

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

Pedro Henrique Gomes de Oliveira

**AUTOMATIZAÇÃO DO DIMENSIONAMENTO E
DETALHAMENTO DE PAREDES-DIAFRAGMA DE
CONCRETO ARMADO MOLDADAS *IN LOCO***

Porto Alegre
agosto 2024

PEDRO HENRIQUE GOMES DE OLIVEIRA

**AUTOMATIZAÇÃO DO DIMENSIONAMENTO E
DETALHAMENTO DE PAREDES-DIAFRAGMA DE
CONCRETO ARMADO MOLDADAS *IN LOCO***

Trabalho de Conclusão de Curso 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: Alexandre Rodrigues Pacheco

Porto Alegre

agosto 2024

PEDRO HENRIQUE GOMES DE OLIVEIRA

**AUTOMATIZAÇÃO DO DIMENSIONAMENTO E
DETALHAMENTO DE PAREDES-DIAFRAGMA DE
CONCRETO ARMADO MOLDADAS *IN LOCO***

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

Porto Alegre, agosto de 2024

BANCA EXAMINADORA

Prof. Alexandre Rodrigues Pacheco (UFRGS)
PhD pela Pennsylvania State University
Orientador

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

Prof. Cesar Alberto Ruver (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho à minha mãe, Marina, pelo amor e apoio incondicionais, e pelos ensinamentos que moldaram o meu ser e me guiaram até aqui.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Alexandre Rodrigues Pacheco, orientador deste trabalho, pela paciência, incentivo e inestimáveis contribuições que possibilitaram realizá-lo.

Agradeço aos Eng.º Gustavo, Filipe e Leonardo por terem me proporcionado o primeiro contato com o ofício da engenharia civil e, principalmente, com paredes-diafragma.

Agradeço à minha namorada, Yasmin, por ter estado ao meu lado em todos os momentos: nos bons, celebrando-os comigo, e nos ruins, concedendo-me amparo para enfrentá-los.

Agradeço à minha amiga Laura por ter me ajudado a ressignificar os desafios, em especial, deste trabalho, permitindo-me perceber oportunidades de crescimento nas adversidades.

Agradeço à minha irmã, Ana, por ter plantado em mim a semente da engenharia civil, me inspirando a seguir este caminho – hoje, não estaria onde estou se não fosse pela sua visão.

A maior recompensa pelo trabalho de uma pessoa não é o que ela recebe por ele, mas o que ela se torna através dele.

John Ruskin

RESUMO

Este trabalho relata o desenvolvimento de uma ferramenta computacional capaz de dimensionar e detalhar paredes-diafragma de concreto armado moldadas *in loco* a partir da entrada de dados parametrizados pertinentes ao problema em questão. Para tanto, primeiro são apresentadas as diretrizes da pesquisa e, logo após, as teorias que embasam as metodologias empregadas nos procedimentos de dimensionamento geotécnico e estrutural das estruturas consideradas. Essas metodologias então são convertidas em módulos de códigos-fonte escritos em *Python*, os quais interrelacionam-se para compor a ferramenta objetivada pelo trabalho. As características e o funcionamento desta ferramenta são descritos em capítulo próprio. Em seguida, é demonstrada a aplicação dos métodos de cálculo discutidos anteriormente a fim de comparar os resultados encontrados assim àqueles obtidos a partir da utilização da ferramenta. Por fim, são feitas as considerações finais quanto ao produto deste trabalho.

Palavras-chave: Parede-diafragma. Concreto armado. Projeto estrutural.
Programa computacional. *Python*. TQS.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama das etapas do trabalho.....	17
Figura 2 – Diagramas teórico e aproximado de distribuição de tensões horizontais ativas do solo para solos coesivos.....	21
Figura 3 – Esquema de tensões e deslocamentos numa parede-diafragma em balanço....	22
Figura 4 – Distribuição de tensões horizontais numa parede-diafragma em balanço em solo homogêneo e não-coesivo.....	23
Figura 5 – Diagrama tensão-deformação idealizado curvo e retangular para o concreto.	36
Figura 6 – Comparação entre as distribuições de tensões no concreto segundo o diagrama idealizado curvo e retangular e o retângulo de profundidade $y = \lambda x$..	36
Figura 7 – Diagrama tensão-deformação para aços de armaduras passivas.....	37
Figura 8 – Domínios do ELU da seção transversal de um elemento de concreto armado	37
Figura 9 – Esforços resistentes e solicitantes na seção transversal de um elemento de concreto com armadura simples.....	39
Figura 10 – Exemplo do conteúdo dos arquivos “ <i>perfil_esc.json</i> ” e “ <i>perfil_con.json</i> ”....	50
Figura 11 – Exemplo do conteúdo do arquivo “ <i>parede.json</i> ”.....	51
Figura 12 – Janela de “edição de ferros”.....	53
Figura 13 – Esquema do solo do exemplo de cálculo.....	55
Figura 14 – Diagrama de esforço cortante V_{sd} da parede-diafragma gerado pelo Ftool...	60
Figura 15 – Diagrama de momento fletor M_{sd} da parede-diafragma gerado pelo Ftool...	60

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Relação entre a categoria do aço e a resistência característica de escoamento f_{yk} (MPa).....	29
Quadro 2 – Relação entre a classe de resistência do concreto e a resistência característica à compressão f_{ck} (MPa).....	30
Quadro 3 – Classes de agressividade ambiental.....	32
Quadro 4 – Relação entre a classe de agressividade ambiental e a qualidade do concreto.....	33
Quadro 5 – Relação entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal.....	34
Quadro 6 – Relação entre a espessura h da laje e o coeficiente adicional γ_n	38
Quadro 7 – Armaduras passivas mínimas em lajes de concreto armado.....	42
Quadro 8 – Características das barras de aço para as armaduras de estruturas de concreto armado.....	43
Quadro 9 – Características dos fios de aço para as armaduras de estruturas de concreto armado.....	44
Quadro 10 – Relação entre a categoria do aço e o coeficiente para cálculo da tensão de aderência da armadura passiva η_1	46
Quadro 11 – Propriedades físicas do solo.....	56
Quadro 12 – Tensões efetivas vertical σ'_v e horizontal σ'_h do solo.....	56
Quadro 13 – Empuxos E do solo.....	57
Quadro 14 – Momentos M do solo em relação ao ponto O	57
Quadro 15 – Tensões efetivas vertical σ'_v e horizontal σ'_h do solo para a solução encontrada.....	59
Quadro 16 – Empuxos E do solo para a solução encontrada.....	59
Quadro 17 – Momentos M do solo em relação ao ponto O para a solução encontrada....	59
Quadro 18 – Características das armaduras com barras de aço CA-50 com $\Phi = 10$ mm.	63

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CAD – *Computer-aided design*

JSON – *JavaScript object notation*

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

z – profundidade em relação à superfície do solo (m)

σ'_v – tensão vertical efetiva do solo (kPa)

γ – peso específico do solo (kN/m³)

σ'_{ha} – tensão horizontal ativa efetiva do solo (kPa)

c' – coesão efetiva do solo (kPa)

K_a – coeficiente de empuxo ativo do solo

Φ' – ângulo de atrito interno efetivo do solo (°)

σ'_{hp} – tensão horizontal passiva efetiva do solo (kPa)

K_p – coeficiente de empuxo passivo do solo

z_t – profundidade da fenda de tração em solos coesivos (m)

E – empuxo resultante das tensões de uma camada de solo (kN/m)

D – comprimento de embutimento da parede-diafragma no solo ou ficha (m)

z_o – profundidade do eixo de rotação da parede-diafragma em relação ao nível da escavação (m)

E_{esc} – empuxo resultante das tensões de todas as camadas de solo do lado da escavação (kN/m)

E_{con} – empuxo resultante das tensões de todas as camadas de solo do lado da contenção (kN/m)

$E_{esc,a}$ – empuxo resultante das tensões ativas de todas as camadas de solo do lado da escavação (kN/m)

$E_{esc,p}$ – empuxo resultante das tensões passivas de todas as camadas de solo do lado da escavação (kN/m)

