

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

Maicom Jean Hilbig

**PROJETO ESTRUTURAL DE SILO CILÍNDRICO DE CONCRETO
PARA O ARMAZENAMENTO DE CLÍNQUER**

Porto Alegre

Maio/2022

MAICOM JEAN HILBIG

**PROJETO ESTRUTURAL DE SILO CILÍNDRICO DE CONCRETO
PARA O ARMAZENAMENTO DE CLÍNQUER**

Trabalho de Diplomação apresentado à Comissão de Graduação
do Curso de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos
requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientador: Rubem Clécio Schwingel

Porto Alegre

Maio/2022

MAICOM JEAN HILBIG

**PROJETO ESTRUTURAL DE SILO CILÍNDRICO DE CONCRETO
PARA O ARMAZENAMENTO DE CLÍNQUER**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo Professor Orientador e pela Comissão de Graduação (COMGRAD) do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, maio de 2022

Prof. Rubem Clécio Schwingel
Msc. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Orientador

Prof. Enio Carlos Mesacasa Júnior
Dr. pela Universidade de São Paulo
Coordenador

BANCA EXAMINADORA

Prof. Alexandre Rodrigues Pacheco (UFRGS)
Ph.D. pela Pennsylvania State University

Prof. João Ricardo Masuero (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Rubem Clécio Schwingel (UFRGS)
Msc. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

RESUMO

O armazenamento de materiais granulares e líquidos é uma demanda crescente no cenário mundial. A estocagem de tais produtos em silos cilíndricos em diferentes alturas e diâmetros é uma prática usual, tomando vantagem das propriedades mecânicas da estrutura curva, a qual proporciona uma distribuição de esforços vantajosa com relação a recipientes prismáticos de poucas faces, e de sua relação altura/diâmetro e material definidos conforme demanda técnica e econômica do produto a ser acondicionado.

No setor do cimento, uma das demandas especiais é a armazenagem do clínquer, produto granular e rígido, obtido a partir da queima de matérias-primas refinadas em um forno rotativo a altas temperaturas e que após resfriado é estocado em silos a uma temperatura de entrada entre 100°C e 200°C.

Valendo-se da teoria e experiência adquirida nacional e internacionalmente, este trabalho busca conceber, analisar, dimensionar e detalhar a estrutura de um silo de concreto para o armazenamento de clínquer.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	6
2. MEMÓRIA DE CÁLCULO.....	7
2.1. DIRETRIZES DO PROJETO.....	7
2.1.1. Objetivo.....	7
2.1.2. Método.....	7
2.1.3. Delimitação.....	8
2.2. PREMISSAS.....	9
2.2.1. Características da estrutura.....	9
2.2.2. Materiais empregados.....	11
2.3. CARREGAMENTOS E COMBINAÇÕES.....	13
2.3.1. Cargas de vento.....	13
2.3.1.1. Paredes verticais.....	13
2.3.1.2. Cobertura.....	16
2.3.2. Cargas dos equipamentos.....	17
2.3.3. Cargas de armazenamento.....	17
2.3.3.1. Pressões de armazenamento.....	17
2.3.4. Carga térmica.....	25
2.3.5. Combinações de carregamentos.....	26
2.4. MODELO ESTRUTURAL E ANÁLISE.....	28
2.5. DIMENSIONAMENTO.....	33
2.5.1. Cobertura.....	33
2.5.2. Paredes verticais.....	38
2.5.3. Acesso lateral.....	47
2.5.4. Túnel de extração.....	48
2.5.5. Anel de fundações.....	49
3. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	51
3.1. Referências e bases teóricas.....	52
APÊNDICE A – Desenhos técnicos.....	53

1. INTRODUÇÃO

Estruturas especiais como silos para armazenamento de clínquer demandam conhecimentos teóricos e experimentais que não são abordados pelas normas brasileiras. A partir da adequabilidade dos referenciais da norma europeia, da norma americana e da norma brasileira, busca-se estabelecer as bases para o desenvolvimento de projetos especiais como silos de armazenamento de diferentes materiais.

No processo de armazenamento do clínquer em silos, são observados diferentes fenômenos relevantes para o desenvolvimento do projeto de tal estrutura, sendo os principais fenômenos a temperatura elevada do material armazenado, as características de carregamento e descarregamento do material, os requisitos para controle de fissuração e as ações de equipamentos mecânicos sobre o topo da estrutura. A grandeza e a natureza dos carregamentos, assim como as características de abrasividade do material armazenado, faz com que silos de concreto armado e protendido apresentem vantagem nesse tipo de estrutura, podendo ser moldado em diferentes formas e construídos de forma ágil com o emprego de técnicas construtivas como com formas deslizantes.

Seguindo essa abordagem, este trabalho tem por finalidade apresentar um projeto estrutural de um silo em concreto armado e protendido para o armazenamento de clínquer, de forma a englobar os requisitos e recomendações para o acondicionamento do material e segurança da estrutura.

2. MEMÓRIA DE CÁLCULO

2.1. DIRETRIZES DO PROJETO

2.1.1. Objetivo

O objetivo geral do trabalho é conceber, analisar, dimensionar e detalhar a estrutura de um silo para o armazenamento de clínquer, trazendo como referências normativas a norma americana, a norma brasileira e a norma europeia, para um silo construído em Porto Alegre, empregando-se o concreto armado e protendido com pós-tensão não aderente em sua estrutura, assim como o detalhamento para a aplicação da técnica construtiva de formas deslizantes nas paredes verticais.

Como objetivos específicos do trabalho temos:

- Estimar as ações do vento pela norma brasileira e por referenciais de ensaios de túnel de vento
- Estimar as ações de armazenamento pela norma europeia
- Estimar as ações da temperatura pela norma americana
- Elaborar a análise da estrutura da cobertura metálica do silo para referenciais de carregamento sobre o silo de concreto armado utilizando uma ferramenta computacional baseada em elementos finitos
- Elaborar a análise da estrutura de concreto e aço do silo utilizando uma ferramenta computacional baseada em elementos finitos
- Dimensionar a estrutura de concreto armado e protendido do silo
- Detalhar a estrutura de concreto armado e protendido do silo
- Dimensionar a estrutura metálica de cobertura do silo
- Detalhar a estrutura metálica de cobertura do silo

2.1.2. Método

O trabalho foi desenvolvido no formato de projeto de engenharia. Para a elaboração do trabalho a estrutura seguirá as informações geométricas da capacidade de armazenamento, altura e diâmetro pré-estabelecidas, sendo o projeto desenvolvido a partir de tais informações. Dados os parâmetros iniciais, será realizada a estimativa dos carregamentos pelas normas nacionais e internacionais, a concepção e o dimensionamento da estrutura com solução numérica por elementos finitos e o dimensionamento dos elementos de concreto conforme a ABNT NBR 6118/2014 e dos

elementos metálicos pela AISC 360-05/IBC 2006. Por fim, será realizado o detalhamento dos elementos estruturais analisados.

2.1.3.Delimitação

O trabalho se limita ao projeto estrutural do silo segundo uma análise elástico-linear-instantânea e ao dimensionamento estrutural do silo, da cobertura e das fundações, não contemplando o dimensionamento geotécnico das fundações, cujos parâmetros para o dimensionamento estrutural são fornecidos como dados iniciais do projeto.

2.2. PREMISSAS

O projeto do presente trabalho trata de um silo com características fornecidas pelo Cliente A, apresentando premissas particulares para o caso específico, segundo sua geometria e técnicas construtivas disponíveis.

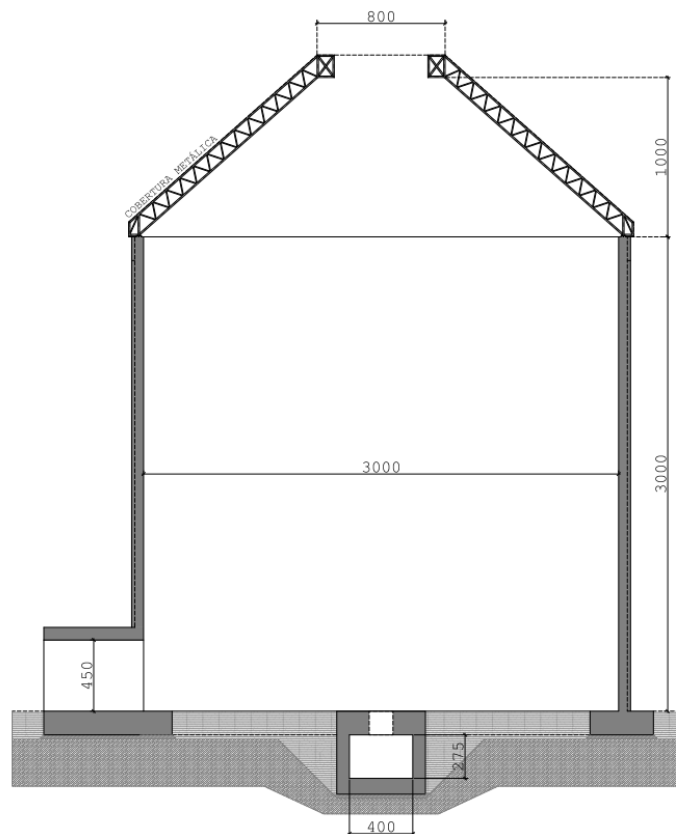
2.2.1. Características da estrutura

As características pré-estabelecidas para o silo correspondem a sua capacidade de armazenamento e condições geométricas ligadas aos projetos mecânicos como o de esteiras transportadoras para a carga e a descarrega do silo, sistemas de filtros e layout da indústria.

As condicionantes fornecidas pela Cliente A, são apresentadas na Figura 1 e na Figura 2 e correspondem a:

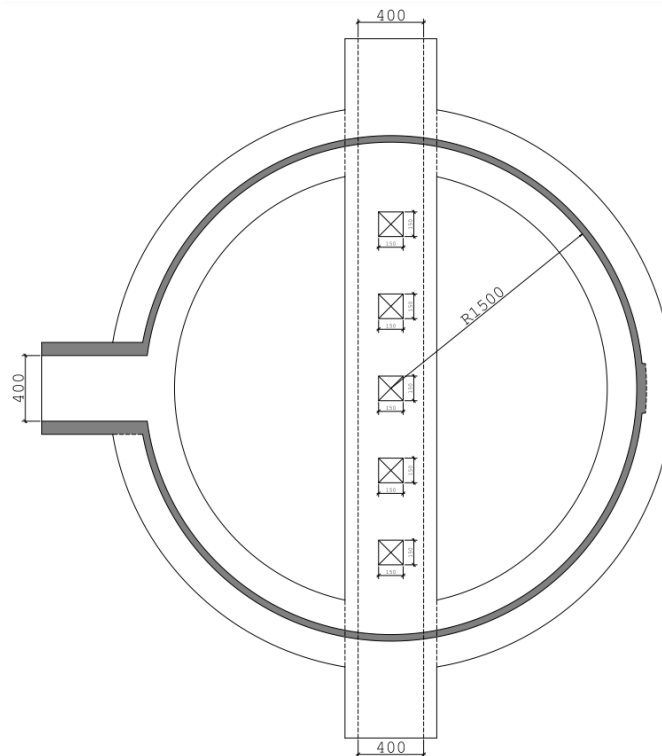
- Capacidade máxima de armazenamento: aproximadamente 35.000 toneladas ou 23.330 m³
- Altura das paredes circulares de concreto: 30 metros
- Altura interna da cobertura cônica: 10 metros
- Diâmetro do anel central da cobertura cônica: 8 metros
- Dimensões do túnel de extração: largura de 4 metros e altura de 2,75 metros
- Dimensões do acesso lateral: largura de 4 metros e altura de 4,50 metros
- Número de descargas de fundo: 5 unidades com abertura de 1,5x1,5 metros
- Parâmetros do solo:
 - Tensão admissível: 4 kgf/cm²
 - Coeficiente de recalque: 8 kgf/cm³

Figura 1 - Características geométricas básicas – Corte (unidades em centímetro)



Fonte: AUTOR, 2022

Figura 2 - Características geométricas básicas – Planta (unidades em centímetro)



Fonte: AUTOR, 2022

2.2.2. Materiais empregados

Para a análise e dimensionamento da estrutura de concreto, com base nos valores mínimos para a classe de agressividade ambiental, CAA III, selecionou-se o concreto de classe C45 (45MPa), classe acima do mínimo recomendado. Os materiais empregados para o reforço do concreto foram o aço passivo CA-50 (500MPa) e o aço ativo em cordoalha engraxada CP-210RB (2100MPa). As características adicionais dos materiais foram calculadas com o auxílio da ferramenta SMath Studio e são apresentadas na Figura 3, na Figura 4 e na Figura 5.

Figura 3 - Características do concreto utilizado

$$\begin{aligned}
 f_{ck} &:= 45 \text{ MPa} & \gamma_c &:= 1,4 \\
 \alpha_E &:= 1 & \alpha_i &:= 0,2 \cdot \frac{f_{ck}}{80} + 0,8 = 0,91 \\
 E_{ci} &:= \alpha_E \cdot 5600 \cdot \sqrt{f_{ck}} \text{ MPa} = 3756,59 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \\
 E_{cs} &:= \alpha_i \cdot E_{ci} = 3427,89 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \\
 f_{cj} &:= 0,8 \cdot f_{ck} = 36 \text{ MPa} \\
 E_{c0} &:= E_{ci} \cdot \sqrt{\frac{f_{cj}}{f_{ck}}} = 3360 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \\
 E_{cs0} &:= 0,87 \cdot E_{c0} = 2923,2 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \\
 \sigma_{cd} &:= 0,85 \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \text{ MPa} = 2,73 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}
 \end{aligned}$$

Figura 4 - Características dos aços utilizados

<u>Aço CP210-RB</u>	<u>Aço CA-50</u>
$\gamma_s := 1,15$	
$f_{ptk} := 210 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$	$f_{yk} := 50 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$
$\sigma_{p0} := 0,8 \cdot f_{ptk} = 168 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$	$f_{yd} := \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = 43,48 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$
$E_p := 20000 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$	$E_p := 21000 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$
$f_{pyk} := 189 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$	
$f_{pyd} := \frac{f_{pyk}}{\gamma_s} = 164,35 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$	
$\sigma_{pi} := \min \left(\left[\begin{array}{l} 0,77 \cdot f_{ptk} \\ 0,85 \cdot f_{pyk} \end{array} \right] \right) = 160,65 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$	

Figura 5 - Limites de protensão

$$\underline{t = t_0}$$

$$f_{ctmj} := 0,3 \cdot f_{cj} \frac{2}{3} \text{ MPa}$$

$$\sigma_{ct0} := 1,2 \cdot f_{ctmj} = 3,92 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{cc0} := 0,7 \cdot f_{cj} \text{ MPa} = 25,2 \text{ MPa}$$

$$\underline{t = t_\infty}$$

$$f_{ctm} := 0,3 \cdot f_{ck} \frac{2}{3} \text{ MPa}$$

$$\sigma_{ct\infty} := 1,2 \cdot f_{ctm} = 4,55 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{cc\infty} := 0,5 \cdot f_{ck} \text{ MPa} = 22,5 \text{ MPa}$$

Já para a análise e dimensionamento da estrutura de aço, selecionou-se o aço A572Gr50 cujas propriedades de mecânicas correspondem a:

- Resistência ao escoamento, f_y : 345 MPa
- Resistência a ruptura, f_u : 450 MPa
- Módulo de elasticidade, E: 200.000 MPa
- Coeficiente de Poisson, ν : 0,3

2.3. CARREGAMENTOS E COMBINAÇÕES

Para a análise estrutural do silo, foram consideradas as ações provenientes do peso próprio da estrutura, do vento, dos equipamentos, do material armazenado e da temperatura. Tais estimativas de carregamento são abordadas nos tópicos seguintes, segundo as normativas e técnicas aplicáveis.

2.3.1. Cargas de vento

Para determinação dos carregamentos variáveis provenientes do vento, sendo essa ação variável importante no caso em que o silo se encontra vazio, subdividiu-se a estrutura em cobertura e paredes verticais do silo.

A estimativa das ações variáveis resultantes da ação do vento sobre as paredes verticais do silo, são realizadas segundo as considerações da NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988). Já para a determinação das ações do vento sobre a cobertura do silo, visto que a geometria proposta não possui aplicação direta das considerações da NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações, tomou-se partido dos resultados experimentais obtidos por Andrade Junior (2002) em túnel de vento.

2.3.1.1. Paredes verticais

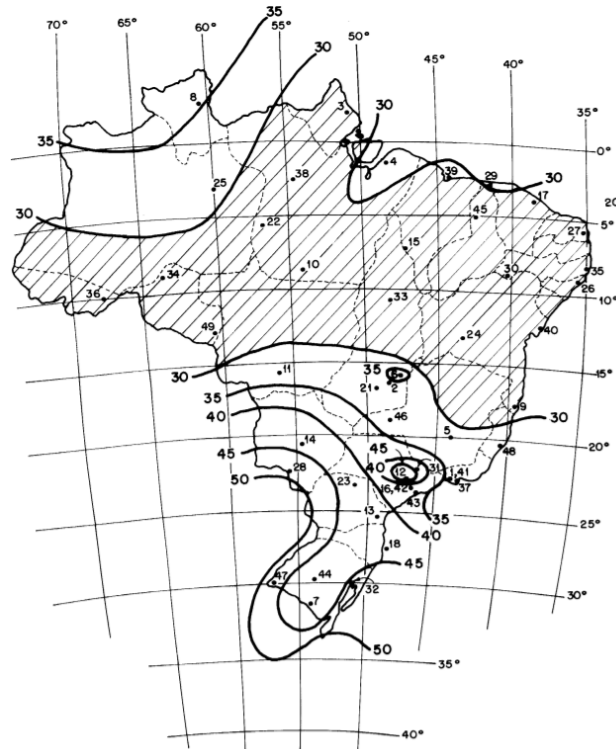
Para a determinação das forças estáticas do vento sobre o silo segundo a NBR 6123, foram realizados os seguintes passos:

- determinação da velocidade básica do vento, V_0
- determinação do fator topográfico, S_1
- determinação do fator de rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura sobre o terreno, S_2
- determinação do fator estatísticos para grau de segurança e vida útil da edificação, S_3
- cálculo da velocidade característica do vento, V_k
- cálculo da pressão dinâmica do vento, q
- cálculo das componentes de força sobre a edificação, F

Para a cidade de Porto Alegre/RS, local de implantação da edificação e fator estatísticos para grau de segurança e vida útil da edificação, tem-se:

- a. $V_0 = 45$ m/s, de acordo de acordo com a localização da edificação no mapa de isopletas da Norma (Figura 6)

Figura 6 - Mapa de isopletas da velocidade básica V_0 (m/s)



Fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 6

- b. $S_1 = 1$, para terreno plano
- c. S_2 , para classificação III-B com terrenos de obstáculos esparsos e edificação com maior dimensão entre 20 e 50 metros, sendo os valores assumidos apresentados na Tabela 1

Tabela 1 – Fator S_2

Intervalos em Z (m)	S_2
0 a 3	0,76
3 a 6	0,85
6 a 9	0,90
9 a 12	0,93
12 a 15	0,96
15 a 18	0,98
18 a 21	0,99
21 a 24	1,00
24 a 27	1,02
27 a 30	1,03

- d. $S_3 = 0,95$, para edificações e instalações industriais com baixo fator de ocupação
- e. V_k é variável conforme altura considerada, sendo calculada a partir da fórmula abaixo, assumindo os valores da Tabela 2

$$V_k = V_0 \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \quad (1)$$

Tabela 2 – Velocidade característica, V_k

Intervalos em Z (m)	V_k (m/s)
0 a 3	32,37
3 a 6	36,21
6 a 9	38,21
9 a 12	39,58
12 a 15	40,64
15 a 18	41,51
18 a 21	42,24
21 a 24	42,88
24 a 27	43,45
27 a 30	43,96

- f. q é variável conforme altura considerada, sendo calculada a partir da fórmula abaixo, assumindo os valores da Tabela 3

$$q = 0,613 \cdot V_k^2 \quad (2)$$

Tabela 3 – Pressão dinâmica do vento, q

Intervalos em Z (m)	q (kN/m²)
0 a 3	0,638
3 a 6	0,804
6 a 9	0,895
9 a 12	0,96
12 a 15	1,01
15 a 18	1,06
18 a 21	1,09
21 a 24	1,13
24 a 27	1,16
27 a 30	1,18

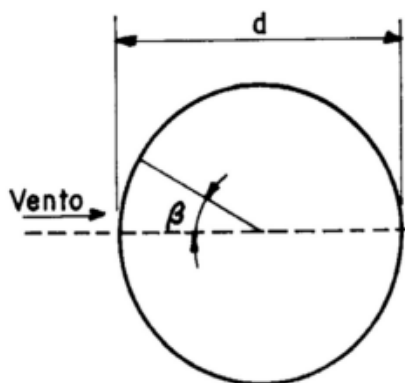
- g. F é variável conforme altura e ângulo do corpo cilíndrico considerado, sendo calculada a partir da fórmula abaixo, assumindo os valores da e com incidência conforme Figura 7

$$F = q \cdot C_{pe} \quad (3)$$

Tabela 4 – Força de arrasto resultante, F

Força de arrasto resultante (kN/m ²)										
β	Intervalos em Z (m)									
	0 a 3	3 a 6	6 a 9	9 a 12	12 a 15	15 a 18	18 a 21	21 a 24	24 a 27	27 a 30
0°	0,64	0,8	0,89	1,00	1,00	1,10	1,10	1,10	1,20	1,20
10°	0,57	0,72	0,81	0,86	0,91	1,00	1,00	1,00	1,00	1,10
20°	0,45	0,56	0,63	0,67	0,71	0,74	0,77	0,79	0,81	0,83
30°	0,22	0,28	0,31	0,34	0,35	0,37	0,38	0,39	0,41	0,41
40°	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
50°	-0,32	-0,40	-0,45	-0,48	-0,51	-0,53	-0,55	-0,56	-0,58	-0,59
60°	-0,67	-0,84	-0,94	-1,00	-1,10	-1,10	-1,10	-1,20	-1,20	-1,20
70°	-0,8	-1,00	-1,10	-1,20	-1,30	-1,30	-1,40	-1,40	-1,40	-1,50
80°	-0,83	-1,00	-1,20	-1,20	-1,30	-1,40	-1,40	-1,50	-1,50	-1,50
90°	-0,77	-1,00	-1,10	-1,20	-1,20	-1,30	-1,30	-1,40	-1,40	-1,40
100°	-0,54	-0,68	-0,76	-0,82	-0,86	-0,9	-0,93	-1,00	-1,00	-1,00
120°	-0,26	-0,32	-0,36	-0,38	-0,41	-0,42	-0,44	-0,45	-0,46	-0,47
140°	-0,16	-0,20	-0,22	-0,24	-0,25	-0,26	-0,27	-0,28	-0,29	-0,30
160°	-0,16	-0,20	-0,22	-0,24	-0,25	-0,26	-0,27	-0,28	-0,29	-0,30
180°	-0,16	-0,20	-0,22	-0,24	-0,25	-0,26	-0,27	-0,28	-0,29	-0,30

Figura 7 – Ângulo de incidência do vento



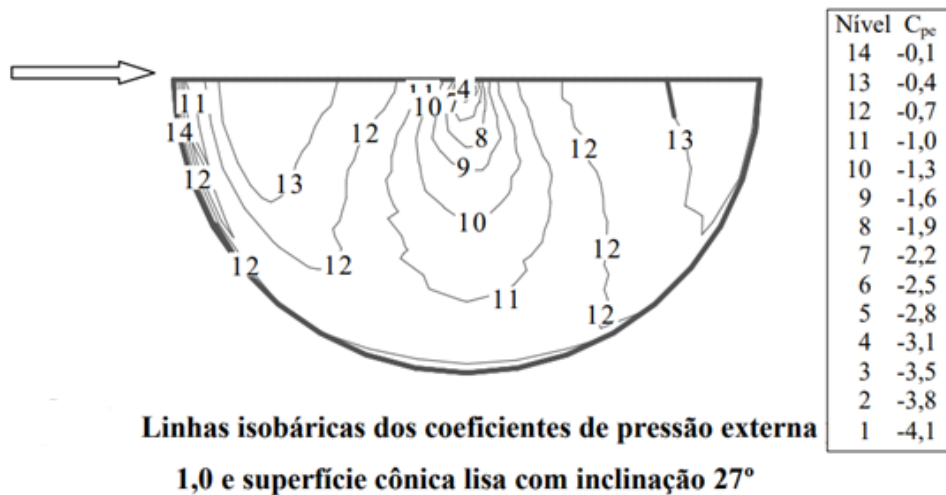
Fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 19

2.3.1.2. Cobertura

Devido a não aplicabilidade da norma NBR 6123 para coberturas do tipo cônicas, tomou-se como referência para a determinação das ações variáveis devidas ao vento, os resultados obtidos por Andrade Junior (2002) em túnel de vento.

Os valores de coeficientes de pressão externa obtidos por Andrade Junior (2002) e adotados para o presente projeto são apresentados na Figura 8.

Figura 8 – Coeficientes de pressão externa para cobertura cônica



Fonte: ANDRADE JUNIOR, L.J., 2002, p. 144

2.3.2.Cargas dos equipamentos

Os carregamentos provenientes dos equipamentos seguem o especificado pelo Cliente A, dos quais obteve-se os seguintes carregamentos sobre o anel central da cobertura metálica:

- Peso próprio do filtro de mangas: 115 kN
- Peso próprio do ventilador: 6 kN
- Máxima reação vertical total do transportador: 99 kN
- Máxima reação horizontal total em Y do transportador por ação do vento: 39 kN
- Máxima reação horizontal total em X do transportador por ação do vento: 8 kN
- Sobrecarga na área de operação: 5 kN/m²

2.3.3.Cargas de armazenamento

Com base nas características físicas do material armazenado e geométricas do silo, valendo-se das referências normativas nacionais e internacionais, os carregamentos sobre a estruturas foram calculados com o auxílio do programa matemático SMath Studio a partir de código elaborado pelo autor.

2.3.3.1. Pressões de armazenamento

A estimativa dos carregamentos sobre as superfícies internas do silo, provenientes do material armazenado, é realizada de acordo com a norma internacional EN1991-4/2006: Eurocode 1 – Actions on Structures – Part 4: Silos and Tanks (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006).

