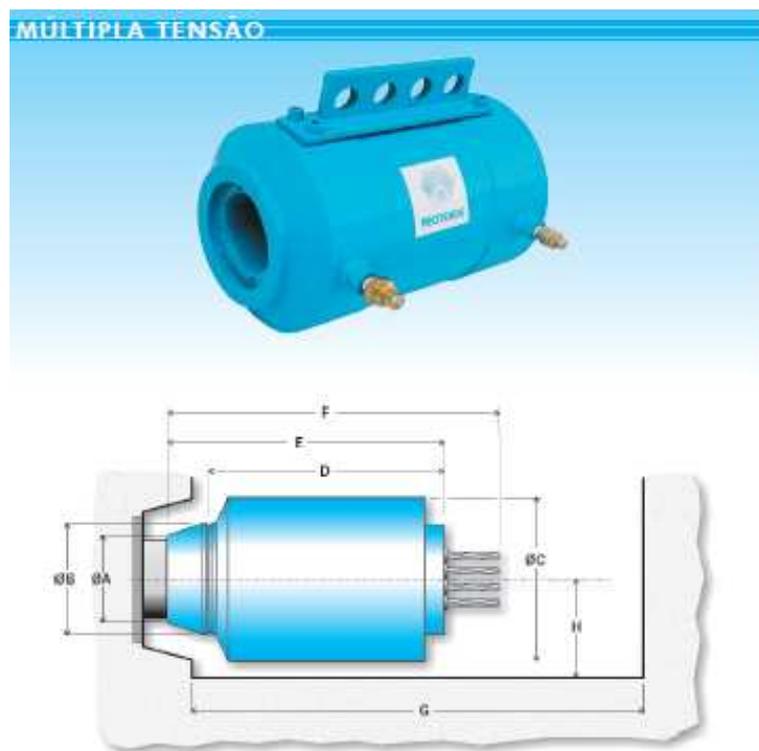


Figura 2.7: Macaco de protensão (Catálogo Protende, 2008)

### 2.5.2 Ancoragem

As ancoragens são peças destinadas a segurar os cabos de protensão tensionados e alongados, impedindo que eles voltem ao seu estado inicial, mantendo a carga aplicada pelo macaco, com o mínimo de perda possível.

Ancoragens ativas: são dispositivos que permitem a aplicação da protensão através dos macacos hidráulicos e possibilitam manter os cabos tensionados ancorados através de cunhas ou porcas.

Ancoragens por meio de cunhas. Os cabos são ancorados por duas peças em forma de cunha no sistema macho e fêmea. As cunhas podem ser cravadas ou deslizantes.

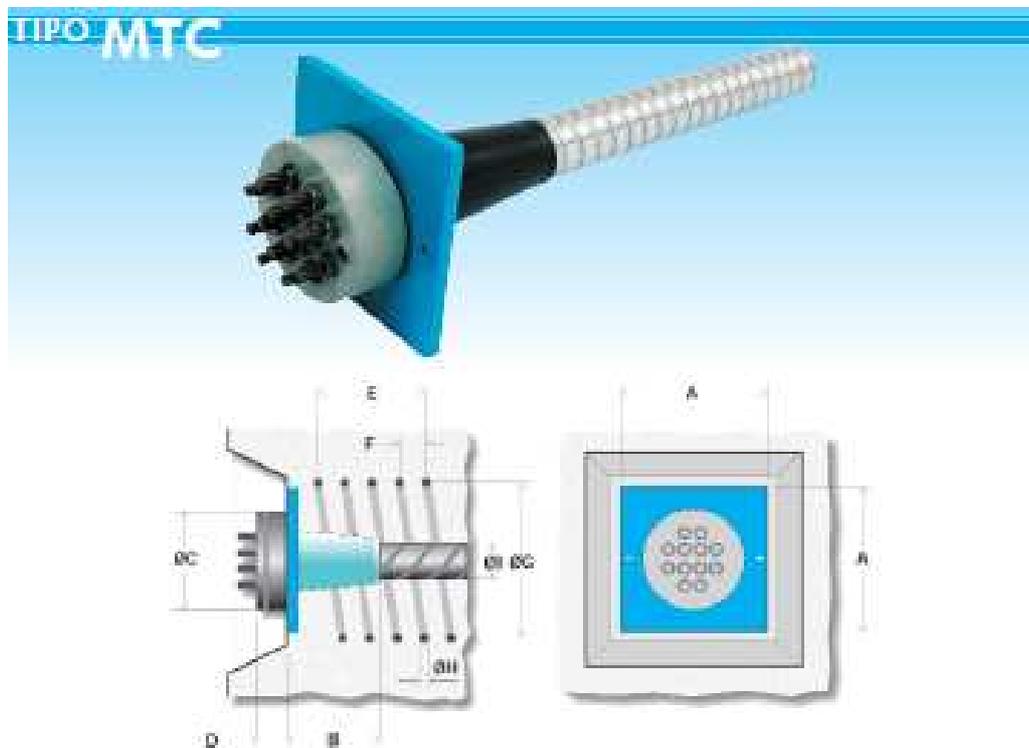


Figura 2.8: Ancoragem ativa por meio de cunhas (Catálogo Protende, 2008)

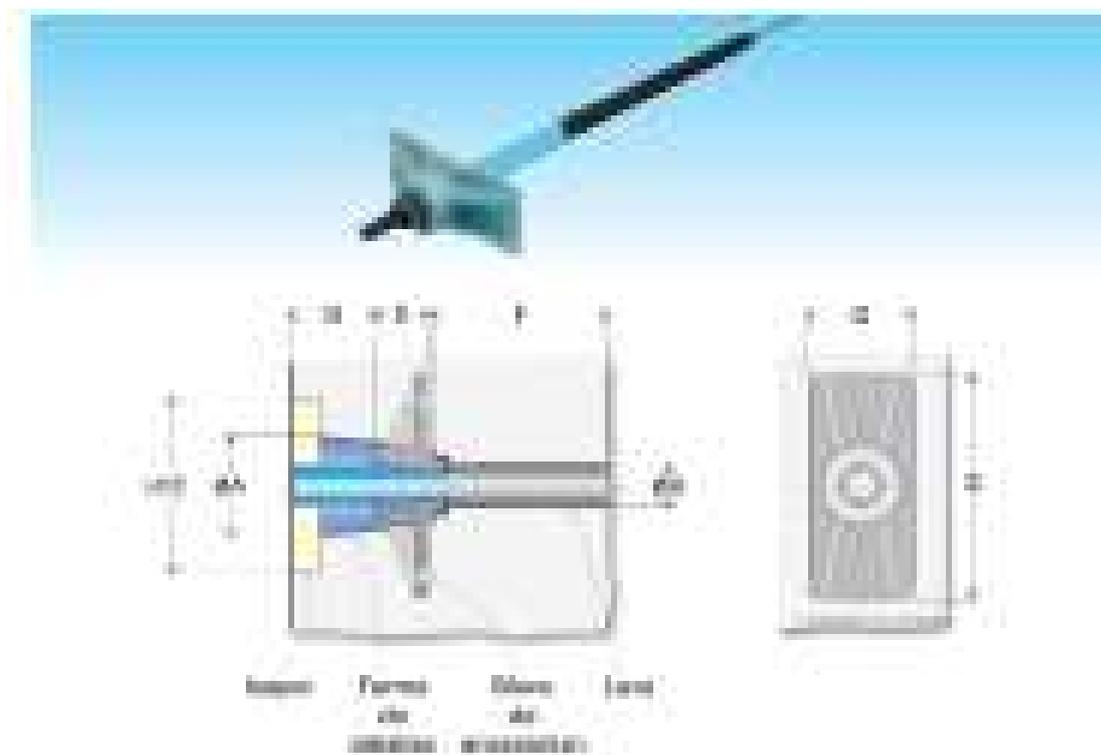


Figura 2.9: Ancoragem ativa monocordoalha (Catálogo Protende, 2008)

Ancoragens com porca. Normalmente são utilizados nos processos que utilizam barras maciças.

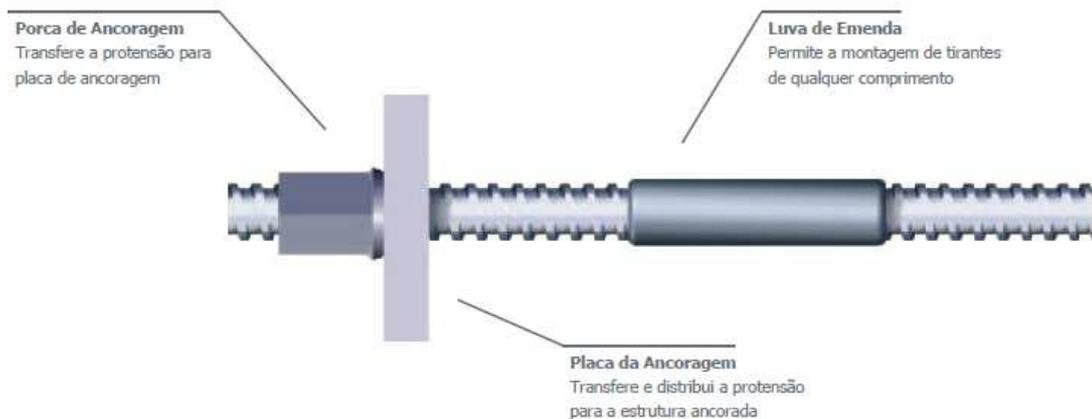


Figura 2.10: Ancoragem com porca (Catálogo Diwidag)

- Ancoragens passivas. São usadas nos casos em que a protensão é aplicada apenas de um lado, colocando-se do outro uma ancoragem morta ou passiva. Podem ser executadas por aderência dos cabos com o concreto, por meio de laços, por ancoragens pré-cravadas.



Figura 2.11: Ancoragem passiva tipo laço (Catálogo Protende, 2008)

Ancoragem por aderência. É usada no sistema de protensão por aderência inicial e se desenvolve através de aderência mecânica através das nervuras da armadura com o concreto endurecido. No caso de cordoalhas de sete fios, a aderência é realizada pelo efeito saca rolha no momento em que a cordoalha tensionada contra a cabeça da bancada de protensão com macaco mono-cordoalha é cortada.



Figura 2.12: Macaco mono tensão (Catálogo Protende, 2008)

## **2.6 Aplicações da protensão**

### **2.6.1 Concreto pré-moldado**

Para peças pré-moldadas de concreto, o sistema de protensão com aderência inicial é o mais utilizado por representar um processo industrial constituído de bancadas ou pistas de protensão, onde os equipamentos e materiais envolvidos no processo têm um rigoroso controle tecnológico, proporcionando um produto de qualidade e custo adequado, face racionalização de todo o sistema.

Sobre as bancadas de protensão são montadas as armaduras frouxas, passam-se os cabos de protensão constituídos de fios ou cordoalhas que serão ancorados nas cabeças da bancada de protensão, fecham-se as formas, aplica-se a protensão nos cabos através de macacos hidráulicos apoiados nas cabeças da bancada e a peça é concretada. Após o concreto adquirir a resistência de projeto, os cabos são liberados

(cortados), transmitindo ao concreto a força de protensão neles aplicada através da aderência ao concreto. O esquema é apresentado na Figura 2.10 abaixo.

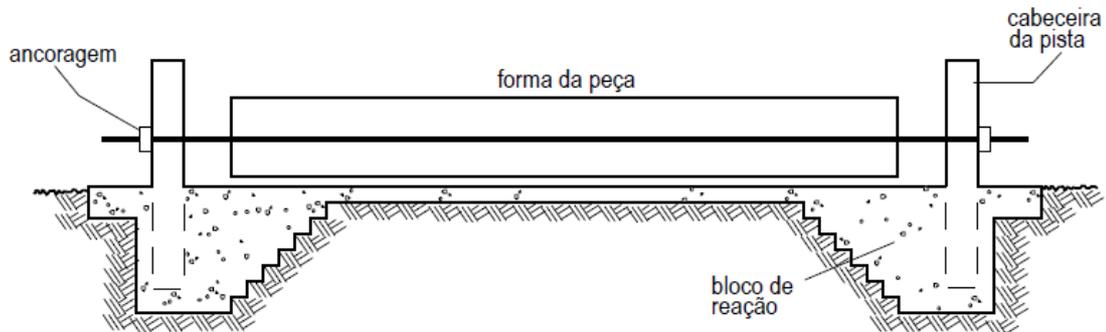


Figura 2.13: Esquema de uma pista de protensão típica (VERÍSSIMO e CÉSAR Jr, 1998)

As estruturas em concreto pré-moldado protendidas conferem ao processo os seguintes diferenciais de escolha:

- maior durabilidade devido a força de protensão não permitir a abertura das fissuras;
- peças de menores dimensões, tendo em vista a possibilidade de se manter a seção totalmente comprimida;
- para a racionalização do processo é necessário a adoção de concretos de alto desempenho que levam a altas resistências iniciais, reduzindo o tempo de retirada da peça da bancada, diminuindo o ciclo de fabricação;
- os concretos de alto desempenho apresentam menores deformações e menor efeito da retração, reduzindo a relaxação da protensão e aumentando a vida útil da peça.

Mostramos a seguir processo de fabricação das vigas pré-moldadas protendidas aplicadas na Obra do Boulevard Arrudas concluída em 2007.



Figura 2.14: Bancada de protensão



Figura 2.15: Cabeça de ancoragem da bancada de protensão



Figura 2.16: Ancoragens e cunhas de protensão



Figura 2.17: Passagem das cordoalhas



Figura 2.18: Fechamento da forma e colocação da armadura da mesa superior



Figura 2.19: Bomba e macaco de protensão



Figura 2.20: Corte das cordoalhas



Figura 2.21: Estocagem das vigas



Figura 2.22: Transporte e montagem de vigas pré-moldadas

### **2.6.2 Pontes e viadutos**

A protensão é amplamente utilizada na execução de pontes, tendo em vista que para vencer grandes vãos com peças submetidas a flexão, apresenta a vantagem de conduzir a peças mais esbeltas tornando-se economicamente viável em relação ao concreto armado e até mesmo ao vigamento metálico até um determinado comprimento.

Sendo assim, a protensão é utilizada em diversos sistemas estruturais de pontes, conforme descrevemos abaixo:

- Pontes em vigas. As vigas principais absorvem o momento fletor e força cortante;
- Pontes em viga caixão. As vigas absorvem momento fletor, força cortante e torção.
- Pontes em viga T. A laje funciona em conjunto com as vigas, sendo que as vigas absorvem os esforços de tração e as lajes os esforços de compressão gerados pelo momento fletor.

### **2.6.3 Silos e reservatórios**

Nestes casos a protensão é denominada circular por cintamento, que consiste em enrolar a peça com fio ou cabo de aço contínuo que é preso num ponto inicial e com um dispositivo tensor é aplicada uma força de tração na medida em que o fio é enrolado na peça. Posteriormente é feito um revestimento em argamassa projetada para proteção contra a corrosão.

O processo de protensão com cordoalhas engraxadas plastificadas pode substituir com vantagem o sistema tradicional, considerando o baixo coeficiente de atrito cabo/bainha evitando as grandes perdas por atrito do sistema anterior além de melhorar a proteção contra corrosão através da graxa e bainha plástica.



Figura 2.23: Silo em concreto protendido

### **2.6.4 Lajes e pisos de edifícios**

A protensão em edifícios durante muitos anos foi executada com a tecnologia do sistema aderente utilizado em pontes para construção de lajes maciças em edifícios comerciais com vãos de grande amplitude.

A partir do ano 2000, o processo de protensão com a cordoalha engraxada e plastificada pós-tracionada passou a ganhar espaço no Brasil em edificações residenciais e comerciais de pequeno e médio porte, solução que já era adotada no mundo desde 1960.

Este processo é de aplicação simples, dispensando bainhas e injeção de calda de cimento, utilizando macacos e bombas leves, portáteis e de acionamento simples, proporcionando produtividade adequada.



Figura 2.24: Ancoragens ativas



Figura 2.25: Posicionamento dos cabos



Figura 2.26: Macaco de protensão monocordoalha engraxada

As principais vantagens do processo em relação do concreto armado convencional são:

- em edifícios com pequenos e médios vãos, promoveu redução significativa da quantidade de vigas representando melhor qualidade e aproveitamento dos espaços, menor quantidade de aplicação de formas para vigas e por consequência redução significativa dos custos;
- em pisos comerciais e industriais e fundações em “radieers”, representou ganhos de qualidade e custo, na associação do sistema à armadura convencional.

## **2.7 Aplicações dos tirantes**

### **2.7.1 Tirantes em pontes e viadutos**

Os tirantes são usados na construção de pontes como elementos de sustentação do tabuleiro, suportados pelo mastro nas pontes estaiadas e pelos cabos principais nas pontes pênséis.

- Pontes estaiadas. O tabuleiro é suportado por tirantes com cabos retos e inclinados denominados estais que são fixados ao mastro. As cargas permanentes e móveis são transmitidas ao mastro através dos estais na forma de treliça, ficando o mastro e tabuleiro comprimidos e os estais tracionados.



Figura 2.27: Ponte estaiada sobre o Rio Pinheiros em São Paulo

- Pontes pênseis. A estrutura destas pontes é constituída de vigas que são suportadas por tirantes presos aos cabos de aço principais suspensos pelas torres e ancorados em terra nas extremidades.



Figura 2.28: Ponte de São Vicente

### 2.7.2 Tirantes em estruturas de contenção

Os tirantes protendidos são aplicados em obras de contenção do tipo cortinas atirantadas em solo e ancoragem de barragem no maciço de fundação.

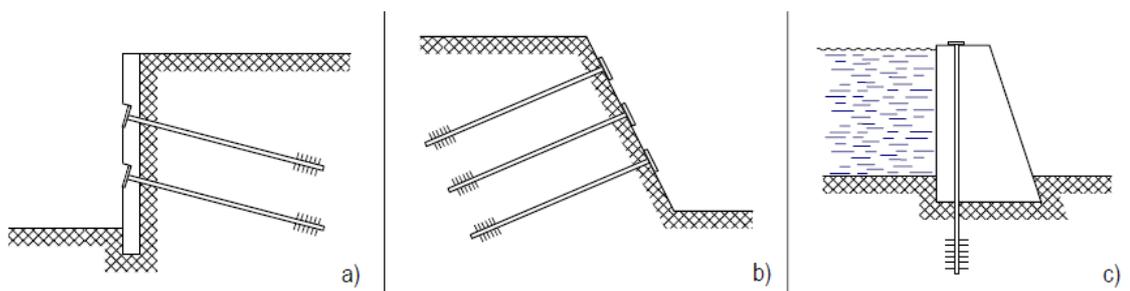


Figura 2.29: a) muro vertical com tirantes; b) tirantes com placas individuais; c) tirantes ancorados no maciço de fundação (VERÍSSIMO e CÉSAR Jr, 1998)

O tirante para estas aplicações é uma peça composta por um ou mais elementos resistentes à tração, coluna de injeção e válvulas manchetes. Estes elementos são introduzidos no terreno através de uma perfuração executada previamente, e posteriormente é feita a injeção de calda de cimento sob pressão que irá romper a

válvula manchete rosqueada na extremidade da coluna de injeção para formar o bulbo de ancoragem que irá receber a carga de protensão aplicada ao tirante para estabilizar a estrutura contra o terreno.