$E_{con,a}$ – empuxo resultante das tensões ativas de todas as camadas de solo do lado da contenção (kN/m)

$E_{con,p}$ – empuxo resultante das tensões passivas de todas as camadas de solo do lado da contenção (kN/m)

$\sigma'_{h,i}$ – tensão horizontal efetiva do solo no ponto inicial de uma camada de solo (kPa)

$\sigma'_{h,f}$ – tensão horizontal efetiva do solo no ponto final de uma camada de solo (kPa)

Δz – variação da profundidade entre os pontos inicial e final de uma camada de solo (m)

M_a – momento desestabilizante resultante dos momentos causados pelos empuxos ativos do solo (kNm/m)

M_p – momento estabilizante resultante dos momentos causados pelos empuxos passivos do solo (kNm/m)

$M_{esc,a}$ – momento em relação ao eixo de rotação da parede-diafragma causado pelo empuxo ativo do solo do lado da escavação (kNm/m)

$M_{esc,p}$ – momento em relação ao eixo de rotação da parede-diafragma causado pelo empuxo passivo do solo do lado da escavação (kNm/m)

$M_{con,a}$ – momento em relação ao eixo de rotação da parede-diafragma causado pelo empuxo ativo do solo do lado da contenção (kNm/m)

$M_{con,p}$ – momento em relação ao eixo de rotação da parede-diafragma causado pelo empuxo passivo do solo do lado da contenção (kNm/m)

S_d – solicitação de cálculo

R_d – resistência de cálculo

f_{yk} – resistência característica de escoamento do aço (MPa)

f_{ck} – resistência característica à compressão do concreto (MPa)

$f_{ct,m}$ – resistência média à tração do concreto (MPa)

$f_{ctk,inf}$ – resistência característica inferior à tração do concreto (MPa)

$f_{ctk,sup}$ – resistência característica superior à tração do concreto (MPa)

γ_m – coeficiente de ponderação das resistências

γ_c – coeficiente de ponderação da resistência do concreto

γ_s – coeficiente de ponderação da resistência do aço

f_{cd} – resistência de cálculo à compressão do concreto (MPa)

f_{yd} – resistência de cálculo ao escoamento do aço (MPa)

c_{\min} – cobrimento mínimo (mm)

c_{nom} – cobrimento nominal (mm)

Δc – tolerância de execução (mm)

y – profundidade do diagrama retangular de tensões do concreto (cm)

x – profundidade da linha neutra na seção transversal do elemento de concreto armado (cm)

λ – relação entre a profundidade y do diagrama retangular de compressão equivalente e a profundidade efetiva x da linha neutra

σ_{cd} – tensão constante do concreto no diagrama retangular (MPa)

α_c – parâmetro de redução da resistência do concreto na compressão

η_c – fator que considera a fragilidade do concreto

x/d – posição da linha neutra na seção transversal de um elemento de concreto armado

d – altura útil (cm)

h – espessura da parede-diafragma (cm)

γ_n – coeficiente adicional para lajes em balanço

M_d – momento fletor de projeto (kNm)

b_w – largura da seção transversal considerada no dimensionamento (cm)

A_s – área da seção transversal da armadura tracionada (cm²/m)

R_{cc} – força resultante das tensões de compressão no concreto (kN)

R_{st} – força resultante das tensões de tração na armadura (kN)

z_{cc} – distância entre os pontos de aplicação de R_{cc} e R_{st} (cm)

ρ_{\min} – taxa geométrica mínima de armadura

$A_{s,\min}$ – área da seção transversal da armadura mínima (cm²/m)

A_c – área bruta de concreto da seção transversal do elemento (cm²/m)

$M_{d,\min}$ – momento fletor de cálculo mínimo (kNm)

W_0 – módulo de resistência da seção transversal bruta de concreto, relativo à fibra mais tracionada (cm³)

I_c – momento de inércia da seção transversal bruta de concreto do elemento (cm⁴)

y_t – distância do centro de gravidade da seção transversal bruta de concreto do elemento à fibra mais tracionada (cm)

Φ – diâmetro nominal da barra ou fio de aço da armadura (mm)

s_{\max} – espaçamento máximo permitido entre barras ou fios de aço da armadura (cm)

f_{bd} – resistência de aderência de cálculo entre a armadura e o concreto (MPa)

η_1 – coeficiente para cálculo da tensão de aderência da armadura passiva

η_2 – coeficiente para cálculo da tensão de aderência da armadura passiva

η_3 – coeficiente para cálculo da tensão de aderência da armadura passiva

l_b – comprimento de ancoragem básico (cm)

$l_{b,nec}$ – comprimento de ancoragem necessário (cm)

$l_{b,\min}$ – comprimento de ancoragem mínimo (cm)

$A_{s,calc}$ – área de aço calculada para ancoragem (cm²/m)

$A_{s,ef}$ – área de aço efetivamente empregada na ancoragem (cm^2/m)

V_{Rd1} – força cortante resistente de cálculo (kN/m)

V_{Sd} – força cortante solicitante de cálculo (kN/m)

τ_{Rd} – tensão resistente de cálculo do concreto ao cisalhamento (MPa)

f_{ctd} – resistência de cálculo à tração do concreto (MPa)

ρ_1 – taxa de armadura longitudinal de tração usada na verificação do esforço cortante

A_{s1} – área da seção transversal da armadura de tração (cm^2/m)

σ_{cp} – tensão longitudinal na seção devido ao carregamento (MPa)

k – coeficiente de ponderação da força cortante resistente de cálculo

N_{sd} – força longitudinal na seção devido ao carregamento (kN/m)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
2 DIRETRIZES DA PESQUISA.....	15
2.1 OBJETIVOS DA PESQUISA.....	15
2.1.1 Objetivo principal.....	15
2.1.2 Objetivos secundários.....	15
2.2 PRESSUPOSTO.....	15
2.3 DELIMITAÇÕES E LIMITAÇÕES.....	15
2.4 DELINEAMENTO.....	16
3 DIMENSIONAMENTO GEOTÉCNICO.....	18
3.1 EMPUXOS DE SOLO.....	18
3.2 TEORIA DE RANKINE.....	19
3.3 ANÁLISE DE ESTABILIDADE GLOBAL.....	22
4 DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL.....	28
4.1 SEGURANÇA NAS ESTRUTURAS.....	28
4.2 RESISTÊNCIA DOS MATERIAIS.....	29
4.2.1 Resistência do aço.....	29
4.2.2 Resistência do concreto.....	29
4.2.3 Resistência de cálculo.....	31
4.3 DURABILIDADE DA ESTRUTURA.....	32
4.3.1 Agressividade ambiental.....	32
4.3.2 Qualidade do concreto e cobrimento.....	33
4.4 DIMENSIONAMENTO DA ARMADURA DE FLEXÃO.....	34
4.4.1 Hipóteses básicas.....	35
4.4.2 Dutilidade.....	37
4.4.3 Lajes em balanço.....	38
4.4.4 Armadura principal de flexão.....	38
4.4.5 Armadura mínima e máxima.....	41
4.4.6 Barras e fios de aço.....	43
4.4.7 Prescrições gerais.....	44
4.4.8 Comprimento de ancoragem.....	45
4.5 DISPENSA DA ARMADURA TRANSVERSAL.....	46
5 FERRAMENTA COMPUTACIONAL.....	49
5.1 LINGUAGEM DE PROGRAMAÇÃO.....	49

5.2 ENTRADA DE DADOS.....	49
5.3 MÓDULOS.....	51
5.4 SAÍDA.....	52
5.5 VALIDAÇÃO.....	54
6 EXEMPLO DE CÁLCULO.....	55
6.1 DIMENSIONAMENTO GEOTÉCNICO.....	56
6.2 DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL.....	60
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	65
REFERÊNCIAS.....	66
APÊNDICE A – Memória de cálculo da parede-diafragma do exemplo.....	68
APÊNDICE B – Quadros de esforços da parede-diafragma do exemplo.....	82
APÊNDICE C – Diagramas de esforços da parede-diafragma do exemplo.....	96
APÊNDICE D – Detalhamento da parede-diafragma do exemplo.....	99

1 INTRODUÇÃO

A realização de uma obra de fundações quase sempre envolve estruturas de contenção. É frequente a criação de subsolos para estacionamento em edifícios urbanos, de contenções de cortes ou aterros, por muros de arrimo, para a criação de plataformas; a instalação de dutos de utilidades em valas escoradas etc. Obras de contenção do terreno estão presentes em projetos de estradas, de pontes, de estabilização de encostas, de canalizações, de saneamento, de metrô etc. (RANZINI; NEGRO JR., 1998, p. 497).