Para a aplicação da norma EN 1991-4/2006:

- Determina-se as propriedades do material com base em ensaios de caracterização ou em bases de dados
- Classifica-se o silo quanto as suas propriedades geométricas
- Calcula-se as ações provenientes do armazenamento do material

Para as características do material armazenado, temos:

- Peso específico superior, $\gamma_u = 18 \text{ kN/m}^3$
- Peso específico inferior, $\gamma_l = 15 \text{ kN/m}^3$
- Ângulo de repouso, $\varphi_r = 33^\circ$ (Valor corrigido conforme BAEL-BPEL91)
- Ângulo de atrito interno, $\varphi_{im} = 40^\circ$
- Coeficiente, $a_\varphi = 1,2$
- Valor médio de pressões laterais, $K_m = 0,38$
- Relação de pressões laterais, $a_K = 1,31$
- Fator de amplificação da carga, $C_{op} = 0,7$
- Coeficiente de atrito com a parede, $\mu = 0,62$
- Coeficiente, $a_\mu = 1,07$

Para a classificação do silo, temos:

- Esbeltez: intermediária, com esbeltez $1 < h_c/d_c < 2$
- Capacidade de armazenamento: Classe 3, com armazenamento superior a 10.000 toneladas

Através das características do material armazenado, para o silo de Classe 3, calculou-se os limites superiores e inferiores das propriedades físicas do material e através das fórmulas apresentadas a seguir:

$$\varphi_{il} := \frac{\varphi_{im}}{a_\varphi} = 0,582 \quad (4)$$

$$\varphi_{iu} := \varphi_{im} \cdot a_\varphi = 0,838 \quad (5)$$

$$\mu_l := \frac{\mu}{a_\mu} = 0,579 \quad (6)$$

$$\mu_u := \mu \cdot a_\mu = 0,663 \quad (7)$$

$$K_l := \frac{K_m}{a_k} = 0,290 \quad (8)$$

$$K_u := K_m \cdot a_k = 0,498 \quad (9)$$

Sendo:

- φ_{il} : valor inferior do ângulo de carga de atrito interno (em radianos)
- φ_{iu} : valor superior do ângulo de carga de atrito interno (em radianos)
- μ_l : valor inferior do coeficiente de atrito com a parede
- μ_u : valor superior do coeficiente de atrito com a parede
- K_l : valor inferior de pressões laterais
- K_u : valor superior de pressões laterais

Para as características geométricas do silo, temos:

- Diâmetro interno, $d_c = 30$ m
- Altura do segmento de parede vertical, $h_c = 30$ m
- Máxima excentricidade da pilha do material armazenado, $e_f = 5$ m
- Altura total da pilha superior do material armazenado, $h_{tp} = 10,10$ m

Com base nas características geométricas do silo, calculou-se as propriedades geométricas adicionais do silo, que são apresentadas abaixo e ilustradas na Figura 9:

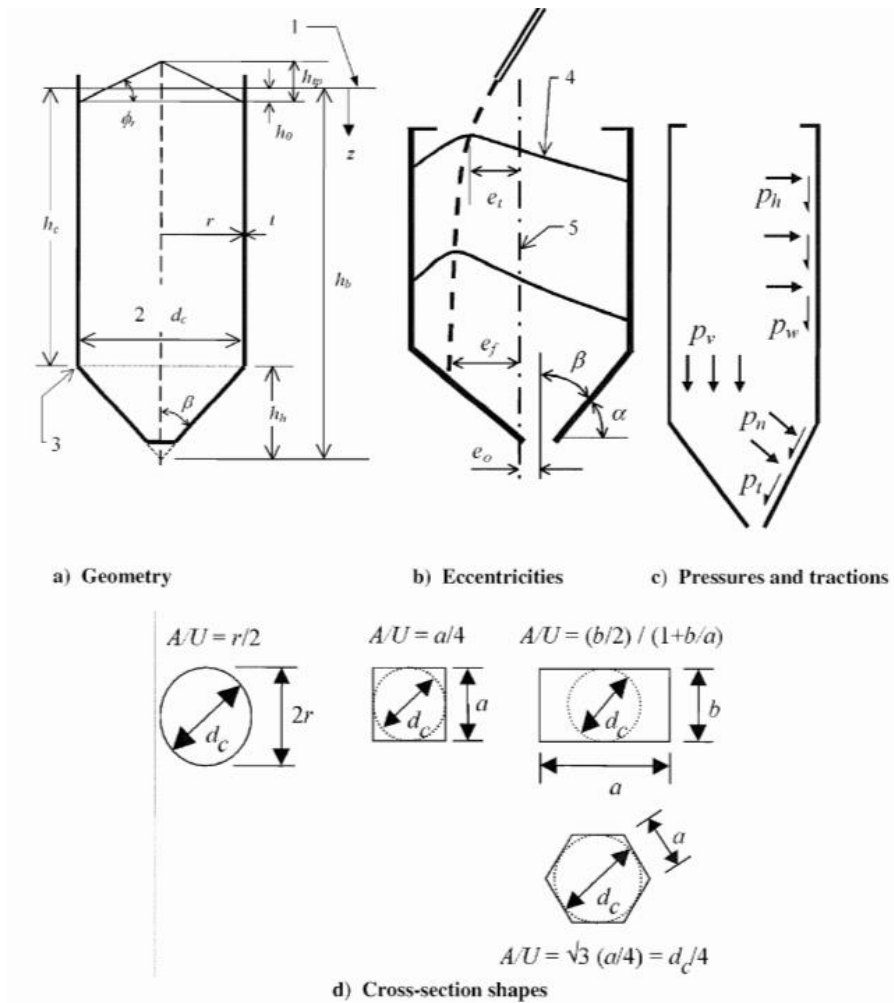
$$h_o := \frac{d_c}{3} \cdot \tan(\varphi_r) = 3,25 \quad (10)$$

$$h_c := 30 - 1 + h_o = 32,2 \quad (11)$$

Sendo:

- h_0 : profundidade abaixo da superfície equivalente (em metros)
- h_c : altura da superfície equivalente (em metros)

Figura 9 – Notação para as dimensões e pressões do silo



Fonte: EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006, p. 9

A partir das características geométricas do silo e das propriedades físicas do material armazenado, determinou-se o carregamento atuante sobre as paredes verticais e sobre o fundo do silo. Tais carregamento, subdividem-se em: pressão horizontal e atrito nas paredes verticais, e pressão vertical sobre o fundo, sendo distinguidos em carga e descarga do silo.

As pressões para a fase de carregamento são calculadas através da formulação abaixo para silos mediantemente esbeltos e convenção ilustrada na Figura 9, sendo:

$$z_o := \frac{A}{K_u \cdot \mu \cdot U} \quad (12)$$

$$P_{ho} := \gamma_u \cdot K_u \cdot z_o \quad (13)$$

$$n := -\left(1 + \tan(\varphi_r)\right) \cdot \left(1 - \frac{h_o}{z_o}\right) \quad (14)$$

$$Y_R(z) := \left(1 - \left[\left(\frac{z - h_o}{z_o - h_o}\right) + 1\right]^n\right) \quad (15)$$

$$z_v(z) := h_o - \frac{1}{(n+1)} \cdot \left[z_o - h_o - \frac{(z + z_o - 2 \cdot h_o)^{n+1}}{(z_o - h_o)^n}\right] \quad (16)$$

$$P_{hf}(z) := P_{ho} \cdot Y_R(z) \quad (17)$$

$$P_{wf}(z) := \mu \cdot P_{ho} \cdot Y_R(z) \quad (18)$$

$$P_{vf}(z) := \gamma_l \cdot z_v(z) \quad (19)$$

Sendo:

- z_o : profundidade característica de Janssen
- p_{ho} : pressão horizontal assintótica em grande profundidade devido ao sólido particulado armazenado
- n : relação de pressão no fundo
- $Y_{R(z)}$: função de variação de pressão na profundidade do silo
- $z_{v(z)}$: medida de profundidade para avaliação de estresse vertical no silo
- $p_{hf(z)}$: pressão horizontal no carregamento
- $p_{wf(z)}$: atrito na parede no carregamento
- $p_{vf(z)}$: pressão vertical no carregamento

Já as pressões de sobrecarga para a fase de carregamento são calculadas através da formulação abaixo para silos mediamente esbeltos e ilustradas na Figura 10.

$$E := 2 \cdot \frac{e_f}{d_c} \quad (20)$$

$$s := \frac{\pi \cdot d_c}{16} \quad (21)$$

$$C_{pf} := 0,21 \cdot C_{op} \cdot \left(1 + 2 \cdot E^2\right) \cdot \left[1 - \exp\left[-1,5 \cdot \left(\frac{h_c}{d_c}\right) - 1\right]\right] \quad (22)$$

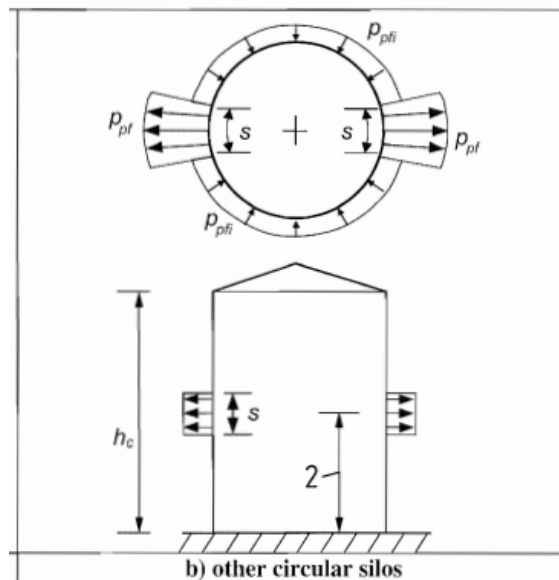
$$P_{pf}(z) := C_{pf} \cdot P_{hf}(z) \quad (23)$$

$$P_{pfi}(z) := \frac{P_{pf}(z)}{7} \quad (24)$$

Sendo:

- E: excentricidade do canal de fluxo
- s: dimensão da zona afetada pela sobrecarga
- C_{pf}: fator de ampliação de carga
- p_{pf}(z): sobrecarga horizontal no carregamento
- p_{pfi}(z): sobrecarga complementar horizontal no carregamento

Figura 10 – Convenções para aplicação das sobrecargas

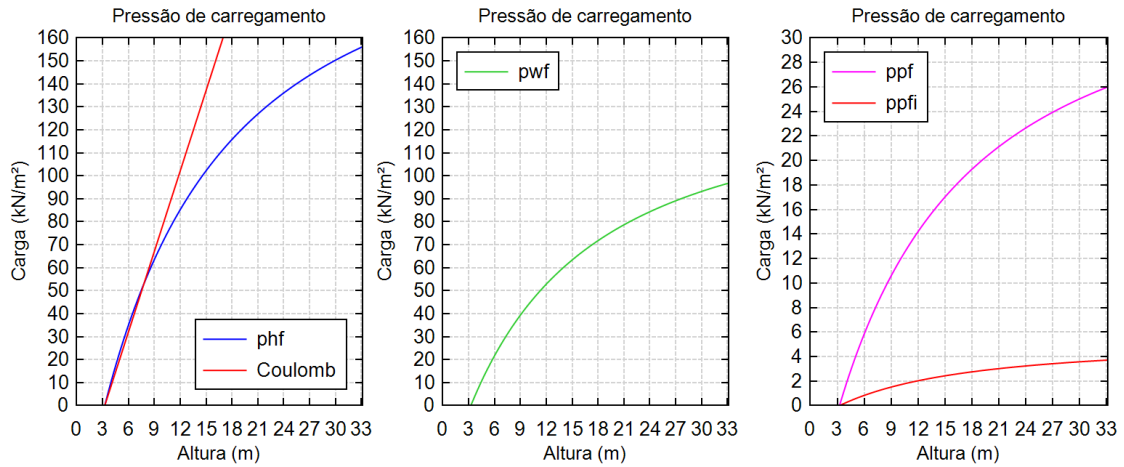


Fonte: EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 2006, p. 9

Os valores resultantes para as ações na fase de carregamento são apresentadas nos gráficos abaixo, sendo *phf* a pressão horizontal de carregamento, *pwf* o atrito vertical nas paredes e *ppf/ppfi* as pressões de sobrecarga. Para as pressões horizontais de

carregamento, comparou-se o valor com as pressões de Coulomb para a validação dos cálculos.

Gráficos 1 - Pressões de carregamento



As pressões para a fase de descarregamento são calculadas através da formulação abaixo para silos mediantemente esbeltos e convenção ilustrada na Figura 9, sendo:

$$C_s := \frac{h_c}{d_c} - 1 \quad (25)$$

$$C_h := 1 + 0,15 \cdot C_s \quad (26)$$

$$C_w := 1 + 0,1 \cdot C_s \quad (27)$$

$$P_{he}(z) := C_h \cdot P_{hf}(z) \quad (28)$$

$$P_{we}(z) := C_w \cdot P_{wf}(z) \quad (29)$$

Sendo:

- C_s : fator de ajuste de esbeltez
- C_h : fator de amplificação de pressão horizontal
- C_w : fator de amplificação de atrito
- $p_{he(z)}$: pressão horizontal na descarga
- $p_{we(z)}$: atrito na parede na descarga

Já as pressões de sobrecarga para a fase de descarregamento são calculadas através da formulação abaixo para silos mediantemente esbeltos e ilustradas na Figura 10.

$$C_{pe} := 0,272 \cdot C_{op} \cdot \left(\frac{h_c}{d_c} - 1 + E \right) \quad (30)$$

$$P_{pe}(z) := C_{pe} \cdot P_{he}(z) \quad (31)$$

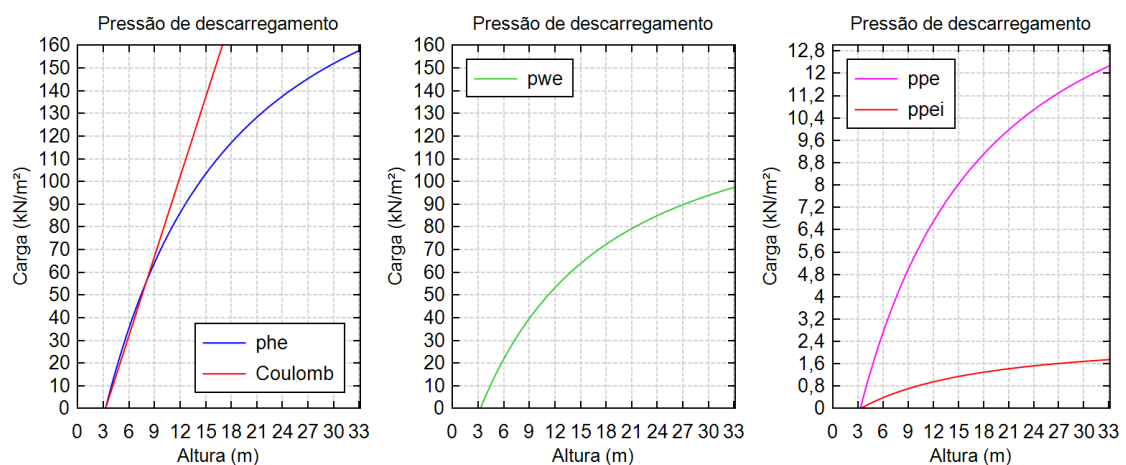
$$P_{pei}(z) := \frac{P_{pe}(z)}{7} \quad (32)$$

Sendo:

- C_{pe} : fator ampliação de carga
- $p_{pe(z)}$: sobrecarga horizontal na descarga
- $p_{pei(z)}$: sobrecarga complementar horizontal na descarga

Os valores resultantes para as ações na fase de descarregamento são apresentadas nos gráficos abaixo, sendo p_{he} a pressão horizontal de carregamento, p_{we} o atrito vertical nas paredes e p_{pe}/p_{pei} as pressões de sobrecarga. Para as pressões horizontais de carregamento, comparou-se o valor com as pressões de Coulomb para a validação dos cálculos.

Gráfico 2 - Pressões de descarregamento



A pressão de fundo do silo é calculada através da formulação abaixo, sendo o valor resultante para a pressão de fundo do silo corresponde a 407 kN/m².

$$P_{vho} := P_{vf} (h_o) \quad (33)$$

$$C_b := 1, 2 \quad (34)$$

$$P_{vb} := C_b \cdot P_{vf} (h_c) \quad (35)$$

$$P_{vtp} := \gamma_u \cdot h_{tp} \quad (36)$$

$$\Delta P_{sq} := P_{vtp} - P_{vho} \quad (37)$$

$$P_{vsq} := P_{vb} + \Delta P_{sq} \cdot \left(\frac{2 - \frac{h_c}{d_c}}{2 - \frac{h_{tp}}{d_c}} \right) \quad (38)$$

Sendo:

- p_{vho} : pressão vertical no fundo do silo sob o topo da pilha
- C_b : fator de ampliação de carga
- p_{vb} : pressão vertical avaliada na base do silo
- p_{vtp} : pressão vertical geostática na base do silo
- Δp_{sq} : diferença entre as pressões verticais avaliadas por dois métodos
- p_{vsq} : pressão vertical atuando no fundo plano de do silo

2.3.4.Carga térmica

A determinação das cargas térmicas sobre a estrutura de concreto, toma como base os dados de temperatura do material armazenado fornecidos pelo Cliente A, sendo de 120°C a temperatura média do material armazenado e de 50°C a temperatura da atmosfera interna.

Na determinação da ação térmica sobre a estrutura de concreto, a distribuição de temperatura para as estruturas com várias camadas é obtida a partir da relação do fluxo de calor, segundo o ACI 307 (1998). Essa distribuição baseia-se na condução térmica entre os materiais, suas respectivas espessura e iteração entre os diferentes meios, sendo expressa pela fórmula abaixo:

$$Q = \frac{(T_i - T_e)}{\sum \frac{1}{f} + \sum \frac{h}{k}} \quad (39)$$

$$t_e = \frac{h}{k} \cdot Q \quad (40)$$

Sendo:

- f: coeficiente de condutividade térmica da película de ar
- h: espessura de cada camada
- k: coeficiente de condutividade térmica da camada de concreto
- T_i : temperatura interna
- T_e : temperatura da atmosfera externa
- t_e : temperatura externa da parede

Com base no fluxo de calor estabelecido na estrutura e a obtenção da temperatura externa, o gradiente térmico a que a estrutura é submetida pela fórmula a seguir:

$$\nabla T = \frac{\Delta T}{\Delta Z}$$

Sendo:

- ∇T : gradiente térmico;
- ΔT : variação de temperatura no concreto
- ΔZ : variação de espessura do concreto

Dessa forma, através das fórmulas acima, obteve-se como temperatura externa o valor de $72,7^\circ\text{C}$ e gradiente térmico de $118,3^\circ\text{C/m}$ para as paredes verticais de 40 cm de espessura.

Já sobre a estrutura metálica, tomou-se uma distribuição uniforme de temperatura igual 50°C .

2.3.5. Combinações de carregamentos

A partir dos carregamentos, propriedades físicas e geométricas do silo, resolveu-se o problema estrutural com o auxílio do SAP2000 v23. A partir das soluções individuais da estrutura para cada carregamento atuante, extraiu-se os resultados para as seções de interesse. As combinações foram realizadas manualmente a partir dos dados extraídos em planilha de cálculo para as combinações de estados-limites de serviço e estado-limite último considerado os coeficientes apresentados na *Tabela 5*.

Tabela 5 – Coeficientes de combinação e ponderação

Ações	ELS-F e ELS-D		ELU	
	ψ_1	ψ_2	Ponderação	Combinação
Pesos próprios	1,0	1,0	1,0 - 1,4	-
Sobrecarga	0,6	0,4	1,4	0,7
Vento	0,3	0,0	1,4	0,6
Armazenamento	0,6	0,4	1,4	0,7
Temperatura	0,5	0,3	1,2	0,6

2.4. MODELO ESTRUTURAL E ANÁLISE

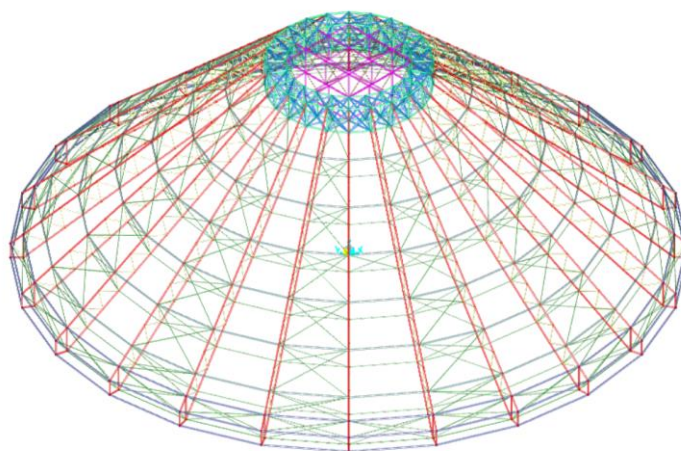
Para a representação matemática da estrutura projetada, selecionou-se o software de elementos finitos SAP2000 v23. A modelagem foi realizada de forma integrada para as estruturas de concreto do silo e das fundações, sendo desacoplada ao modelo estrutural da cobertura. Para a integração dos modelos da cobertura metálica e da estrutura de concreto, a estrutura metálica foi concebida com vínculos perfeitamente rotulados sobre a estrutura de concreto e sem vinculação elástica entre as estruturas metálica e de concreto, sendo as reações calculadas e transportadas para o modelo integrado das estruturas de concreto. As renderizações dos modelos estruturais podem ser visualizadas nas figuras de Figura 11 à Figura 20.

Os elementos selecionados para a representação em elementos finitos, são:

- Estrutura da cobertura: elemento finito do tipo *frame*, possuindo formulação viga-coluna de Bathe e Wilson
- Estruturas de concreto: elemento finito do tipo *shell* com representação de placa grossa, possuindo como características três ou quatro nós por elemento e com formulação para ccccccc.
- Cordoalhas de protensão: elemento finito do tipo *tendon* e integrado aos elementos do tipo *shell*.

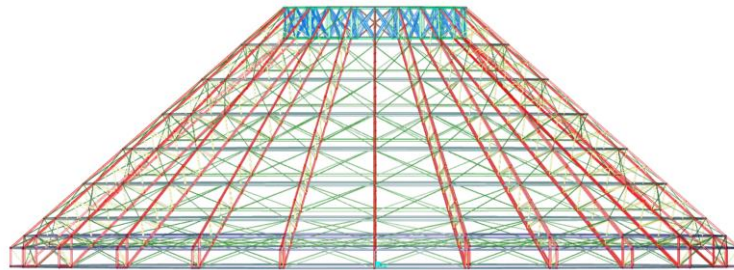
A análise realizada foi do tipo linear, elástica e instantânea, não apresentando características não lineares dos tipos físicas e geométricas.

Figura 11 – Perspectiva do modelo estrutural da treliça espacial da cobertura metálica



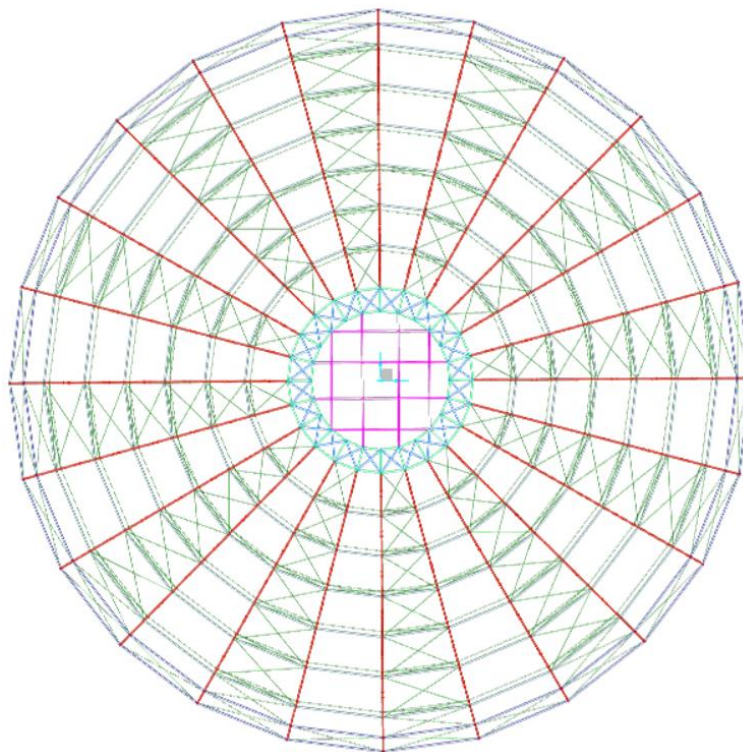
Fonte: AUTOR, 2022

Figura 12 – Vista lateral do modelo estrutural da treliça espacial da cobertura metálica



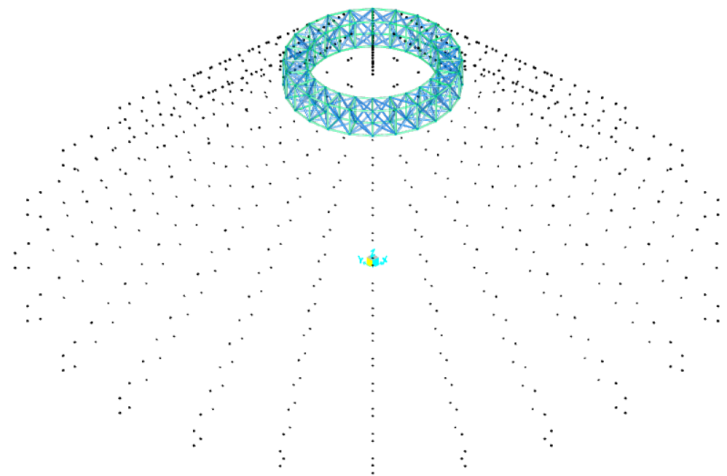
Fonte: AUTOR, 2022

Figura 13 - Vista superior do modelo estrutural da treliça espacial da cobertura metálica



Fonte: AUTOR, 2022

Figura 14 – Perspectiva isolada do modelo estrutural do anel de torção da estrutura metálica da cobertura



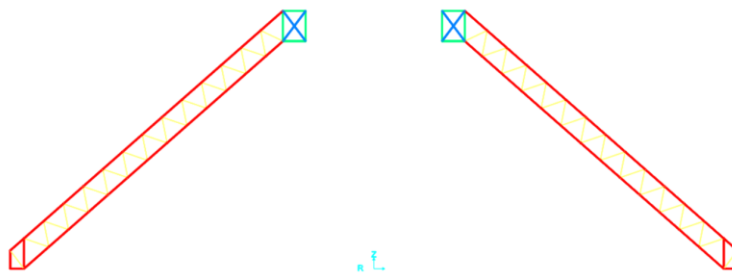
Fonte: AUTOR, 2022

Figura 15 - Vista superior do modelo estrutural do anel de torção e estrutura de sustentação dos equipamentos sobre a cobertura



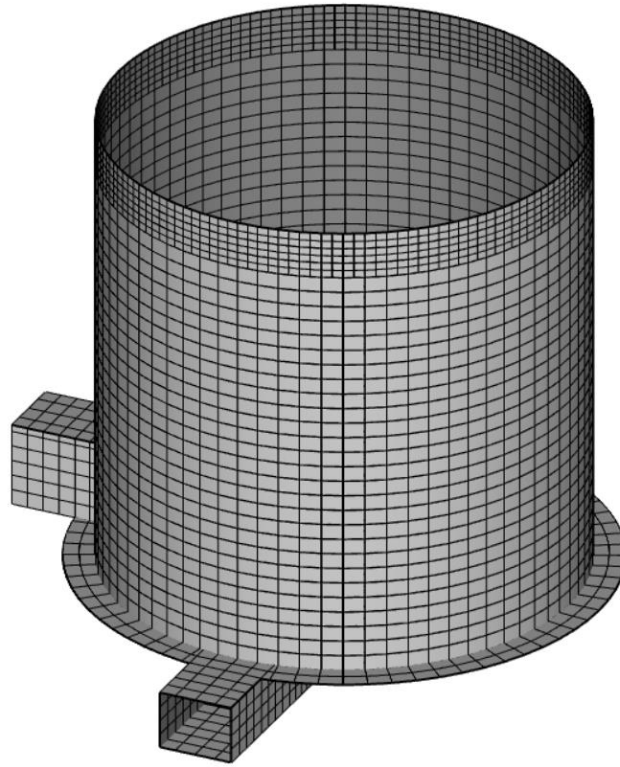
Fonte: AUTOR, 2022

Figura 16 - Vista lateral do modelo estrutural de treliças simétricas da cobertura metálica