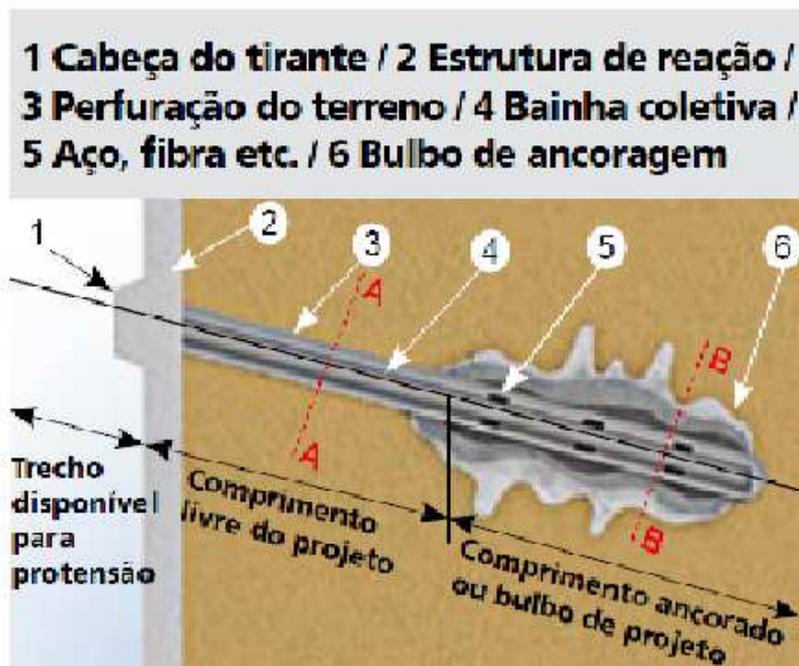


Figura 2.30: Partes construtivas do tirante

### **3. ESTUDO DE CASO**

Será feito um estudo de caso sobre o sistema estrutural do Edifício do Palácio do Governo da Cidade Administrativa de Minas Gerais composto de dois pórticos, vigas transversais e tirantes nos quais os pavimentos do edifício estão suspensos.

O presente capítulo apresentará a tecnologia aplicada durante a construção do referido edifício, amparada nos conhecimentos técnicos relativo aos sistemas de protensão e aos sistemas de atirantamento existentes na literatura que foram consolidados na revisão bibliográfica do presente trabalho.

Será realizada a apresentação e análise de desempenho dos vários sistemas de protensão e do sistema de tirantes aplicados nesta obra, a partir da sequência e métodos executivos adotados na fase de construção.

#### ***3.1 Projeto do edifício***

O projeto arquitetônico do edifício foi concebido pelo Arquiteto Oscar Niemeyer, cujas obras se caracterizam por grandes esculturas moldadas em concreto armado, com linhas curvas e vãos de grande amplitude.

Na figura 3.1 abaixo, é mostrado o projeto executivo das fachadas e fotografias que ilustram a concepção arquitetônica do edifício. No Anexo estão desenhos em plantas e cortes que permitem ter uma visão geral do projeto.

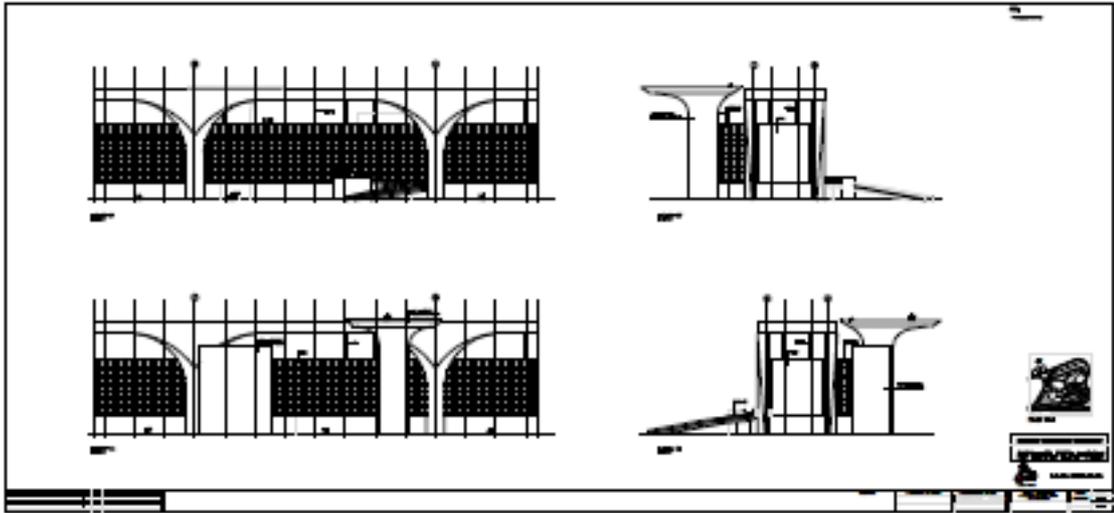


Figura 3.1: Desenho ARQ 112 – Fachadas 01 a 04 (Niemeyer, 2006)



Figura 3.2: Fachada 01



Figura 3.3: Fachada 03



Figura 3.4: Fachada 02



Figura 3.5: Fachada 04



Figura 3.6: Fachada 01 – noturno

O projeto estrutural foi desenvolvido pelo Engenheiro José Carlos Sussekind, apresentando características técnicas com elevado grau de complexidade para atender a formulação estética proposta.

O edifício do Palácio possui um vão livre de 147,50 metros apoiado em quatro pilares que suportam duas vigas longitudinais constituindo dois pórticos paralelos, nos quais se apoiam quinze vigas transversais, onde estão ancorados trinta tirantes que suportam o edifício de cinco pavimentos.

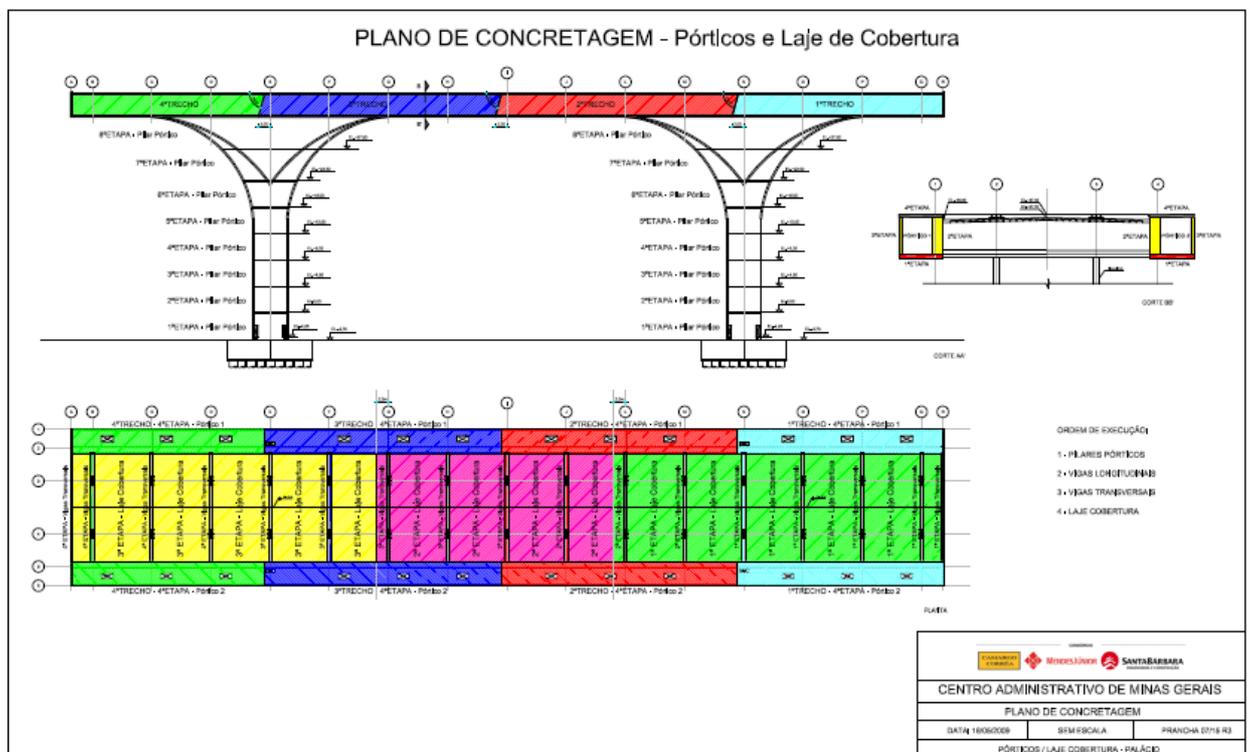


Figura 3.7: Plano de concretagem dos pórticos e cobertura

## 3.2 Sequência executiva do edifício

### 3.2.1 Fundações

As fundações foram executadas em estacas escavadas com lama bentonítica (estacões) para os pilares, estacas hélice contínua na estrutura central, heliponto e circulação vertical, e estacas pré-moldadas na estrutura periférica.

### **3.2.2 Estrutura dos pavimentos**

A estrutura do pavimento térreo é constituída de vigas e lajes nervuradas protendidas suportada por pilares de concreto.

Entre o térreo e o primeiro pavimento foram construídos pilares metálicos provisórios. Nos pavimentos subsequentes, a estrutura metálica dos tirantes assumiu a função de pilares para permitir a construção dos pavimentos até a cobertura da forma convencional de baixo para cima. No Anexo podem são apresentados os projetos da estrutura.



Figura 3.8: a) Pilares provisórios – pavimento térreo; b) Estrutura Metálica dos Tirantes – demais pavimentos.



Figura 3.9: Pilares provisórios – pavimento térreo



Figura 3.10: a) Pilares provisórios – térreo; b) Estrutura Metálica dos Tirantes - demais pavimentos.



Figura 3.11: Estrutura metálica dos tirantes – pavimentos quarto e técnico



Figura 3.12: Estrutura metálica dos tirantes – pavimento técnico



Figura 3.13: Tirantes – Cabos de cordoalha nua e ancoragens

Para garantir a monoliticidade e reduzir o peso da estrutura suspensa foi adotada a protensão nas duas direções dos pavimentos, os quais não possuem juntas de dilatação em função do modelo estrutural definido.

A estrutura dos pavimentos suspensos é constituída no sentido longitudinal por duas vigas no alinhamento dos tirantes e uma viga central, protendidas no sistema de monocordoalhas engraxadas encapadas individualmente. No sentido transversal é constituída por quinze vigas dispostas no alinhamento dos tirantes, que são protendidas no sistema de cabos com aderência posterior. O sistema construtivo das lajes dos pavimentos suspensos é mostrado a seguir:



Figura 3.14: Vigas longitudinais – protensão em cordoalha engraxada encapada



Figura 3.15: Vigas longitudinais – cordoalha engraxada plastificada



Figura 3.16: Vigas transversais – bainha dos cabos de protensão



Figura 3.17: Passagem tirantes – cruzamento das vigas longitudinais / transversais (bainha para protensão aderente com cabos de cordoalha nua)



Figura 3.18: Estrutura metálica dos tirantes – cimbramento das lajes



Figura 3.19: Laje térreo após retirada pilares provisórios

Para proporcionar o desempenho requerido pelos pavimentos suspensos (peças mais esbeltas com menor peso e garantir a monoliticidade da estrutura), foram aplicados dois processos de protensão:

- protensão com cordoalhas engraxadas não aderentes no sentido longitudinal trespassadas para permitir a ausência de juntas de dilatação neste sentido com 147,50 metros de extensão e possibilitar o cruzamento destas cordoalhas com as bainhas dos cabos de protensão dispostos nas vigas transversais nos capitéis de apoio dos tirantes;
- protensão com cabos de cordoalhas com aderência posterior nas vigas transversais que suportam maiores momentos oriundos da sustentação.

### **3.2.3 Estrutura de sustentação**

Os pórticos e vigas transversais da cobertura foram construídos de forma independente dos pavimentos do edifício, sendo interligados no último pavimento do edifício através da estrutura metálica dos tirantes, por onde passam os cabos de cordoalhas engraxadas plastificadas que suportam o edifício.

A estrutura do pórtico é composta por pilares com seção transversal variável vazada e viga longitudinal com seção de 4,0 metros de largura por 4,0 metros de altura em caixão vazado, os quais possuem uma parede principal com 1,0 metro de largura em um só plano. A viga longitudinal nas fachadas é fechada por uma parede de 25 centímetros de espessura. Esta fase da obra é mostrada a seguir:



Figura 3.20: Pilares Pórtico - 1ª Etapa



Figura 3.21: Pilares Pórtico - 2ª Etapa



Figura 3.22: Pilares Pórtico - 3ª Etapa



Figura 3.23: Pilares Pórtico - 4ª Etapa



Figura 3.24: Pilares Pórtico - 5ª Etapa



Figura 3.25: Pilares Pórtico - 6ª Etapa



Figura 3.26: Pilares Pórtico - 7ª Etapa



Figura 3.27: Pilares Pórtico - 7ª Etapa – Forma e Armação

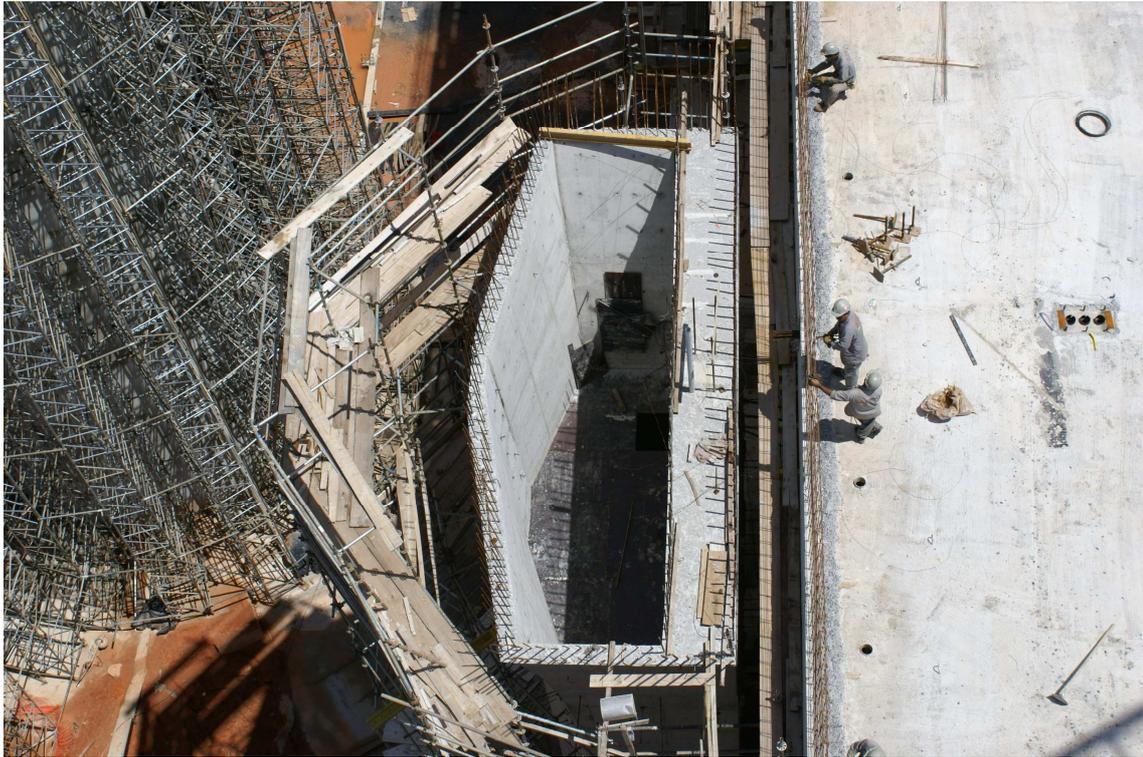


Figura 3.28: Pilares Pórtico - 7ª Etapa – Detalhe Armação e Vista Interna do Pilar



Figura 3.29: Pilares Pórtico - 8ª Etapa – Montagem de Cimbramento (altura = 37,5m)



Figura 3.30: Pilares Pórtico - 8ª Etapa – Montagem de Forma (altura = 37,5m)



Figura 3.31: Pilares Pórtico - 8ª Etapa – Detalhe da Armação



Figura 3.32: Vigas Longitudinais – Paredes Laterais

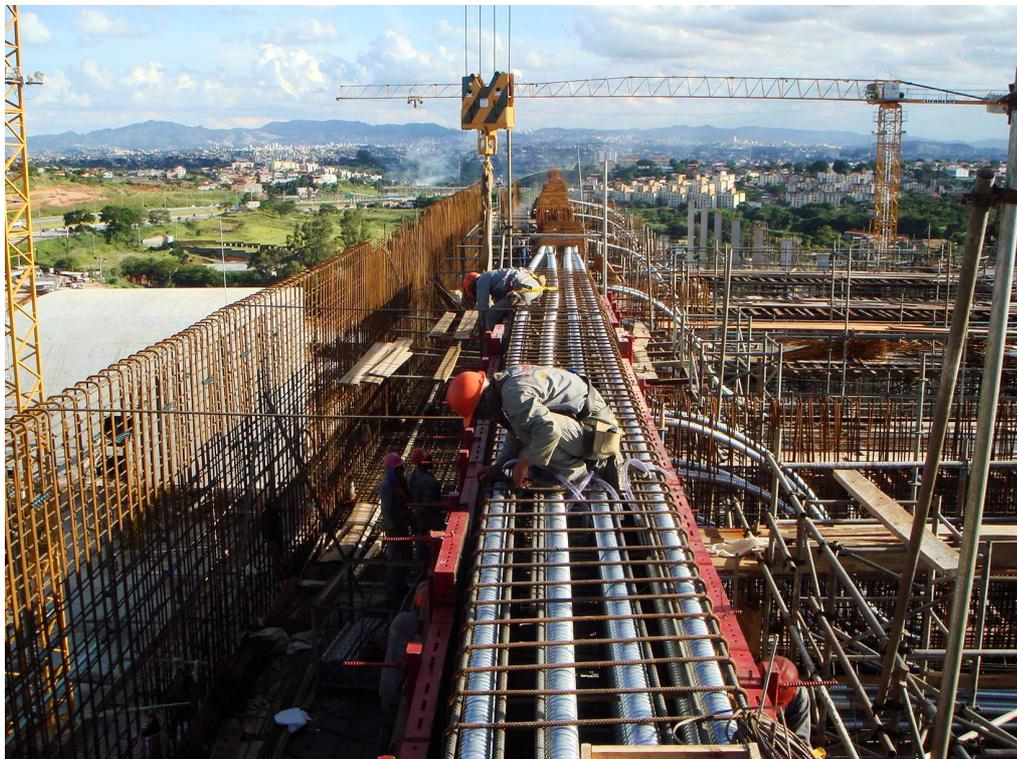


Figura 3.33: Vigas Longitudinais – Paredes Laterais (Interna com 1,0m e Externa com 0,25m)



Figura 3.34: Vigas Longitudinais – Bainhas (Protensão)



Figura 3.35: Vigas Longitudinais – Concretagem



Figura 3.36: Vigas Longitudinais – Concretagem



Figura 3.37: Vigas Longitudinais – Vista Interna

As quinze vigas transversais que estão engastadas nas vigas longitudinais do pórtico, possuem seção T com espessura de 60 centímetros na alma e 120 centímetros no talão da mesa inferior com altura de 360 centímetros, nas quais estão ancorados dois tirantes em cada uma. O fechamento do conjunto é feito por duas vigas transversais em concreto armado.