Segundo Barros (2017, p. 6), estruturas de contenção são obras civis executadas com o objetivo de proporcionar estabilidade contra a ruptura de maciços de solo, ou seja, são estruturas projetadas para resistir aos empuxos laterais decorrentes do peso próprio dos maciços e de carregamentos externos aplicados a eles.

Com efeito, a função primordial das contenções é viabilizar a escavação dentro da área reservada para tal, entretanto, para que este propósito seja alcançado, outros requisitos funcionais – como controlar a água – ainda precisam ser atendidos, além de requisitos construtivos, de segurança e econômicos (SAES; STUCCHI; MILITITSKY, 1998, p. 517-518).

Deste modo, o desempenho de uma contenção não depende tão somente do tipo de contenção em si, mas também dos fatores particulares de cada situação, tais como a geometria do maciço, a composição do solo, o nível d'água, o espaço disponível para a sua implantação, as condições das construções lindeiras etc. Nesse sentido, o advento da parede-diafragma revolucionou a área da geotecnia na engenharia civil por possibilitar a execução de escavações profundas com relativa facilidade, segurança e economia (SAES; STUCCHI; MILITITSKY, 1998, p. 526).

A história da parede-diafragma data do início do século passado, quando a bentonita começou a ser utilizada como agente suspensor e gelificante para lamas de perfuração, entre 1926 e 1929 (DEEP FOUNDATIONS INSTITUTE, 2005, p. iv). Este avanço preparou o terreno para usos futuros em tecnologias de contenção e foi crucial para o surgimento da parede-diafragma anos depois.

A parede-diafragma foi testada pela primeira vez em 1948, porém a inovação somente veio a ser implementada em escala real em 1950, na construção de um *cutoff* para a barragem de Santa Maria, na Itália (DEEP FOUNDATIONS INSTITUTE, 2005, p. iv). O sucesso desta obra levou

à rápida adoção da tecnologia no projeto de metrô de Milão, na mesma década, e em pouco tempo o método se expandiu para outras cidades ao redor do mundo, passando a ser empregado em construções subterrâneas de grande escala.

Em 1961, a parede-diafragma foi usada no Park Hyde Center, em Londres (PULLER, p. 121); em 1962, no projeto de um túnel sob o Rio East, em Nova Iorque (DEEP FOUNDATIONS INSTITUTE, 2005, p. v). A parede-diafragma chegou ao Brasil em 1969 com a construção do Edifício Pelletron da Universidade de São Paulo, posteriormente sendo difundida pelo país através da construção dos metrôs de São Paulo e Rio de Janeiro (FERREIRA, 2018, p. 32).

Desde então, a parede-diafragma tem se tornado cada vez mais popular, consolidando-se como um recurso valioso para projetos de engenharia civil que requerem a contenção de escavações profundas (SAES; STUCCHI; MILITITSKY, 1998, p. 526).

Neste contexto, o presente trabalho aborda os temas referentes ao projeto de paredes-diafragma de concreto armado moldadas *in loco*, em especial, o dimensionamento e o detalhamento dessas estruturas, com o objetivo de desenvolver uma ferramenta computacional capaz de realizar estes processos de maneira automática.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

O propósito deste capítulo é definir o escopo da pesquisa com base nos objetivos da pesquisa, no pressuposto, nas delimitações e limitações, e no delineamento, descritos nos próximos itens.

2.1 OBJETIVOS DA PESQUISA

Os objetivos da pesquisa estão classificados em principal e secundário, apresentados a seguir.

2.1.1 Objetivo principal

O objetivo principal da pesquisa é desenvolver uma ferramenta computacional que auxilie na elaboração do projeto de paredes-diafragma de concreto armado moldadas *in loco*.

2.1.2 Objetivos secundários

O objetivo secundário da pesquisa é fazer um levantamento dos processos de dimensionamento e detalhamento de paredes-diafragma de concreto armado moldadas *in loco*.

2.2 PRESSUPOSTO

O trabalho tem por pressuposto que é válido aplicar:

- a) o método do equilíbrio limite na análise de estabilidade global de paredes-diafragma;
- b) as prescrições das normas técnicas referenciadas nos capítulos posteriores quando do dimensionamento estrutural de paredes-diafragma de concreto armado;

2.3 DELIMITAÇÕES E LIMITAÇÕES

O trabalho se delimita a desenvolver uma ferramenta computacional capaz de dimensionar e detalhar paredes-diafragma de concreto armado moldadas *in loco* a partir da entrada de dados parametrizados pertinentes ao problema em questão, contemplando somente aquelas que:

- a) possuam geometria que permita considerá-las armadas em uma direção;
- b) não necessitem de armadura transversal;
- c) possam ser consideradas em balanço.

2.4 DELINEAMENTO

A realização do trabalho se deu através das etapas listadas a seguir, descritas nos próximos parágrafos e representadas na figura 1:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) desenvolvimento dos procedimentos de cálculo;
- c) desenvolvimento da ferramenta computacional;
- d) validação da ferramenta computacional;
- e) considerações finais.

A pesquisa bibliográfica visa a obter o subsídio para as etapas subsequentes do trabalho. Nela, foi feito o levantamento dos métodos encontrados na literatura para dimensionar e detalhar paredes-diafragma de concreto armado moldadas *in loco*.

O desenvolvimento dos procedimentos de cálculo consiste em formular um roteiro para realizar os cálculos referentes ao dimensionamento e detalhamento conforme os métodos descobertos anteriormente.

Na etapa de desenvolvimento da ferramenta computacional, esse roteiro é transcrito para um código computacional na linguagem de programação *Python* a fim de criar um programa computacional para gerar um arquivo de desenho técnico compatível com sistemas CAD (*computer-aided design* ou, em tradução livre, “desenho assistido por computador”) correspondente ao detalhamento da solução encontrada para o problema descrito pelos dados fornecidos na entrada.

A etapa de validação da ferramenta computacional tem o objetivo de verificar a confiabilidade dos resultados gerados pela ferramenta em diversos casos de uso.

Enfim, as considerações finais fazem o fechamento do trabalho com enfoque na eficácia da ferramenta desenvolvida.

Figura 1 – Diagrama das etapas do trabalho



(fonte: elaborado pelo autor)

3 DIMENSIONAMENTO GEOTÉCNICO

Dimensionamento geotécnico é o processo de cálculo que visa a determinar a configuração da estrutura de contenção ou fundação para que esta resista com alguma margem de segurança às ações do solo com o qual estará em contato.

Neste capítulo são abordados os tópicos essenciais para realizar o dimensionamento geotécnico de paredes-diafragma em balanço.

3.1 EMPUXOS DE SOLO

O empuxo de solo – ou empuxo de terra – é a força resultante das tensões laterais que o solo exerce sobre uma estrutura de contenção ou fundação. Essas tensões decorrem tanto do peso próprio do maciço de solo como de sobrecargas que venham a ser aplicadas a ele (BARROS, 2017, p. 38).

A intensidade do empuxo de solo sobre uma estrutura está diretamente ligada ao deslocamento ocasionado nesta em função do empuxo, de modo que quando a estrutura é afastada do maciço, ocorre uma diminuição do empuxo, ao passo que se, em vez disso, a estrutura for movida contra o maciço, o empuxo aumentará (BARROS, 2017, p. 38-39).

Na primeira condição “as forças que o solo exerce sobre a estrutura são de natureza ativa. O solo ‘empurra’ a estrutura [...]”; na outra, “ao contrário, é a estrutura que é empurrada contra o solo. A força exercida pela estrutura sobre o solo é de natureza passiva” (GERSCOVICH, 2010, p. 5). Assim, definem-se os empuxos ativo e passivo, respectivamente.