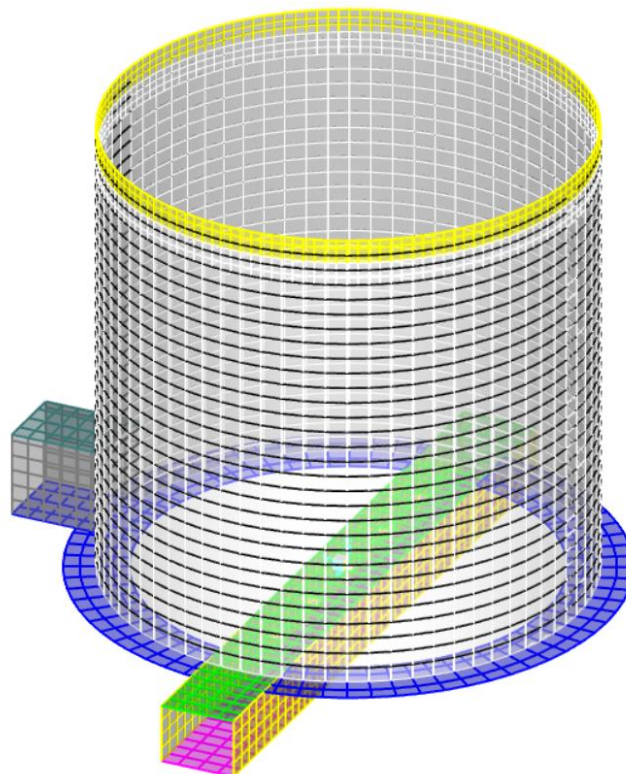
Fonte: AUTOR, 2022

Figura 17 - Perspectiva do modelo estrutural das estruturas de concreto



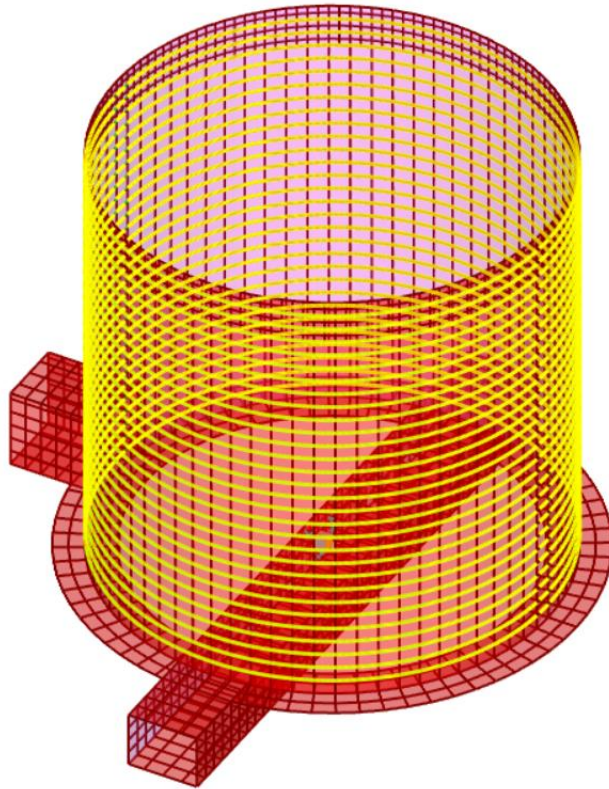
Fonte: AUTOR, 2022

Figura 18 - Perspectiva do modelo estrutural das estruturas de concreto com diferenciação de regiões de interesse



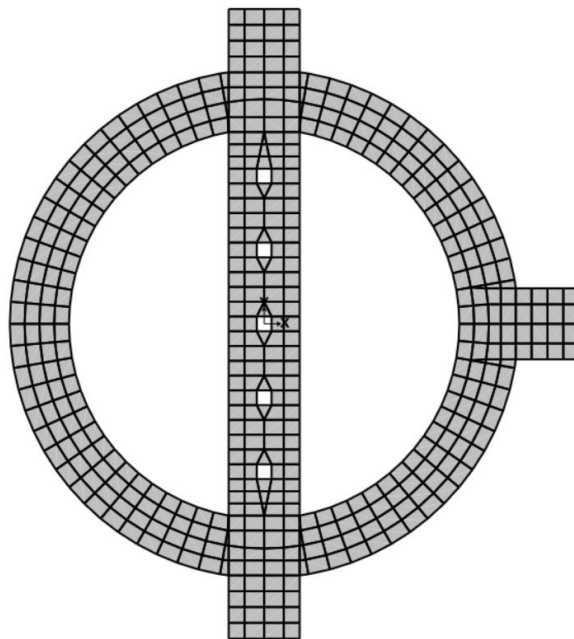
Fonte: AUTOR, 2022

Figura 19 - Perspectiva do modelo estrutural das estruturas de concreto com diferenciação dos elementos finitos que representam as cordoalhas de protensão



Fonte: AUTOR, 2022

Figura 20 – Vista superior do modelo estrutural do anel inferior das estruturas de concreto



Fonte: AUTOR, 2022

2.5. DIMENSIONAMENTO

2.5.1. Cobertura

Para do dimensionamento da cobertura metálica seguiu-se as diretrizes para verificação das seções de acordo com a ANSI/AISC 360-05/IBC 2006, com rotina integrada do software SAP2000. O procedimento adotado para o dimensionamento da estrutura baseou-se nos seguintes passos:

- Resolver o problema matemático para os diferentes casos de carga
- Combinar as solicitações para os estados limites
- Verificar as seções metálicas quanto as solicitações atuantes
- Coletar as reações da estrutura para dimensionamento das paredes de concreto do silo

Os resultados das verificações das seções mais solicitadas para cada tipo de perfil selecionado são apresentados nas figuras de Figura 21 à Figura 24.

Figura 21 - Verificação do perfil mais solicitados dos banzos das treliças

SAP2000

```

AISC360-05/IBC2006 STEEL SECTION CHECK (Summary for Combo and Station)
Units : KN, cm, C

Frame : 2011 X Mid: -742,662 Combo: EN1 Design Type: Brace
Length: 145,473 Y Mid: 1286,329 Shape: TC-88,9 x 7,57 Frame Type: SMF
Loc : 0, Z Mid: 47,971 Class: Compact Princpl Rot: 0, degrees

Provision: LRFD Analysis: Direct Analysis Reduction: Tau-b Fixed
D/C Limit=0,95 2nd Order: General 2nd Order EA factor=0,8 EI factor=0,8
AlphaPr/Fy=0,513 AlphaPr/Pe=0,208 Tau_b=0,999

PhiB=0,9 PhiC=0,9 PhiTY=0,9 PhiTF=0,75
PhiS=0,9 PhiS-RI=1, PhiST=0,9

A=9,647 I33=87,899 r33=3,018 S33=19,775 Av3=4,829
J=175,8 I22=87,899 r22=3,018 S22=19,775 Av2=4,829
E=19994,798 Fy=34,474 Ry=1,1 z33=26,209
RLLF=1, Fu=44,816 z22=26,209

HSS Welding: ERW Reduce HSS Thickness? No

STRESS CHECK FORCES & MOMENTS (Combo EN1)
Location Pu Mu33 Mu22 Vu2 Vu3 Tu
0, -170,626 -24,219 -12,686 -0,098 -0,144 0,2

PMM DEMAND/CAPACITY RATIO (H1-1a)
D/C Ratio: 0,705 = 0,676 + 0,026 + 0,014
= (Pr/Pc) + (8/9) (Mr33/Mc33) + (8/9) (Mr22/Mc22)

AXIAL FORCE & BIAXIAL MOMENT DESIGN (H1-1a)
Factor L K1 K2 B1 B2 Cm
Major Bending 1, 1, 1, 1, 1, 1,
Minor Bending 1, 1, 1, 1, 1, 0,579

Ltb Kltb Cb
LTB 1, 1, 1,154

Pu phi*Pnc phi*Pnt
Axial Force Capacity Capacity
-170,626 252,568 299,318

Mu phi*Mn phi*Mn
Major Moment Moment Capacity No LTB
-24,219 813,186 813,186
Minor Moment -12,686 813,186

Tu Tn phi*Tn
Torsion Moment Capacity Capacity
0,2 851,061 765,955

SHEAR CHECK
Status Vu phi*Vn Stress
Force Capacity Ratio Check
Major Shear 0,098 89,795 0,001 OK
Minor Shear 0,144 89,795 0,002 OK

BRACE MAXIMUM AXIAL LOADS
P P
Comp Tens
Axial -170,626 3,246
    
```

Fonte: AUTOR, 2022

Figura 22 - Verificação do perfil mais solicitados das diagonais das treliças

SAP2000

```

AISC360-05/IBC2006 STEEL SECTION CHECK (Summary for Combo and Station)
Units : KN, cm, C

Frame : 1940 X Mid: -742,662 Combo: EN1 Design Type: Brace
Length: 115,47 Y Mid: 1286,329 Shape: TC-48,3 x 4,86 Frame Type: SMF
Loc : 57,735 Z Mid: 114,488 Class: Compact Princpl Rot: 0, degrees

Provision: LRFD Analysis: Direct Analysis Reduction: Tau-b Fixed
D/C Limit=0,95 2nd Order: General 2nd Order EA factor=0,8 EI factor=0,8
AlphaPr/Fy=0,145 AlphaPr/Fe=0,139 Tau_b=1,

PhiB=0,9 PhiC=0,9 PhiTY=0,9 PhiTF=0,75
PhiS=0,9 PhiS-RI=1, PhiST=0,9

A=6,192 I33=15,006 r33=1,557 S33=6,214 Av3=3,118
J=30,01 I22=15,006 r22=1,557 S22=6,214 Av2=3,118
E=19994,798 Fy=34,474 Ry=1,1 z33=8,663
RLLF=1, Fu=44,816 z22=8,663

HSS Welding: ERW Reduce HSS Thickness? No

STRESS CHECK FORCES & MOMENTS (Combo EN1)
Location Fu Mu33 Mu22 Vu2 Vu3 Tu
57,735 30,933 0,94 0, 0, 0, 0,

PMM DEMAND/CAPACITY RATIO (H1.2,H1-1b)
D/C Ratio: 0,084 = 0,081 + 0,003 + 0,
= (1/2) (Pr/Pc) + (Mr33/Mc33) + (Mr22/Mc22)

AXIAL FORCE & BIAXIAL MOMENT DESIGN (H1.2,H1-1b)
Factor L K1 K2 B1 B2 Cn
Major Bending 1, 1, 1, 1, 1, 1,
Minor Bending 1, 1, 1, 1, 1, 1,

Ltb Kltb Cb
1, 1, 1,404

Pu phi*Pnc phi*Pnt
Force Capacity Capacity
Axial 30,933 128,486 192,118

Mu phi*Mn phi*Mn
Moment Capacity No LTB
Major Moment 0,94 268,793 268,793
Minor Moment 0, 268,793

Tu Tn phi*Tn
Moment Capacity Capacity
Torsion 0, 280,492 252,443

SHEAR CHECK
Status Vu phi*Vn Stress
Force Capacity Ratio Check
Major Shear 0, 57,635 0, OK
Minor Shear 0, 57,635 0, OK
    
```

Fonte: AUTOR, 2022

Figura 23 - Verificação do perfil mais solicitados das terças das treliças

SAP2000

```

AISC360-05/IBC2006 STEEL SECTION CHECK (Summary for Combo and Station)
Units : KN, cm, C

Frame : 2345 X Mid: -188,058 Combo: EN1 Design Type: Beam
Length: 379,362 Y Mid: 1428,444 Shape: TC-88,9 x 8,38 Frame Type: SMF
Loc : 189,681 Z Mid: 209,188 Class: Compact Princpl Rot: 0, degrees

Provision: LRFD Analysis: Direct Analysis Reduction: Tau-b Fixed
D/C Limit=0,95 2nd Order: General 2nd Order EA factor=0,8 EI factor=0,8
AlphaPr/Fy=0,211 AlphaPr/Fe=0,587 Tau_b=1,

PhiB=0,9 PhiC=0,9 PhiTY=0,9 PhiTF=0,75
PhiS=0,9 PhiS-RI=1, PhiST=0,9

A=10,669 I33=96,34 r33=3,005 S33=21,674 Av3=5,342
J=192,68 I22=96,34 r22=3,005 S22=21,674 Av2=5,342
E=19994,798 Fy=34,474 Ry=1,1 z33=28,853
RLLF=1, Fu=44,816 z22=28,853

HSS Welding: ERW Reduce HSS Thickness? No

STRESS CHECK FORCES & MOMENTS (Combo EN1)
Location Fu Mu33 Mu22 Vu2 Vu3 Tu
189,681 77,507 553,023 -413,037 0, 0, 0,

PMM DEMAND/CAPACITY RATIO (H1.2,H1-1a)
D/C Ratio: 0,92 = 0,234 + 0,549 + 0,41
= (Fr/Fc) + (8/9)(Mr33/Mc33) + (8/9)(Mr22/Mc22)

AXIAL FORCE & BIAXIAL MOMENT DESIGN (H1.2,H1-1a)
Factor L K1 K2 B1 B2 Cm
Major Bending 1, 1, 1, 1, 1, 1,
Minor Bending 1, 1, 1, 1, 1, 1,

Ltb Ltb Ktb Cb
1, 1, 1,431

Axial Fu phi*Pnc phi*Pnt
Force Capacity Capacity
77,507 104,27 131,016

Major Moment Mu phi*Mn phi*Mn
Moment Capacity No LTB
553,023 895,217 895,217
Minor Moment -413,037 895,217

Torsion Tu Tn phi*Tn
Moment Capacity Capacity
0, 936,776 43,098

SHEAR CHECK
Status Vu phi*Vn Stress
Force Capacity Ratio Check
Major Shear 0, 99,305 0, OK
Minor Shear 0, 99,305 0, OK

CONNECTION SHEAR FORCES FOR BEAMS
VMajor VMajor
Left Right
Major (V2) 5,831 5,831
    
```

Fonte: AUTOR, 2022

Figura 24 - Verificação do perfil mais solicitados dos tirantes de contraventamento

SAP2000

```

AISC360-05/IBC2006 STEEL SECTION CHECK (Summary for Combo and Station)
Units : KN, cm, C

Frame : 305 X Mid: 1246,53 Combo: EN1 Design Type: Brace
Length: 350,646 Y Mid: 165,593 Shape: TC-38,1 x 3,36 Frame Type: SMF
Loc : 175,323 Z Mid: 304,874 Class: Compact Princpl Rot: 0, degrees

Provision: LRFD Analysis: Direct Analysis Reduction: Tau-b Fixed
D/C Limit=0,95 2nd Order: General 2nd Order EA factor=0,8 EI factor=0,8
AlphaPr/Fy=0,031 AlphaPr/Fe=0,446 Tau_b=1,

PhiB=0,9 PhiC=0,9 PhiTY=0,9 PhiTF=0,75
PhiS=0,9 PhiS-RI=1, PhiST=0,9

A=4,285 I33=6,314 r33=1,214 S33=3,315 Av3=2,162
J=12,63 I22=6,314 r22=1,214 S22=3,315 Av2=2,162
E=19994,798 Fy=34,474 Ry=1,1 z33=4,673
RLLF=1, Fu=44,816 z22=4,673

HSS Welding: ERW Reduce HSS Thickness? No

DESIGN MESSAGES
Warning: kl/r > 200 (AISC E2)

STRESS CHECK FORCES & MOMENTS (Combo EN1)
Location Fu Mu33 Mu22 Vu2 Vu3 Tu
175,323 4,525 5,997 0, 0, 0, 0,

PMN DEMAND/CAPACITY RATIO (H1.2,H1-1b)
D/C Ratio: 0,058 = 0,017 + 0,041 + 0,
= (1/2) (Pr/Pc) + (Mr33/Mc33) + (Mr22/Mc22)

AXIAL FORCE & BIAXIAL MOMENT DESIGN (H1.2,H1-1b)
Factor L Kl K2 B1 B2 Cm
Major Bending 1, 1, 1, 1, 1, 1,
Minor Bending 1, 1, 1, 1, 1, 1,

LTB Lltb Kltb Cb
1, 1, 1,581

Axial Force Capacity phi*Pnc phi*Pnt
4,525 7,999 132,952

Major Moment Moment phi*Mn phi*Mn No LTB
5,997 144,973 144,973
Minor Moment 0, 144,973

Torsion Tu Tn phi*Tn Capacity
0, 151,122 136,01

SHEAR CHECK
Status Vu phi*Vn Stress Force Capacity Ratio Check
Major Shear 0, 39,886 0, OK
Minor Shear 0, 39,886 0, OK
    
```

Fonte: AUTOR, 2022

2.5.2.Paredes verticais

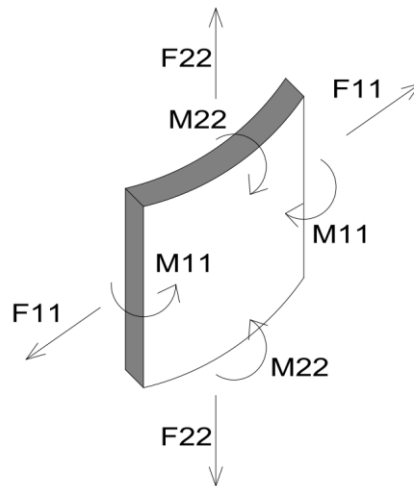
Para o dimensionamento e verificação das estruturas de concreto das paredes verticais, seguiu-se o Método dos Estados Limites com as diretrizes estabelecidas na ANBT NBR 6118. O procedimento adotado para o dimensionamento da estrutura baseou-se nos seguintes passos:

- Resolver o problema matemático para os diferentes casos de carga
- Combinar as solicitações para os estados limites
- Pré-dimensionar a estrutura de concreto protendido das paredes verticais
- Revisar o modelo matemático inserindo os elementos finitos que representam a protensão
- Verificar se os estados limites de serviço permanecem respeitados segundo o pré-dimensionamento da estrutura
- Verificar e dimensionar as estruturas quanto aos estados limites últimos de utilização

Os estados limites associados ao dimensionamento e verificação foram escolhidos quanto ao nível limitado de protensão, seguindo-se para a verificação e dimensionamento das estruturas de concreto quanto o Estado-limite de formação de fissuras (ELS-F) – estado em que se inicia a formação de fissuras em combinação frequente – e Estado-limite de descompressão (ELS-D) – estado com pontos da seção com tensão normal nula, não havendo tração no restante da seção em combinação quase permanente.

As solicitações obtidas através do software SAP2000 foram extraídas para as seções de interesse, sendo pós-processadas de forma a regularizar os valores obtidos de metro em metro. Na Tabela 6 e na Tabela 7 são apresentadas as solicitações nas paredes verticais para cada carregamento aplicado sobre a estrutura, segundo as convenções da Figura 25.

Figura 25 - Convenção de esforços



Fonte: AUTOR, 2022

Tabela 6 - Solicitações nas paredes verticais segundo carregamentos da cobertura

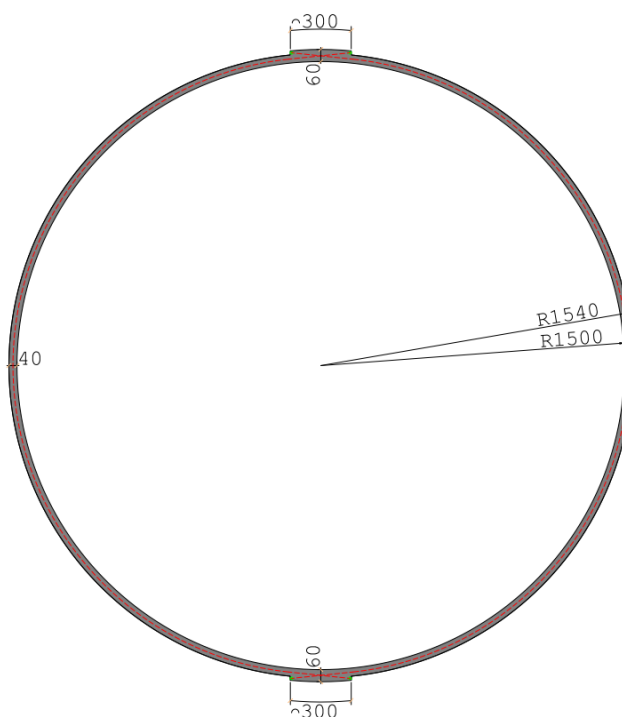
Cobertura (Peso próprio)					Cobertura (Sobrecarga)					Cobertura (Temperatura)				
Z	F11	F22	M11	M22	Z	F11	F22	M11	M22	Z	F11	F22	M11	M22
(m)	KN/m	KN/m	KN-m/m	KN-m/m	(m)	KN/m	KN/m	KN-m/m	KN-m/m	(m)	KN/m	KN/m	KN-m/m	KN-m/m
1	-1,1	-6,7	0,1	0,3	1	-1,7	-10,0	0,1	0,4	1	0,0	0,0	0,0	0,0
2	-1,2	-6,6	0,0	0,1	2	-1,8	-9,9	0,0	0,1	2	0,0	0,0	0,0	0,0
3	-0,8	-6,5	0,0	0,0	3	-1,2	-9,7	0,0	-0,1	3	0,0	0,0	0,0	0,0
4	-0,3	-6,4	0,0	-0,1	4	-0,5	-9,6	-0,1	-0,1	4	0,0	0,0	0,0	0,0
5	-0,1	-6,4	-0,1	-0,1	5	-0,1	-9,5	-0,1	-0,1	5	0,0	0,0	0,0	0,0
6	0,1	-6,3	-0,1	-0,1	6	0,1	-9,5	-0,1	-0,1	6	0,0	0,0	0,0	0,0
7	0,1	-6,4	-0,1	-0,1	7	0,1	-9,6	-0,1	-0,1	7	0,0	0,0	0,0	0,0
8	0,1	-6,5	-0,1	-0,1	8	0,1	-9,7	-0,2	-0,1	8	0,0	0,0	0,0	0,0
9	0,0	-6,6	-0,1	-0,1	9	0,0	-10,0	-0,2	-0,1	9	0,0	0,0	0,0	0,0
10	-0,1	-6,8	-0,1	-0,1	10	-0,1	-10,2	-0,2	-0,1	10	0,0	0,0	0,0	0,0
11	-0,1	-7,0	-0,2	-0,1	11	-0,2	-10,6	-0,2	-0,1	11	0,0	0,0	0,0	0,0
12	-0,2	-7,3	-0,2	-0,1	12	-0,3	-10,9	-0,3	-0,1	12	0,0	0,0	0,0	0,0
13	-0,2	-7,5	-0,2	-0,1	13	-0,3	-11,2	-0,3	-0,1	13	0,0	0,1	0,0	0,0
14	-0,3	-7,7	-0,2	-0,1	14	-0,4	-11,5	-0,3	-0,1	14	0,0	0,1	0,0	0,0
15	-0,3	-7,9	-0,2	0,0	15	-0,4	-11,9	-0,3	-0,1	15	0,0	0,1	0,0	0,0
16	-0,3	-8,1	-0,2	0,0	16	-0,4	-12,1	-0,3	-0,1	16	0,0	0,1	0,0	0,0
17	-0,2	-8,3	-0,2	0,0	17	-0,3	-12,4	-0,3	-0,1	17	0,1	0,1	0,0	0,0
18	-0,1	-8,4	-0,2	0,0	18	-0,2	-12,7	-0,3	-0,1	18	0,2	0,1	0,0	0,0
19	0,0	-8,6	-0,2	0,0	19	-0,1	-12,9	-0,3	-0,1	19	0,3	0,1	0,0	0,0
20	0,1	-8,7	-0,2	-0,1	20	0,0	-13,1	-0,3	-0,1	20	0,4	0,0	0,0	0,0
21	0,1	-8,9	-0,2	-0,1	21	0,0	-13,3	-0,3	-0,1	21	0,4	0,0	0,0	-0,1
22	-0,3	-9,0	-0,2	-0,2	22	-0,4	-13,4	-0,3	-0,2	22	-0,1	0,0	0,0	-0,2
23	-1,2	-9,1	-0,2	-0,2	23	-1,5	-13,6	-0,3	-0,2	23	-1,3	0,0	0,0	-0,2
24	-2,8	-9,2	-0,2	-0,2	24	-3,4	-13,7	-0,3	-0,2	24	-3,5	0,0	0,0	-0,2
25	-4,9	-9,2	-0,2	0,0	25	-6,1	-13,8	-0,2	0,0	25	-6,5	0,0	0,0	0,1
26	-6,5	-9,3	-0,1	0,6	26	-8,0	-13,9	-0,1	0,7	26	-8,6	-0,1	0,2	0,8
27	-5,1	-9,5	0,1	1,5	27	-6,2	-14,1	0,1	1,8	27	-6,6	-0,1	0,4	2,1
28	-0,6	-9,4	0,3	2,4	28	-0,8	-14,1	0,3	2,9	28	-0,3	0,0	0,7	3,3
29	16,4	-9,2	0,5	3,5	29	19,8	-13,7	0,6	4,3	29	23,5	0,1	1,0	4,8
30	66,7	-5,7	0,4	3,0	30	80,2	-8,7	0,3	3,7	30	96,6	0,4	1,3	4,1