As lajes de cobertura são constituídas de painéis nervurados, sendo deixada uma faixa de laje maciça de 2,20 metros sobre cada viga transversal formando nelas a mesa superior de compressão. Abaixo, apresentamos esta fase da obra:



Figura 3.38: Vigas Transversais - Cimbramento



Figura 3.39: Vigas Transversais – Armação



Figura 3.40: Vigas Transversais – Armação e Bainhas (Protensão)



Figura 3.41: Vigas Transversais – Forma



Figura 3.42: Vigas Transversais e laje de cobertura



Figura 3.43: Vigas Transversais – Cabos Protensão

Concluída a estrutura de sustentação foi realizada a transferência das cargas dos pavimentos suspensos do edifício, suportadas até então pelos pilares provisórios, para os tirantes e destes para as vigas transversais, pórticos e fundações por meio da aplicação das cargas de protensão de forma gradual conforme sequência definida em projeto e etapas definidas no plano de protensão.



Figura 3.44: Tirantes



Figura 3.45: Tirantes protensão

Na fase de planejamento da obra foram desenvolvidos os métodos executivos e projetos complementares de construção que são apresentados no Anexo deste trabalho e descritos a seguir:

- projetos de cimbramento que constituem o escoramento provisório da estrutura durante a construção,
- projetos das fôrmas que irão moldar o concreto,
- planos de concretagem que definem as etapas de fôrma, armação e concretagem das peças de acordo com a sequência executiva e pontos de junta de concretagem,
- planos de protensão que definem: a sequência dos cabos, parcela da força de protensão a ser aplicada, tipo de ancoragem, alongamento teórico dos cabos e demais dados necessários à execução da protensão.

Para atender o desempenho requerido pela estrutura de sustentação do edifício foi utilizado nas vigas o processo de protensão com aderência posterior que constitui o sistema clássico do concreto protendido, onde os cabos são dispostos no sentido oposto ao diagrama dos momentos, visando reduzir ou eliminar o esforço de tração na seção inferior da viga conforme abaixo:

- nas vigas longitudinais do pórtico foi adotado o sistema de protensão com aderência posterior, constituído por 12 cabos com 19 cordoalhas de 15,2 mm nuas em cada viga.
- nas vigas transversais da cobertura foi adotado o sistema de protensão com aderência posterior, sendo 6 cabos com 15 cordoalhas de 15,2 mm nuas em cada viga.

O sistema de tirantes é composto por 30 tirantes que têm por função suportar os pavimentos suspensos do edifício, sendo cada tirante constituído por três cabos com 15 cordoalhas engraxadas plastificadas de 15,2 mm, dispostas em bainhas de PEAD com injeção posterior de calda de cimento e vedação final com parafina.

Para transferência das cargas da estrutura para os tirantes foi adotado o sistema de protensão sem aderência, tendo na extremidade inferior dos cabos uma ancoragem

passiva pré-cravada e na extremidade superior uma ancoragem ativa, onde foi aplicada a carga de protensão sendo as cunhas cravadas posteriormente.

O processo de protensão não aderente aplicado aos tirantes é importante no desempenho deste elemento estrutural permitindo a distribuição das tensões de maneira uniforme ao longo dos cabos produzindo pequenos alongamentos unitários, perdas por atrito muito baixas, proteção contra corrosão adequada através da graxa e colocação dos cabos de forma rápida e prática.

#### **3.2.4 Estabilidade global**

Os anexos Heliponto e Circulação Vertical, têm a função de permitir o acesso ao edifício por escadas, elevadores e helicóptero além de possibilitar a circulação entre os pavimentos.

Além da função arquitetônica, estas estruturas são responsáveis pelo equilíbrio global do conjunto às ações do vento através de passarelas que ligam os pavimentos suspensos do edifício a elas. A ligação das três estruturas é realizada por meio de juntas articuladas compostas por aparelhos de apoio em neoprene e cabos de protensão não aderentes compostos por cordoalhas engraxadas e encapadas ancorados no interior destas estruturas e dos pavimentos suspensos. Esta solução estrutural é mostrada a seguir:



Figura 3.46: Passarela de interligação Heliponto – pavimentos suspensos do edifício



Figura 3.47: Passarela de interligação Heliponto – pavimentos suspensos do edifício



Figura 3.48: Passarela de interligação Circulação Vertical – pavimentos suspensos do edifício

Neste caso, para atender o desempenho requerido foi aplicado o processo de protensão sem aderência através de 2 cabos de cordoalhas engraxadas e encapadas de 15,2 mm dispostas em bainhas que foram injetadas posteriormente com calda de cimento, para permitir a absorção dos esforços oriundos da carga de vento sobre os pavimentos suspensos.

Num sentido a carga é absorvida pela tração nos cabos e no outro através do encosto da estrutura articulada no consolo sobre o qual estão os aparelhos de apoio em neoprene fretado presos ao consolo por meio de chumbadores. O sistema de protensão sem aderência é importante porque distribui uniformemente as tensões ao longo dos cabos.

### ***3.2.5 Estrutura do Heliponto e Circulação Vertical***

A estrutura do heliponto é constituída de uma torre cilíndrica que apresenta no topo uma plataforma circular excêntrica em relação ao eixo da torre com seção variando de 9,9 metros a 28,5 metros.

Nesta estrutura foi aplicado um processo protensão cruzada das vigas radiais direcionadas ao eixo da torre passando pela laje superior, ligando vigas situadas em quadrantes opostos da parede cilíndrica, na qual estas vigas estão interrompidas. A laje inferior maciça cria um anel com a parede cilíndrica com a função de absorver os esforços de compressão criados pela estrutura em balanço. O sistema construtivo do Heliponto é apresentado a seguir:



Figura 3.49: Heliponto - cimbramento e forma



Figura 3.50: Heliporto – cimbramento



Figura 3.51: Heliporto - Vigas radiais



Figura 3.52: Heliporto – bainhas dos cabos de protensão das vigas radiais



Figura 3.53: Heliporto

O desempenho da estrutura foi garantido pelo o processo de protensão aderente adotado, no qual as forças de protensão são aplicadas da forma mais uniforme possível em todo o contorno da estrutura.

Em estruturas curvas a introdução das elevadas cargas de protensão localizadas, podem levar à ruptura da estrutura requerendo atenção especial quanto ao posicionamento dos cabos, carga e sequência de protensão.

A Circulação Vertical em forma de trapézio, tem sua estrutura em concreto armado convencional, apresentando cuidado especial na estrutura de ligação da passarela de ligação com os pavimentos suspensos.

### **3.2.6 Remoção dos pilares provisórios**

Realizada a transferência total das cargas dos pavimentos suspensos para a estrutura de sustentação e garantida a estabilidade global do conjunto através das ligações articuladas protendidas entre as passarelas do Heliponto e da Circulação Vertical com os pavimentos suspensos do edifício, os pilares provisórios foram cortados e removidos propiciando a liberação total do vão livre de 147,50 metros.

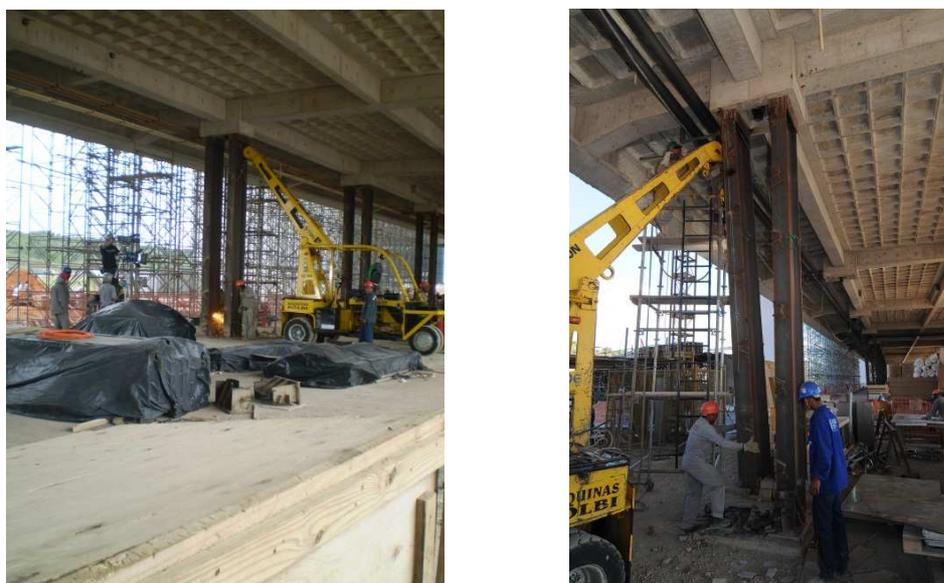


Figura 3.54: Corte e remoção dos pilares provisórios



Figura 3.55: Corte pilares provisórios



Figura 3.56: Ancoragem do tirante após a retirada dos pilares provisórios



Figura 3.57: Pavimento térreo após a retirada dos pilares provisórios

A remoção dos pilares provisórios representa a etapa final da construção da estrutura do Edifício do Palácio do Governo da Cidade Administrativa de Minas Gerais.

### **3.2.7 Controle tecnológico**

A aplicação dos sistemas de protensão na construção de obras de engenharia, requer um rigor maior nos métodos de controle tecnológico relacionados ao concreto, armadura em aço de alta resistência para protensão, posicionamento dos cabos de protensão, gráficos de controle de protensão e calda de cimento para a injeção das bainhas, tendo em vista que as elevadas tensões aplicadas na protensão podem levar ao funcionamento inadequado da estrutura ou à ruptura das peças.

No caso especial desta obra, para conhecer o comportamento da estrutura foi realizado um programa de monitoração dos deslocamentos em pontos notáveis da estrutura: níveis da base, topo dos pilares provisórios, fundo das vigas transversais e longitudinais dos pórticos nos cruzamentos dos eixos em fases distintas da execução: antes, durante e após a transferência das cargas dos pilares provisórios para o pórtico.

A título ilustrativo mostramos na figura 3.58, a deformação prevista em projeto para o pórtico.

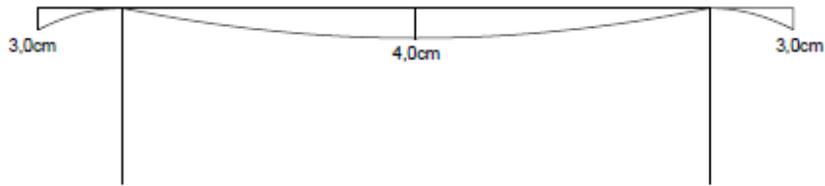


Figura 3.58: Deformação prevista para o pórtico

#### **4. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A Construção Civil vem ao longo do tempo desenvolvendo sistemas construtivos e soluções para atender às mais variadas necessidades do homem na condução da vida econômica e social, além da exploração e preservação dos recursos naturais à sua disposição.

Vem vencendo desafios e realizando sonhos, quais sejam exploração mineral, mobilidade, moradia, conforto, manifestações culturais e religiosas.

A capacidade criativa do homem, representada no presente estudo, pelas formas e ousadia dos traços do Arquiteto Oscar Niemeyer, exigem da engenharia soluções que forcem seu avanço tecnológico tanto no que se refere ao cálculo estrutural quanto ao desenvolvimento de materiais e sistemas construtivos que possam realizar tais projetos.

Neste sentido, os sistemas de protensão representam um grande recurso na obtenção de soluções complexas de engenharia, possibilitando como resultado, estruturas mais esbeltas e leves em relação às estruturas em concreto armado convencional, estruturas com maior durabilidade em função da redução da fissuração e maior controle das deformações.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

HAMANN, Fernanda; PFEIL, Walter. Engenharia Invisível. 1 Ed. Rio de Janeiro: Desiderata, 2008. 1 v. 134 p.

NIEMEYER, Oscar. **Projeto Arquitetônico do Palácio do Governo da Cidade Administrativa de Minas Gerais**, 2006.

PFEIL,Walter. **Concreto Protendido – Processos Construtivos - Perdas de Protensão**. 2. Ed. Rio de Janeiro: LTC,1983. 2 v. 328 p.

PFEIL,Walter. **Concreto Protendido – Dimensionamento à Flexão**. 1. Ed. Rio de Janeiro: LTC,1983. 3 v. 239 p.

SUSSEKIND, José Carlos. **Curso de Concreto**. 2. Ed. Porto Alegre: Globo, 1981. 1 v. 376 p.

SUSSEKIND, José Carlos. **Projeto Executivo de Estrutura Palácio do Governo da Cidade Administrativa de Minas Gerais**, 2006.

VERÍSSIMO, Gustavo de Souza; CÉSAR JR, Kléos M Lens. **Concreto Protendido**. 4. Ed. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1998. 1 v. 73 p.

## **6. ANEXO**

### ***6.1 Projetos executivos – arquitetura e estrutura***

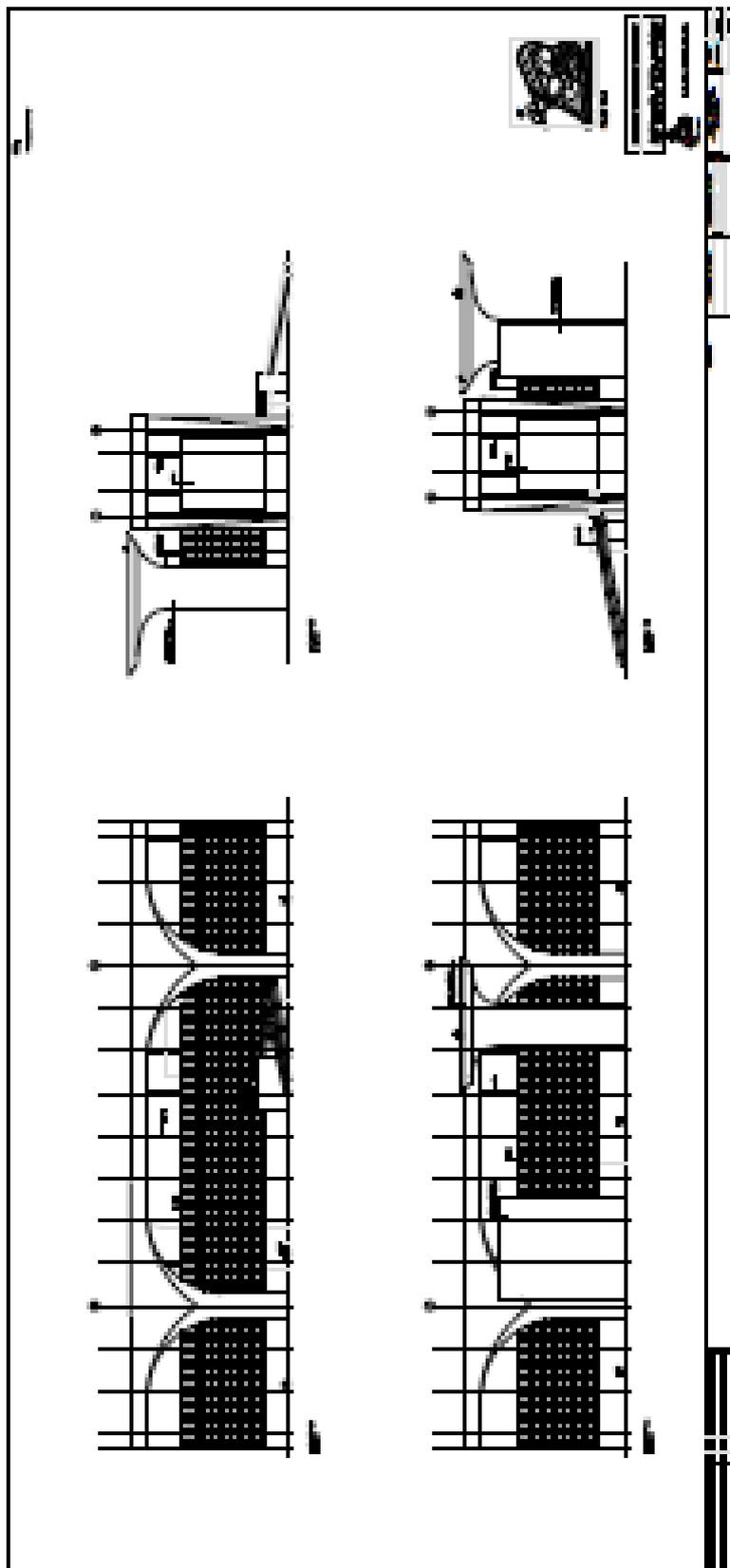


Figura 6.1: Desenho ARQ 112 – Fachadas 01 a 04 (Niemeyer, 2006)