Todavia, segundo Marzionna *et al.* (1998, p. 538):

O valor do empuxo de terra, assim como a distribuição das tensões ao longo da altura do elemento de contenção, dependem da interação solo-elemento estrutural durante todas as fases da obra (escavação e reaterro). O empuxo atuando sobre o elemento estrutural provoca deslocamentos horizontais que, por sua vez, alteram o valor e a distribuição do empuxo, ao longo das fases construtivas da obra e até mesmo durante sua vida útil.

Deste modo, o problema de determinar o empuxo e as tensões laterais do solo é estaticamente indeterminado e, portanto, faz-se necessário assumir hipóteses sobre a relação entre as tensões e as deformações do solo para se chegar a uma solução (BARROS, 2017, p. 40).

3.2 TEORIA DE RANKINE

O estado de equilíbrio plástico do solo descreve a condição em que todos os pontos de um maciço de solo estão à beira da falha, de modo que as tensões no solo atingem os valores limite. A teoria de Rankine, formulada em 1857, considera que o solo esteja no estado de equilíbrio plástico e assume as seguintes hipóteses (GERSCOVICH, 2010, p. 12-13):

- a) a superfície do terreno é plana;
- b) o solo é homogêneo e isotrópico;
- c) as paredes da contenção são verticais e não possuem atrito com o solo;
- d) a ruptura do solo ocorre sob o estado plano de deformações e em todos os pontos do maciço simultaneamente.

Supondo um elemento infinitesimal de solo localizado a uma profundidade z medida a partir da superfície do terreno, a tensão vertical efetiva σ'_v atuante no elemento é calculada da seguinte forma:

$$\sigma'_v = \gamma z \quad (\text{fórmula 1})$$

Sendo:

γ = peso específico do solo – natural γ_{nat} , caso esteja acima do nível d'água, ou submerso γ_{sub} , se estiver abaixo.

No estado ativo de deformação do solo, a tensão horizontal ativa efetiva σ'_{ha} é calculada como:

$$\sigma'_{ha} = K_a \sigma'_v - 2c' \sqrt{K_a} \quad (\text{fórmula 2})$$

Sendo:

c' = coesão efetiva do solo ($c' = 0$ para solos não-coesivos);

K_a = coeficiente de empuxo ativo do solo, dado por:

$$K_a = \tan^2(45^\circ - \phi'/2) \quad (\text{fórmula 3})$$

Sendo:

Φ' = ângulo de atrito interno efetivo do solo.

Analogamente, no estado passivo tem-se a tensão horizontal passiva efetiva σ'_{hp} e o coeficiente de empuxo passivo do solo K_p conforme:

$$\sigma'_{hp} = K_p \sigma'_v + 2c' \sqrt{K_p} \quad (\text{fórmula 4})$$

$$K_p = \tan^2(45^\circ + \phi'/2) \quad (\text{fórmula 5})$$

Analisando a fórmula 2, é possível constatar que o solo coesivo, quando no estado ativo, fica sujeito a tensões de tração no trecho superior que se estende até uma profundidade z_t , dada por:

$$z_t = 2c' / \gamma \sqrt{K_a} \quad (\text{fórmula 6})$$

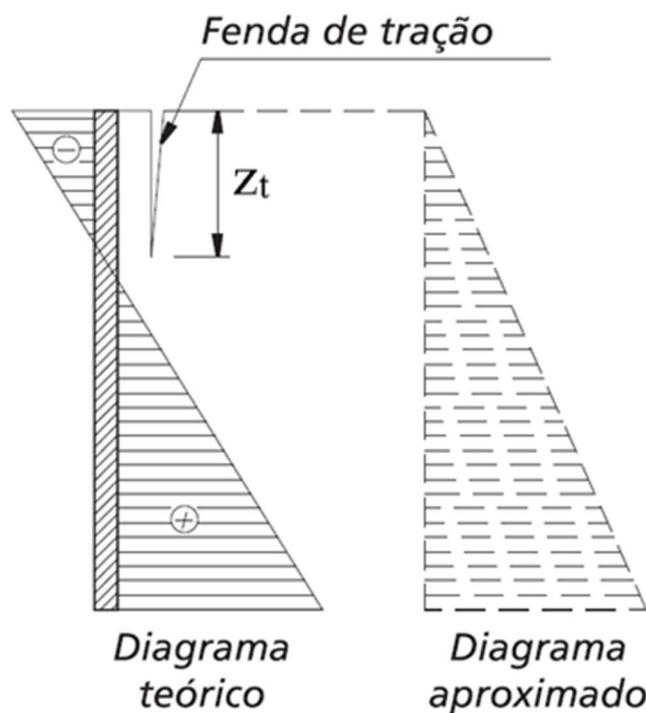
Entretanto, tipicamente o solo não é capaz de resistir a tensões de tração, de modo que o cenário descrito acima ocasiona o surgimento de fendas no solo. Devido a isto, não há contato entre o solo e a contenção até a profundidade z_t , significando que as tensões teóricas nesse trecho não são transmitidas à estrutura. Assim, neste caso é comum considerar o diagrama de distribuição de tensões horizontais aproximado apresentado na figura 2, onde $\sigma'_{ha} = 0$ na profundidade inicial ($z = 0$), ao passo que na profundidade final da mesma camada de solo o valor de σ'_{ha} é calculado conforme a fórmula 2 (BARROS, 2017, p. 43).

Essa configuração é favorável à segurança em comparação à alternativa de simplesmente desprezar σ'_{ha} até a profundidade z_t , dado que conduz a um valor maior para o empuxo E resultante das tensões horizontais do solo, onde E é obtido integrando essas tensões ao longo da altura da contenção:

$$E = \int_0^z \sigma'_h dz \quad (\text{fórmula 7})$$

A posição vertical do ponto de aplicação do empuxo sobre a contenção será igual à posição vertical do centro geométrico da área sob o gráfico de distribuição de tensões horizontais do solo.

Figura 2 – Diagramas teórico e aproximado de distribuição de tensões horizontais ativas do solo para solos coesivos



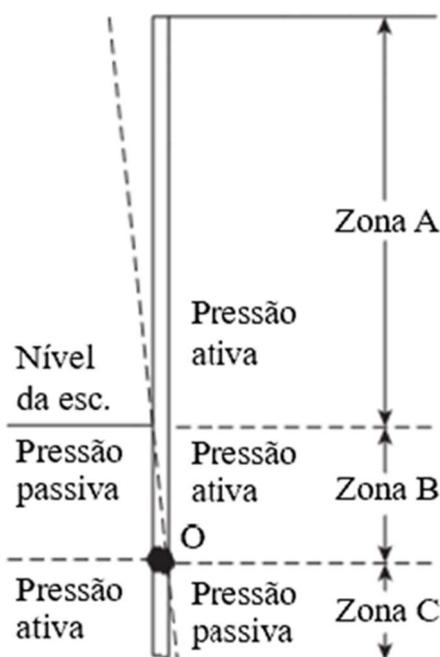
(fonte: adaptado de BARROS, 2017, p.44)

3.3 ANÁLISE DE ESTABILIDADE GLOBAL

A estabilidade global de paredes-diafragma em balanço provém principalmente da resistência passiva desenvolvida no solo à frente da estrutura, no lado escavado. Isto é feito através do embutimento da parede no solo até uma profundidade suficiente para que ocorra uma mobilização da resistência passiva suficiente para equilibrar a estrutura.

Os cálculos convencionais baseiam-se em métodos de equilíbrio limite, em que a análise considera que a estrutura rotaciona em torno de um ponto abaixo do nível da escavação e próximo à base da parede (figura 3). Neste contexto, as tensões exercidas pelo solo acima do ponto de rotação são ativas no lado da contenção e passivas no lado da escavação. Enquanto abaixo do ponto de rotação as condições se invertem, de modo que o lado da contenção passa do estado ativo para o passivo, ao passo que o lado da escavação passa do estado passivo para o ativo, resultando na distribuição de tensões ilustrada na figura 4 (CONTE; TRONCONE, 2018, p. 1446-1447).