Tabela 7 - Solicitações nas paredes verticais segundo carregamentos do silo

Silo (Peso próprio)					Silo (Empuxo)					Silo (Atrito)					Silo (Temperatura)				
Z	F11	F22	M11	M22	Z	F11	F22	M11	M22	Z	F11	F22	M11	M22	Z	F11	F22	M11	M22
(m)	KN/m	KN/m	KN-m/m	KN-m/m	(m)	KN/m	KN/m	KN-m/m	KN-m/m	(m)	KN/m	KN/m	KN-m/m	KN-m/m	(m)	KN/m	KN/m	KN-m/m	KN-m/m
1	-50,9	-311,7	0,7	3,5	1	361,2	35,1	23,1	125,5	1	-227,2	-1339,6	10,8	53,6	1	41,9	18,0	203,3	179,6
2	-35,1	-299,7	0,0	-0,1	2	986,1	58,7	-3,5	-8,2	2	-241,1	-1228,5	1,5	14,5	2	94,0	15,0	206,3	195,7
3	-17,7	-287,6	-0,2	-1,4	3	1629,0	79,3	-11,9	-53,5	3	-157,0	-1116,9	-5,4	-7,2	3	80,0	10,7	208,5	205,9
4	-5,7	-275,6	-0,2	-1,5	4	2052,1	95,3	-11,5	-52,3	4	-69,7	-1009,5	-10,7	-15,9	4	48,0	5,5	209,7	210,6
5	0,6	-263,8	-0,2	-1,1	5	2245,5	108,1	-8,6	-35,5	5	-12,4	-910,2	-14,8	-18,3	5	20,2	0,3	210,1	212,0
6	2,6	-252,4	-0,1	-0,7	6	2278,1	115,1	-6,4	-19,4	6	14,1	-820,1	-18,7	-17,6	6	3,0	-4,3	210,1	211,6
7	2,5	-241,5	-0,1	-0,5	7	2230,0	118,7	-5,6	-8,0	7	18,3	-743,1	-22,3	-16,6	7	-5,2	-7,7	209,9	210,9
8	1,5	-231,0	-0,2	-0,3	8	2154,1	116,6	-6,3	-3,3	8	10,7	-678,5	-26,1	-15,5	8	-7,7	-10,2	209,8	210,1
9	0,3	-221,0	-0,2	-0,2	9	2080,2	111,2	-7,5	-1,8	9	-1,9	-623,3	-29,9	-14,7	9	-7,3	-12,0	209,7	209,6
10	-0,6	-211,4	-0,3	-0,2	10	2015,7	102,2	-8,8	-1,8	10	-15,0	-577,1	-33,2	-14,1	10	-6,2	-13,4	209,7	209,3
11	-1,3	-201,9	-0,4	-0,2	11	1962,0	91,5	-10,1	-2,9	11	-27,2	-538,2	-36,5	-13,5	11	-5,1	-14,6	209,7	209,2
12	-1,6	-192,6	-0,4	-0,2	12	1913,3	79,9	-11,0	-3,9	12	-36,2	-501,1	-38,9	-13,0	12	-4,3	-15,9	209,7	209,2
13	-1,8	-183,3	-0,5	-0,1	13	1864,7	68,2	-11,3	-3,5	13	-42,8	-467,5	-41,0	-12,5	13	-3,8	-17,2	209,8	209,2
14	-1,8	-174,0	-0,5	-0,1	14	1815,5	57,2	-11,5	-3,8	14	-46,9	-435,7	-42,3	-12,0	14	-3,5	-18,6	209,8	209,3
15	-1,7	-164,5	-0,5	-0,1	15	1762,6	47,0	-11,5	-3,9	15	-48,4	-401,8	-43,3	-11,5	15	-3,2	-19,8	209,9	209,3
16	-1,6	-154,8	-0,4	-0,1	16	1705,1	38,1	-11,2	-3,2	16	-48,7	-369,0	-43,7	-11,0	16	-3,2	-20,9	210,0	209,3
17	-1,4	-145,1	-0,4	0,0	17	1643,7	30,3	-11,0	-3,5	17	-48,0	-336,8	-43,8	-10,5	17	-3,7	-21,6	210,1	209,2
18	-1,2	-135,2	-0,3	0,0	18	1576,9	23,7	-10,7	-3,7	18	-46,2	-301,6	-43,6	-10,0	18	-5,3	-22,0	210,1	209,1
19	-1,0	-125,3	-0,3	0,0	19	1503,2	18,0	-10,1	-2,7	19	-44,3	-267,8	-43,2	-9,5	19	-8,7	-21,9	210,2	209,1
20	-0,8	-115,2	-0,2	0,0	20	1425,0	13,4	-9,9	-3,3	20	-42,6	-235,7	-42,6	-9,1	20	-14,0	-21,4	210,4	209,3
21	-0,7	-105,1	-0,2	0,0	21	1339,6	9,5	-9,6	-3,7	21	-40,2	-200,6	-42,0	-8,6	21	-19,9	-20,4	210,7	210,2
22	-0,5	-94,9	-0,1	0,0	22	1245,4	6,4	-9,0	-2,9	22	-38,2	-168,7	-41,4	-8,3	22	-21,9	-19,0	211,2	212,0
23	-0,4	-84,6	-0,1	0,0	23	1143,6	3,9	-8,9	-4,0	23	-36,8	-140,1	-40,7	-8,0	23	-11,1	-17,2	212,0	214,9
24	-0,3	-74,3	-0,1	0,0	24	1030,3	2,0	-8,6	-4,8	24	-35,1	-109,1	-40,0	-7,8	24	25,7	-15,2	212,9	218,0
25	-0,2	-64,0	0,0	0,0	25	902,3	0,5	-8,1	-3,6	25	-35,1	-83,4	-39,4	-7,6	25	101,3	-12,9	213,4	218,6
26	-0,2	-53,7	0,0	0,0	26	762,3	-0,5	-7,8	-4,2	26	-37,6	-63,0	-38,7	-7,4	26	215,5	-10,5	212,4	211,8
27	-0,3	-43,4	0,0	0,0	27	609,0	-1,1	-7,3	-3,2	27	-41,4	-40,3	-38,0	-6,9	27	331,3	-7,9	208,5	190,4
28	-0,3	-35,6	0,1	0,0	28	487,2	-0,7	-6,8	0,6	28	-45,1	-26,0	-36,0	-5,8	28	381,0	-5,1	203,2	162,8
29	-0,5	-25,3	0,1	0,1	29	333,1	-0,7	-5,6	4,2	29	-50,0	-18,9	-35,7	-4,0	29	221,9	-2,7	191,4	102,5
30	1,8	-11,3	0,4	0,1	30	300,3	-0,3	-20,8	2,2	30	-66,6	-9,0	-117,6	-1,7	30	-648,1	-0,6	432,1	31,0

Para o cálculo da armadura de protensão, com base na classe de agressividade ambiental, CAAIII, utilizou-se a protensão limitada. O pré-dimensionamento foi realizado com base nos estados limites de serviço quanto a formação de fissuras e descompressão. Para organização do arranjo estrutural a ser projetado, as cordoalhas engraxadas foram reunidas em feixes de 4 cordoalhas com Ø15,2mm e aço CP-210RB, posicionadas no centro geométrico da seção das paredes verticais do silo. Para a disposição das cordoalhas ao longo dos 360°, dividiu-se a seção em dois trechos com caminhamento de 180°, nos quais a protensão se dá por suas duas extremidades, conforme Figura 26. A partir das equações clássicas de resistência dos materiais, determinou-se a força de protensão mínima a atender os estados limites recomendados na ABNT NBR 6118, quanto as tensões na seção. Calculados tais valores, são apresentados na Tabela 8 os resultados do pré-dimensionamento da protensão.

Figura 26 – Traçado da protensão



Fonte: AUTOR, 2022

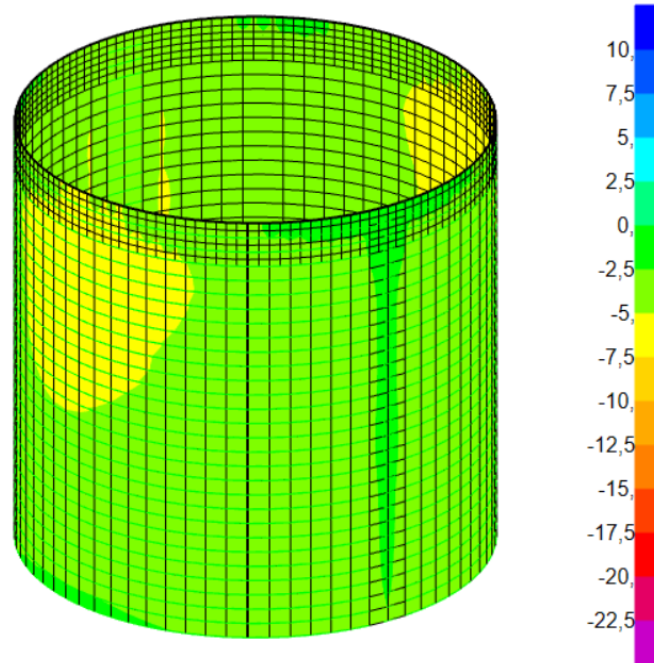
Tabela 8 – Pré-dimensionamento da protensão não aderente sobre as paredes verticais do silo

Pré-dimensionamento					
Z	F min	Min	Adot	F prot	Feixes
(m)	(kN)	un	un	(kN)	un/m
1	1765	7,3	8	1538	2,00
2	2184	9,1	9	1730	2,25
3	2606	10,8	11	2114	2,75
4	2882	12,0	12	2306	3,00
5	3006	12,5	12	2306	3,00
6	3027	12,6	12	2306	3,00
7	2995	12,5	12	2306	3,00
8	2946	12,3	12	2306	3,00
9	2899	12,1	12	2306	3,00
10	2858	11,9	12	2306	3,00
11	2824	11,8	12	2306	3,00
12	2795	11,6	12	2306	3,00
13	2766	11,5	12	2306	3,00
14	2738	11,4	11	2114	2,75
15	2708	11,3	11	2114	2,75
16	2675	11,1	11	2114	2,75
17	2641	11,0	11	2114	2,75
18	2603	10,8	11	2114	2,75
19	2561	10,7	11	2114	2,75
20	2518	10,5	11	2114	2,75
21	2473	10,3	10	1922	2,50
22	2428	10,1	10	1922	2,50
23	2382	9,9	10	1922	2,50
24	2331	9,7	10	1922	2,50
25	2264	9,4	9	1730	2,25
26	2162	9,0	9	1730	2,25
27	1999	8,3	8	1538	2,00
28	1826	7,6	8	1538	2,00
29	1513	6,3	8	1538	2,00
30	6012	25,0	8	1538	2,00

Com base nos dados do pré-dimensionamento da protensão para as paredes verticais, atualizou-se o modelo estrutural em elementos finitos com a adição do elemento do tipo *tendon*. Os resultados para verificação dos estados limites de serviço para

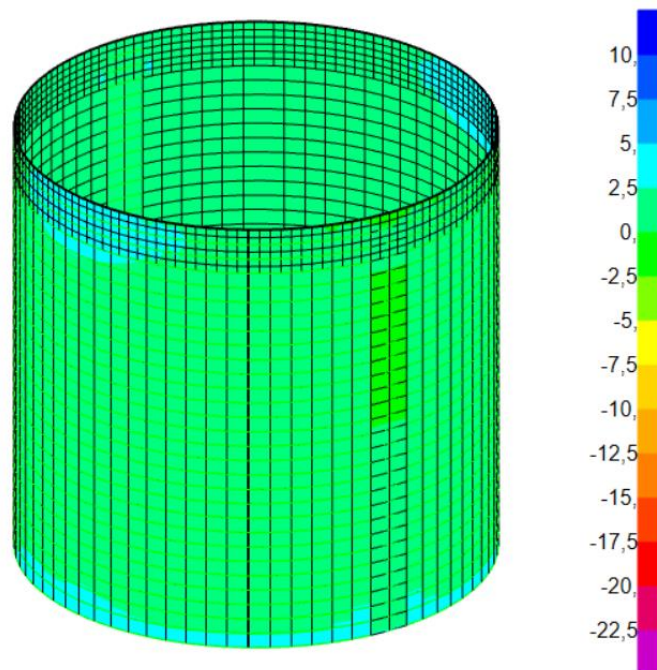
protensão limitada aliadas ao efeito hiperestático podem ser visualizados na Figura 27 e na Figura 28, sendo os estados limites respeitados para o nível de protensão selecionado.

Figura 27 - Tensões na face externa no tempo infinito (N/mm²)



Fonte: AUTOR, 2022

Figura 28 - Tensões na face interna no tempo infinito (N/mm²)



Fonte: AUTOR, 2022

Para o dimensionamento da protensão foram considerados as seguintes quantidades na consideração das perdas:

- Cravação da ancoragem, δ : 6mm
- Coeficiente de atrito entre a bainha de polipropileno engraxada e a cordoalha, μ : 0,05
- Coeficiente de perdas provocadas pela curvatura não intencional da cordoalha, k : $0,005 \text{ m}^{-1}$

As variações das tensões em um cabo posicionado na altura média do silo podem ser visualizadas da Figura 29.

Figura 29 - Tensões em uma cordoalha posicionados na altura média do silo



Fonte: AUTOR, 2022

Verificada as condições da estrutura quanto aos seus estados limites de serviço, dimensionou-se a estrutura das paredes verticais quanto ao seu estado limite último. Para a realização do dimensionamento, utilizou-se o programa matemático SMATH Studio, com o qual foi elaborado um código para a verificação das seções de interesse. A seguir é apresentada a rotina para a determinação do momento resistente da seção em sua direção circunferencial.

Momento resistente da seções de concreto (ELU-tinf):

Materiais:

Coeficientes:

$$\gamma_c := 1,4 \quad \gamma_s := 1,15 \quad r_0 := 0,92$$

Concreto:

$$f_{cj} := 45 \text{ MPa}$$

$$f_{cd} := \frac{f_{cj}}{\gamma_c} \quad \varepsilon_{c2} := 2,0 \text{ ‰} \quad \varepsilon_{cu} := 3,5 \text{ ‰}$$

Aço CA-50:

$$f_{yk} := 500 \text{ MPa} \quad E_s := 210 \text{ GPa}$$

$$f_{yd} := \frac{f_{yk}}{\gamma_s} \quad \varepsilon_{yd} := \frac{f_{yd}}{E_s} \quad \varepsilon_{yu} := 10 \text{ ‰}$$

Aço CP210RB:

$$f_{yp} := 2100 \text{ MPa}$$

Seção (S0) :

$$b_w := 100 \text{ cm} \quad h := 40 \text{ cm} \quad A_p := (3 \cdot 4 \cdot 1,43 \text{ cm}^2) = 17,16 \text{ cm}^2$$

$$A'_s := 15,71 \text{ cm}^2 \quad A_s := 15,71 \text{ cm}^2 \quad d_p := \frac{h}{2} = 20 \text{ cm}$$

$$d' := 4 \text{ cm} \quad d_s := h - 4 \text{ cm} \quad \rho_p := \frac{A_p}{b_w \cdot d_p} = 0,00858$$

$$N := 1,4 \cdot 1762 \text{ kN}$$

Limites:

$$\text{Condição}_{inicial} := \begin{cases} x := 0,01 \text{ cm} \\ \Sigma F := -10000 \end{cases}$$

$$x_{2a,b} := \frac{\varepsilon_{c2}}{\varepsilon_{yu} + \varepsilon_{c2}} \cdot d_s = 6 \text{ cm}$$

$$x_{23} := \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{yu}} \cdot d_s = 9,33 \text{ cm}$$

$$x_{lim} := 0,45 \cdot d_s = 16,2 \text{ cm}$$

$$x_{3lim} := \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{yd}} \cdot d_s = 22,6 \text{ cm}$$

Iterações:

```
while  $\Sigma F \leq 0$ 
   $\epsilon_1 :=$  if  $x \leq x_{23}$ 
     $\epsilon_{yu}$ 
  else
     $\epsilon_{cu} \cdot \frac{(d_s - x)}{x}$ 
   $\epsilon_2 :=$  if  $x \leq x_{23}$ 
     $\epsilon_{yu} \cdot \frac{(x - d')}{(d_s - x)}$ 
  else
     $\epsilon_{cu} \cdot \frac{(x - d')}{x}$ 
   $\epsilon_c :=$  if  $x \leq x_{23}$ 
     $\epsilon_{yu} \cdot \frac{x}{(d_s - x)}$ 
  else
     $\epsilon_{cu}$ 
   $\sigma_s := f_{yd}$ 
   $\sigma'_s :=$  if  $\epsilon_2 < \epsilon_{yd}$ 
     $\epsilon_2 \cdot E_s$ 
  else
     $f_{yd}$ 
   $\sigma_c :=$  if  $\epsilon_c < \epsilon_{c2}$ 
     $0,85 \cdot f_{cd} \cdot \left(1 - \left(1 - \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c2}}\right)^2\right)$ 
  else
     $0,85 \cdot f_{cd}$ 
   $\Delta_p :=$  if  $A_p > 0$ 
     $70 \text{ MPa} + \frac{f_{cj}}{100 \cdot \rho_p}$ 
  else
    0
   $\sigma_{pd} := 0,8 \cdot f_{yp} \cdot r_0 + \Delta_p$ 
   $R_{cc} := (b_w \cdot 0,8 \cdot x) \cdot (\sigma_c)$ 
   $R_{sc} := A'_s \cdot \sigma'_s$ 
   $R_{st} := A_s \cdot \sigma_s$ 
   $R_{pt} := (A_p \cdot \sigma_{pd}) - N$ 
   $\Sigma F := R_{cc} + R_{sc} - R_{st} - R_{pt}$ 
   $x := x + 0,01 \text{ cm}$ 
```

Resultados:

$\sigma_c = 25,9 \text{ MPa}$	$R_{cc} = 996 \text{ kN}$	$\epsilon_c = 1,5 \text{ ‰}$	
$\sigma'_s = 54,5 \text{ MPa}$	$R_{sc} = 85,7 \text{ kN}$	$\epsilon_1 = 10 \text{ ‰}$	
$\sigma_{pd} = 1670 \text{ MPa}$	$R_{st} = 683 \text{ kN}$	$\epsilon_2 = 0,26 \text{ ‰}$	$\Sigma F = 3 \text{ kN}$ (erro estimado)
$\Delta_p = 122 \text{ MPa}$ (<210 MPa)	$R_{pt} = 396 \text{ kN}$	$x = 4,82 \text{ cm}$	

$$M_{Rd} := -(R_{cc} \cdot (x - 0,4 \cdot x) + R_{sc} \cdot (x - d') - R_{st} \cdot (d_s - x) - R_{pt} \cdot (d_p - x)) = 244 \text{ kN m}$$

Para o dimensionamento da seção das paredes verticais quanto as solicitações na direção vertical, empregou-se o software FCN Ret, desenvolvido pelo Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, cuja interface é demonstrada na Figura 30 e os resultados para as diferentes seções analisadas é apresentado na Tabela 9.

Figura 30 - Interface do software FCN Ret (Deciv/UFRGS)

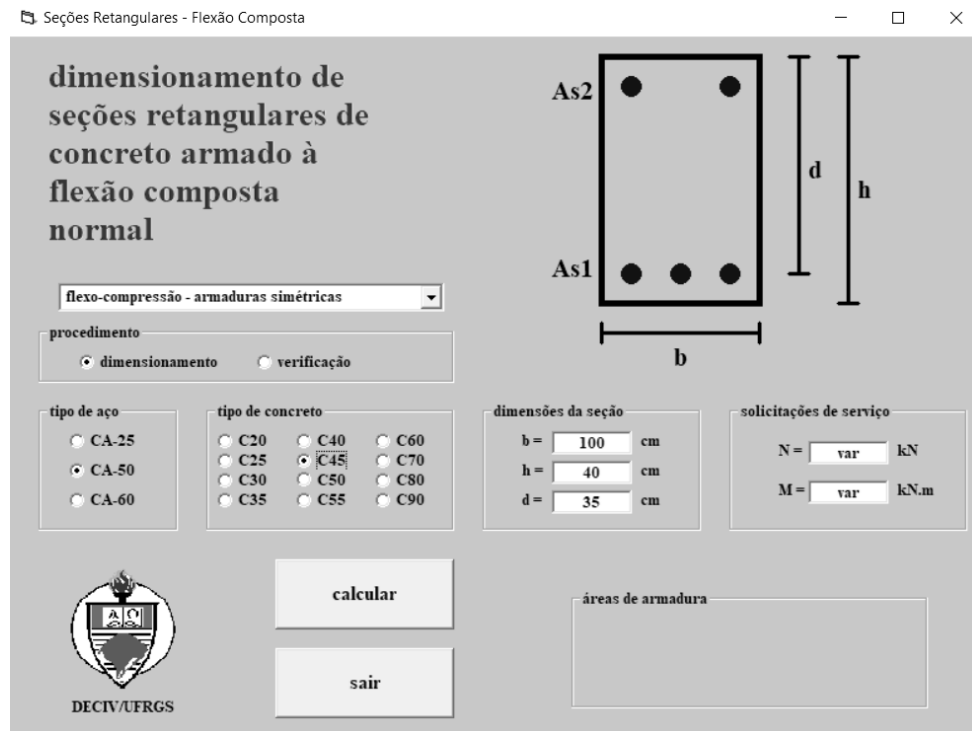


Tabela 9 - Resultados de armadura vertical para as diferentes seções analisadas das paredes verticais do silo

ELU				
Seção	F22	M22	As	Adotado
-	KN/m	KN-m/m	cm ² /m	
1	-1624	273	1,59	ø 20 c/20
2	-1479	104	0	
3	-1223	284	5,05	
4	-213	176	6,83	
5	-212	96	6,15	
6	-181	178	7,98	
7	-177	98	12,78	
8	-152	180	13,5	
9	-146	96	14,18	
10	-126	176	14,21	

O dimensionamento das regiões de ancoragem da protensão foram dimensionadas segundo Fusco (2013), valendo-se da teoria básica de blocos parcialmente carregados. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Dimensionamento da zona de regularização

Dimensionamento da zona de regularização	
Forças	cm ² /m
Fissuração superficial	2,62
Fendilhamento	6,84
Equilíbrio transversal	14,43

2.5.3. Acesso lateral

Para o dimensionamento e verificação das estruturas de concreto do acesso lateral, seguiu-se o Método dos Estados Limites com as diretrizes estabelecidas na ANBT NBR 6118. O procedimento adotado para o dimensionamento da estrutura baseou-se nos seguintes passos:

- Resolver o problema matemático para os diferentes casos de carga
- Combinar as solicitações para os estados limites
- Pré-dimensionar a estrutura de concreto do acesso lateral
- Revisar o modelo matemático com os valores de rigidez das seções correspondentes
- Dimensionar as estruturas quanto aos estados limites últimos de utilização

Para o dimensionamento da seção das paredes do acesso lateral quanto as solicitações nas diferentes direções, também se empregou o software FCN Ret, cujos resultados são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Resultados de armaduras para as diferentes seções das paredes do acesso lateral

ELU1 k										
El	F11	F22	M11	M22	V13	V23	As,x	Adotado	As,y	Adotado
el	KN/m	KN/m	KN-m/m	KN-m/m	KN/m	KN/m	cm ² /m		cm ² /m	
1	311	-38	-142	-38	-125	290	As 11,69 As' 0,10	As,min ø 20 c/15	As 11,69 As' 0,10	As,min ø 20 c/15
2	696	37	-132	250	89	128				
3	696	35	-132	249	90	-128				
4	308	-43	-143	-40	-125	-291				
5	-182	-342	8	-220	24	136				
6	50	-471	-25	-192	-10	-52	As 0	As,min ø 20 c/15	As 0	As,min ø 20 c/15
7	-776	-779	2	-92	-52	-23				
8	-1013	-984	30	-68	-60	2				
9	-1052	-849	40	-84	-55	36				
10	-690	-487	22	-142	-32	84				

2.5.4. Túnel de extração

Para o dimensionamento e verificação das estruturas de concreto do túnel extração, seguiu-se o Método dos Estados Limites com as diretrizes estabelecidas na ANBT NBR 6118. O procedimento adotado para o dimensionamento da estrutura baseou-se nos seguintes passos:

- Resolver o problema matemático para os diferentes casos de carga
- Combinar as solicitações para os estados limites
- Pré-dimensionar a estrutura de concreto do túnel de extração
- Revisar o modelo matemático com os valores de rigidez das seções correspondentes
- Verificar as tensões sob o solo
- Dimensionar as estruturas quanto aos estados limites últimos de utilização

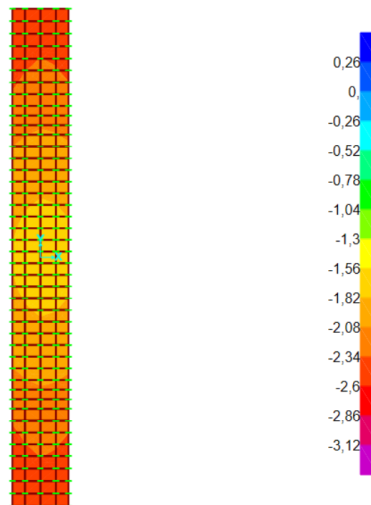
Para o dimensionamento da seção das paredes do túnel de extração quanto as solicitações nas diferentes direções, também se empregou o software FCN Ret, cujos resultados são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Resultados de armaduras para as diferentes seções das paredes do túnel de extração

ELU1 k										
El	F11	F22	M11	M22	V13	V23	AS,x	Adotado	As,y	Adotado
el	KN/m	KN/m	KN-m/m	KN-m/m	KN/m	KN/m	cm ² /m		cm ² /m	
1	51	3353	137	-435	28	4	As'	As,min	As'	As,min
2	51	3285	149	-434	-15	2	13,36	ø 20 c/15	13,36	ø 20 c/15
3	95	4032	86	-503	-70	0	As 13,36	As,min	As 13,36	As,min
4	99	4204	56	-506	82	0		ø 20 c/15		ø 20 c/15

A verificação das tensões sob a laje de fundações foi realizada de acordo com as premissas iniciais para o coeficiente de mola vertical e das tensões admissíveis do solo, os valores obtidos na análise são apresentados na Figura 31, e correspondem a valores aceitáveis quanto as tensões admissíveis previstas para o terreno.

Figura 31 - Tensões admissíveis no solo sob a estrutura de fundações do túnel. (kgf/cm²)



2.5.5. Anel de fundações

Para o dimensionamento e verificação das estruturas de concreto do anel de fundações, seguiu-se o Método dos Estados Limites com as diretrizes estabelecidas na ANBT NBR 6118. O procedimento adotado para o dimensionamento da estrutura baseou-se nos seguintes passos:

- Resolver o problema matemático para os diferentes casos de carga
- Combinar as solicitações para os estados limites
- Pré-dimensionar a estrutura de concreto do anel de fundações
- Revisar o modelo matemático com os valores de rigidez das seções correspondentes
- Verificar as tensões sob o solo
- Dimensionar as estruturas quanto aos estados limites últimos de utilização

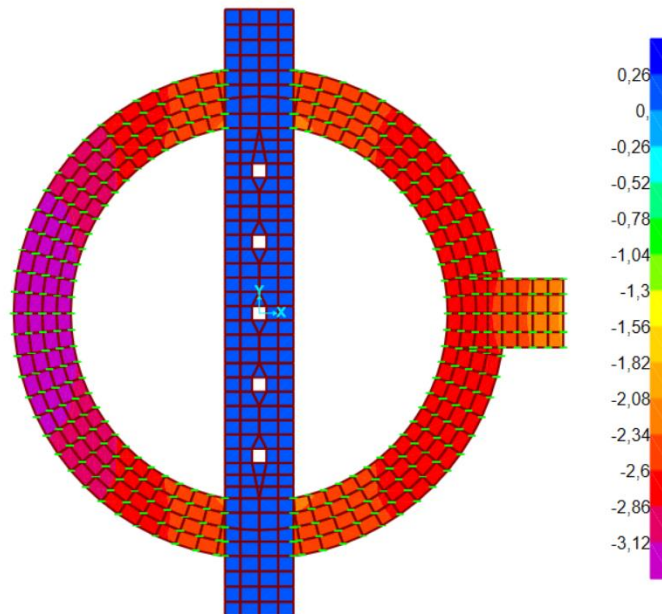
Para o dimensionamento da seção do anel de fundações quanto as solicitações nas diferentes direções, também se empregou o software FCN Ret, cujos resultados são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 - Resultados de armaduras para as diferentes seções das paredes do anel de fundações

ELU1 k										
El	F11	F22	M11	M22	V13	V23	AS,r	Adotado	As,t	Adotado
el	KN/m	KN/m	KN-m/m	KN-m/m	KN/m	KN/m	cm ² /m		cm ² /m	
1	72	1469	101	-4	296	-33	2,33	As,min ø 25 c/15	As'	As,min
2	203	1337	567	180	903	-56	13,27		14,94	ø 25 c/15
3	-160	1129	959	344	-1073	-145	22,72		As 24,35	As,min
4	-34	944	181	241	-344	-61	4,19			ø 25 c/15

A verificação das tensões sob a estrutura de fundações foi realizada de acordo com as premissas iniciais para o coeficiente de mola vertical e das tensões admissíveis do solo, os valores obtidos na análise são apresentados na Figura 32, e correspondem a valores aceitáveis quanto as tensões admissíveis previstas para o terreno.

Figura 32 – Tensões no solo sob a estrutura de fundações. (kgf/cm²)



Fonte: AUTOR, 2022

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este relatório contém 52 páginas e refere-se à memória de cálculo das estruturas de um silo a ser construído na cidade de Porto Alegre – RS.

3.1. Referências e bases teóricas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto e execução de estruturas de concreto Armado – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123**: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 1988.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EM 1991-4**: Eurocode 1 – Actions on structures – Part 4: Silos and tanks. Brussels, 2006.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 307-98**: Design and Construction of Reinforced Concrete Chimneys. 1998.

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. **ANSI/AISC 360-05**: Specification for Structural Steel Buildings. 2005.

INSTITUT SUPÉRIEUR DU BÂTIMENT ET DES TRAVAUX PUBLI. **BAEL-BPEL91**: Calcul et Dimensionnement des Silos en Béton Armé et en Béton Précontraint. 2007.

GHALI, A., 2000. **Circular Storage Tanks and silos**. E & FN Spon. 1nd ed., 3-37. London: Taylor & Francis Routledge.

GHALI, A. & ELLIOTT, E., 1992. **Serviceability of Circular Prestressed Concrete Tanks**. ACI Structural Journal, vol.89, 345–355.

HAHN, J., 1972. **Vigas continuas, porticos, placas y vigas flotantes sobre lecho elástico**. Editorial Gustavo Gili, 2ª edición. Barcelona.

FUSCO, P. B., 2013. **Técnicas de armar as estruturas de concreto**. Pini, 2. ed.. São Paulo.

EMERICK, A. A., 2005. **Projeto e execução de lajes protendidas**. Interciência, 1. ed.. Rio de Janeiro.