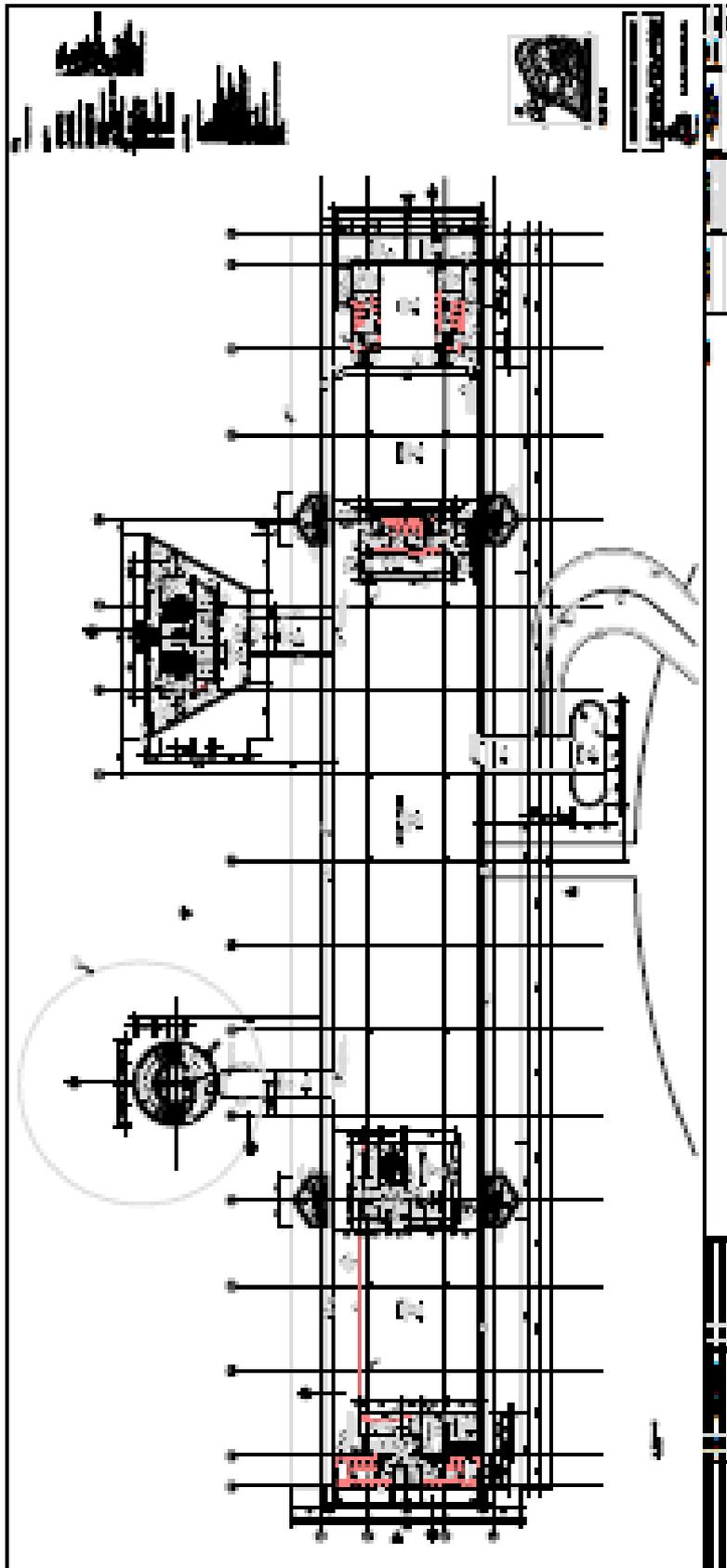


Figura 6.2: Desenho ARQ 102 - 1º. Pavimento (Niemeyer, 2006)

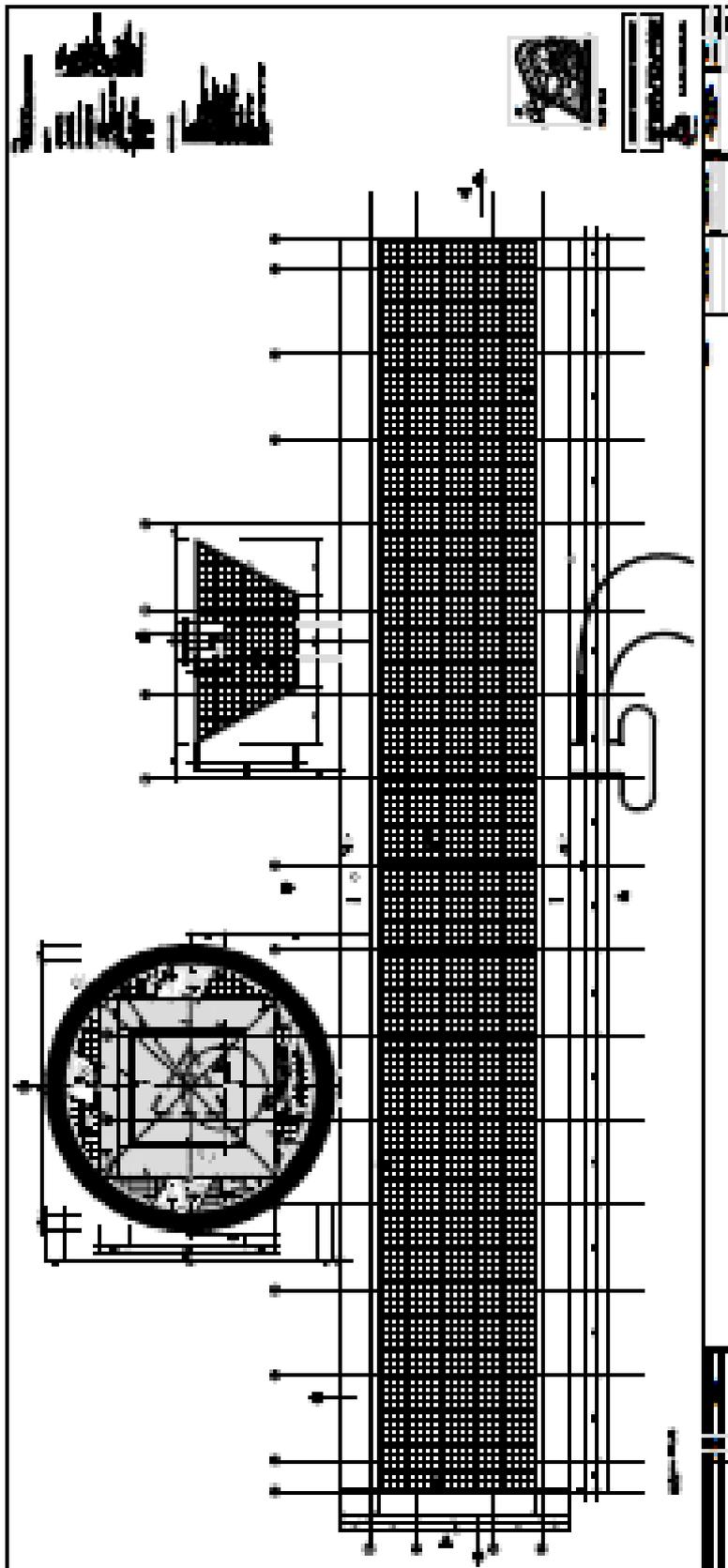


Figura 6.3: Desenho ARQ 108 – Cobertura / Heliporto (Niemeyer, 2006)

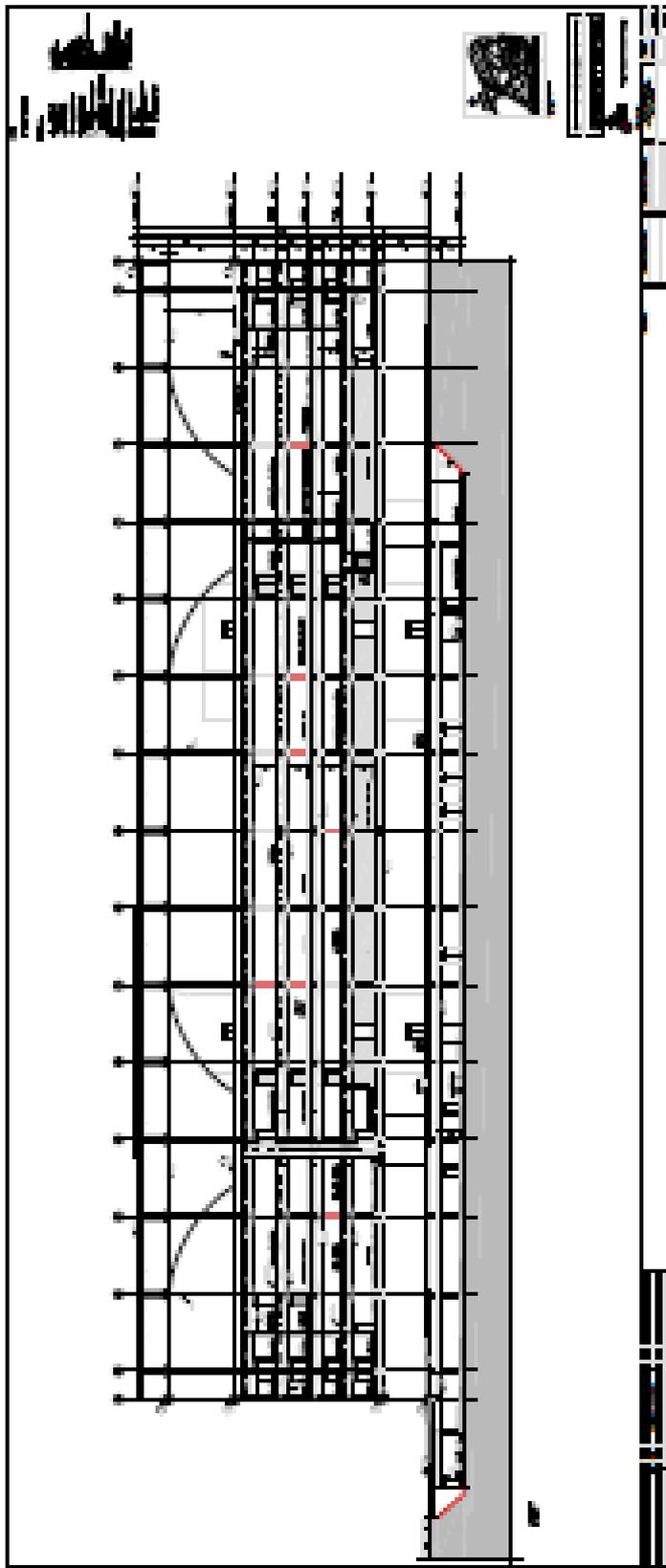


Figura 6.4 Desenho ARQ 109 – Corte AA (Niemeyer, 2006)

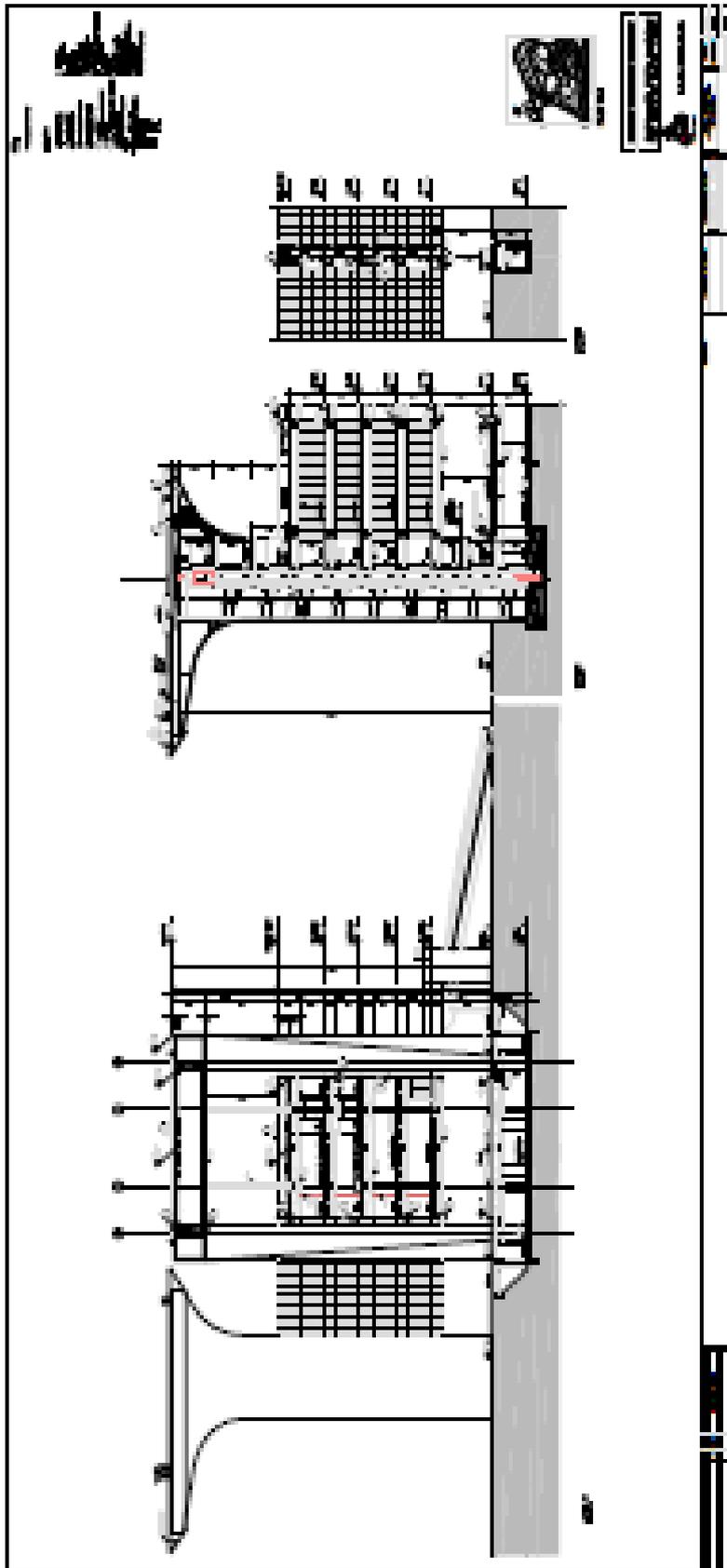


Figura 6.5: Desenho ARQ 110 – Corte BB, CC, DD (Niemeyer, 2006)

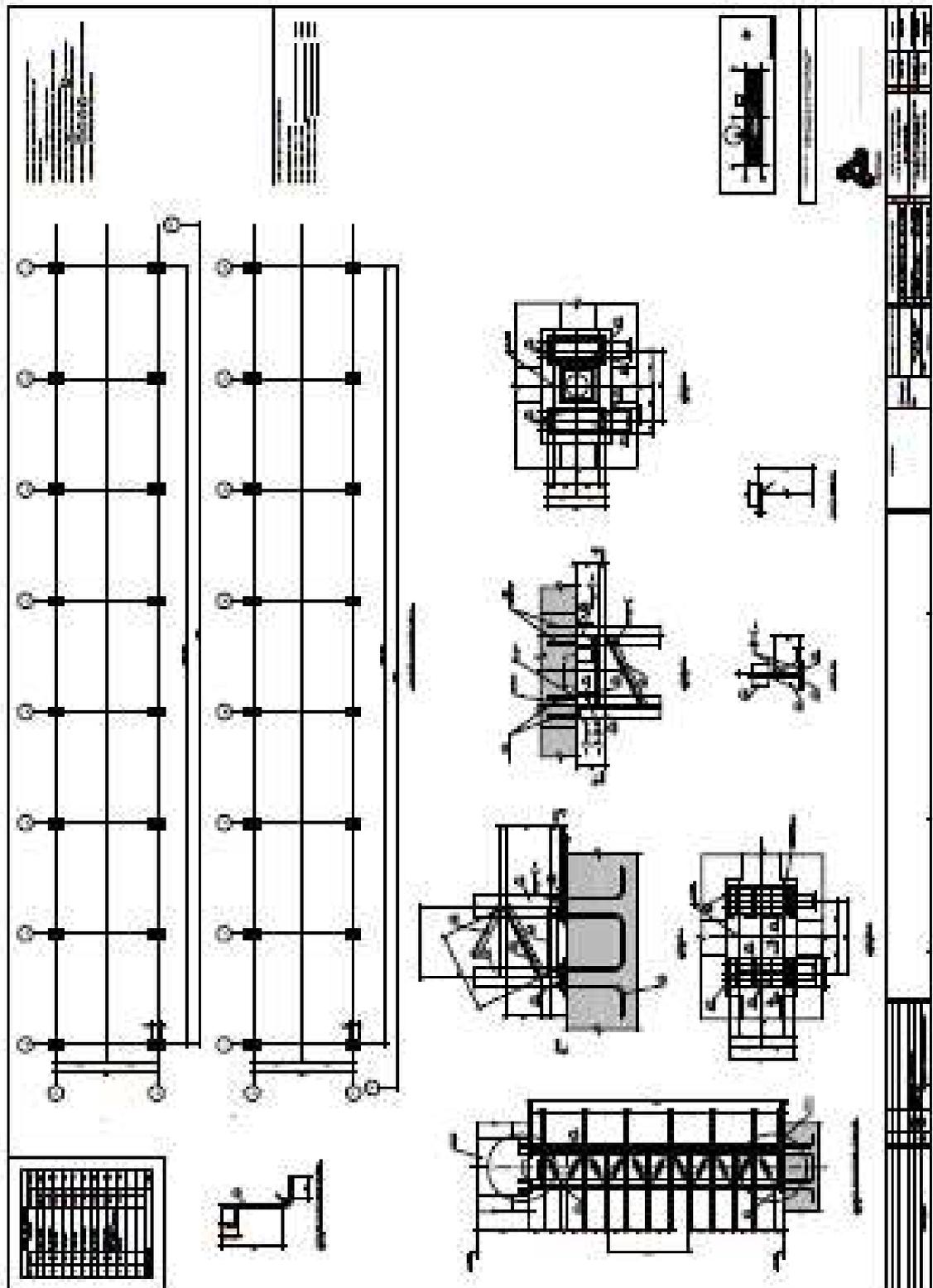


Figura 6.6: Desenho MET 101 – Escoramento provisório (Sussekind, 2006)

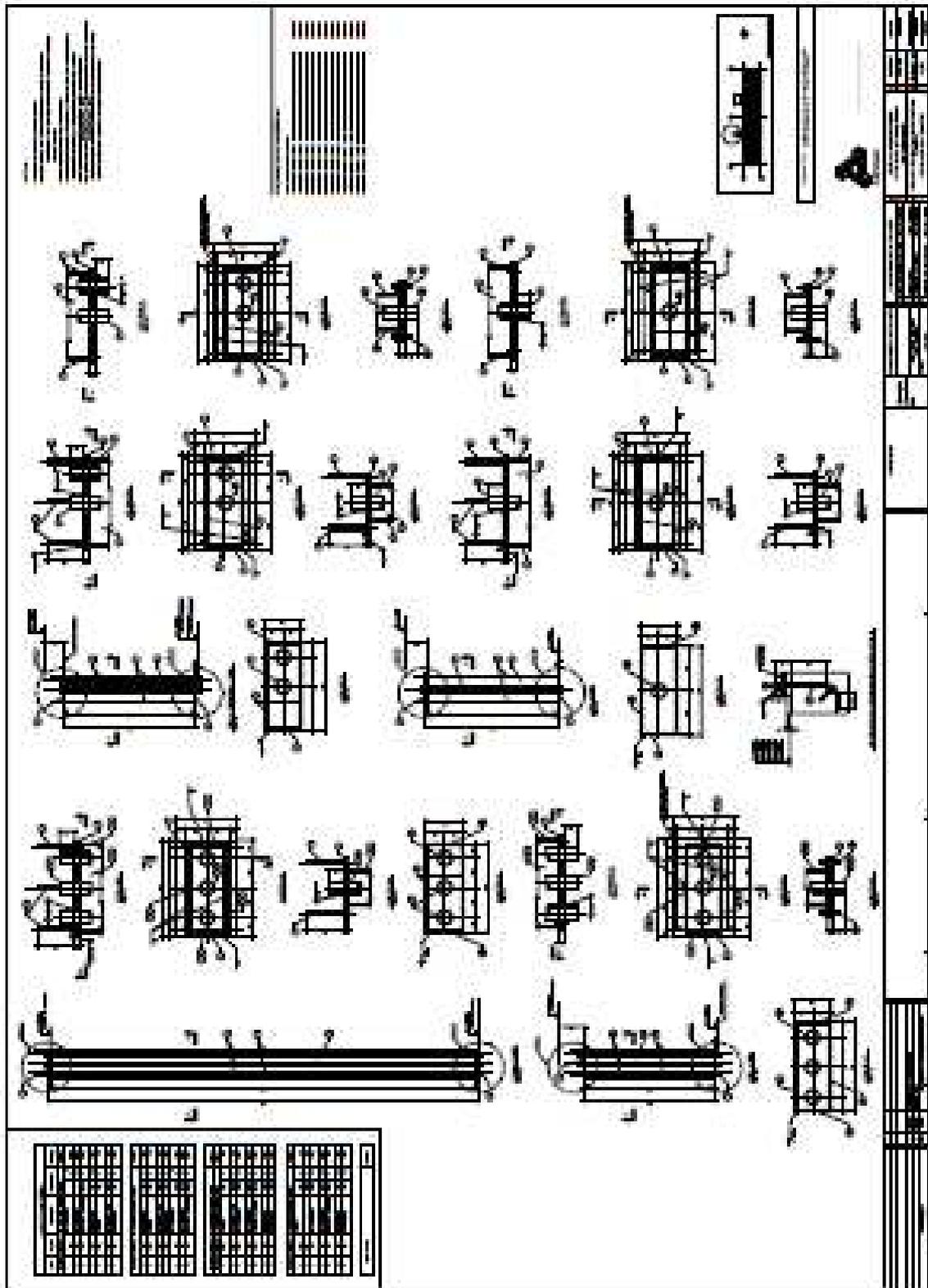


Figura 6.7: Desenho MET 103 – Detalhe dos tirantes (Sussekind, 2006)