Figura 3 – Esquema de tensões e deslocamentos numa parede-diafragma em balanço

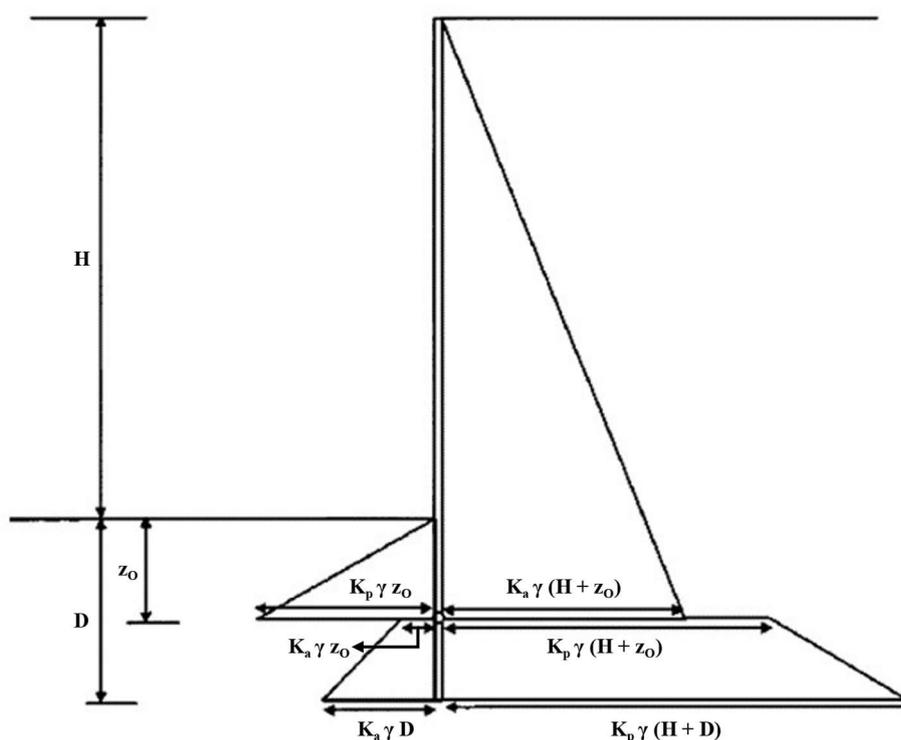


(fonte: adaptado de HOSSAIN, 2012, p.166)

A determinação do embutimento mínimo necessário para assegurar a estabilidade global da parede-diafragma é feita por um processo iterativo de tentativa e erro, solucionando as equações

de equilíbrio de forças horizontais e momentos que atuam na estrutura, as quais envolvem duas incógnitas. A primeira delas é o comprimento D do trecho da parede embutido no solo, também conhecido como ficha, e a outra é a distância vertical z_0 entre o ponto de rotação da parede e o nível da escavação.

Figura 4 – Distribuição de tensões horizontais numa parede-diafragma em balanço em solo homogêneo e não-coesivo



(fonte: MADABHUSHI; CHANDRASEKARAN, 2005, apud KUMAR; DEY, 2013, p. 51)

Objetivando ilustrar a aplicação desta metodologia, considere o caso simplificado da parede-diafragma em balanço, embutida em solo homogêneo e não-coesivo, com massa específica γ e coeficientes de empuxo ativo K_a e passivo K_p , delineada na figura 4. O equilíbrio entre as forças horizontais atuantes em cada lado da estrutura será alcançado quando os empuxos resultantes das combinações de tensões ativas e passivas exercidas pelo solo no lado da escavação E_{esc} for igual ao empuxo resultante correspondente ao solo no lado da contenção E_{con} , dados por:

$$E_{esc} = E_{esc,a} + E_{esc,p} \quad (\text{fórmula 8})$$

$$E_{con} = E_{con,a} + E_{con,p} \quad (\text{fórmula 9})$$

Sendo $E_{esc,a}$ e $E_{esc,p}$ as parcelas do empuxo decorrentes das tensões ativa e passiva do solo do lado da escavação, respectivamente, enquanto $E_{con,a}$ e $E_{con,p}$ são as parcelas correspondentes para o empuxo do solo do lado da contenção.

Assim, considerando que o empuxo causado pela tensão do solo é igual à área sob o gráfico de distribuição desta tensão, conforme implica a fórmula 7, e que as distribuições de tensões do solo em cada trecho – acima ou abaixo do ponto de rotação da parede-diafragma – são lineares, conforme mostra a figura 4, pode-se calcular o empuxo E em cada trecho do solo da seguinte forma:

$$E = \Delta z \frac{\sigma'_{h,i} + \sigma'_{h,f}}{2} \quad (\text{fórmula 10})$$

Em que:

$\sigma'_{h,i}$ = tensão horizontal efetiva do solo no ponto inicial do trecho considerado;

$\sigma'_{h,f}$ = tensão horizontal efetiva do solo no ponto final do trecho considerado;

Δz = variação da profundidade entre os pontos inicial e final.

Deste modo, com base nas fórmulas 2 e 4, define-se as parcelas do empuxo do solo de cada lado da estrutura como:

$$E_{esc,a} = \frac{K_a \gamma}{2} (D + z_0)(D - z_0) \quad (\text{fórmula 11})$$

$$E_{esc,p} = \frac{K_p \gamma}{2} z_0^2 \quad (\text{fórmula 12})$$

$$E_{con,a} = \frac{K_a \gamma}{2} (H + z_0)^2 \quad (\text{fórmula 13})$$

$$E_{con,p} = \frac{K_p \gamma}{2} (2H + D + z_0)(D - z_0) \quad (\text{fórmula 14})$$

Logo, as fórmulas 8 e 9 podem ser reescritas da seguinte forma:

$$E_{esc} = \frac{K_a \gamma}{2} (D + z_0)(D - z_0) + \frac{K_p \gamma}{2} z_0^2 \quad (\text{fórmula 15})$$

$$E_{con} = \frac{K_a \gamma}{2} (H + z_0)^2 + \frac{K_p \gamma}{2} (2H + D + z_0)(D - z_0) \quad (\text{fórmula 16})$$

Quanto ao equilíbrio de momentos, será alcançado quando o momento desestabilizante M_a , resultante do somatório de momentos causados pelos empuxos ativos do solo – tanto do lado da escavação como do lado da contenção – for igual ao momento estabilizante M_p , análogo ao primeiro para momentos causados pelos empuxos passivos. Assim, define-se:

$$M_a = M_{esc,a} + M_{con,a} \quad (\text{fórmula 17})$$

$$M_p = M_{esc,p} + M_{con,p} \quad (\text{fórmula 18})$$

Sendo $M_{esc,a}$, $M_{con,a}$, $M_{esc,p}$ e $M_{con,p}$ os momentos em relação ao eixo de rotação da parede-diafragma correspondentes aos empuxos $E_{esc,a}$, $E_{con,a}$, $E_{esc,p}$ e $E_{con,p}$, respectivamente, de modo que o momento M de cada empuxo E em relação a um ponto qualquer é dado por:

$$M = E \times z_E \quad (\text{fórmula 19})$$

Onde z_E é o braço de alavanca de E , definido como a distância entre ponto de aplicação de E e o ponto considerado para o cálculo de M , tal que o ponto de aplicação de E coincide com a posição vertical do centro geométrico da área sob o gráfico de tensões do solo correspondente. Portanto, os momentos do lado direito da igualdade nas fórmulas 17 e 18 podem ser calculados segundo:

$$M_{esc,a} = K_a \gamma \left[\frac{(D - z_0)^3}{3} + z_0 \frac{(D - z_0)^2}{2} \right] \quad (\text{fórmula 20})$$

$$M_{con,a} = K_a \gamma \frac{(H + z_0)^3}{6} \quad (\text{fórmula 21})$$

$$M_{esc,p} = K_p \gamma \frac{z_0^3}{6} \quad (\text{fórmula 22})$$

$$M_{con,p} = K_p \gamma \left[\frac{(D - z_0)^3}{3} + (H + z_0) \frac{(D - z_0)^2}{2} \right] \quad (\text{fórmula 23})$$