LEONHARDT, F. & MONNING, E., 2008. **Construções de concreto**. Interciência, vol 1-5. Rio de Janeiro.

CARMONA, T. G.. **Esforços Circunferenciais em Tanques de Concreto Armado com Seção Circular Tensões Originadas Por Gradiente Térmico**. 2005. Dissertação de mestrado – Universidade Estadual de Campinas.

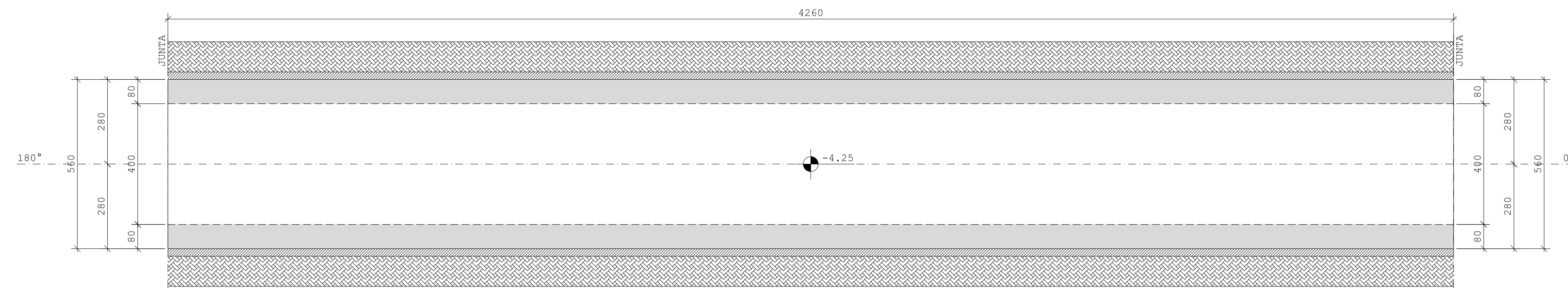
ANDRADE JUNIOR, L.J. **A ação do vento em silos cilíndricos de baixa relação altura/diâmetro**. 2002. Tese de doutorado – Universidade de São Paulo.

COMPUTERS & STRUCTURES, INC. **CSI Analysis Reference Manual For SAP2000®, ETABS®, SAFE® and CSiBridge**. United States of America, 2017.

APÊNDICE A – Desenhos técnicos

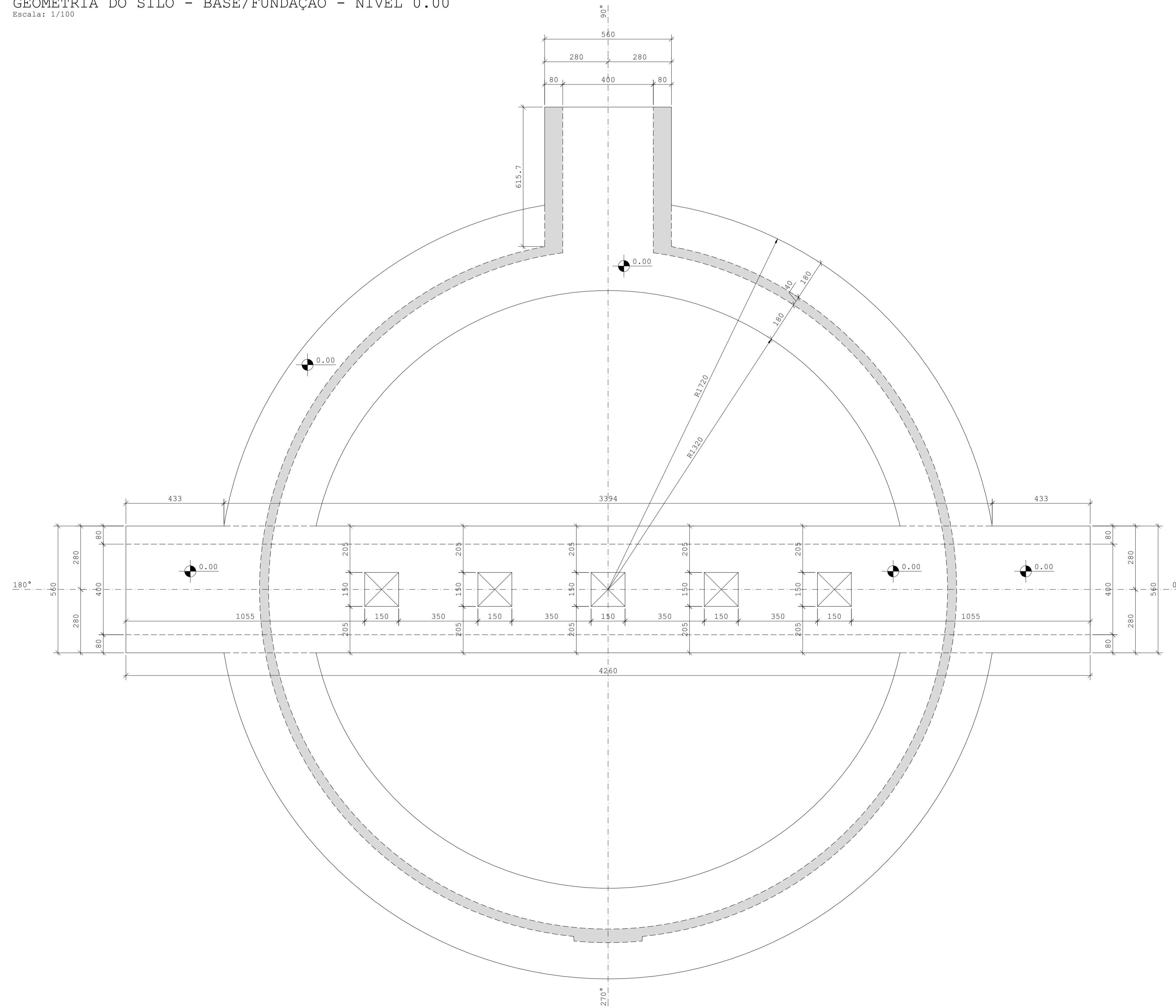
GEOMETRIA DO SILO - TÚNEL DE EXTRAÇÃO - NÍVEL -4.25

Escala: 1/100



GEOMETRIA DO SILO - BASE/FUNDAÇÃO - NÍVEL 0.00

Escala: 1/100



NOTAS DE PROJETO

- 01) VER MEMORIAL DE CÁLCULO
- 02) DEVERÃO SER OBSERVADAS AS DEMAIS NOTAS PERTINENTES A CADA PLANTA
- 03) CLASSE DE AGRESSIVIDADE AMBIENTAL: CAA - III
- 04) COTAS EM CENTÍMETROS E ELEVAÇÕES EM METROS, EXCETO SE INDICADO
- 05) CONSULTAR O PROJETISTA SE QUALQUER DIMENSÃO DIVERGIR, NA OBRA, DA COTA DE PROJETO
- 06) OS ELEMENTOS DA ESTRUTURA SÓ PODEM SER FURADOS COM A PRÉVIA AUTORIZAÇÃO DO RESPONSÁVEL TÉCNICO DO PROJETO, EXCETO SE INDICADO
- 07) TODAS AS SOLDAS DEVERÃO SER EXECUTADAS COM ELETRODO E70XX
- 08) SERVIÇOS DE MONTAGEM DE FÔRMAS, POSICIONAMENTO DE CHUMBADORES E ARMADURAS, TRATAMENTO DE SUPERFÍCIES E PROTENSÃO, DEVEM SER RIGOROSAMENTE EXECUTADOS
- 09) TODAS AS PEÇAS METÁLICAS DEVERÃO RECEBER GALVANIZAÇÃO À FOGO E PINTURA PROTETORA A CORROSÃO
- 10) O ESCORAMENTO E OS CIMBRAMENTOS NÃO FAZEM PARTE DO ESCOPO DESTA PROJETO
- 11) OS ELEMENTOS DESTINADOS À SEGURANÇA DOS TRABALHADORES E TRANSEUNTES À EXECUÇÃO DA OBRA, NÃO FAZEM PARTE DO ESCOPO DO PRESENTE PROJETO

MATERIAIS EMPREGADOS

CONCRETO IN LOCO:

CLASSE (ABNT NBR 8953): C45 - $f_{ck} \geq 45$ MPa
 $f_{cj} \geq 38$ MPa

COBRIMENTO NOMINAL: 40 mm (TOLERÂNCIA DE EXECUÇÃO 10 mm)

AÇOS:

AÇO CA-50
 AÇO CP-210RB
 AÇO A572Gr50

PROTENSÃO

SISTEMA: PÓS-TENSÃO NÃO ADERENTE COM CORDALHA ENGRAXADA
 ANCORAGEM ATIVA NAS DUAS EXTREMIDADES
 FORÇA DE PROTENSÃO: 235 kN

REVISÃO	DATA	DESCRIÇÃO	RESPONSÁVEL
R00	MAIO/2022	EMISSÃO INICIAL	MAICOM

PROJETO:
 PROJETO ESTRUTURAL DE SILO CILÍNDRICO DE CONCRETO PARA O ARMAZENAMENTO DE CLÍNQUER

ASSUNTO: GEOMETRIA DO SILO - FUNDAÇÃO E TÚNEL DE EXTRAÇÃO
 NÚMERO: 01/12

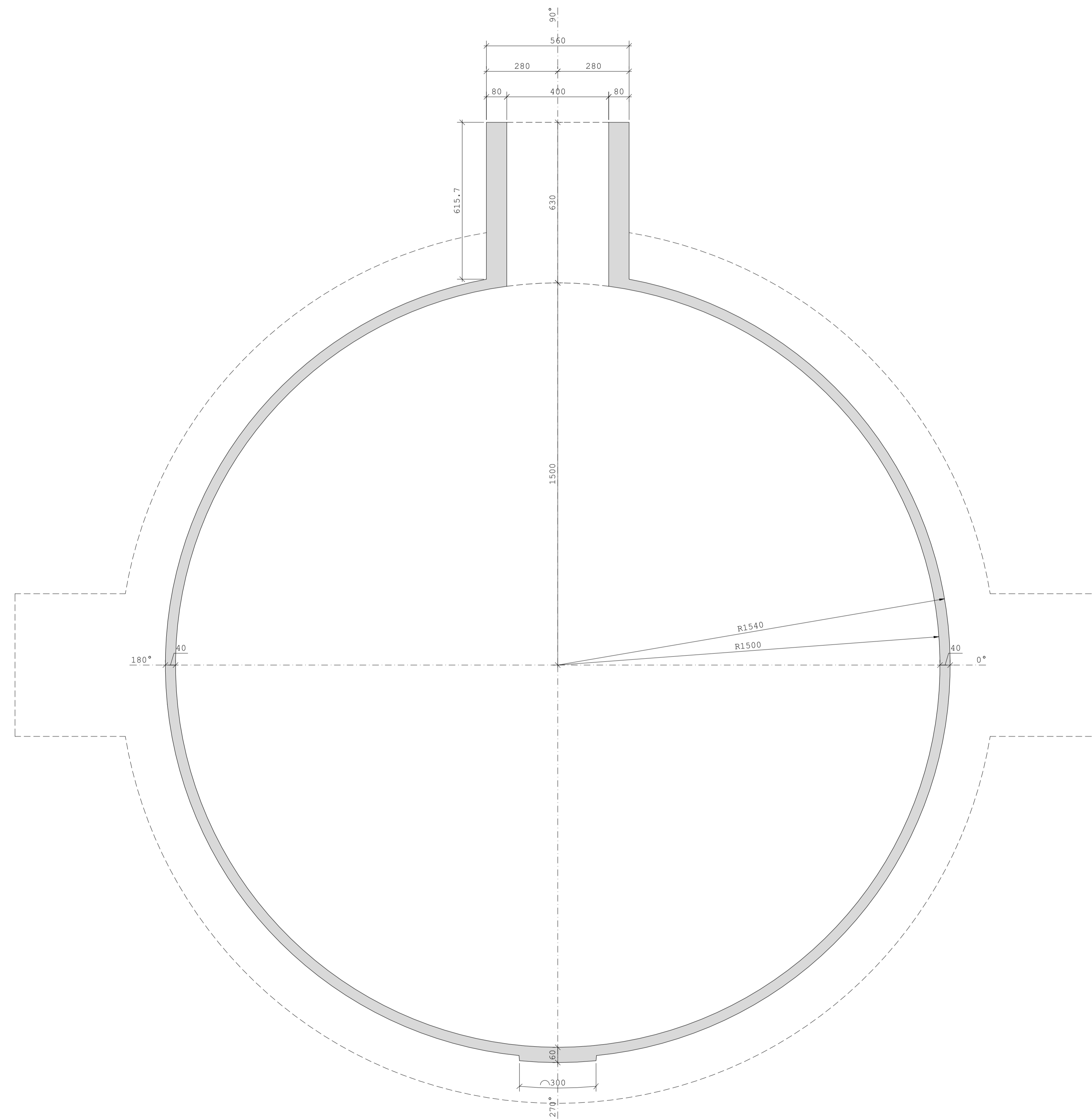
DATA DE EMISSÃO: MAIO/2022
 REVISÃO: R00

ORIENTADOR: RUBEM CLECIO SCHWINGEL

GRADUANDO: MAICOM JEAN HILBIG

GEOMETRIA DO SILO - ANEL INFERIOR - NÍVEL 4.50

Escala: 1/100



NOTAS DE PROJETO

- 01) VER MEMORIAL DE CÁLCULO
- 02) DEVERÃO SER OBSERVADAS AS DEMAIS NOTAS PERTINENTES A CADA PLANTA
- 03) CLASSE DE AGRESSIVIDADE AMBIENTAL: CAA - III
- 04) COTAS EM CENTÍMETROS E ELEVAÇÕES EM METROS, EXCETO SE INDICADO
- 05) CONSULTAR O PROJETISTA SE QUALQUER DIMENSÃO DIVERGIR, NA OBRA, DA COTA DE PROJETO
- 06) OS ELEMENTOS DA ESTRUTURA SÓ PODEM SER FURADOS COM A PRÉVIA AUTORIZAÇÃO DO RESPONSÁVEL TÉCNICO DO PROJETO, EXCETO SE INDICADO
- 07) TODAS AS SOLDAS DEVERÃO SER EXECUTADAS COM ELETRODO E70XX
- 08) SERVIÇOS DE MONTAGEM DE FÔRMAS, POSICIONAMENTO DE CHUMBADORES E ARMADURAS, TRATAMENTO DE SUPERFÍCIES E PROTENSÃO, DEVEM SER RIGOROSAMENTE EXECUTADOS
- 09) TODAS AS PEÇAS METÁLICAS DEVERÃO RECEBER GALVANIZAÇÃO À FOGO E PINTURA PROTETORA A CORROSÃO
- 10) O ESCORAMENTO E OS CIMBRAMENTOS NÃO FAZEM PARTE DO ESCOPO DESTA PROJETO
- 11) OS ELEMENTOS DESTINADOS À SEGURANÇA DOS TRABALHADORES E TRANSEUNTES À EXECUÇÃO DA OBRA, NÃO FAZEM PARTE DO ESCOPO DO PRESENTE PROJETO

MATERIAIS EMPREGADOS

CONCRETO IN LOCO:

CLASSE (ABNT NBR 8953): C45 - $f_{ck} \geq 45$ MPa
 $f_{cj} \geq 38$ MPa

COBRIMENTO NOMINAL: 40 mm (TOLERÂNCIA DE EXECUÇÃO 10 mm)

AÇOS:

AÇO CA-50
 AÇO CP-210RB
 AÇO A572Gr50

PROTENSÃO

SISTEMA: PÓS-TENSÃO NÃO ADERENTE COM CORDALHA ENGRAXADA
 ANCORAGEM ATIVA NAS DUAS EXTREMIDADES
 FORÇA DE PROTENSÃO: 235 kN

REVISÃO	DATA	DESCRIÇÃO	RESPONSÁVEL
R00	MAIO/2022	EMISSÃO INICIAL	MAICOM

PROJETO: PROJETO ESTRUTURAL DE SILO CILÍNDRICO DE CONCRETO PARA O ARMAZENAMENTO DE CLÍNQUER

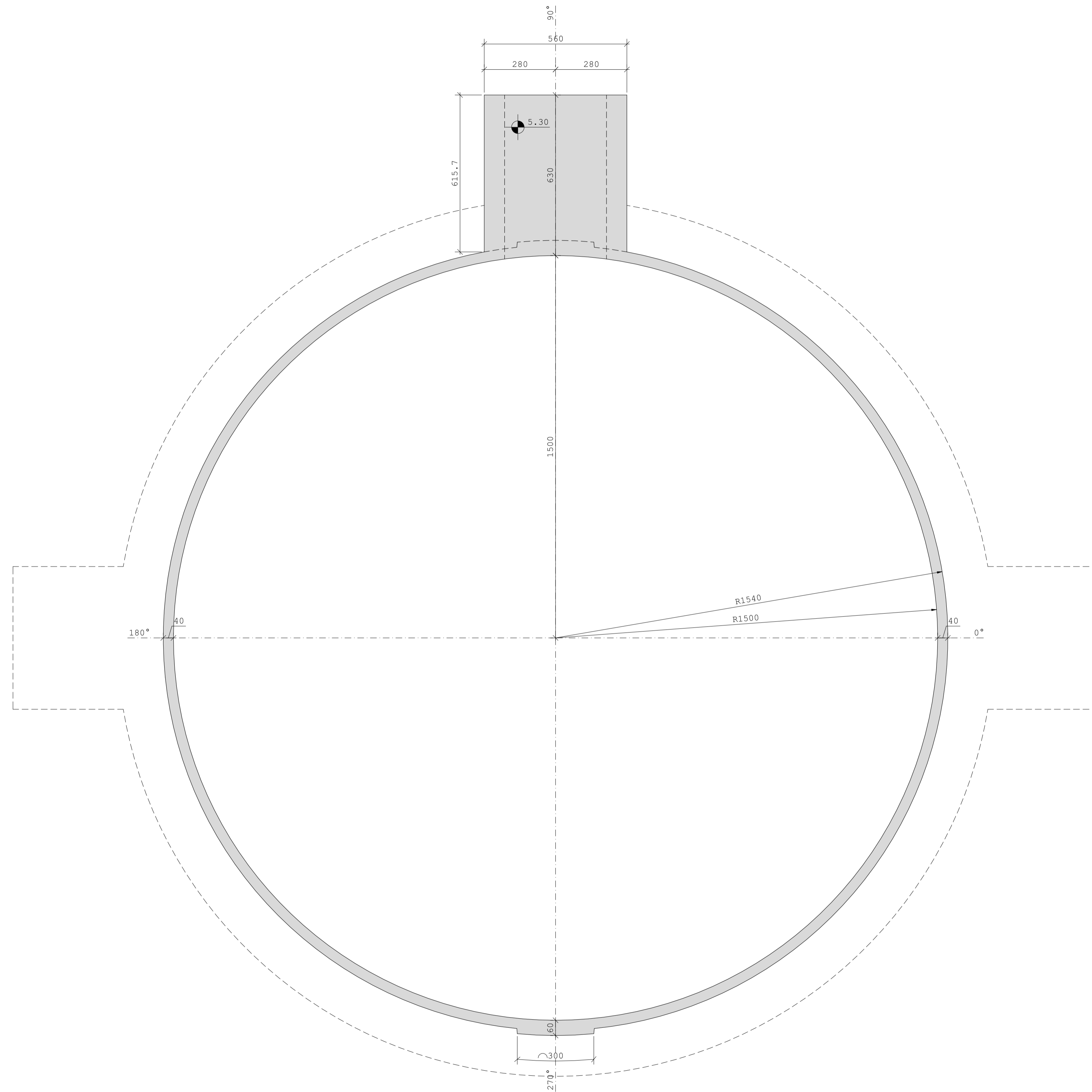
ASSUNTO: GEOMETRIA DO SILO - ANEL INFERIOR NÚMERO: 02/12

DATA DE EMISSÃO: MAIO/2022 REVISÃO: R00

ORIENTADOR: RUBEM CLECIO SCHWINGEL

GRADUANDO: MAICOM JEAN HILBIG

GEOMETRIA DO SILO - COBERTURA DO TÚNEL DE ACESSO - 5.30
Escala: 1/100



NOTAS DE PROJETO

- 01) VER MEMORIAL DE CÁLCULO
- 02) DEVERÃO SER OBSERVADAS AS DEMAIS NOTAS PERTINENTES A CADA PLANTA
- 03) CLASSE DE AGRESSIVIDADE AMBIENTAL: CAA - III
- 04) COTAS EM CENTÍMETROS E ELEVAÇÕES EM METROS, EXCETO SE INDICADO
- 05) CONSULTAR O PROJETISTA SE QUALQUER DIMENSÃO DIVERGIR, NA OBRA, DA COTA DE PROJETO
- 06) OS ELEMENTOS DA ESTRUTURA SÓ PODEM SER FURADOS COM A PRÉVIA AUTORIZAÇÃO DO RESPONSÁVEL TÉCNICO DO PROJETO, EXCETO SE INDICADO
- 07) TODAS AS SOLDAS DEVERÃO SER EXECUTADAS COM ELETRODO E70XX
- 08) SERVIÇOS DE MONTAGEM DE FÔRMAS, POSICIONAMENTO DE CHUMBADORES E ARMADURAS, TRATAMENTO DE SUPERFÍCIES E PROTENSÃO, DEVEM SER RIGOROSAMENTE EXECUTADOS
- 09) TODAS AS PEÇAS METÁLICAS DEVERÃO RECEBER GALVANIZAÇÃO À FOGO E PINTURA PROTETORA A CORROSÃO
- 10) O ESCORAMENTO E OS CIMBRAMENTOS NÃO FAZEM PARTE DO ESCOPO DESTA PROJETO
- 11) OS ELEMENTOS DESTINADOS À SEGURANÇA DOS TRABALHADORES E TRANSEUNTES À EXECUÇÃO DA OBRA, NÃO FAZEM PARTE DO ESCOPO DO PRESENTE PROJETO

MATERIAIS EMPREGADOS

CONCRETO IN LOCO:

CLASSE (ABNT NBR 8953): C45 - $f_{ck} \geq 45$ MPa
 $f_{cj} \geq 38$ MPa

COBRIMENTO NOMINAL: 40 mm (TOLERÂNCIA DE EXECUÇÃO 10 mm)

AÇOS:

AÇO CA-50
AÇO CP-210RB
AÇO A572Gr50

PROTENSÃO

SISTEMA: PÓS-TENSÃO NÃO ADERENTE COM CORDALHA ENGRAXADA
ANCORAGEM ATIVA NAS DUAS EXTREMIDADES
FORÇA DE PROTENSÃO: 235 kN

REVISÃO	DATA	DESCRIÇÃO	RESPONSÁVEL
R00	MAIO/2022	EMISSÃO INICIAL	MAICOM

PROJETO:

PROJETO ESTRUTURAL DE SILO CILÍNDRICO DE CONCRETO PARA O ARMAZENAMENTO DE CLÍNQUER

ASSUNTO:	NÚMERO:
GEOMETRIA DO SILO - ANEL INFERIOR E COBERTURA ACESSO SUPERIOR	03/12

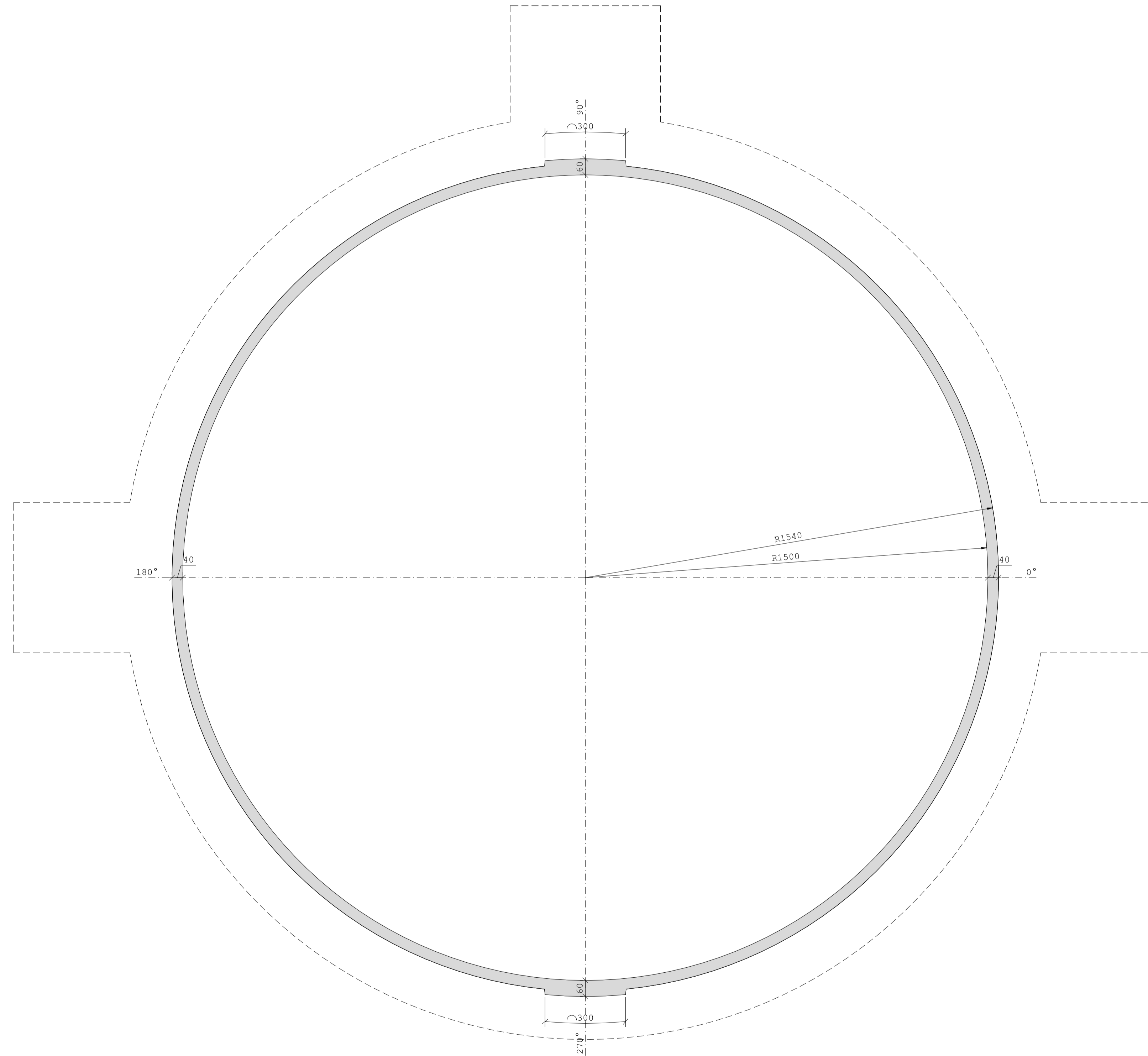
DATA DE EMISSÃO:	REVISÃO:
MAIO/2022	R00

ORIENTADOR:	RUBEM CLECIO SCHWINGEL
-------------	------------------------

GRADUANDO:	MAICOM JEAN HILBIG
------------	--------------------

GEOMETRIA DO SILO - ANEL INTERMEDIÁRIO - NÍVEL 5.30 À 28.50

Escala: 1/100



NOTAS DE PROJETO

- 01) VER MEMORIAL DE CÁLCULO
- 02) DEVERÃO SER OBSERVADAS AS DEMAIS NOTAS PERTINENTES A CADA PLANTA
- 03) CLASSE DE AGRESSIVIDADE AMBIENTAL: CAA - III
- 04) COTAS EM CENTÍMETROS E ELEVAÇÕES EM METROS, EXCETO SE INDICADO
- 05) CONSULTAR O PROJETISTA SE QUALQUER DIMENSÃO DIVERGIR, NA OBRA, DA COTA DE PROJETO
- 06) OS ELEMENTOS DA ESTRUTURA SÓ PODEM SER FURADOS COM A PRÉVIA AUTORIZAÇÃO DO RESPONSÁVEL TÉCNICO DO PROJETO, EXCETO SE INDICADO
- 07) TODAS AS SOLDAS DEVERÃO SER EXECUTADAS COM ELETRODO E70XX
- 08) SERVIÇOS DE MONTAGEM DE FÔRMAS, POSICIONAMENTO DE CHUMBADORES E ARMADURAS, TRATAMENTO DE SUPERFÍCIES E PROTENSÃO, DEVEM SER RIGOROSAMENTE EXECUTADOS
- 09) TODAS AS PEÇAS METÁLICAS DEVERÃO RECEBER GALVANIZAÇÃO À FOGO E PINTURA PROTETORA A CORROSÃO
- 10) O ESCORAMENTO E OS CIMBRAMENTOS NÃO FAZEM PARTE DO ESCOPO DESTA PROJETO
- 11) OS ELEMENTOS DESTINADOS À SEGURANÇA DOS TRABALHADORES E TRANSEUNTES À EXECUÇÃO DA OBRA, NÃO FAZEM PARTE DO ESCOPO DO PRESENTE PROJETO