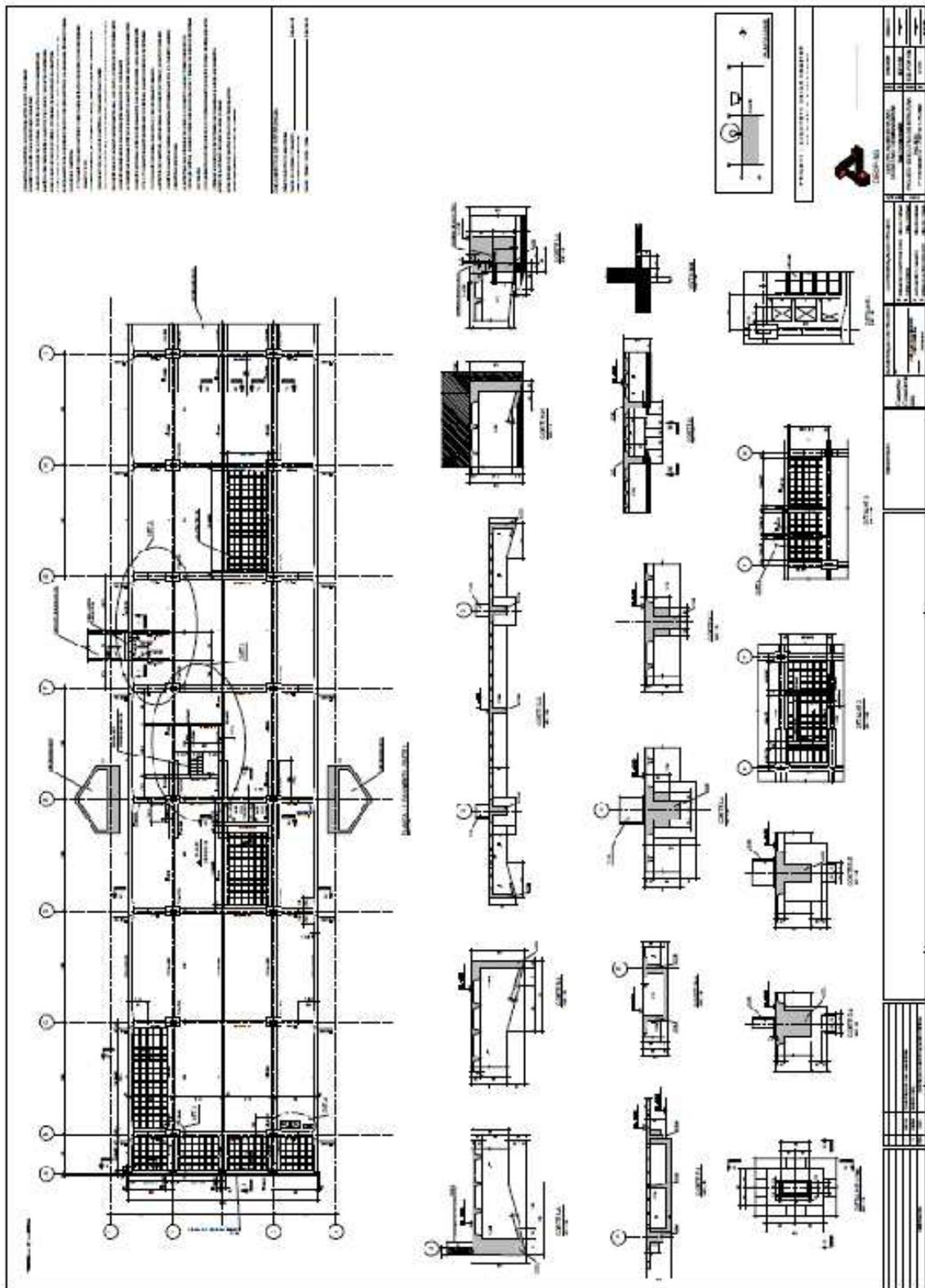


Figura 6.8: Desenho de forma FOR 109 – 1º. Pavimento – parte 1 (Sussekind, 2006)

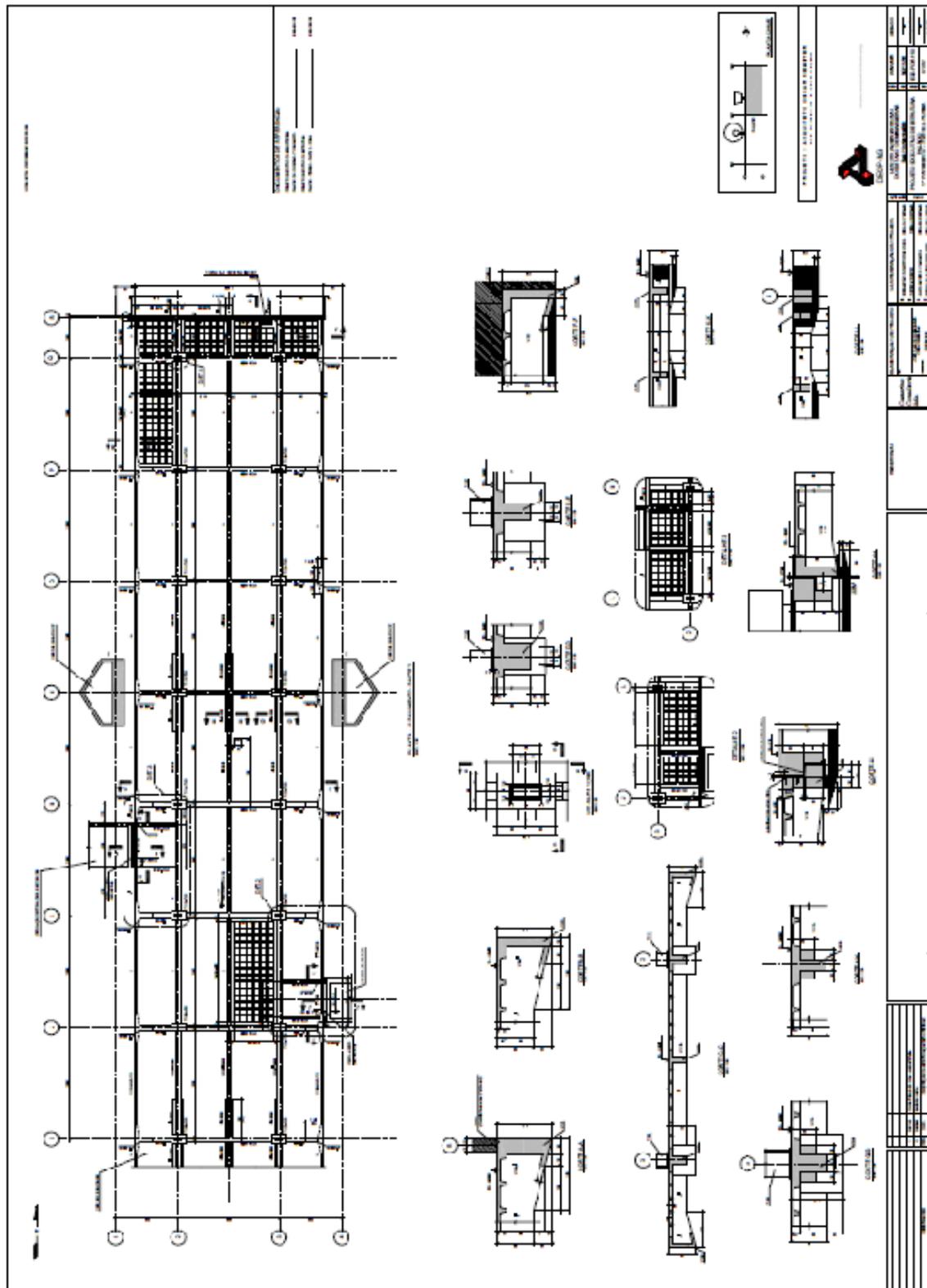


Figura 6.9: Desenho de forma FOR 110 – 1º. Pavimento – parte 2 (Sussekind, 2006)





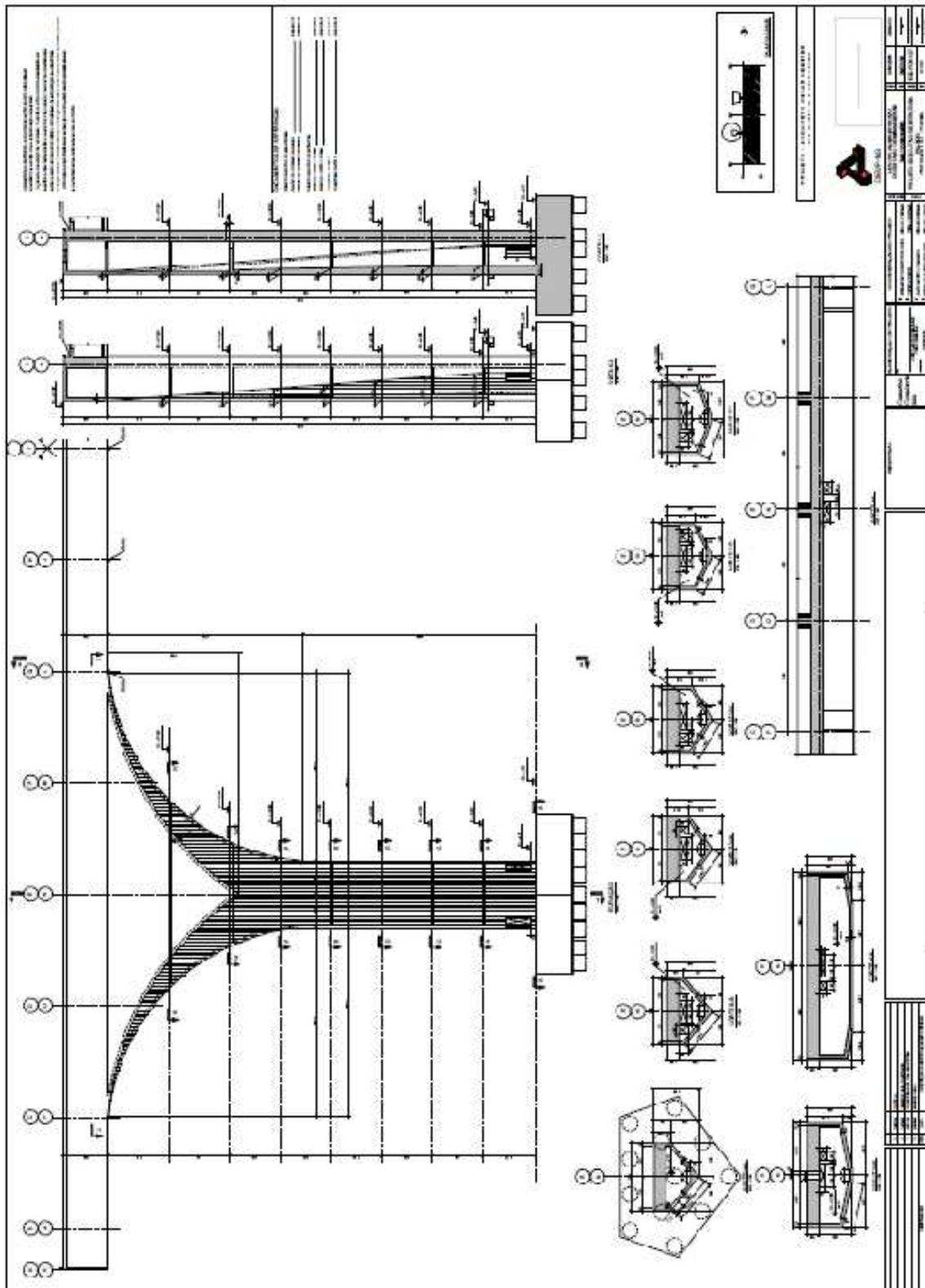


Figura 6.12: Desenho FOR 127 – Pórticos 1 e 2 (Sussekind, 2006)

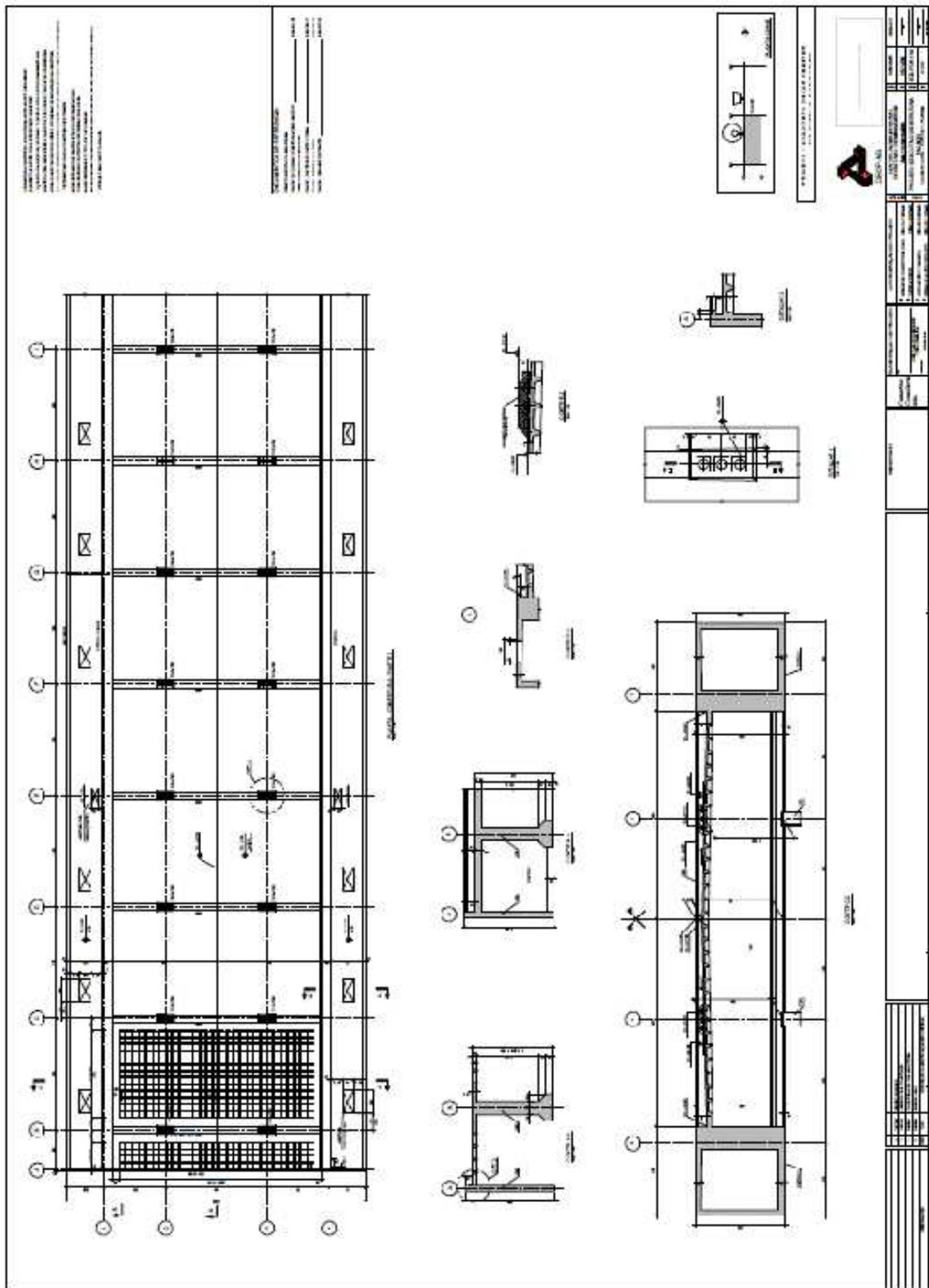


Figura 6.13: Desenho FOR 119 – Cobertura parte 1 (Sussekind, 2006)