Deste modo, M_a e M_p equivalem a:

$$M_a = K_a \gamma \left[\frac{(H + z_0)^3}{6} + \frac{(D - z_0)^3}{3} + z_0 \frac{(D - z_0)^2}{2} \right] \quad (\text{f\u00f3rmula 24})$$

$$M_p = K_p \gamma \left[\frac{z_0^3}{6} + \frac{(D - z_0)^3}{3} + (H + z_0) \frac{(D - z_0)^2}{2} \right] \quad (\text{f\u00f3rmula 25})$$

Enfim, determinam-se as inc\u00f3gnitas do problema, D e z_0 , solucionando o sistema de equa\u00e7\u00f5es formado igualando as f\u00f3rmulas 15 e 16, e 24 e 25. Uma vez feito isso, a distribui\u00e7\u00e3o de tens\u00f5es e, conseq\u00fcentemente, a distribui\u00e7\u00e3o de solicita\u00e7\u00f5es ao longo da estrutura passam a ser conhecidas, ent\u00e3o possibilitando proceder \u00e0 etapa de dimensionamento estrutural, abordada no cap\u00edtulo seguinte.

4 DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL

O dimensionamento estrutural de elementos de concreto armado consiste em determinar as características mecânicas dos materiais que irão compor o elemento – ou seja, o concreto e o aço –, as dimensões da seção transversal deste elemento e a armadura necessárias para resistir aos esforços solicitantes definidos anteriormente.

Ao longo deste capítulo, é apresentado o conteúdo relacionado ao dimensionamento estrutural de paredes-diafragma de concreto armado moldadas in loco no estado-limite último (ELU).

4.1 SEGURANÇA NAS ESTRUTURAS

No projeto de estruturas, após a análise estrutural, em que são determinadas as distribuições de esforços solicitantes, procede-se às etapas de dimensionamento, verificação e detalhamento, as quais têm como objetivo garantir a segurança da estrutura como um todo, assim como em cada uma das suas partes. Para tanto, faz-se necessário atender condições como:

$$S_d \leq R_d \quad (\text{fórmula 26})$$

A qual implica que as solicitações de cálculo S_d não podem exceder as resistências de cálculo R_d para todos os estados-limites pertinentes à análise da estrutura em questão (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2023, p. 114).

Cabe ressaltar que o dimensionamento e a verificação de uma estrutura são processos aplicados a seções de elementos desta estrutura, tal que a segurança proporcionada por estes processos ainda precisa ser estendida pelo restante da estrutura por meio do detalhamento.

Ademais, no que se refere ao ELU, “[...] além de se garantir a segurança adequada, isto é, uma probabilidade suficientemente pequena de ruína, é necessário garantir uma boa ductilidade, de forma que uma eventual ruína ocorra de forma suficientemente avisada, alertando os usuários” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2023, p. 115).

4.2 RESISTÊNCIA DOS MATERIAIS

No contexto deste trabalho, o termo resistência se refere à capacidade de um material resistir a uma determinada solicitação gerada por uma ação ou combinação de ações impostas a ele.

Assim, definem-se os valores característicos das resistências f_k como aqueles que “[...] em um lote de material, têm uma determinada probabilidade de serem ultrapassados, no sentido desfavorável para a segurança” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2023, p. 70).

4.2.1 Resistência do aço

A ABNT NBR 6118 estabelece que “[...] nos projetos de estruturas de concreto armado deve ser utilizado aço classificado pela ABNT NBR 7480, com o valor característico da resistência de escoamento nas categorias CA-25, CA-50 e CA-60” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2023, p. 28).

O aço para armaduras de estruturas de concreto armado é classificado de acordo com o valor característico da resistência de escoamento f_{yk} conforme definido no quadro 1 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2022, p. 3).

Quadro 1 – Relação entre a categoria do aço e a resistência característica de escoamento f_{yk} (MPa)

Categoria do aço	Resistência característica de escoamento f_{yk} (MPa)
CA-25	250
CA-50	500
CA-60	600

(fonte: adaptado de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2022, p. 14)

4.2.2 Resistência do concreto

As prescrições da ABNT NBR 6118 se aplicam aos concretos para fins estruturais pertencentes às classes de resistência dos grupos I e II definidos na ABNT NBR 8953, até a classe C90, sendo que a resistência característica à compressão do concreto f_{ck} está relacionada à classe de

resistência conforme o quadro 2 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2023, p. 22).

Quadro 2 – Relação entre a classe de resistência do concreto e a resistência característica à compressão f_{ck} (MPa)

Classe de resistência Grupo I	Resistência característica à compressão MPa	Classe de resistência Grupo II	Resistência característica à compressão MPa
C20	20	C55	55
C25	25	C60	60
C30	30	C70	70
C35	35	C80	80
C40	40	C90	90
C45	45	C100	100
C50	50		

(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015, p. 2)

Porém, a depender do caso, pode haver interesse em determinar as resistências características inferior $f_{k,inf}$ ou superior $f_{k,sup}$ – esta, maior que a resistência média f_m ; aquela, menor (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2023, p.70).

É o que ocorre no cálculo da resistência à tração do concreto, em que, na ausência dos ensaios prescritos pelas ABNT NBR 7222 e ABNT NBR 12142, a ABNT NBR 6118 permite utilizar as fórmulas 27 a 30 para obter os valores médio $f_{ct,m}$ e característicos inferior $f_{ctk,inf}$ e superior $f_{ctk,sup}$ da resistência à tração do concreto (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2023, p. 23):

$$f_{ct,m} = 0,3f_{ck}^{2/3} \text{ quando } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \quad (\text{fórmula 27})$$

$$f_{ct,m} = 2,12 \ln(1,8 + f_{ck}/10) \text{ quando } f_{ck} > 50 \text{ MPa} \quad (\text{fórmula 28})$$

$$f_{ctk,inf} = 0,7f_{ct,m} \quad (\text{fórmula 29})$$

$$f_{ctk,sup} = 1,3f_{ct,m} \quad (\text{fórmula 30})$$

onde f_{ck} e $f_{ct,m}$ devem ser expressos em megapascals (MPa).

4.2.3 Resistência de cálculo

As resistências de cálculo f_d , empregadas nos processos de dimensionamento e verificação, são calculadas pela minoração de f_k pelos respectivos coeficientes de ponderação das resistências γ_m através da seguinte fórmula:

$$f_d = \frac{f_k}{\gamma_m} \quad (\text{fórmula 31})$$

Onde γ_m é dado pelo produto dos coeficientes parciais γ_{m1} , γ_{m2} e γ_{m3} , que consideram a variabilidade da resistência dos materiais, a diferença entre a resistência do material no corpo de prova e na estrutura, e a incerteza na determinação da resistência, seja devido aos desvios na construção ou às aproximações do método de cálculo (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003, p. 17).

Ainda, a ABNT NBR 6118 define coeficientes de ponderação das resistências específicos para o concreto γ_c e para o aço γ_s , tal que as resistências de cálculo à compressão do concreto f_{cd} e de escoamento do aço f_{yd} , são dadas pelas fórmulas:

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (\text{fórmula 32})$$

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} \quad (\text{fórmula 33})$$

Sendo que, no âmbito deste trabalho, deve-se considerar $\gamma_c = 1,4$ e $\gamma_s = 1,15$ (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2023, p. 71).

4.3 DURABILIDADE DA ESTRUTURA

Objetivando garantir que a segurança proporcionada pelo dimensionamento e verificação da estrutura perdurem por toda a sua vida útil prevista, a ABNT NBR 6118 determina que “[...] é fundamental que sejam respeitadas exigências de durabilidade que limitem a deterioração da estrutura provocada pela agressão do meio ambiente em que está inserida” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2023, p. 117).

4.3.1 Agressividade ambiental

A agressividade ambiental está relacionada às ações físicas e químicas que atuam sobre as estruturas de concreto, independentemente das ações mecânicas, das variações volumétricas de origem térmica, da retração hidráulica e outras previstas no dimensionamento das estruturas [...] (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2023, p. 16).