MATERIAIS EMPREGADOS

CONCRETO IN LOCO:

CLASSE (ABNT NBR 8953): C45 - $f_{ck} \geq 45$ MPa
 $f_{cj} \geq 38$ MPa

COBRIMENTO NOMINAL: 40 mm (TOLERÂNCIA DE EXECUÇÃO 10 mm)

AÇOS:

AÇO CA-50
 AÇO CP-210RB
 AÇO A572Gr50

PROTENSÃO

SISTEMA: PÓS-TENSÃO NÃO ADERENTE COM CORDALHA ENGRAXADA
 ANCORAGEM ATIVA NAS DUAS EXTREMIDADES
 FORÇA DE PROTENSÃO: 235 kN

REVISÃO	DATA	DESCRIÇÃO	RESPONSÁVEL
R00	MAIO/2022	EMISSÃO INICIAL	MAICOM

PROJETO:

PROJETO ESTRUTURAL DE SILO CILÍNDRICO DE CONCRETO PARA O ARMAZENAMENTO DE CLÍNQUER

ASSUNTO:	GEOMETRIA DO SILO - ANEL INTERMEDIÁRIO	NÚMERO:	04/12
----------	--	---------	-------

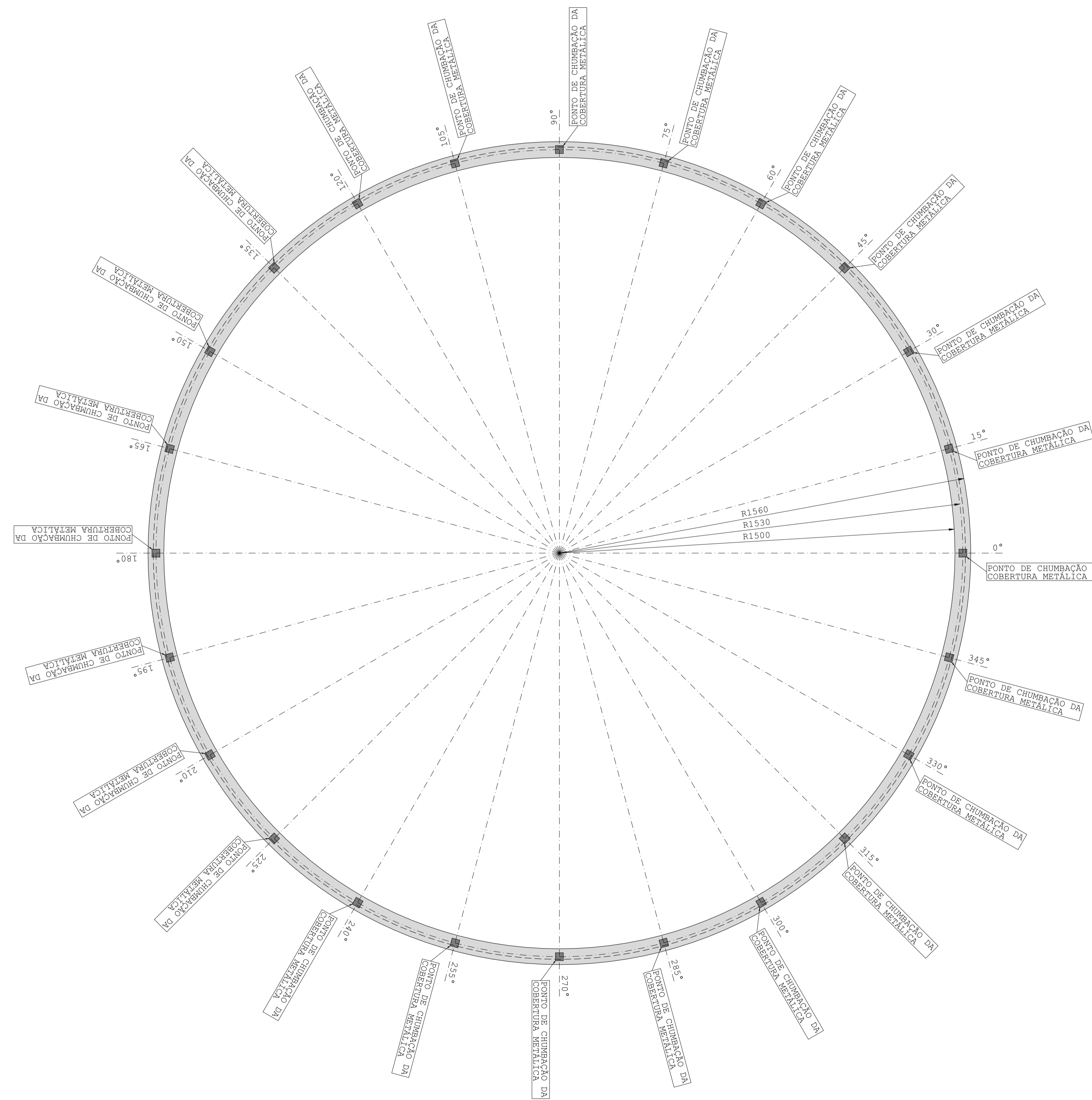
DATA DE EMISSÃO:	MAIO/2022	REVISÃO:	R00
------------------	-----------	----------	-----

ORIENTADOR:	RUBEM CLECIO SCHWINGEL
-------------	------------------------

GRADUANDO:	MAICOM JEAN HILBIG
------------	--------------------

GEOMETRIA DO SILO - ANEL SUPERIOR - NÍVEL 30.00

Escala: 1/100



NOTAS DE PROJETO

- 01) VER MEMORIAL DE CÁLCULO
- 02) DEVERÃO SER OBSERVADAS AS DEMAIS NOTAS PERTINENTES A CADA PLANTA
- 03) CLASSE DE AGRESSIVIDADE AMBIENTAL: CAA - III
- 04) COTAS EM CENTÍMETROS E ELEVAÇÕES EM METROS, EXCETO SE INDICADO
- 05) CONSULTAR O PROJETISTA SE QUALQUER DIMENSÃO DIVERGIR, NA OBRA, DA COTA DE PROJETO
- 06) OS ELEMENTOS DA ESTRUTURA SÓ PODEM SER FURADOS COM A PRÉVIA AUTORIZAÇÃO DO RESPONSÁVEL TÉCNICO DO PROJETO, EXCETO SE INDICADO
- 07) TODAS AS SOLDAS DEVERÃO SER EXECUTADAS COM ELETRODO E70XX
- 08) SERVIÇOS DE MONTAGEM DE FÔRMAS, POSICIONAMENTO DE CHUMBADORES E ARMADURAS, TRATAMENTO DE SUPERFÍCIES E PROTENSÃO, DEVEM SER RIGOROSAMENTE EXECUTADOS
- 09) TODAS AS PEÇAS METÁLICAS DEVERÃO RECEBER GALVANIZAÇÃO À FOGO E PINTURA PROTETORA A CORROSÃO
- 10) O ESCORAMENTO E OS CIMBRAMENTOS NÃO FAZEM PARTE DO ESCOPO DESTA PROJETO
- 11) OS ELEMENTOS DESTINADOS À SEGURANÇA DOS TRABALHADORES E TRANSEUNTES À EXECUÇÃO DA OBRA, NÃO FAZEM PARTE DO ESCOPO DO PRESENTE PROJETO

MATERIAIS EMPREGADOS

CONCRETO IN LOCO:

CLASSE (ABNT NBR 8953): C45 - $f_{ck} \geq 45$ MPa
 $f_{cj} \geq 38$ MPa

COBRIMENTO NOMINAL: 40 mm (TOLERÂNCIA DE EXECUÇÃO 10 mm)

AÇOS:

AÇO CA-50
 AÇO CP-210RB
 AÇO A572Gr50

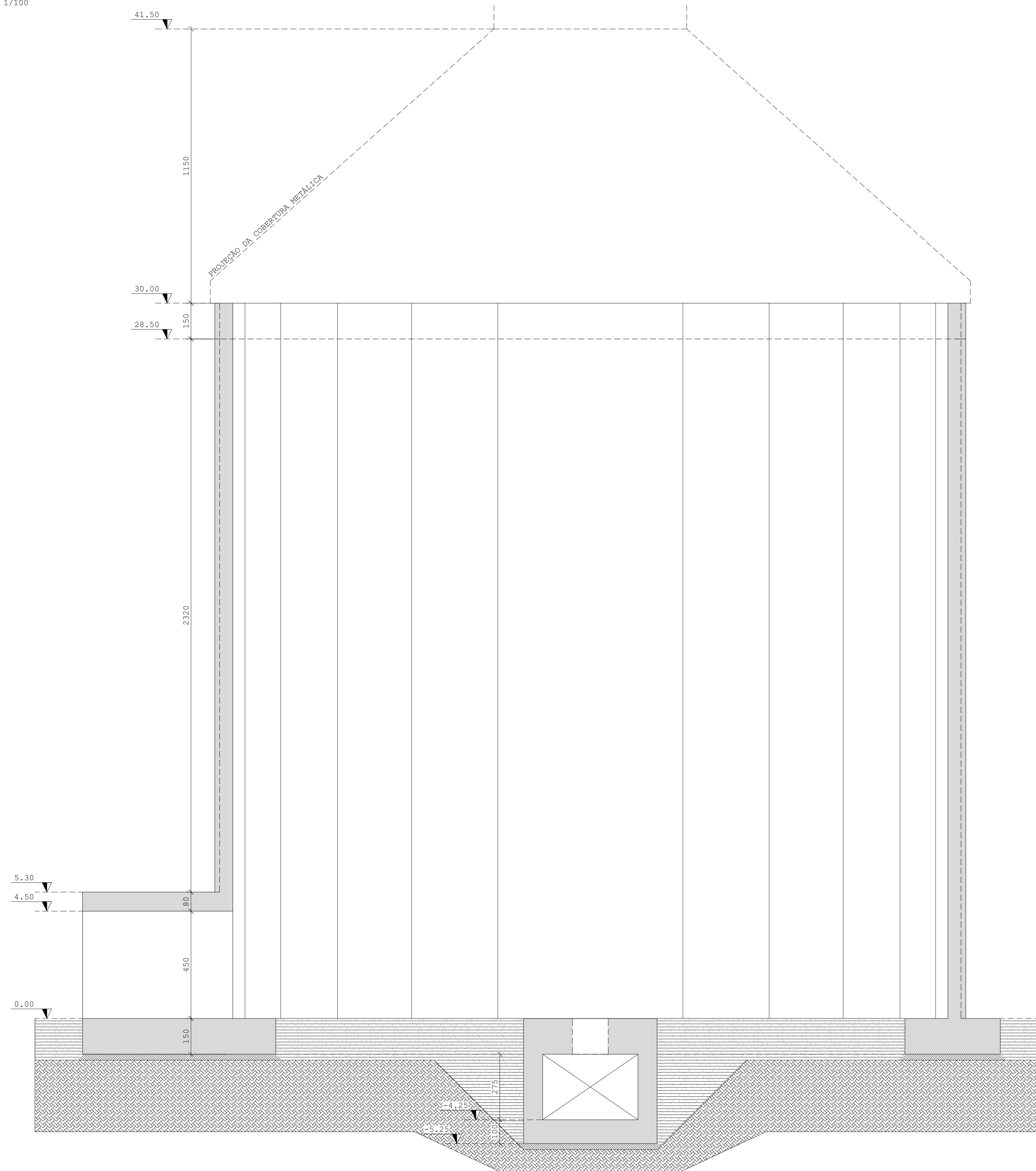
PROTENSÃO

SISTEMA: PÓS-TENSÃO NÃO ADERENTE COM CORDALHA ENGRAXADA
 ANCORAGEM ATIVA NAS DUAS EXTREMIDADES
 FORÇA DE PROTENSÃO: 235 kN

R00	MAIO/2022	EMIÇÃO INICIAL	MAICOM
REVISÃO	DATA	DESCRIÇÃO	RESPONSÁVEL
PROJETO:			
PROJETO ESTRUTURAL DE SILO CILÍNDRICO DE CONCRETO PARA O ARMAZENAMENTO DE CLÍNQUER			
ASSUNTO:	GEOMETRIA DO SILO - ANEL SUPERIOR		NÚMERO: 05/12
DATA DE EMISSÃO:	MAIO/2022		REVISÃO: R00
ORIENTADOR:	RUBEM CLECIO SCHWINGEL		
GRADUANDO:	MAICOM JEAN HILBIG		

GEOMETRIA DO SILO - CORTE EIXOS 90° E 270°

Escala: 1/100



NOTAS DE PROJETO

- 01) VER MEMORIAL DE CÁLCULO
- 02) DEVERÃO SER OBSERVADAS AS DEMAIS NOTAS PERTINENTES A CADA PLANTA
- 03) CLASSE DE AGRESSIVIDADE AMBIENTAL: CAA - III
- 04) COTAS EM CENTÍMETROS E ELEVAÇÕES EM METROS, EXCETO SE INDICADO
- 05) CONSULTAR O PROJETISTA SE QUALQUER DIMENSÃO DIVERGIR, NA OBRA, DA COTA DE PROJETO
- 06) OS ELEMENTOS DA ESTRUTURA SÓ PODEM SER FURADOS COM A PRÉVIA AUTORIZAÇÃO DO RESPONSÁVEL TÉCNICO DO PROJETO, EXCETO SE INDICADO
- 07) TODAS AS SOLDAS DEVERÃO SER EXECUTADAS COM ELETRODO E70XX
- 08) SERVIÇOS DE MONTAGEM DE FÔRMAS, POSICIONAMENTO DE CHUMBADORES E ARMADURAS, TRATAMENTO DE SUPERFÍCIES E PROTENSÃO, DEVEM SER RIGOROSAMENTE EXECUTADOS
- 09) TODAS AS PEÇAS METÁLICAS DEVERÃO RECEBER GALVANIZAÇÃO À FOGO E PINTURA PROTETORA A CORROSÃO
- 10) O ESCORAMENTO E OS CIMBRAMENTOS NÃO FAZEM PARTE DO ESCOPO DESTA PROJETO
- 11) OS ELEMENTOS DESTINADOS À SEGURANÇA DOS TRABALHADORES E TRANSEUNTES À EXECUÇÃO DA OBRA, NÃO FAZEM PARTE DO ESCOPO DO PRESENTE PROJETO

MATERIAIS EMPREGADOS

CONCRETO IN LOCO:

CLASSE (ABNT NBR 8953): C45 - $f_{ck} \geq 45$ MPa
 $f_{cj} \geq 38$ MPa

COBRIMENTO NOMINAL: 40 mm (TOLERÂNCIA DE EXECUÇÃO 10 mm)

AÇOS:

AÇO CA-50
 AÇO CP-210RB
 AÇO A572Gr50

PROTENSÃO

SISTEMA: PÓS-TENSÃO NÃO ADERENTE COM CORDALHA ENGRAXADA
 ANCORAGEM ATIVA NAS DUAS EXTREMIDADES
 FORÇA DE PROTENSÃO: 235 kN

REVISÃO	DATA	DESCRIÇÃO	RESPONSÁVEL
R00	MAIO/2022	EMIÇÃO INICIAL	MAICOM

PROJETO:

PROJETO ESTRUTURAL DE SILO CILÍNDRICO DE CONCRETO PARA O ARMAZENAMENTO DE CLÍNQUER

ASSUNTO:	NÚMERO:
GEOMETRIA DO SILO - CORTE EIXOS 90° E 270°	06/12

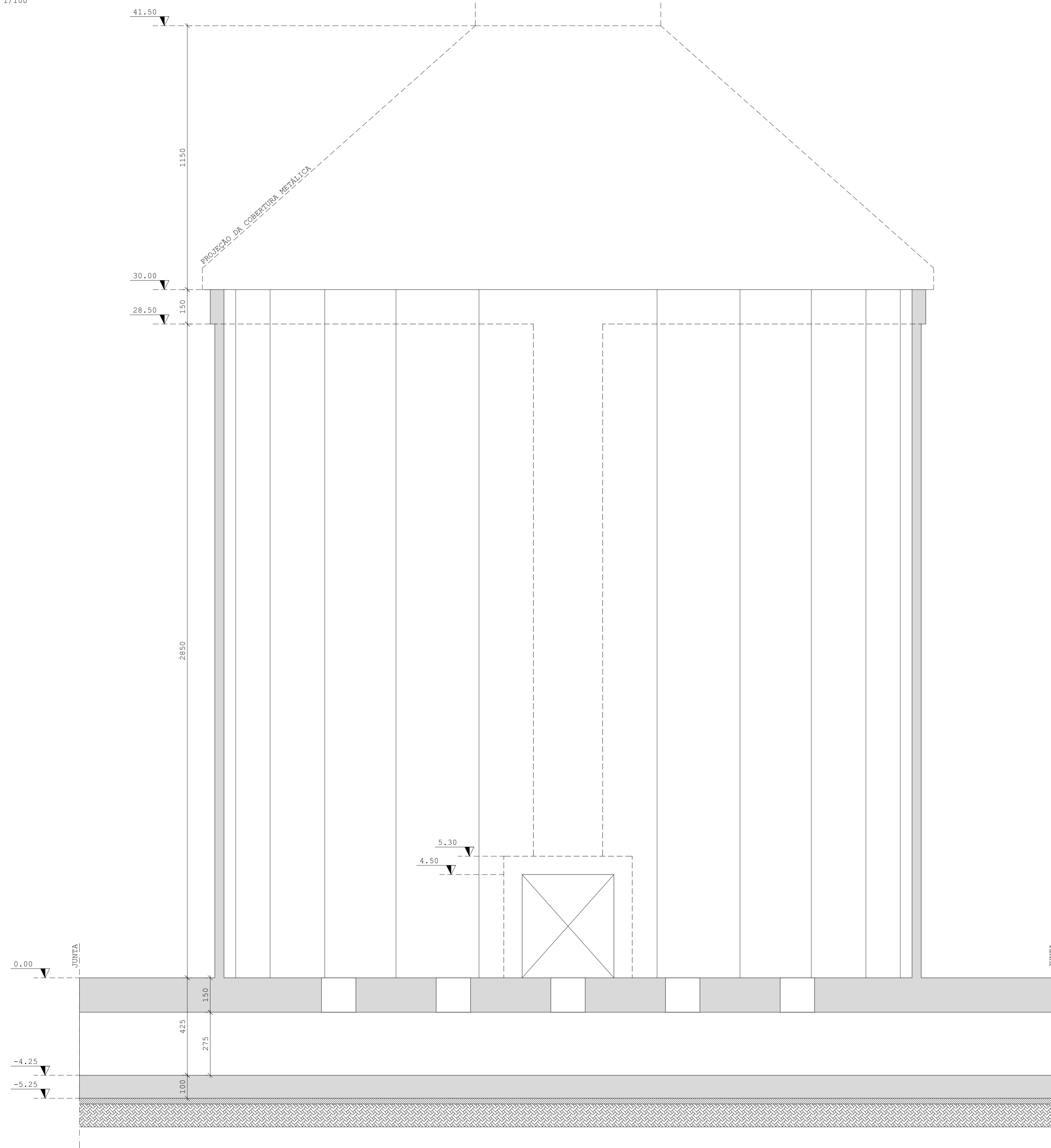
DATA DE EMISSÃO:	REVISÃO:
MAIO/2022	R00

ORIENTADOR:
RUBEM CLECIO SCHWINGEL

GRADUANDO:
MAICOM JEAN HILBIG

GEOMETRIA DO SILO - CORTE EIXOS 0° E 180°

Escala: 1/100



NOTAS DE PROJETO

- 01) VER MEMORIAL DE CÁLCULO
- 02) DEVERÃO SER OBSERVADAS AS DEMAIS NOTAS PERTINENTES A CADA PLANTA
- 03) CLASSE DE AGRESSIVIDADE AMBIENTAL: CAA - III
- 04) COTAS EM CENTÍMETROS E ELEVAÇÕES EM METROS, EXCETO SE INDICADO
- 05) CONSULTAR O PROJETISTA SE QUALQUER DIMENSÃO DIVERGIR, NA OBRA, DA COTA DE PROJETO
- 06) OS ELEMENTOS DA ESTRUTURA SÓ PODEM SER FURADOS COM A PRÉVIA AUTORIZAÇÃO DO RESPONSÁVEL TÉCNICO DO PROJETO, EXCETO SE INDICADO
- 07) TODAS AS SOLDAS DEVERÃO SER EXECUTADAS COM ELETRODO E70XX
- 08) SERVIÇOS DE MONTAGEM DE FÔRMAS, POSICIONAMENTO DE CHUMBADORES E ARMADURAS, TRATAMENTO DE SUPERFÍCIES E PROTENSÃO, DEVEM SER RIGOROSAMENTE EXECUTADOS
- 09) TODAS AS PEÇAS METÁLICAS DEVERÃO RECEBER GALVANIZAÇÃO À FOGO E PINTURA PROTETORA A CORROSÃO
- 10) O ESCORAMENTO E OS CIMBRAMENTOS NÃO FAZEM PARTE DO ESCOPO DESTA PROJETO
- 11) OS ELEMENTOS DESTINADOS À SEGURANÇA DOS TRABALHADORES E TRANSEUNTES À EXECUÇÃO DA OBRA, NÃO FAZEM PARTE DO ESCOPO DO PRESENTE PROJETO

MATERIAIS EMPREGADOS

CONCRETO IN LOCO:

CLASSE (ABNT NBR 8953): C45 - $f_{ck} \geq 45$ MPa
 $f_{cj} \geq 38$ MPa

COBRIMENTO NOMINAL: 40 mm (TOLERÂNCIA DE EXECUÇÃO 10 mm)

AÇOS:

AÇO CA-50
 AÇO CP-210RB
 AÇO A572Gr50

PROTENSÃO

SISTEMA: PÓS-TENSÃO NÃO ADERENTE COM CORDALHA ENGRAXADA
 ANCORAGEM ATIVA NAS DUAS EXTREMIDADES
 FORÇA DE PROTENSÃO: 235 kN