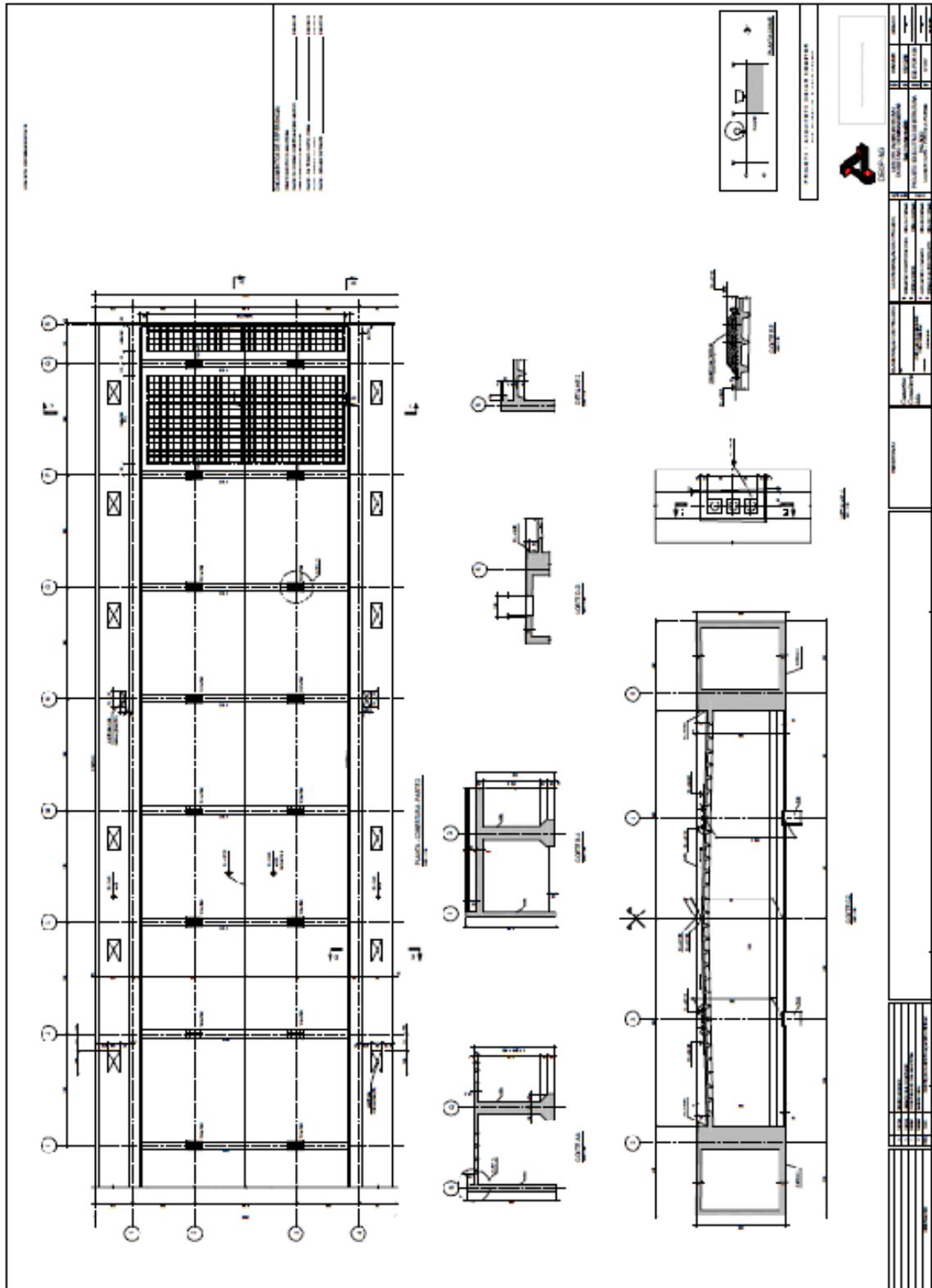


Figura 6.14: Desenho FOR 120 – Cobertura parte 2 (Sussekind, 2006)

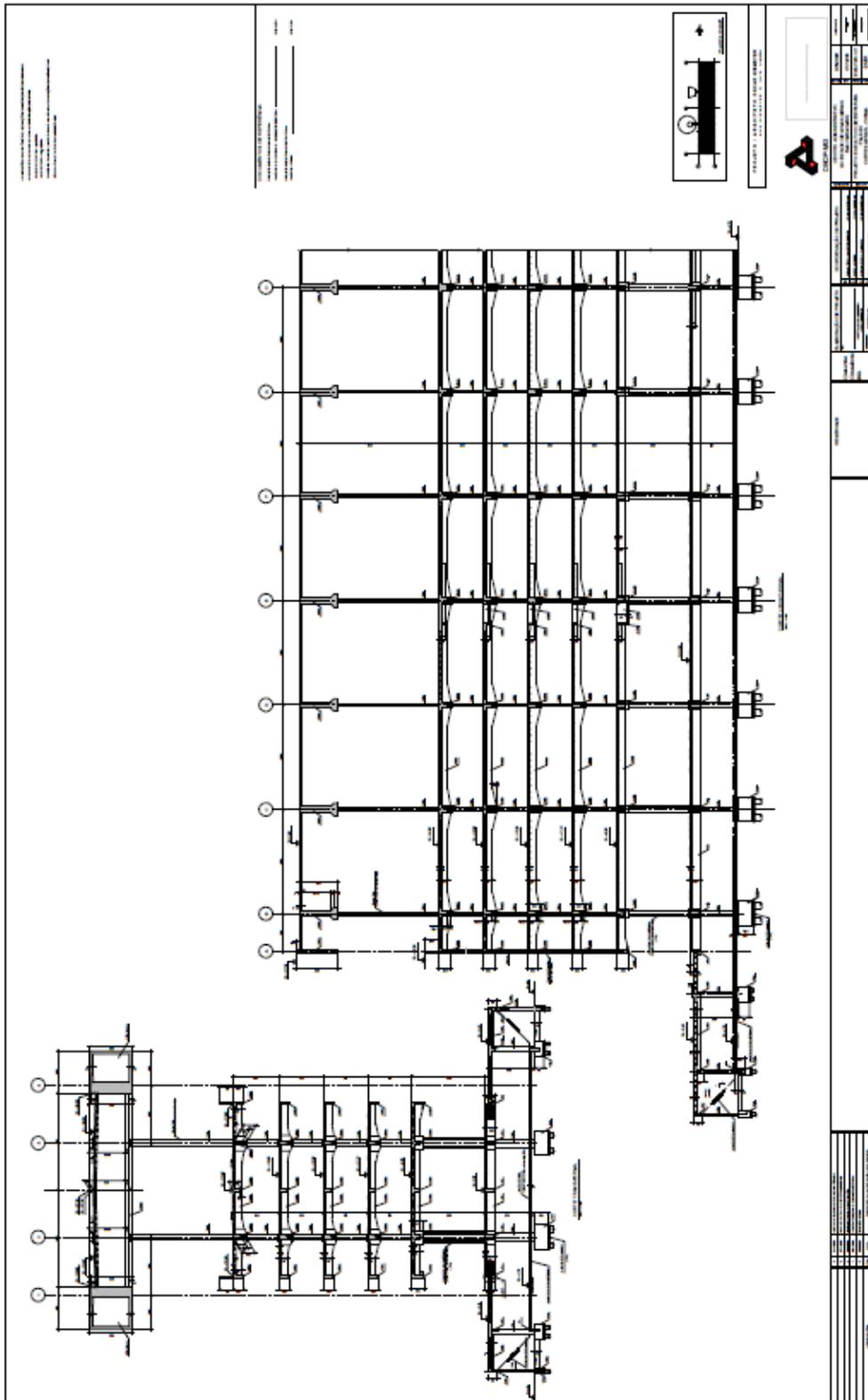


Figura 6.15: Desenho FOR 121 – Cortes gerais (Sussekind, 2006)

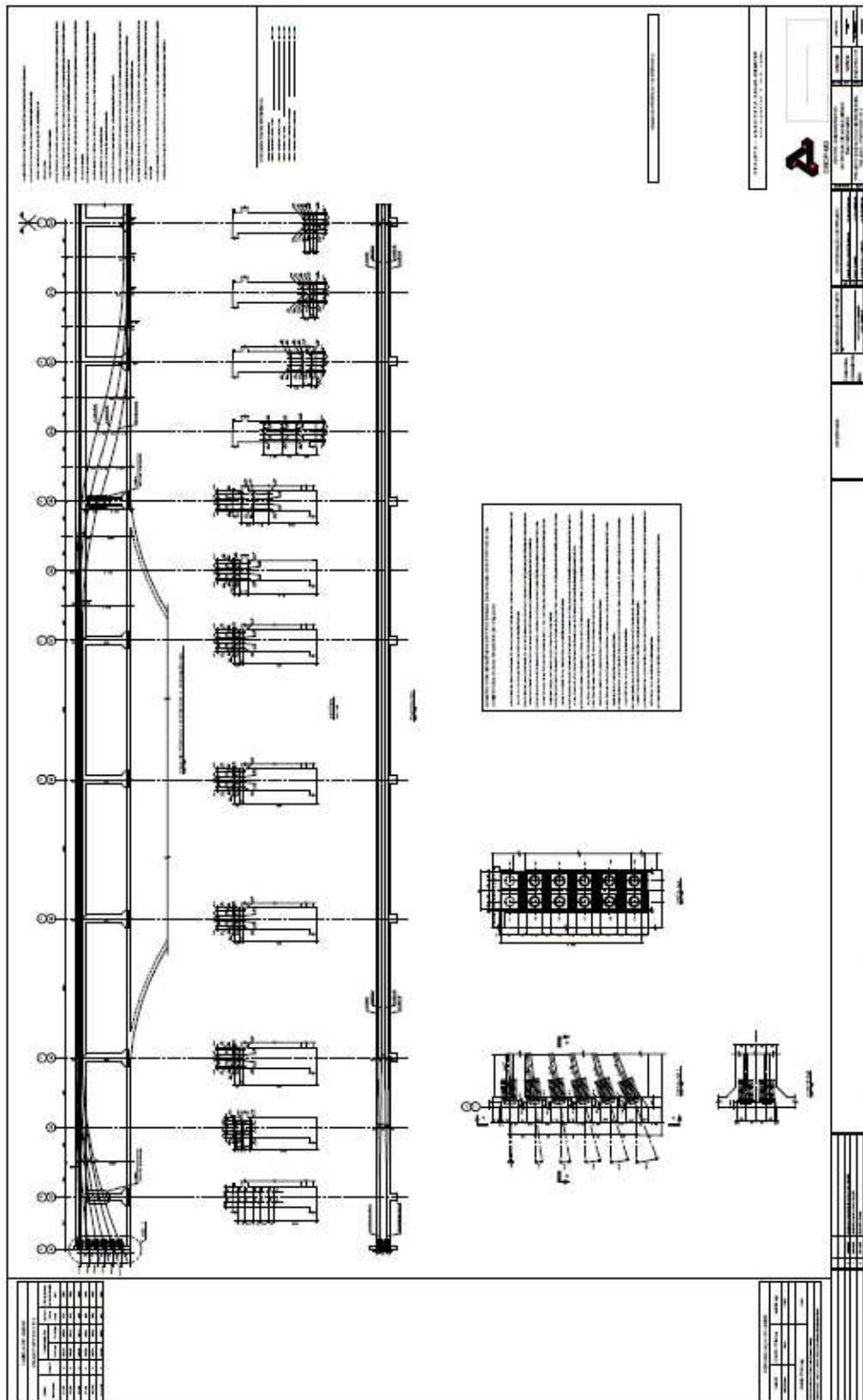


Figura 6.16: Desenho PRO-115 – Protensão vigas longitudinais do pórtico (Sussekind, 2006)

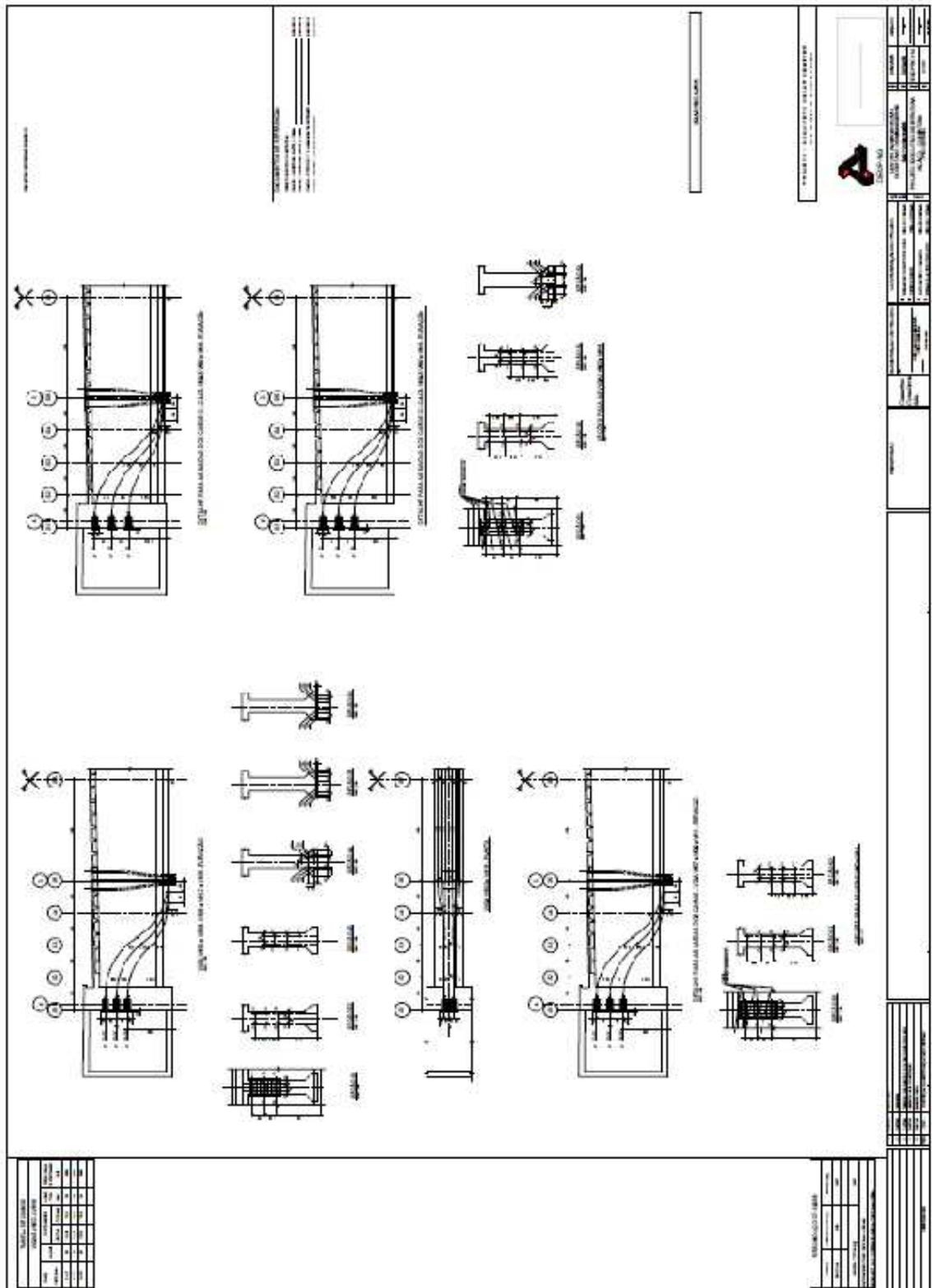


Figura 6.17: Desenho PRO-114 – Protensão vigas transversais da cobertura (Sussekind, 2006)

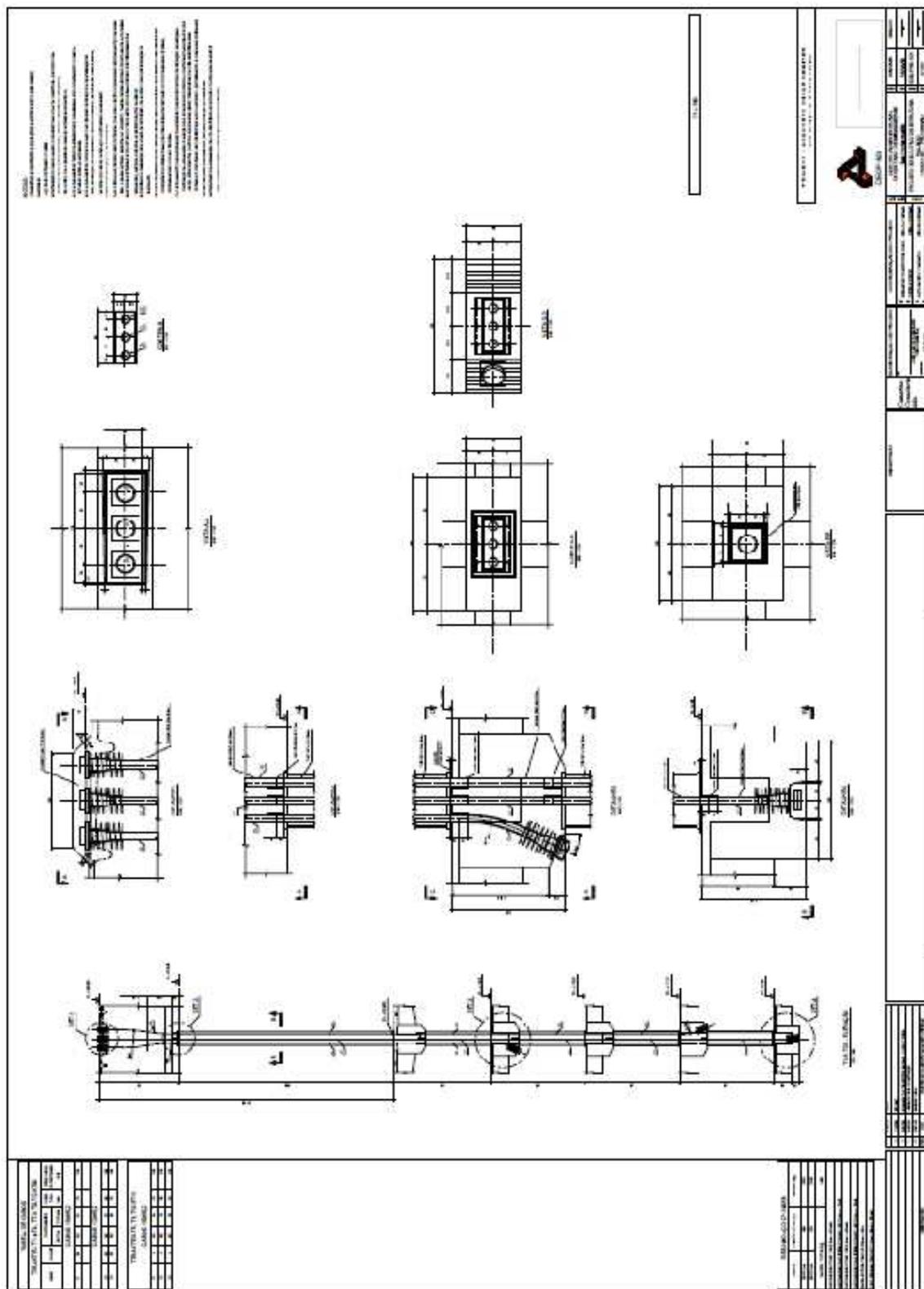


Figura 6.18: Desenho PRO-101 – Protensão dos tirantes (Sussekind, 2006)