Deste modo, a Norma define classes de agressividade ambiental de acordo com as condições de exposição da estrutura ao meio conforme o quadro 3.

Quadro 3 – Classes de agressividade ambiental

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submerso	
II	Moderada	Urbano ^{a, b}	Pequeno
III	Forte	Marinho ^a	Grande
		Industrial ^{a, b}	
IV	Muito forte	Industrial ^{a, c}	Elevado
		Respingos de maré	

continua

continuação

a	Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) para ambientes internos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).
b	Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade média relativa do ar menor ou igual a 65 %, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos ou regiões onde raramente chove.
c	Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas, elementos em contato com solo contaminado ou água subterrânea contaminada.

(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2023, p. 17)

4.3.2 Qualidade do concreto e cobrimento

Segundo a ABNT NBR 6118, “[...] a durabilidade das estruturas é altamente dependente das características do concreto e da espessura e qualidade do concreto de cobrimento da armadura” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2023, p. 18), tal que a Norma define requisitos mínimos referentes à qualidade do concreto e à espessura do cobrimento das armaduras de acordo com a classe de agressividade ambiental, apresentados nos quadros 4 e 5.

Quadro 4 – Relação entre a classe de agressividade ambiental e a qualidade do concreto

Concreto ^a	Tipo ^{b, c}	Classe de agressividade			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	≤ 0,65	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,45
	CP	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,50	≤ 0,45
Classe de concreto (ABNT NBR 8953)	CA	≥ C20	≥ C25	≥ C30	≥ C40
	CP	≥ C25	≥ C30	≥ C35	≥ C40

^a O concreto empregado na execução das estruturas deve cumprir com os requisitos estabelecidos na ABNT NBR 12655.
^b CA corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto armado.
^c CP corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto protendido.

(fonte: adaptado de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2023, p. 18)

O cobrimento mínimo c_{\min} é definido como a espessura mínima para o cobrimento que deve ser respeitada ao longo de toda a superfície do elemento. Entretanto, para garantir que esse valor seja efetivamente atendido na execução do projeto, a Norma propõe que seja considerado o cobrimento nominal c_{nom} , dado pela seguinte fórmula:

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c \quad (\text{fórmula 34})$$

onde Δc é a tolerância de execução, a qual deve ser de pelo menos 10 mm (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2023, p. 19).

É permitido reduzir em até 5 mm os cobrimentos definidos no quadro 5 quando a classe de resistência do concreto empregada for maior que a classe de resistência mínima exigida pelo quadro 4 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2023, p. 20).

Quadro 5 – Relação entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental			
		I	II	III	IV ^c
		Cobrimento nominal mm			
Concreto armado	Laje ^b	20	25	35	45
	Viga ^b /pilar	25	30	40	50
	Elementos estruturais em contato com o solo ^d	30		40	50
Concreto protendido ^a	Laje	25	30	40	50
	Viga/pilar	30	35	45	55

^a Cobrimento nominal da bainha ou dos fios, cabos e cordoalhas. O cobrimento da armadura passiva deve respeitar os cobrimentos para concreto armado.

^b Para a face superior de lajes e vigas que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete e madeira, com argamassa de revestimento e acabamento, como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros, as exigências desta Tabela podem ser substituídas pelas de 7.4.7.5, respeitado um cobrimento nominal ≥ 15 mm.

^c Nas superfícies expostas a ambientes agressivos, como reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos, devem ser atendidos os cobrimentos da classe de agressividade IV.

^d No trecho dos pilares em contato com o solo junto aos elementos de fundação, a armadura deve ter cobrimento nominal ≥ 45 mm.

(fonte: adaptado de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2023, p. 20)

4.4 DIMENSIONAMENTO DA ARMADURA DE FLEXÃO

Segundo a ABNT NBR 6118, “[...] o dimensionamento das armaduras longitudinais deve conduzir a um conjunto de esforços resistentes (N_{Rd} , M_{Rd}) que constituam envoltória dos esforços solicitantes (N_{Sd} , M_{Sd}) determinados na análise estrutural” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2023, p. 120).

4.4.1 Hipóteses básicas

A Norma determina hipóteses que devem ser consideradas na análise dos esforços resistentes das seções de elementos de concreto armado no ELU, das quais, para o propósito deste trabalho, são pertinentes (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2023, p. 120-121):

- a) “as seções transversais se mantêm planas após a deformação”;
- b) “a deformação das barras passivas aderentes [...] deve ser a mesma do concreto em seu entorno”;
- c) “as tensões de tração no concreto, normais à seção transversal, devem ser desprezadas no ELU”;
- d) “a distribuição de tensões no concreto é feita de acordo com o diagrama idealizado curvo e retangular [...]”, descrito na figura 5, o qual “[...] pode ser substituído pelo retângulo de profundidade $y = \lambda x$ [...]”, conforme a figura 6, seja x a profundidade da linha neutra, enquanto:

$$\lambda = 0,8 \text{ quando } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \quad (\text{fórmula 35})$$

$$\lambda = 0,925 - f_{ck}/400 \text{ quando } f_{ck} > 50 \text{ MPa} \quad (\text{fórmula 36})$$

De modo que a tensão σ_{cd} atuante ao longo de y pode ser calculada como:

$$\sigma_{cd} = \alpha_c \eta_c f_{cd} \quad (\text{fórmula 37})$$

Onde:

$$\alpha_c = 0,85 \text{ quando } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \quad (\text{fórmula 38})$$

$$\alpha_c = 0,85(1,25 - f_{ck}/200) \text{ quando } f_{ck} > 50 \text{ MPa} \quad (\text{fórmula 39})$$

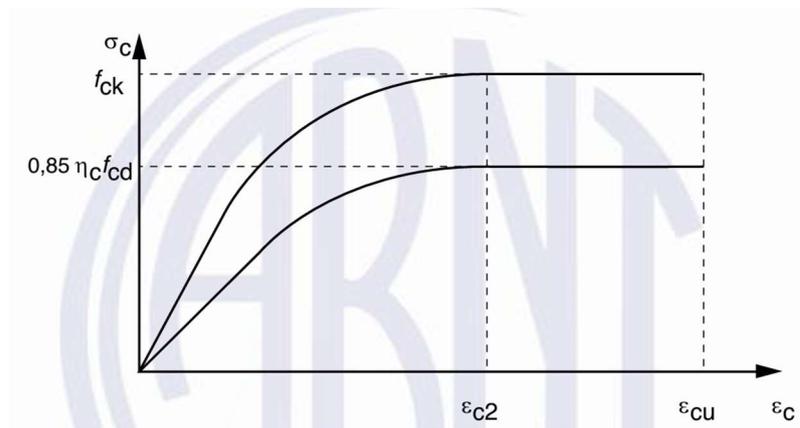
$$\eta_c = 1 \text{ quando } f_{ck} \leq 40 \text{ MPa} \quad (\text{fórmula 40})$$

$$\eta_c = (40/f_{ck})^{1/3} \text{ quando } f_{ck} > 40 \text{ MPa} \quad (\text{fórmula 41})$$

A Norma considera que “as diferenças entre os resultados obtidos com esses dois diagramas são pequenas e aceitáveis, sem necessidade de coeficiente de correção adicional”;

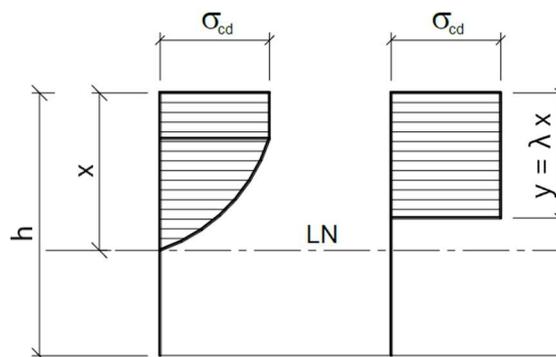
- e) “a tensão nas armaduras deve ser obtida a partir dos diagramas tensão-deformação, com valores de cálculo [...]”, conforme a figura 7.
- f) o estado-limite último ocorre em um dos domínios definidos na figura 8.