REVISÃO	DATA	DESCRIÇÃO	RESPONSÁVEL
R00	MAIO/2022	EMIÇÃO INICIAL	MAICOM

PROJETO: PROJETO ESTRUTURAL DE SILO CILÍNDRICO DE CONCRETO PARA O ARMAZENAMENTO DE CLÍNQUER

ASSUNTO: GEOMETRIA DO SILO - CORTE EIXOS 0° E 180°

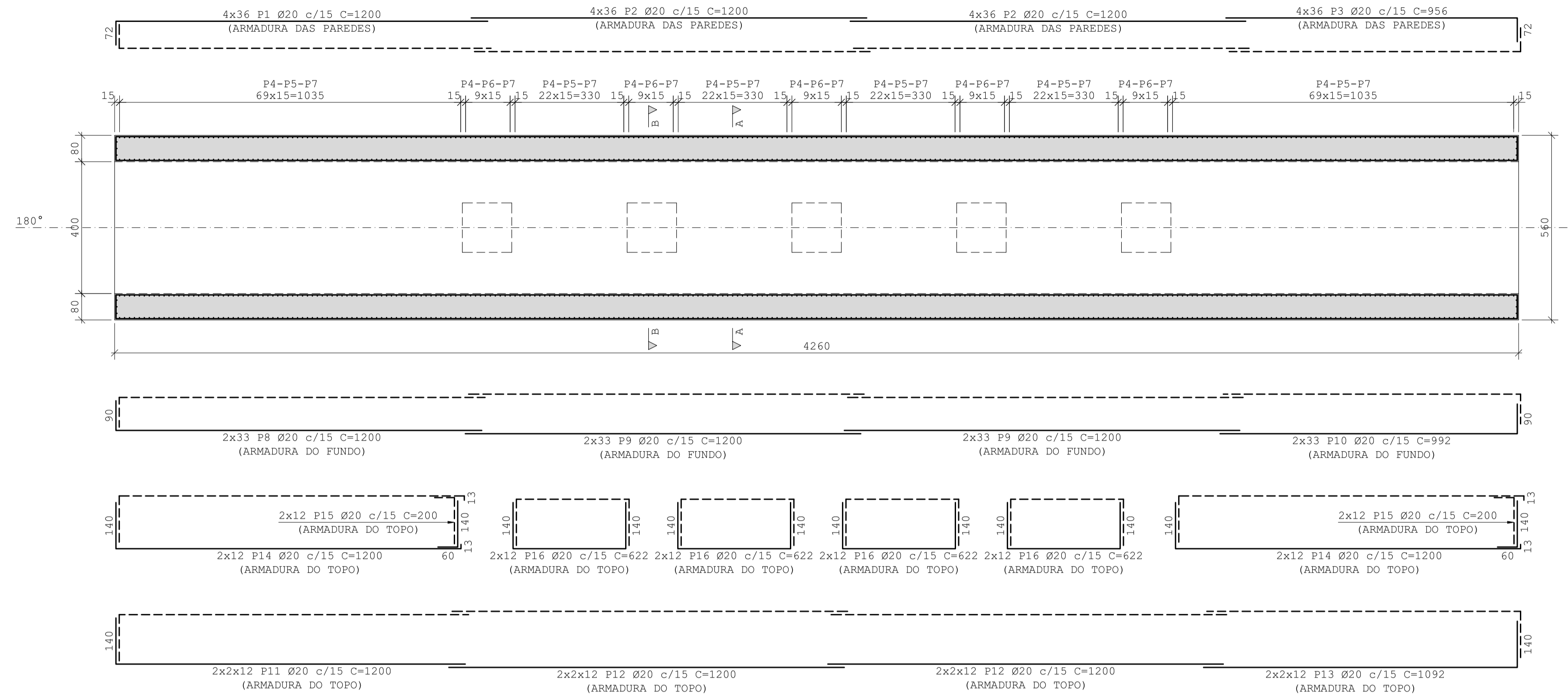
DATA DE EMISSÃO: MAIO/2022

ORIENTADOR: RUBEM CLECIO SCHWINGEL

GRADUANDO: MAICOM JEAN HILBIG

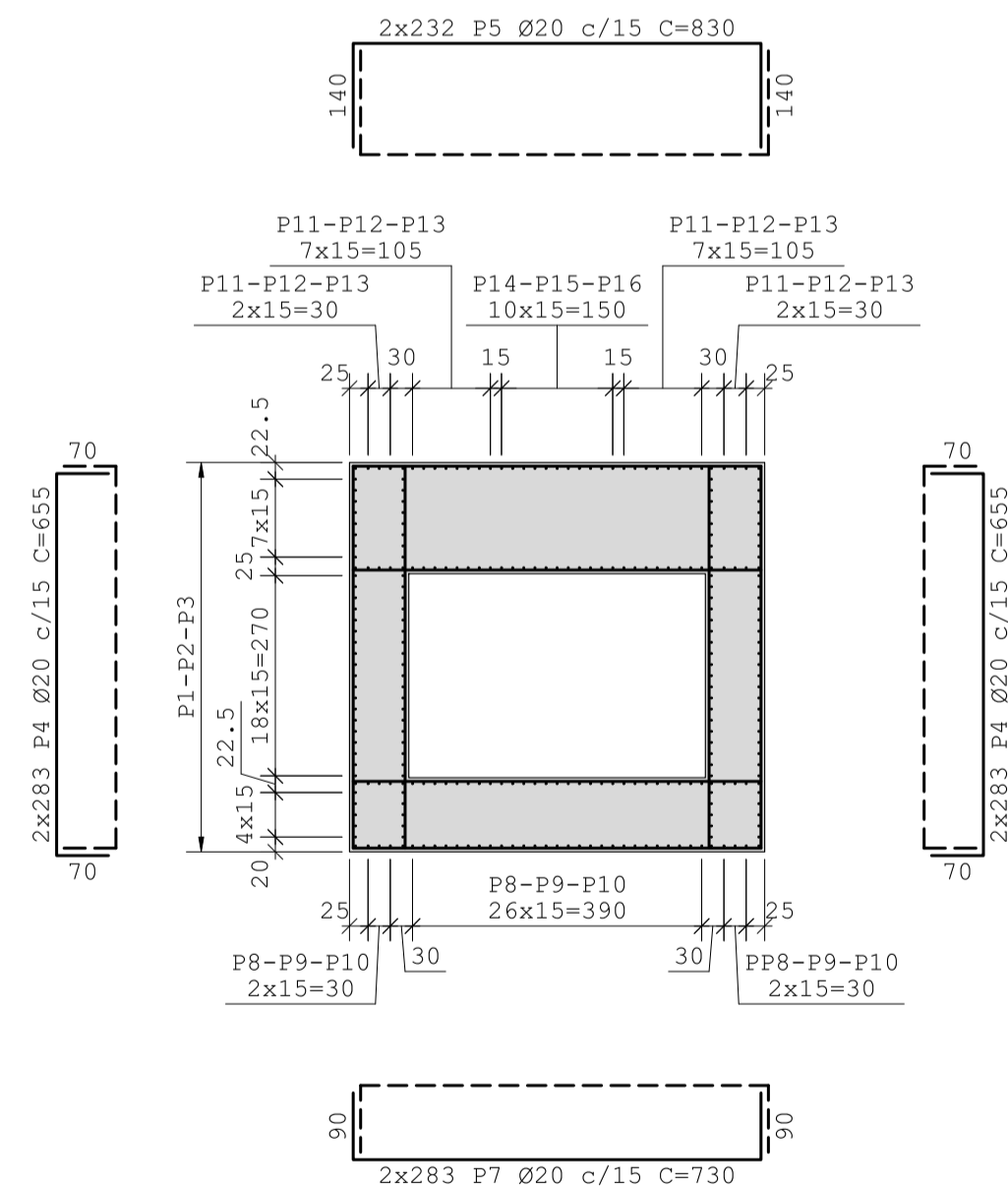
ARMADURAS DO TÚNEL DE EXTRAÇÃO - PAREDES, FUNDO E TOPO

Escala: 1/100



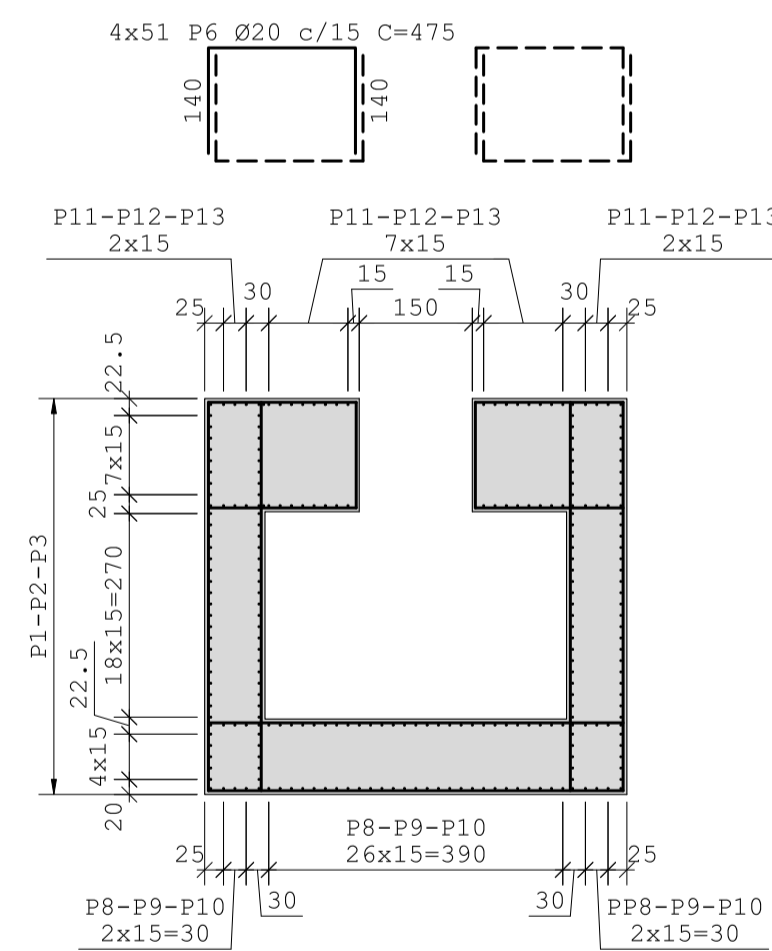
ARMADURAS DO TÚNEL DE EXTRAÇÃO - CORTE A-A

Escala: 1/100



ARMADURAS DO TÚNEL DE EXTRAÇÃO - CORTE B-B

Escala: 1/100



RELAÇÃO DO AÇO

ELEMENTO	AÇO	N	DIAM. (mm)	QUANT.	C. UNIT (cm)	C. TOTAL (cm)
TÚNEL DE EXTRAÇÃO	CA50	1	20	144	1200	172800
	CA50	2	20	288	1200	345600
	CA50	3	20	144	956	137664
	CA50	4	20	1132	655	741460
	CA50	5	20	464	830	385120
	CA50	6	20	204	475	96900
	CA50	7	20	566	730	413180
	CA50	8	20	66	1200	79200
	CA50	9	20	132	1200	158400
	CA50	10	20	66	992	65472
	CA50	11	20	48	1200	57600
	CA50	12	20	96	1200	115200
	CA50	13	20	48	1092	52416
	CA50	14	20	48	1200	57600
	CA50	15	20	48	200	9600
	CA50	16	20	96	622	59712

RESUMO DO AÇO

AÇO	DIAM. (mm)	C. TOTAL (m)
CA50	20	29479

PESO TOTAL (kg)	
CA50	72696

Volume de concreto(C-45)= 783,8 m³

NOTAS DE PROJETO

- 01) VER MEMORIAL DE CÁLCULO
- 02) DEVERÃO SER OBSERVADAS AS DEMAIS NOTAS PERTINENTES A CADA PLANTA
- 03) CLASSE DE AGRESSIVIDADE AMBIENTAL: CAA - III
- 04) COTAS EM CENTÍMETROS E ELEVAÇÕES EM METROS, EXCETO SE INDICADO
- 05) CONSULTAR O PROJETISTA SE QUALQUER DIMENSÃO DIVERGIR, NA OBRA, DA COTA DE PROJETO
- 06) OS ELEMENTOS DA ESTRUTURA SÓ PODEM SER FURADOS COM A PRÉVIA AUTORIZAÇÃO DO RESPONSÁVEL TÉCNICO DO PROJETO, EXCETO SE INDICADO
- 07) TODAS AS SOLDAS DEVERÃO SER EXECUTADAS COM ELETRODO E70XX
- 08) SERVIÇOS DE MONTAGEM DE FÔRMAS, POSICIONAMENTO DE CHUMBADORES E ARMADURAS, TRATAMENTO DE SUPERFÍCIES E PROTENSÃO, DEVEM SER RIGOROSAMENTE EXECUTADOS
- 09) TODAS AS PEÇAS METÁLICAS DEVERÃO RECEBER GALVANIZAÇÃO À FOGO E PINTURA PROTETORA A CORROSÃO
- 10) O ESCORAMENTO E OS CIMBRAMENTOS NÃO FAZEM PARTE DO ESCOPO DESTA PROJETO
- 11) OS ELEMENTOS DESTINADOS À SEGURANÇA DOS TRABALHADORES E TRANSEUNTES À EXECUÇÃO DA OBRA, NÃO FAZEM PARTE DO ESCOPO DO PRESENTE PROJETO

MATERIAIS EMPREGADOS

CONCRETO IN LOCO:

CLASSE (ABNT NBR 8953): C45 - fck >= 45 MPa
fcj >= 38 MPa

COBRIMENTO NOMINAL: 40 mm (TOLERÂNCIA DE EXECUÇÃO 10 mm)

AÇOS:

AÇO CA-50
AÇO CP-210RB
AÇO A572Gr50

PROTENSÃO

SISTEMA: PÓS-TENSÃO NÃO ADERENTE COM CORDALHA ENGRAXADA
ANCORAGEM ATIVA NAS DUAS EXTREMIDADES
FORÇA DE PROTENSÃO: 235 kN

REVISÃO	DATA	DESCRIÇÃO	RESPONSÁVEL
R00	MAIO/2022	EMIÇÃO INICIAL	MAICOM

PROJETO:

PROJETO ESTRUTURAL DE SILO CILÍNDRICO DE CONCRETO PARA O ARMAZENAMENTO DE CLÍNQUER

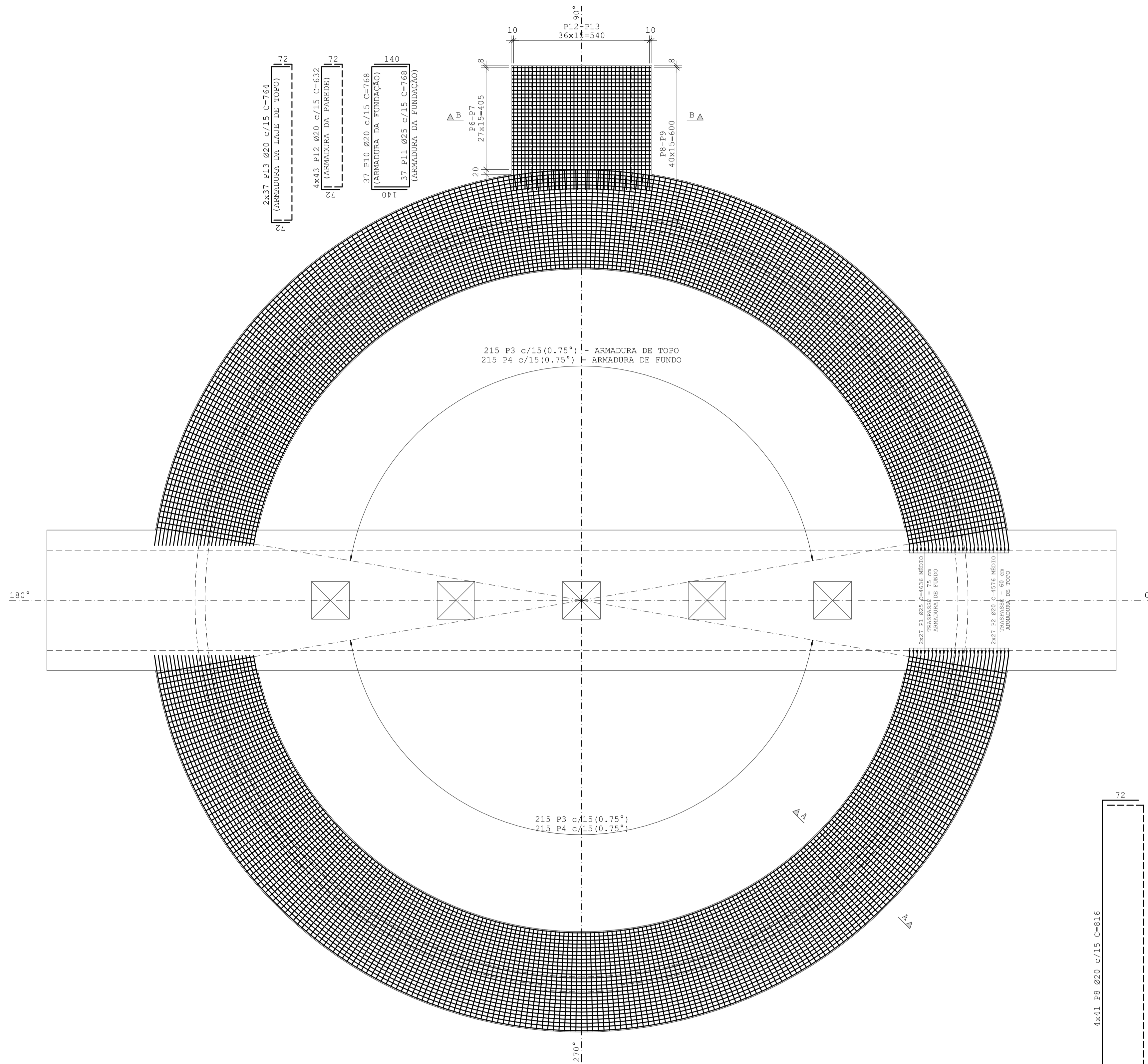
ASSUNTO:	NÚMERO:
ARMADURAS DO TÚNEL DE EXTRAÇÃO	09/12

DATA DE EMISSÃO:	REVISÃO:
MAIO/2022	R00

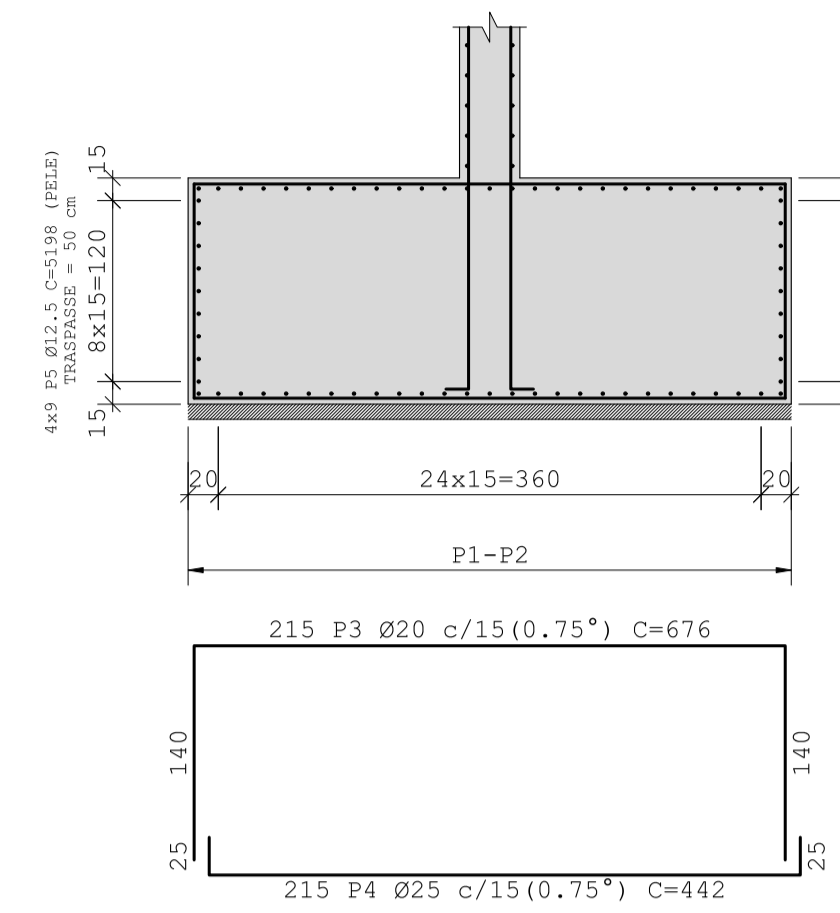
ORIENTADOR:	RESPONSÁVEL:
RUBEM CLECIO SCHWINGEL	

GRADUANDO:	RESPONSÁVEL:
MAICOM JEAN HILBIG	

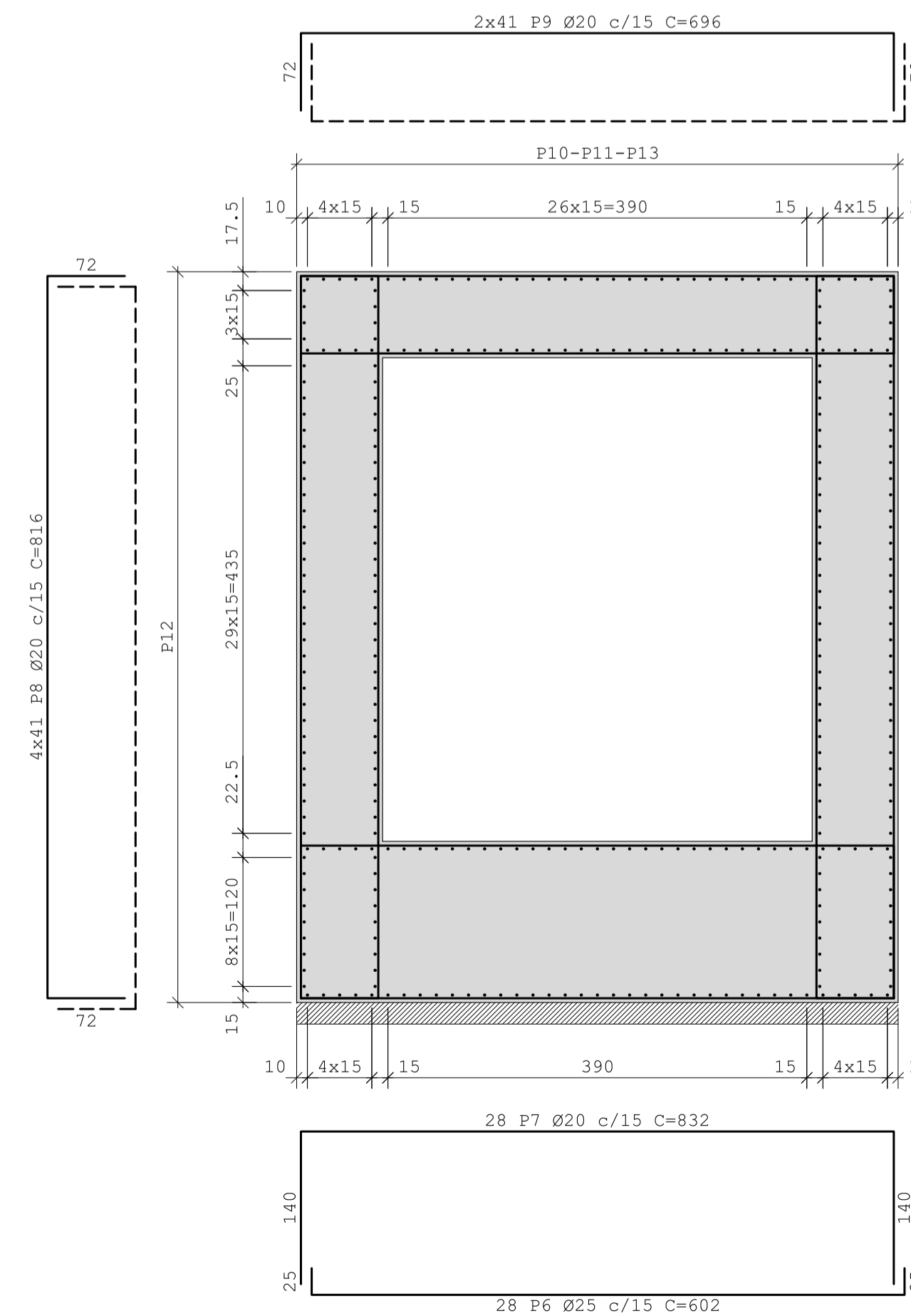
ARMADURAS DO ANEL DE FUNDAÇÃO E ACESSO SUPERIOR - BASE E TOPO
Escala: 1/100



ARMADURAS DO ANEL DE FUNDAÇÃO -
CORTE A-A
Escala: 1/50



ARMADURAS DO ACESSO SUPERIOR -
CORTE B-B
Escala: 1/50



RELAÇÃO DO AÇO

ELEMENTO	AÇO	N	DIAM. (mm)	QUANT.	C. UNIT (cm)	C. TOTAL (cm)
ANEL DE FUNDAÇÃO	CA50	1	25	54	4643	250722
E ACESSO SUPERIOR	CA50	2	20	54	4576	247104
	CA50	3	20	215	676	145340
	CA50	4	25	215	442	95030
	CA50	5	12,5	36	5198	187128
	CA50	6	25	28	602	16856
	CA50	7	20	28	832	23296
	CA50	8	20	164	816	133824
	CA50	9	20	82	696	57072
	CA50	10	20	37	768	28416
	CA50	11	25	37	768	28416
	CA50	12	20	172	632	108704
	CA50	13	20	74	764	56536

RESUMO DO AÇO

AÇO	DIAM. (mm)	C. TOTAL (m)
CA50	12,5	1871
CA50	20	8003
CA50	25	3910

PESO TOTAL (kg)	
CA50	36603

Volume de concreto(C-45)= 827,8 m³

NOTAS DE PROJETO

- 01) VER MEMORIAL DE CÁLCULO
- 02) DEVERÃO SER OBSERVADAS AS DEMAIS NOTAS PERTINENTES A CADA PLANTA
- 03) CLASSE DE AGRESSIVIDADE AMBIENTAL: CAA - III
- 04) COTAS EM CENTÍMETROS E ELEVAÇÕES EM METROS, EXCETO SE INDICADO
- 05) CONSULTAR O PROJETISTA SE QUALQUER DIMENSÃO DIVERGIR, NA OBRA, DA COTA DE PROJETO
- 06) OS ELEMENTOS DA ESTRUTURA SÓ PODEM SER FURADOS COM A PRÉVIA AUTORIZAÇÃO DO RESPONSÁVEL TÉCNICO DO PROJETO, EXCETO SE INDICADO
- 07) TODAS AS SOLDAS DEVERÃO SER EXECUTADAS COM ELETRODO E70XX
- 08) SERVIÇOS DE MONTAGEM DE FÓRMAS, POSICIONAMENTO DE CHUMBADORES E ARMADURAS, TRATAMENTO DE SUPERFÍCIES E PROTENSÃO, DEVEM SER RIGOROSAMENTE EXECUTADOS
- 09) TODAS AS PEÇAS METÁLICAS DEVERÃO RECEBER GALVANIZAÇÃO À FOGO E PINTURA PROTETORA A CORROSÃO
- 10) O ESCORAMENTO E OS CIMBRAMENTOS NÃO FAZEM PARTE DO ESCOPO DESTA PROJETO
- 11) OS ELEMENTOS DESTINADOS À SEGURANÇA DOS TRABALHADORES E TRANSEUNTES A EXECUÇÃO DA OBRA, NÃO FAZEM PARTE DO ESCOPO DO PRESENTE PROJETO

MATERIAIS EMPREGADOS

CONCRETO IN LOCO:

CLASSE (ABNT NBR 8953): C45 - $f_{ck} \geq 45$ MPa
 $f_{cj} \geq 38$ MPa

COBRIMENTO NOMINAL: 40 mm (TOLERÂNCIA DE EXECUÇÃO 10 mm)

AÇOS:

AÇO CA-50
AÇO CP-210RB
AÇO A572Gr50

PROTENSÃO

SISTEMA: PÓS-TENSÃO NÃO ADERENTE COM CORDALHA ENGRAXADA
ANCORAGEM ATIVA NAS DUAS EXTREMIDADES
FORÇA DE PROTENSÃO: 235 kN

REVISÃO	DATA	DESCRIÇÃO	RESPONSÁVEL
R00	MAIO/2022	EMISSION INICIAL	MAICOM

PROJETO:

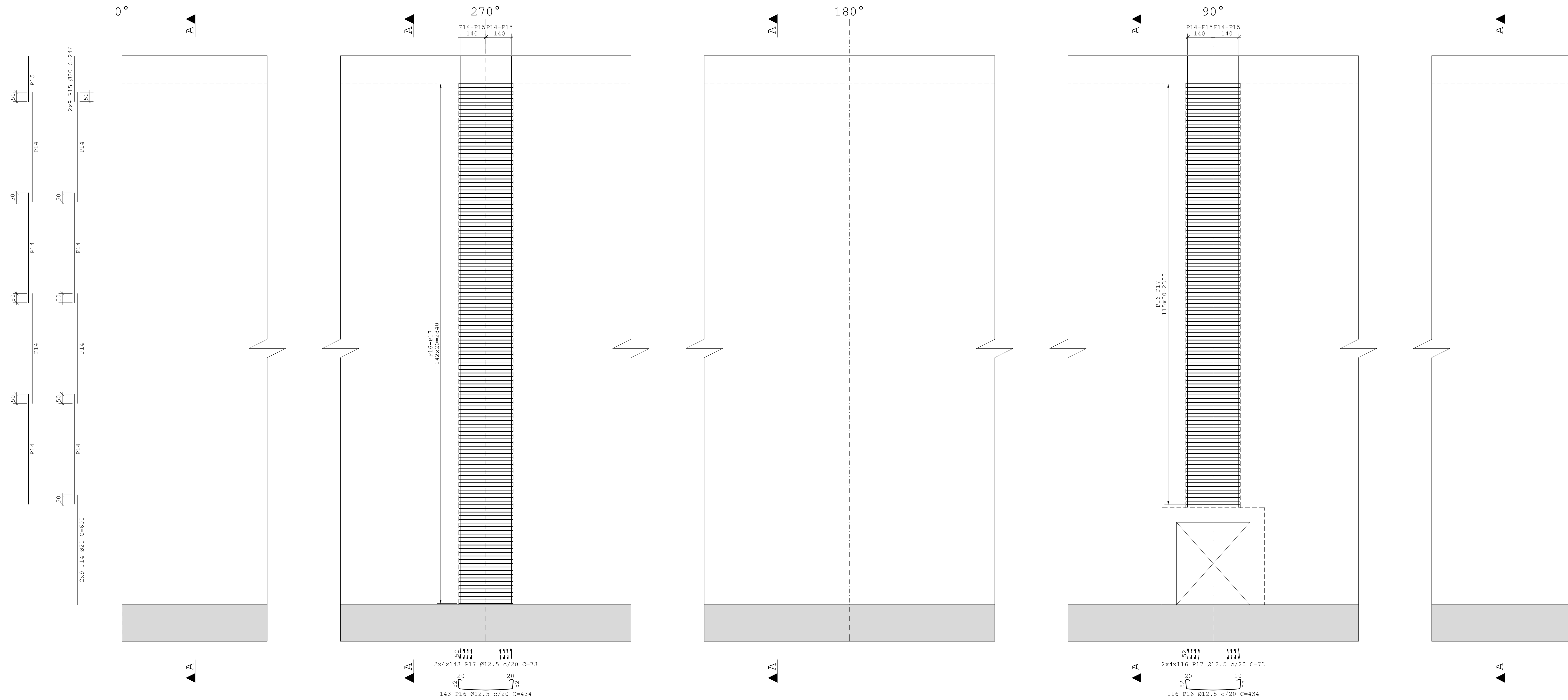
PROJETO ESTRUTURAL DE SILO CILÍNDRICO DE CONCRETO PARA O ARMAZENAMENTO DE CLÍNQUER