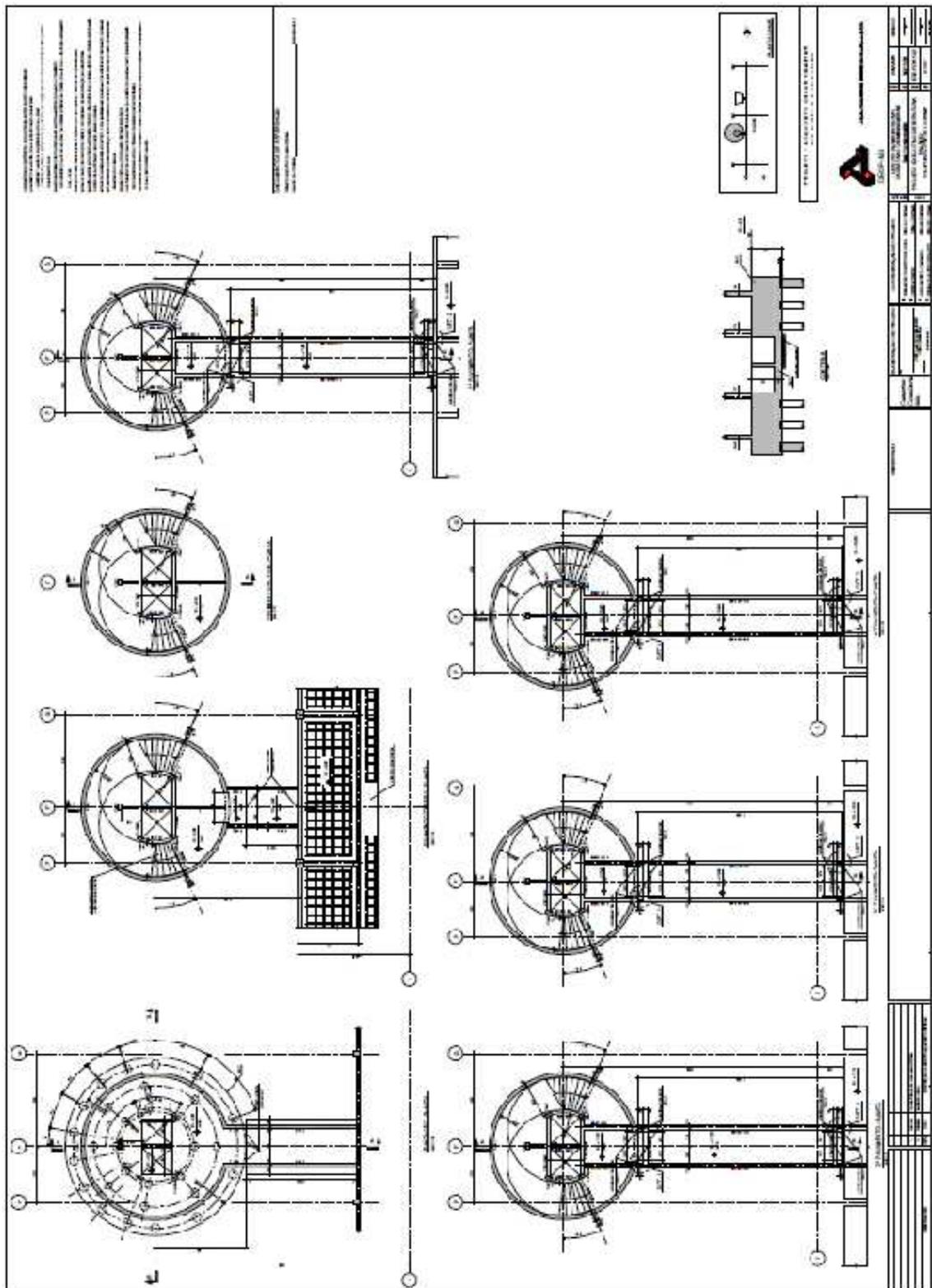


Figura 6.19: Desenho FOR 122 - Heliponto – parte 1 (Sussekind, 2006)

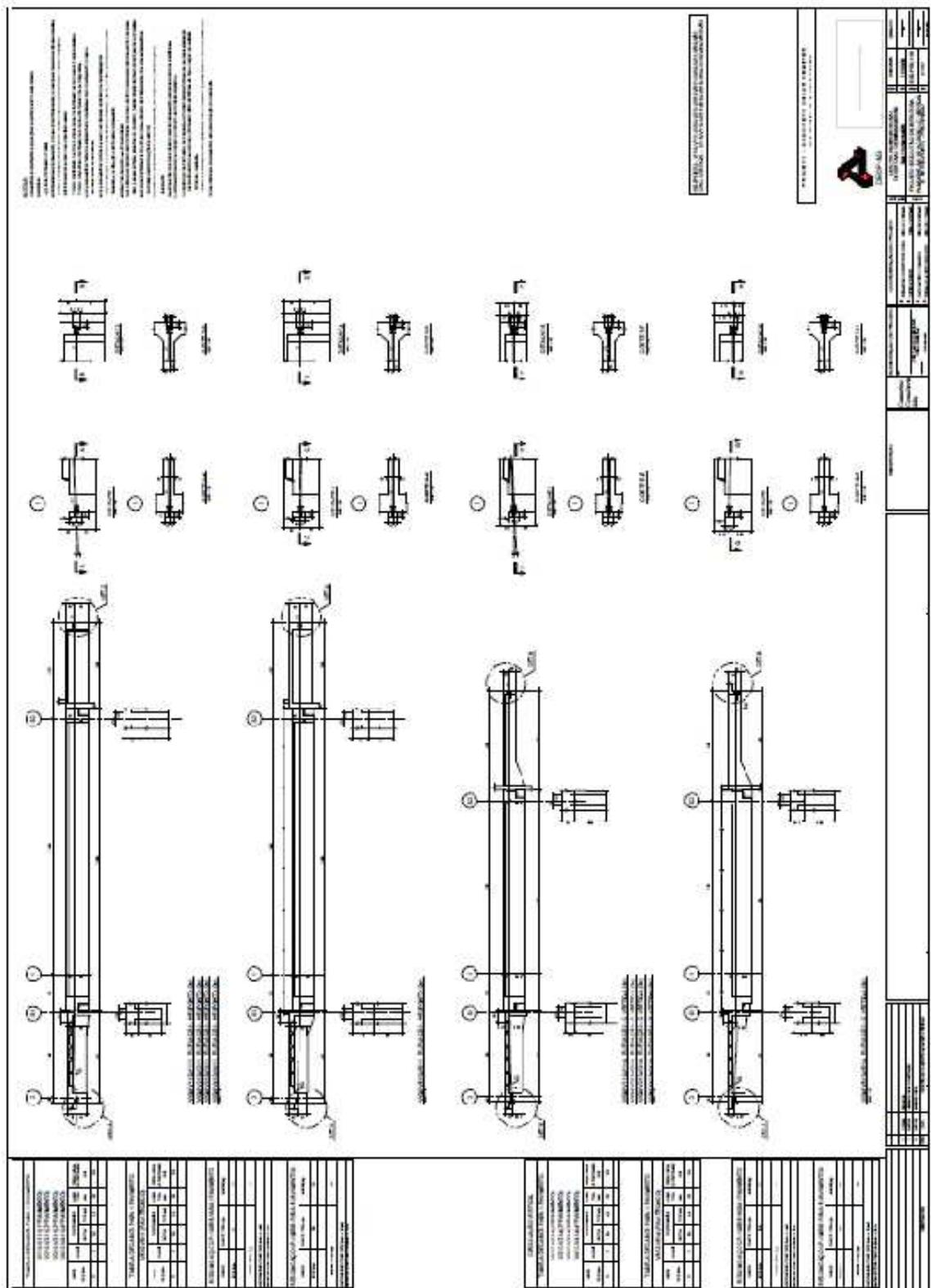


Figura 6.20: Desenho PRO 118 – Passarelas Heliporto e Circulação Vertical (Sussekind, 2006)

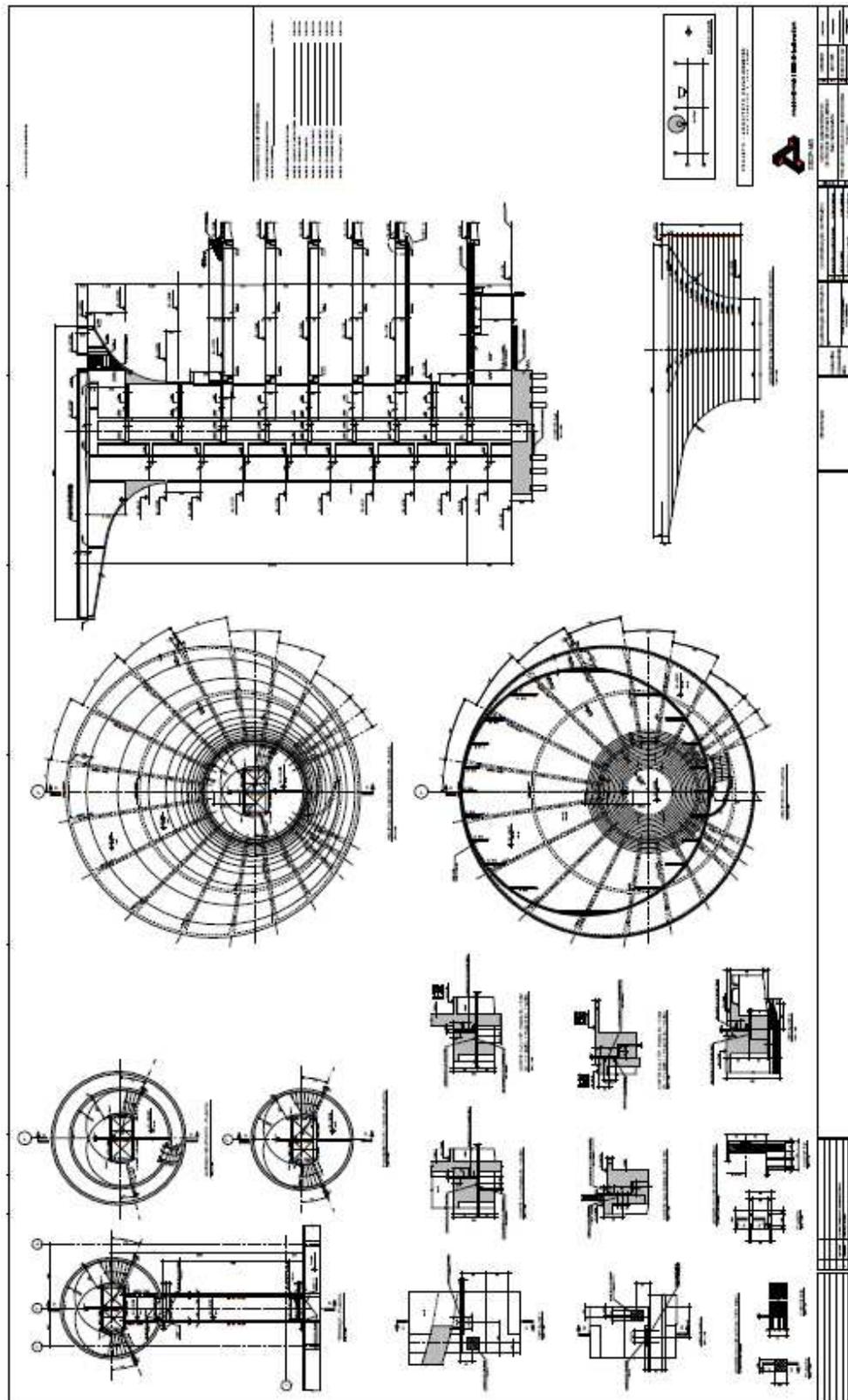


Figura 6.21: Desenho FOR 123 - Heliporto – parte 2

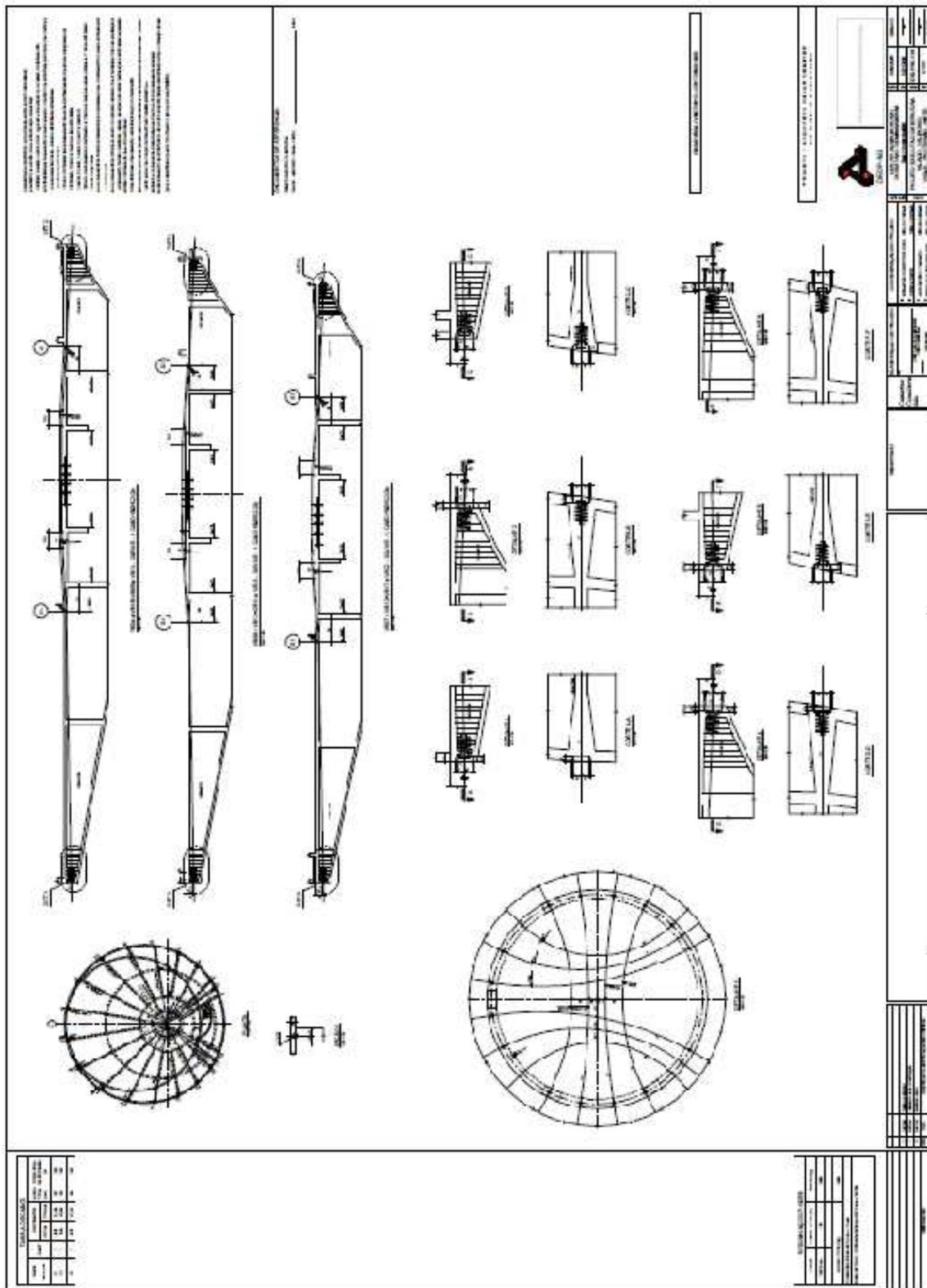


Figura 6.22: Desenho PRO 116 - Heliponto – parte 1

## **6.2 Planejamento e metodologia executiva**

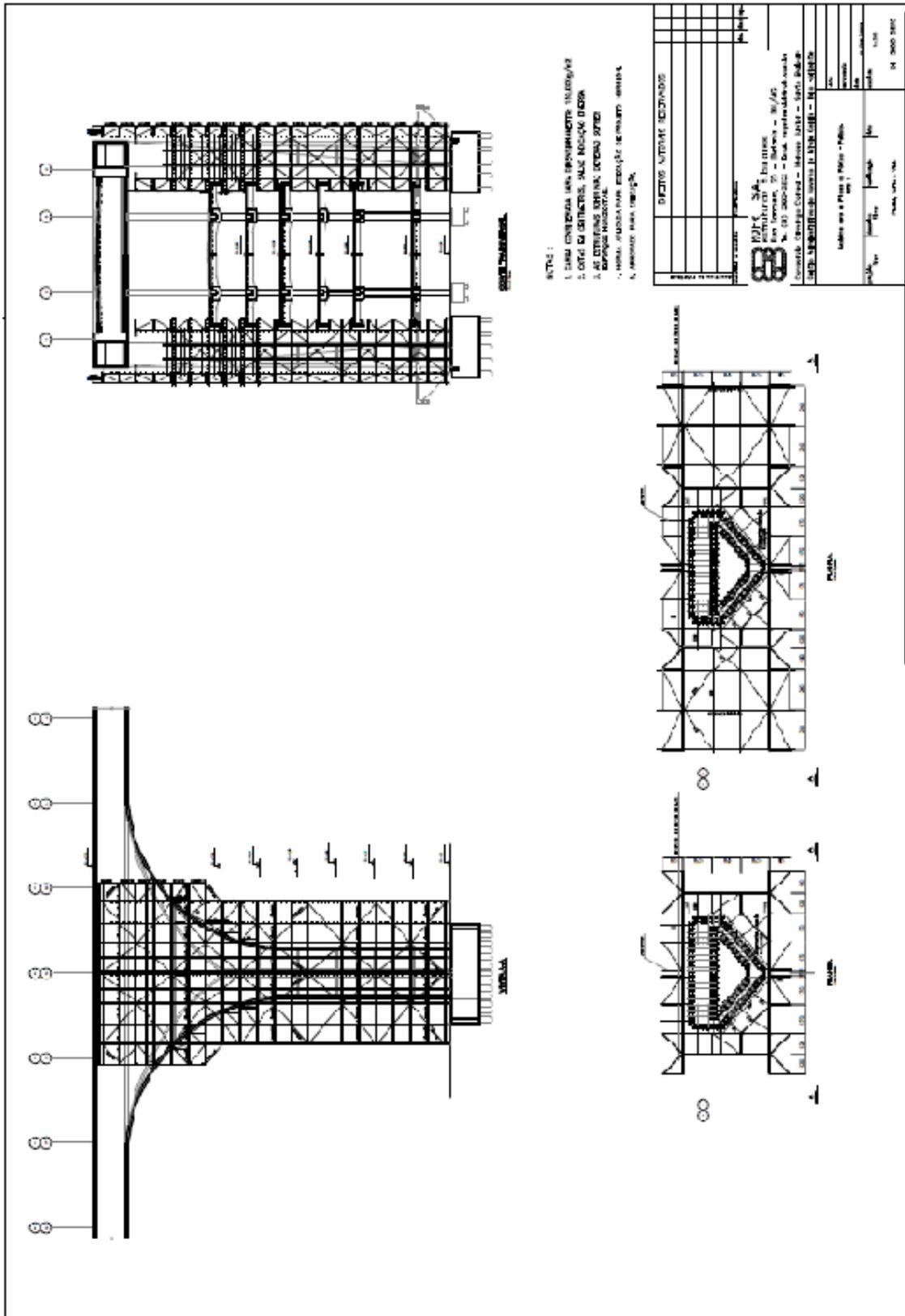


Figura 6.23: Cimbramento dos pilares (Rohr, 2008)