ASSUNTO:	NÚMERO:
ARMADURAS DO ANEL DE FUNDAÇÃO E ACESSO SUPERIOR	10/12

DATA DE EMISSÃO:	REVISÃO:
MAIO/2022	R00

ORIENTADOR:	GRADUANDO:
RUBEM CLECIO SCHWINGEL	MAICOM JEAN HILBIG

ARMADURAS ADICIONAIS - PAREDES DO SILO
Escala: 1/100



RELAÇÃO DO AÇO

ELEMENTO	ACO	N	DIAM. (mm)	QUANT.	C. UNIT (cm)	C. TOTAL (cm)
PAREDES	CA50	1	20	192	205	39360
	CA50	2	20	192	325	62400
	CA50	3	20	192	445	85440
	CA50	4	20	192	565	108480
	CA50	5	20	192	685	131520
	CA50	6	20	3840	600	2304000
	CA50	7	20	384	600	230400
	CA50	8	20	192	490	92160
	CA50	9	20	192	360	69120
	CA50	10	20	192	240	46080
	CA50	11	20	480	246	118080
	CA50	12	20	1350	1200	1620000
	CA50	13	20	1350	1200	1620000
	CA50	14	20	18	600	10800
	CA50	15	20	18	246	4428
	CA50	16	12,5	259	434	112406
	CA50	17	12,5	2072	73	151256

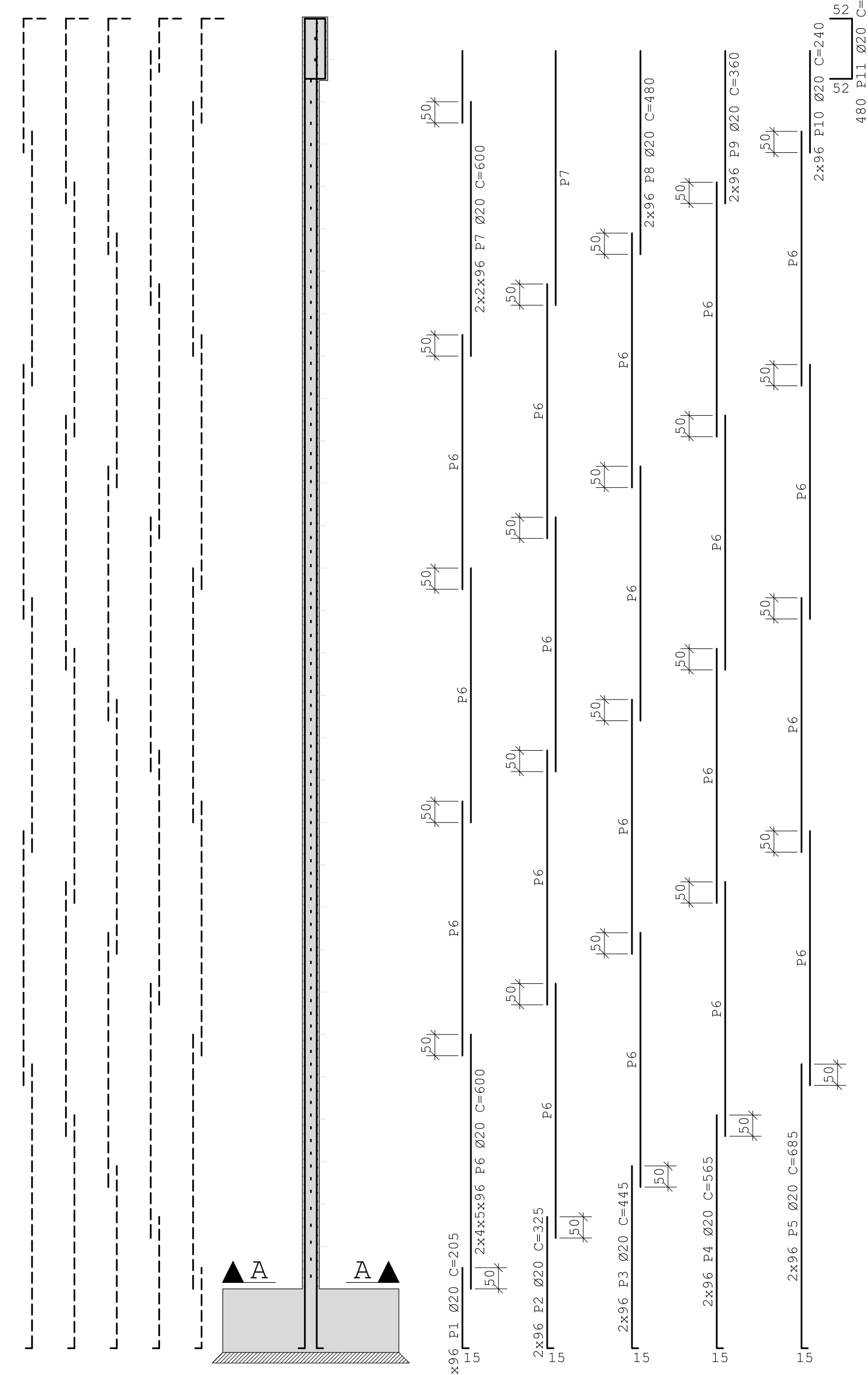
RESUMO DO AÇO

ACO	DIAM. (mm)	C. TOTAL (m)
CA50	12,5	2637
CA50	20	65423

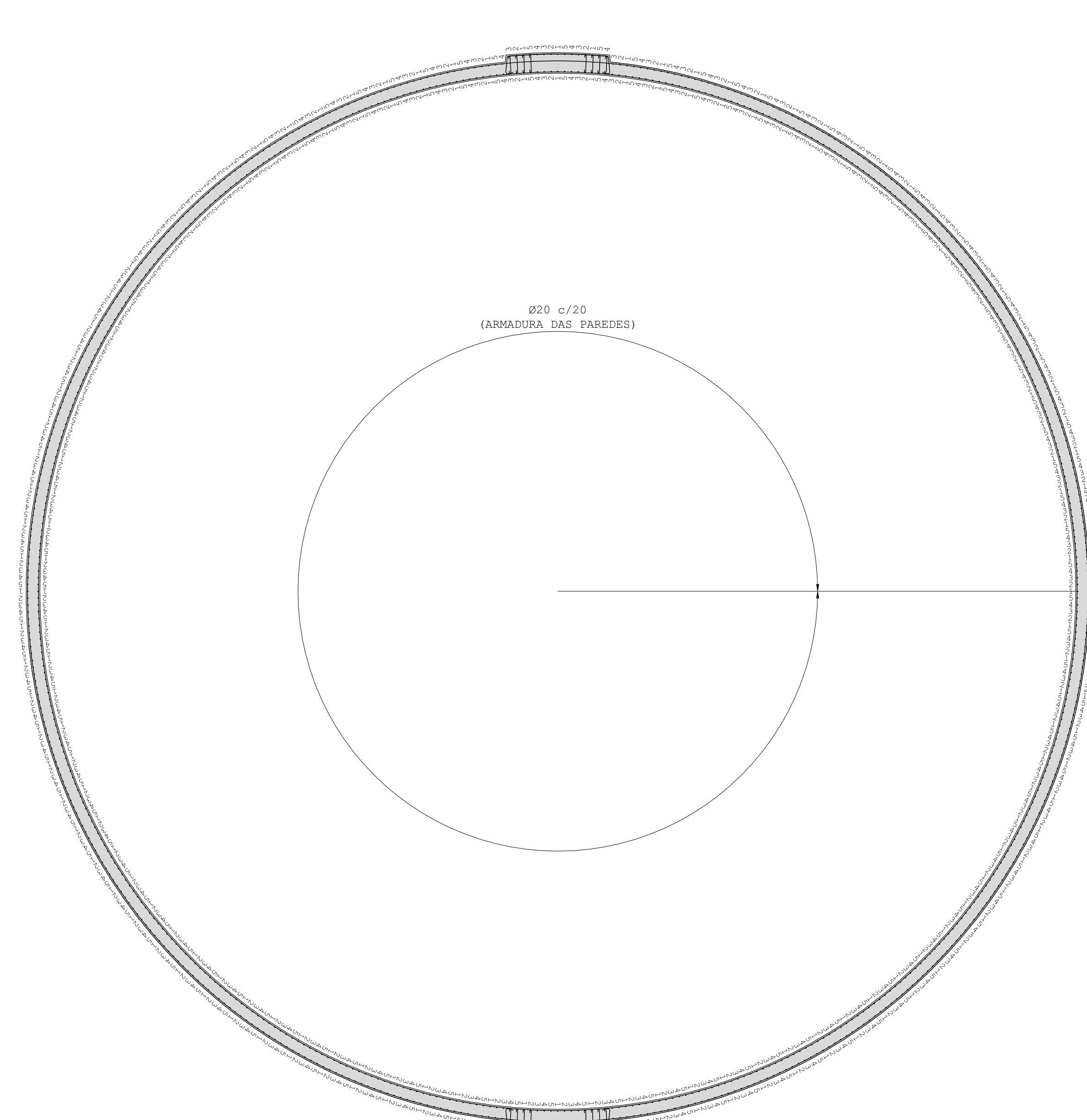
PESO TOTAL (kg)	
CA50	163871

Volume de concreto (C-45) = 1209,7 m³

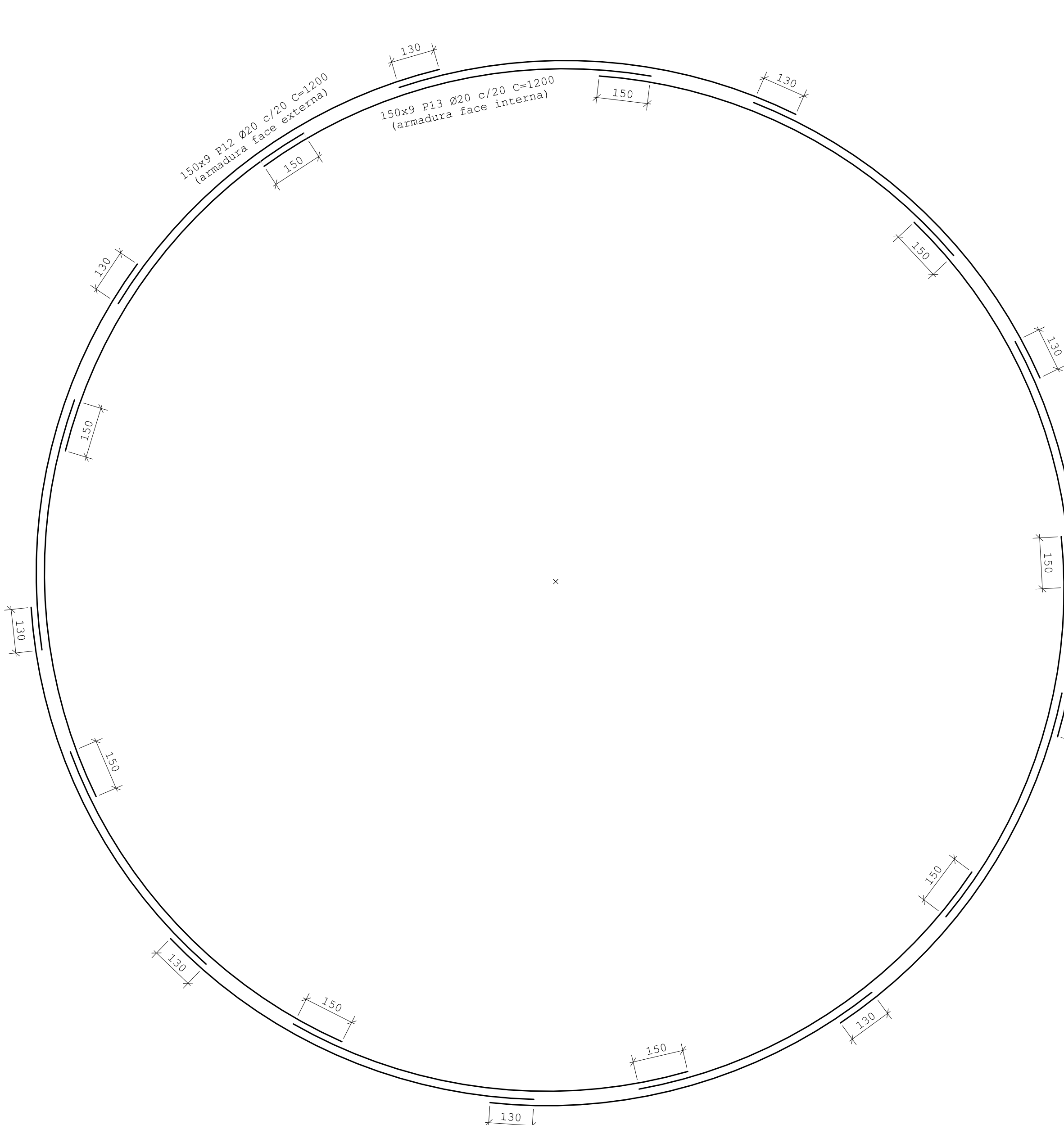
ARMADURAS DAS PAREDES DO SILO - ARMADURAS VERTICAIS
Escala: 1/100



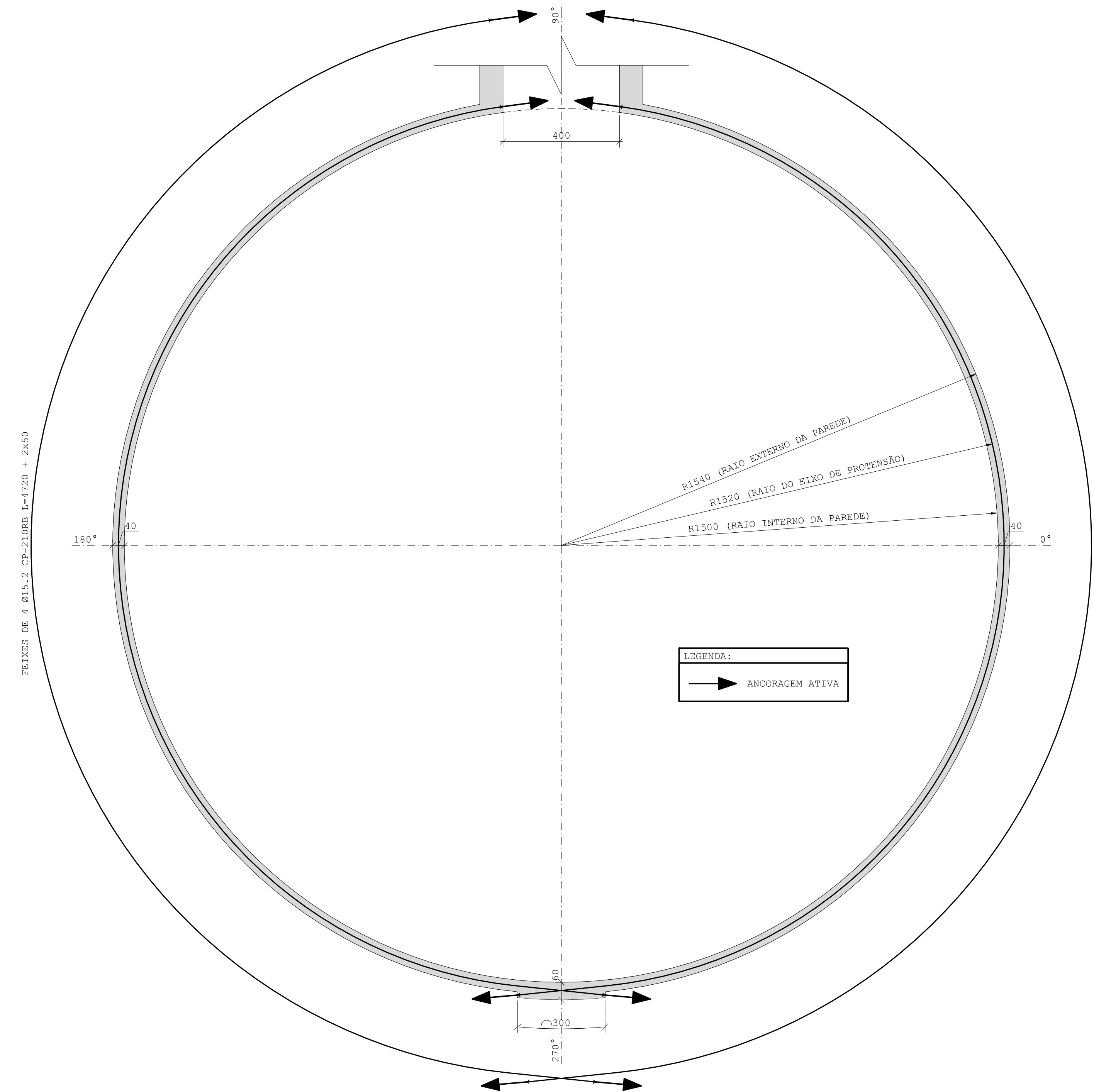
ARMADURAS DAS PAREDES DO SILO - CORTE A-A
Escala: 1/100



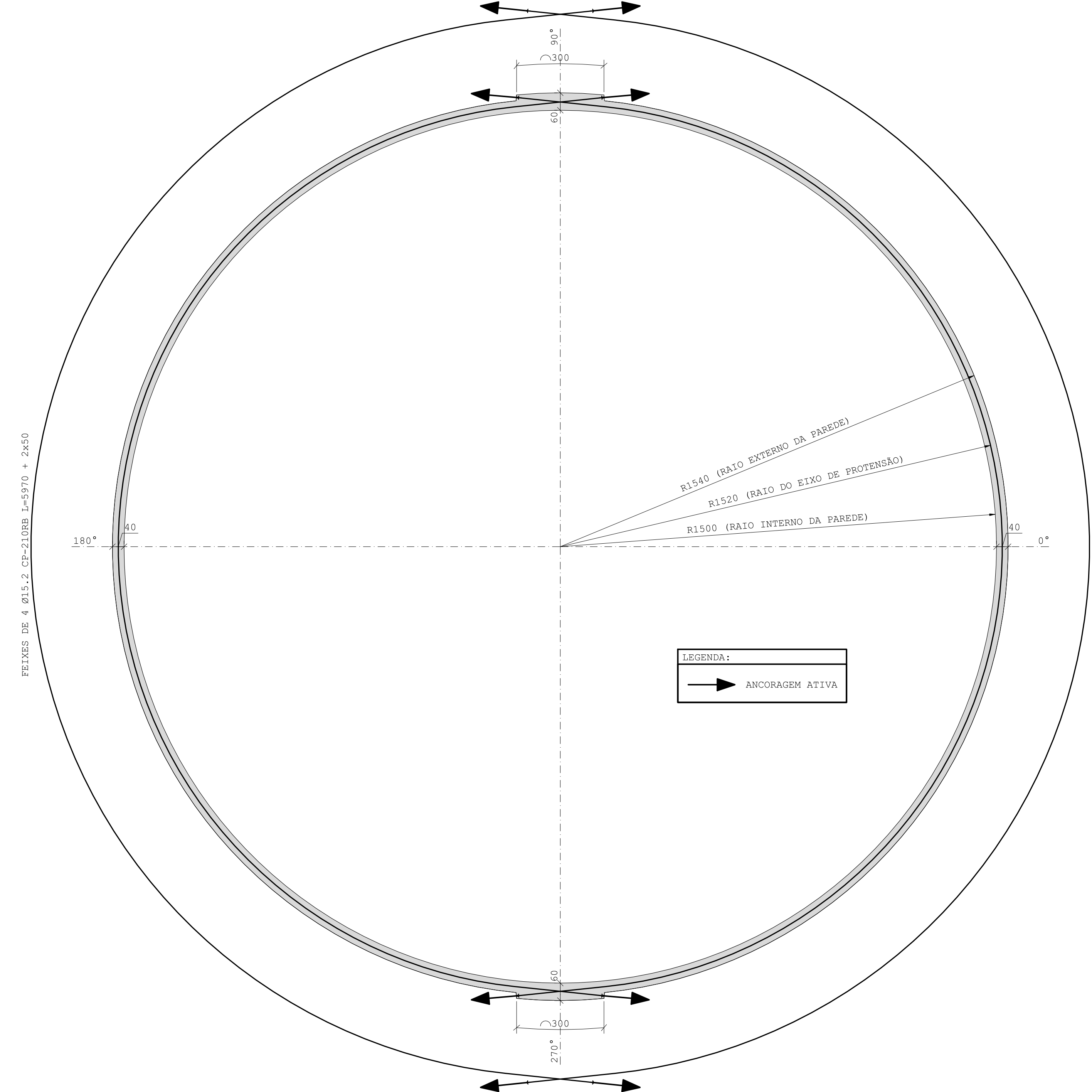
GEOMETRIA DO SILO - BASE/FUNDAÇÕES - NÍVEL 0.00
Escala: 1/100



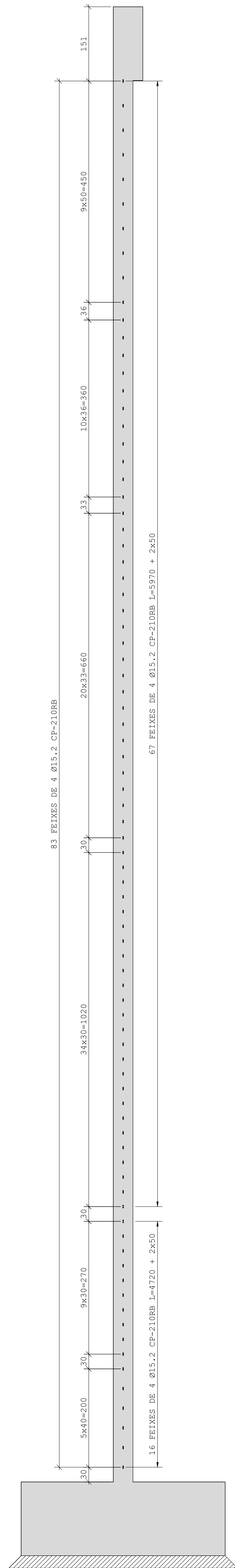
CONFIGURAÇÃO DAS CORDOALHAS DE PROTENSÃO - NÍVEL 0.00 À 5.30
Escala: 1/100



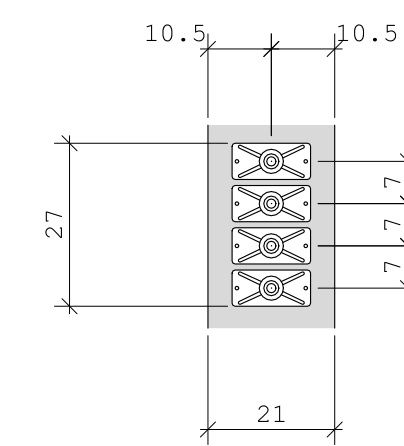
CONFIGURAÇÃO DAS CORDOALHAS DE PROTENSÃO - NÍVEL 5.30 À 30.00
Escala: 1/100



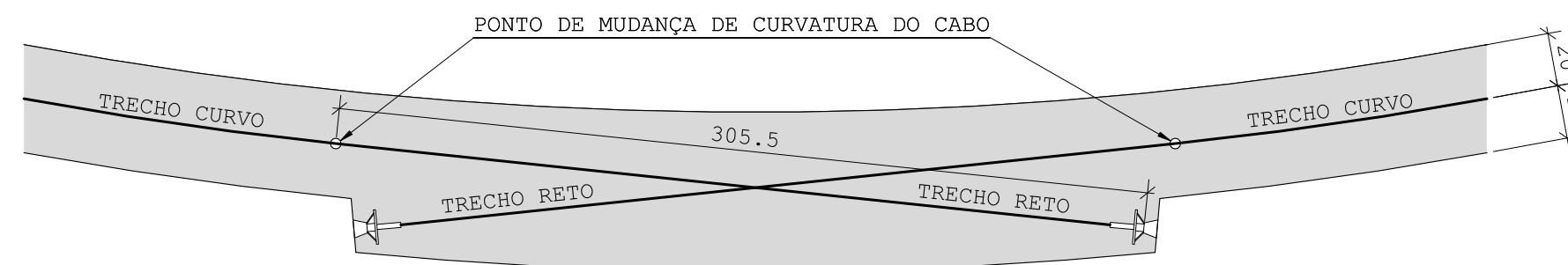
POSICIONAMENTO DAS CORDOALHAS NA PAREDE
Escala: 1/50



POSICIONAMENTO DAS ANCORAGENS PARA UM FEIXE DE CORDOALHAS
Escala: 1/12.5



POSICIONAMENTO DAS ANCORAGENS E CABOS - PONTOS DE INTERESSE
Escala: 1/12.5



RELAÇÃO DO AÇO

ELEMENTO	ACO	N	DIAM. (mm)	QUANT.	C. UNIT (cm)	C. TOTAL (cm)
PAREDES DO SILO	CP-210RB	1	15,2	64	4820	308480
	CP-210RB	2	15,2	268	6070	1626760

PESO TOTAL (kg)
CP-210RB
21791

- NOTAS DE PROJETO
- 1) VER MEMORIAL DE CÁLCULO
 - 2) DEVERÃO SER OBSERVADAS AS DEMAIS NOTAS PERTINENTES A CADA PLANTA
 - 3) CLASSE DE AGRESSIVIDADE AMBIENTAL: CA - III
 - 4) COTAS EM CENTÍMETROS E ELEVAÇÕES EM METROS, EXCETO SE INDICADO
 - 5) CONSULTAR O PROJETISTA SE QUALQUER DIMENSÃO DIVERGIR, NA OBRA, DA COTA DE PROJETO
 - 6) OS ELEMENTOS DA ESTRUTURA SÓ PODEM SER FURADOS COM A PRÉVIA AUTORIZAÇÃO DO RESPONSÁVEL TÉCNICO DO PROJETO, EXCETO SE INDICADO
 - 7) TODAS AS SOLDAS DEVERÃO SER EXECUTADAS COM ELETRODO E70XX
 - 8) SERVIÇOS DE MONTAGEM DE FÓRMAS, POSICIONAMENTO DE CHUMBADORES E ARMADURAS, TRATAMENTO DE SUPERFÍCIES E PROTENSÃO, DEVEM SER RIGOROSAMENTE EXECUTADOS
 - 9) TODAS AS PEÇAS METÁLICAS DEVERÃO RECEBER GALVANIZAÇÃO A FOGO E PINTURA PROTETORA A CORROSÃO
 - 10) O ESCORAMENTO E OS CIMBRAMENTOS NÃO FAZEM PARTE DO ESCOPO DESTA PROJETO
 - 11) OS ELEMENTOS DESTINADOS À SEGURANÇA DOS TRABALHADORES E TRANSITANTES À EXECUÇÃO DA OBRA, NÃO FAZEM PARTE DO ESCOPO DO PRESENTE PROJETO

MATERIAIS EMPREGADOS

CONCRETO IN LOCO:
CLASSE (ABNT NBR 8953): C45 - $f_{ck} \geq 45$ MPa
 $f_{ct} \geq 38$ MPa

COBRIMENTO NOMINAL: 40 mm (TOLERÂNCIA DE EXECUÇÃO 10 mm)

ÁÇOS:
AÇO CA-50
AÇO CP-210RB
AÇO A572G±50

PROTENSÃO

SISTEMA: PÓS-TENSÃO NÃO ADERENTE COM CORDOALHA ENGRAXADA
ANCORAGEM ATIVA NAS DUAS EXTREMIDADES
FORÇA DE PROTENSÃO: 235 kN

R00	MAIO/2022	EMISSÃO INICIAL	MAICOM
REVISÃO	DATA	DESCRIÇÃO	RESPONSÁVEL

PROJETO: PROJETO ESTRUTURAL DE SILO CILÍNDRICO DE CONCRETO PARA O ARMAZENAMENTO DE CIMENTO

ASSUNTO: ARMADURAS DE PROTENSÃO DAS PAREDES DO SILO

NÚMERO: 12/12

DATA DE EMISSÃO: MAIO/2022

REVISÃO: R00

ORIENTADOR: RUBEM CLECIO SCHWINGEL

GRADUANDO: MAICOM JEAN HILBIG