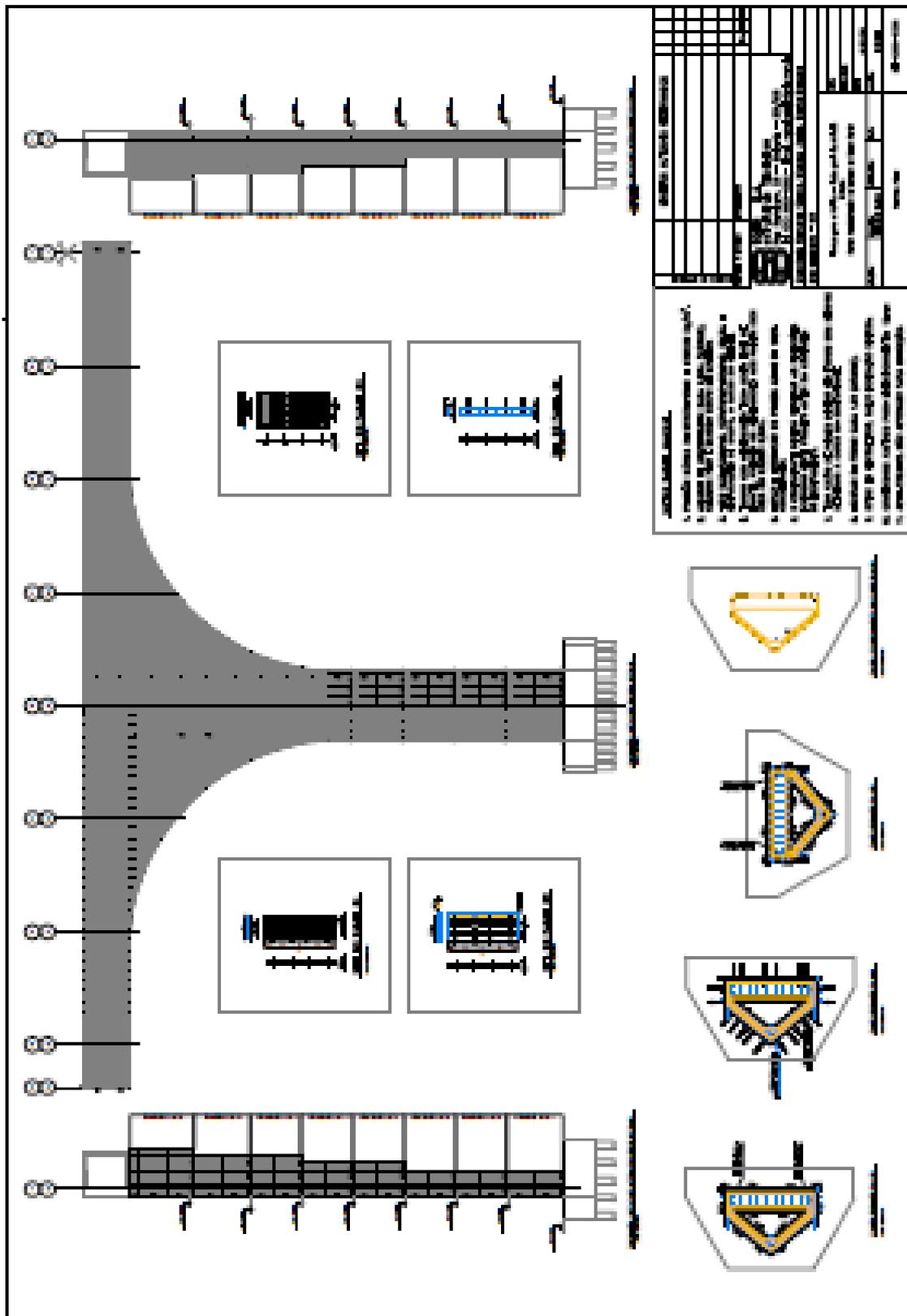


Figura 6.27: Forma dos pilares 2 (Rohr, 2008)

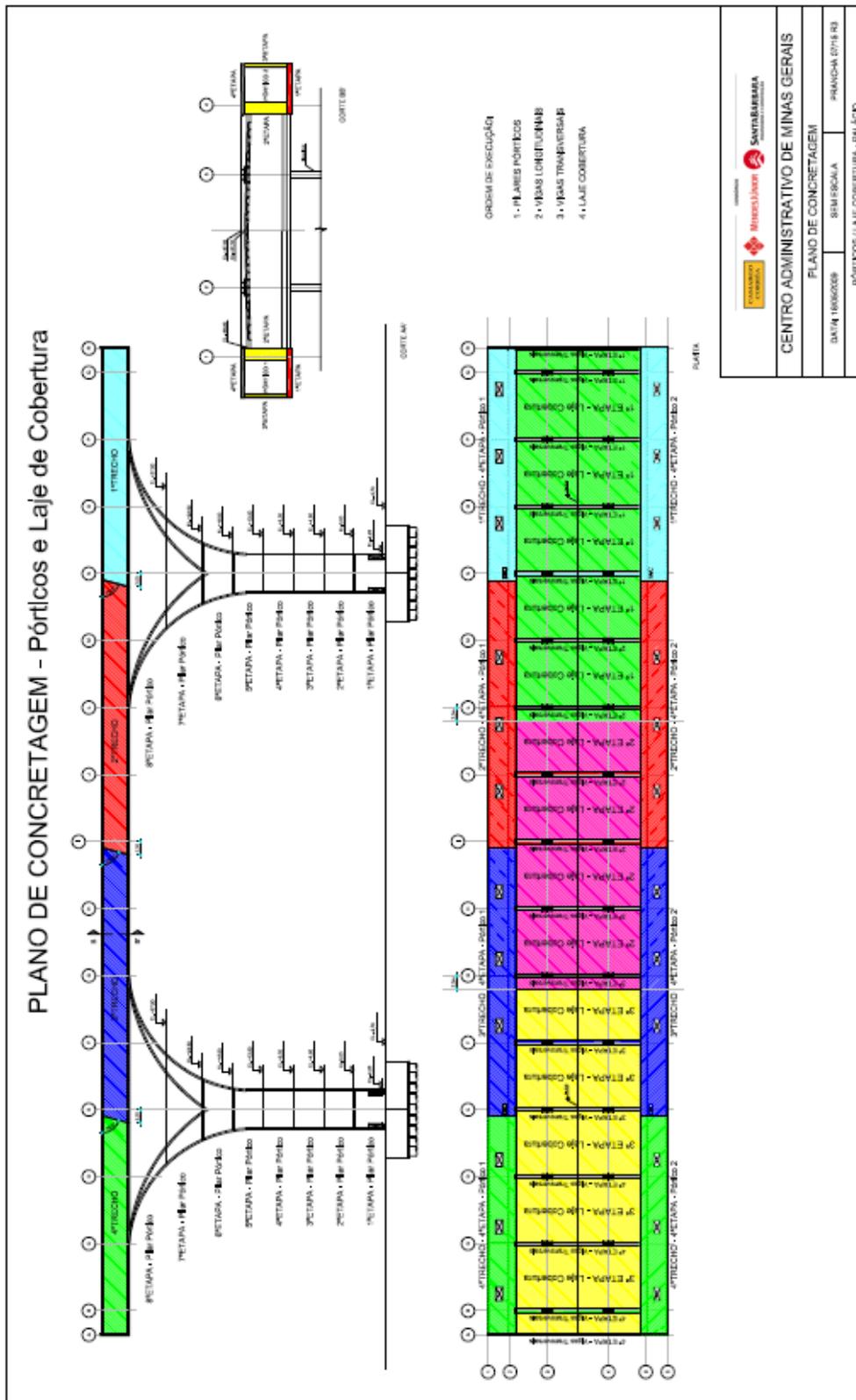


Figura 6.28: Plano de concretagem dos pórticos e cobertura

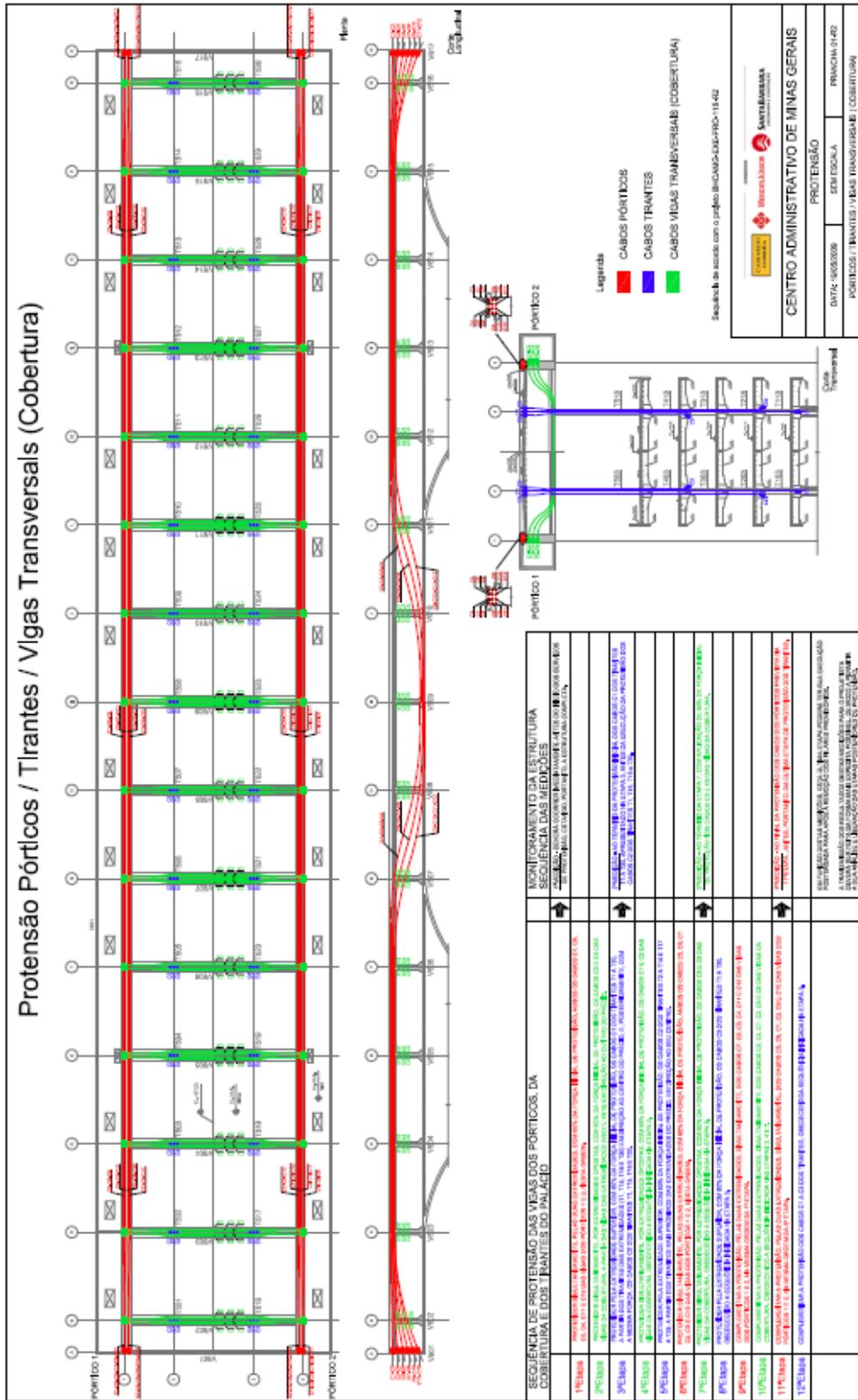


Figura 6.29: Etapas de protensão da estrutura de sustentação



OBRA : CENTRO ADM DO ESTADO DE MINAS GERAIS  
 PT: 058/08  
 CLIENTE : CONSÓRCIO CCCC / MJ / STA BÁRBARA  
 ASSUNTO : SEQUÊNCIA DE PROTENSÃO DA COBERTURA: PORTICOS 1 e 2; V.602 a V.616 e TIRANTES T.1 a T.30  
 DESENHOS: EXE-PRO-101 (TIRANTES); EXE-PRO-114 (VIGAS); EXE-PRO-115 (PORTICOS)  
 LOCAL : COBERTURA DO PALÁCIO

ETAPA	LOCAL	PARCELA DA FORÇA DE PROTENSÃO ETAPA (%)	CABO Nº / SEQUENCIA DE PROTENSÃO	TIPO	BITOLA	CABOS							Nº DE OPERAÇÕES DE PROTENSÃO (n)
						DADOS FINAIS DO CABO ( 100%)				DADOS PARA EXECUÇÃO DA ETAPA DE PROTENSÃO			
						FORÇA INICIAL DE PROTENSÃO (KGF)	COMPR. (m)	PESO AÇO CP 190 RB # (Kg)	ALONG. TEÓRICO (mm)	FORÇA DE PROTENSÃO DA ETAPA (KGF)	PRESSÃO MANOM. (AMC400) (KGF/CM2)	ALONG. TEÓRICO (mm)	
1	PÓRTICOS 1 e 2	60%	C.7	A/A	19 #15,2mm	370.000	150,50	6.433,88	956	222.000	312	574	2
		60%	C.8	A/A	19 #15,2mm	370.000	150,50	6.433,88	956	222.000	312	574	2
		60%	C.3	A/A	19 #15,2mm	370.000	150,25	6.423,19	975	222.000	312	585	2
		60%	C.4	A/A	19 #15,2mm	370.000	150,25	6.423,19	975	222.000	312	585	2
		60%	C.11	A/A	19 #15,2mm	370.000	151,00	6.455,25	941	222.000	312	565	2
		60%	C.12	A/A	19 #15,2mm	370.000	151,00	6.455,25	941	222.000	312	565	2
2	V.602 a V.616	60%	C.3	A/A	15 #15,2mm	293.000	24,05	6.087,66	130	175.800	247	78	15
		60%	C.4	A/A	15 #15,2mm	293.000	24,05	6.087,66	130	175.800	247	78	15
3A	TIRANTES T.1 a T.30	80%	C.1	A/P	15 #15,2mm	225.000	33,10	17.874,00	175	180.000	253	140	30
3B	TIRANTES T.1, T.15, T.16, T.30	80%	C.2	A/P	12 #15,2mm	180.000	29,10	1.676,16	150	144.000	203	120	4
4	V.602 a V.616	60%	C.1	A/A	15 #15,2mm	293.000	24,50	6.201,56	129	175.800	247	77	15
		60%	C.2	A/A	15 #15,2mm	293.000	24,50	6.201,56	129	175.800	247	77	15
5A	TIRANTES T.2 a T.4; T.7 a T.9; T.12 a T.14; T.17	80%	C.2	A/P	12 #15,2mm	180.000	29,10	9.218,88	150	144.000	203	120	22
5B	TIRANTES T.5, T.6; T.10; T.11	80%	C.2	A/P	15 #15,2mm	225.000	29,10	2.095,20	150	180.000	253	120	4
6	PÓRTICOS 1 e 2	60%	C.5	A/A	19 #15,2mm	370.000	150,36	6.427,89	955	222.000	312	573	2
		60%	C.6	A/A	19 #15,2mm	370.000	150,36	6.427,89	955	222.000	312	573	2
		60%	C.1	A/A	19 #15,2mm	370.000	150,15	6.418,91	974	222.000	312	584	2
		60%	C.2	A/A	19 #15,2mm	370.000	150,15	6.418,91	974	222.000	312	584	2
		60%	C.9	A/A	19 #15,2mm	370.000	150,70	6.442,43	939	222.000	312	563	2
		60%	C.10	A/A	19 #15,2mm	370.000	150,70	6.442,43	939	222.000	312	563	2
7	V.602 a V.616	60%	C.5	A/A	15 #15,2mm	293.000	23,62	5.978,81	124	175.800	247	74	15
		60%	C.6	A/A	15 #15,2mm	293.000	23,62	5.978,81	124	175.800	247	74	15
8A	TIRANTES T.1 a T.4; T.7 a T.9; T.12 a T.30	80%	C.3	A/P	12 #15,2mm	180.000	20,70	7.750,08	103	144.000	203	82	26
8B	TIRANTES T.5, T.6; T.10; T.11	80%	C.3	A/P	15 #15,2mm	225.000	20,70	1.490,40	103	180.000	253	82	4
9	PÓRTICOS 1 e 2	100%	C.7	A/A	19 #15,2mm	370.000	150,50	6.433,88	956	370.000	520	956	2
		100%	C.8	A/A	19 #15,2mm	370.000	150,50	6.433,88	956	370.000	520	956	2
		100%	C.3	A/A	19 #15,2mm	370.000	150,25	6.423,19	975	370.000	520	975	2
		100%	C.4	A/A	19 #15,2mm	370.000	150,25	6.423,19	975	370.000	520	975	2
		100%	C.11	A/A	19 #15,2mm	370.000	151,00	6.455,25	941	370.000	520	941	2
		100%	C.12	A/A	19 #15,2mm	370.000	151,00	6.455,25	941	370.000	520	941	2
10	V.602 a V.616	100%	C.3	A/A	15 #15,2mm	293.000	24,05	6.087,66	130	293.000	412	130	15
		100%	C.4	A/A	15 #15,2mm	293.000	24,05	6.087,66	130	293.000	412	130	15
		100%	C.5	A/A	15 #15,2mm	293.000	23,62	5.978,81	124	293.000	412	124	15
		100%	C.6	A/A	15 #15,2mm	293.000	23,62	5.978,81	124	293.000	412	124	15
		100%	C.1	A/A	15 #15,2mm	293.000	24,50	6.201,56	129	293.000	412	129	15
		100%	C.2	A/A	15 #15,2mm	293.000	24,50	6.201,56	129	293.000	412	129	15
11	PÓRTICOS 1 e 2	100%	C.5	A/A	19 #15,2mm	370.000	150,36	6.427,89	955	370.000	520	955	2
		100%	C.6	A/A	19 #15,2mm	370.000	150,36	6.427,89	955	370.000	520	955	2
		100%	C.1	A/A	19 #15,2mm	370.000	150,15	6.418,91	974	370.000	520	974	2
		100%	C.2	A/A	19 #15,2mm	370.000	150,15	6.418,91	974	370.000	520	974	2
		100%	C.9	A/A	19 #15,2mm	370.000	150,70	6.442,43	939	370.000	520	939	2
		100%	C.10	A/A	19 #15,2mm	370.000	150,70	6.442,43	939	370.000	520	939	2
12A	TIRANTES T.1 a T.30	100%	C.1	A/P	15 #15,2mm	225.000	33,10	17.874,00	175	225.000	316	175	30
12B	TIRANTES T.1 a T.4; T.7 a T.9; T.12 a T.30	100%	C.2	A/P	12 #15,2mm	180.000	29,10	9.218,88	150	180.000	253	150	22
12C	TIRANTES T.1 a T.4; T.7 a T.9; T.12 a T.30	100%	C.3	A/P	12 #15,2mm	180.000	20,70	7.750,08	103	180.000	253	103	26
12D	TIRANTES T.5, T.6; T.10; T.11	100%	C.2	A/P	15 #15,2mm	225.000	29,10	2.095,20	150	225.000	316	150	4
12E	TIRANTES T.5, T.6; T.10; T.11	100%	C.3	A/P	15 #15,2mm	225.000	20,70	1.490,40	103	225.000	316	103	4

RESUMO 4 C.J. BOMBAS / MACACOS AMC 400, C/ CABEÇOTES P/ 19, 15 e 12#1/A = ATIVO - ATIVO  
 A/P = ATIVO - PASSIVO PRÉ-CRAVADO AÇO CP 190 RB #15,2mm: 152.168 Kg

Figura 6.30: Plano de protensão da estrutura de sustentação (Protende,2009)