Figura 5 – Diagrama tensão-deformação idealizado curvo e retangular para o concreto



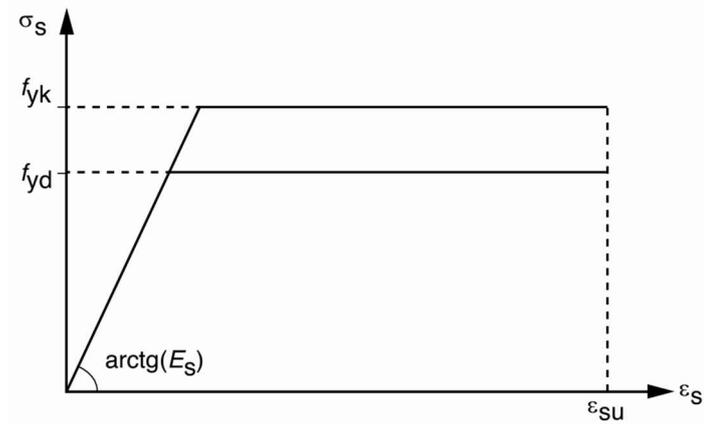
(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2023, p. 26)

Figura 6 – Comparação entre as distribuições de tensões no concreto segundo o diagrama idealizado curvo e retangular e o retângulo de profundidade $y = \lambda x$



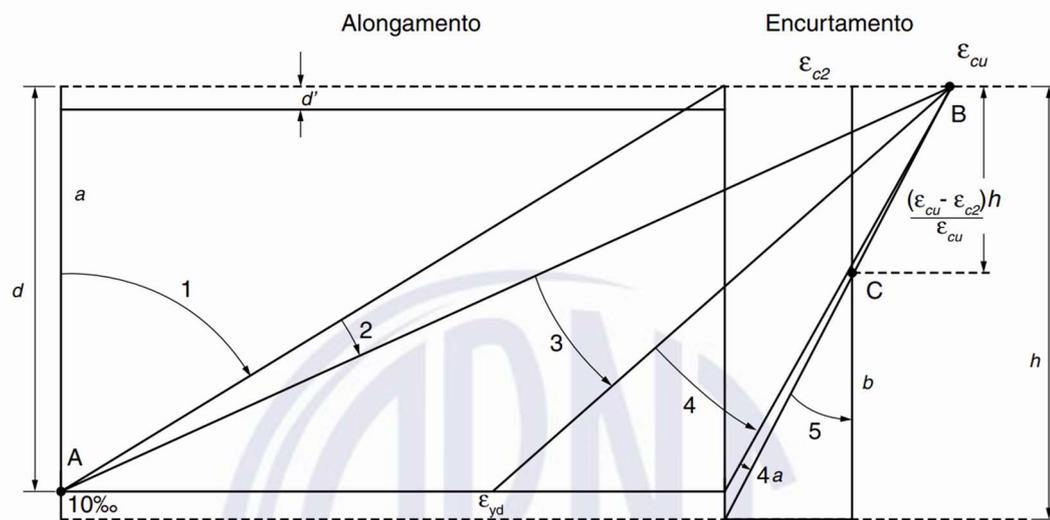
(fonte: adaptado de BASTOS, 2023, p.12)

Figura 7 – Diagrama tensão-deformação para aços de armaduras passivas



(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2023, p. 29)

Figura 8 – Domínios do ELU da seção transversal de um elemento de concreto armado



(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2023, p. 122)

4.4.2 Dutilidade

Objetivando obter um comportamento dútil adequado em vigas e lajes, a Norma especifica os seguintes valores limite para a posição da linha neutra x/d no ELU de acordo com o valor de f_{ck} (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2023, p. 91):

$$x/d \leq 0,45 \text{ quando } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \quad (\text{fórmula 42})$$

$$x/d \leq 0,35 \text{ quando } 50 \text{ MPa} < f_{ck} \leq 90 \text{ MPa} \quad (\text{fórmula 43})$$

Onde d é a altura útil da seção transversal, definida como a distância entre o centro de gravidade da armadura tracionada e a borda mais comprimida.

4.4.3 Lajes em balanço

A Norma estabelece exigências específicas para as lajes maciças em balanço, de modo que:

- a) a espessura h não pode ser menor que 10 cm;
- b) “no dimensionamento [...], os esforços solicitantes de cálculo a serem considerados devem ser multiplicados por um coeficiente adicional γ_n ” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2023, p. 74):

$$\gamma_n = 1,95 - 0,05h \quad (\text{fórmula 44})$$

onde h deve ser expresso em centímetros (cm), ou conforme o quadro 6.

Quadro 6 – Relação entre a espessura h da laje e o coeficiente adicional γ_n

h cm	≥ 19	18	17	16	15	14	13	12	11	10
γ_n	1,00	1,05	1,10	1,15	1,20	1,25	1,30	1,35	1,40	1,45

(fonte: adaptado de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2023, p. 74)

4.4.4 Armadura principal de flexão

Considerando as premissas apresentadas até aqui, é possível dimensionar a seção transversal retangular de um elemento de concreto com armadura simples sujeita a um momento fletor de cálculo M_d no ELU a partir do equilíbrio de esforços resistentes e solicitantes. A figura 9 ilustra o cenário descrito, sendo que:

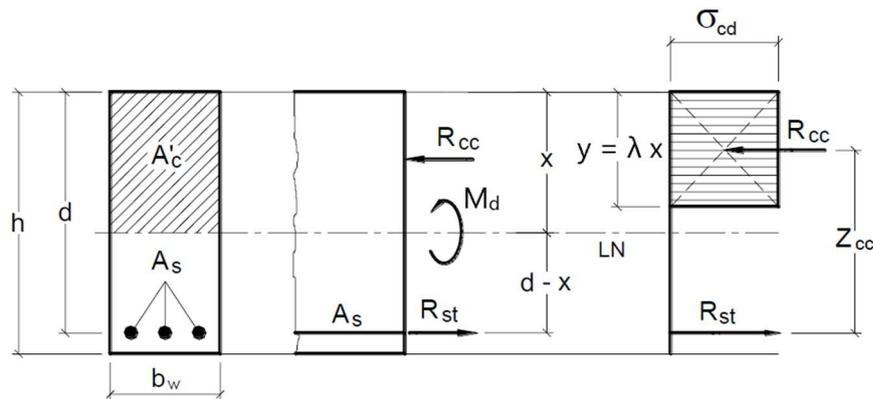
b_w = largura da seção transversal;

h = altura da seção transversal;

d = altura útil da seção transversal;

- x = profundidade da linha neutra na seção transversal;
 y = profundidade do diagrama retangular de tensões do concreto;
 A_s = área da seção transversal da armadura tracionada;
 R_{cc} = força resultante das tensões de compressão no concreto;
 R_{st} = força resultante das tensões de tração na armadura.
 z_{cc} = distância entre os pontos de aplicação de R_{cc} e R_{st} .

Figura 9 – Esforços resistentes e solicitantes na seção transversal de um elemento de concreto com armadura simples



(fonte: adaptado de BASTOS, 2023, p.14)

Assim, o equilíbrio de forças horizontais na seção transversal é dado por:

$$R_{cc} = R_{st} \quad (\text{fórmula 45})$$

Onde:

$$R_{cc} = \alpha_c \eta_c f_{cd} b_w \lambda x \quad (\text{fórmula 46})$$

$$R_{st} = f_{yd} A_s \quad (\text{fórmula 47})$$

Substituindo as fórmulas 46 e 47 na fórmula 45, tem-se:

$$\alpha_c \eta_c f_{cd} b_w \lambda x = f_{yd} A_s \quad (\text{fórmula 48})$$

$$A_s = \frac{\alpha_c \eta_c f_{cd} b_w \lambda x}{f_{yd}} \quad (\text{fórmula 49})$$

Ao passo que o equilíbrio de momentos em relação ao centro de gravidade da armadura pode ser escrito como:

$$R_{cc} z_{cc} = M_d \quad (\text{fórmula 50})$$

Em que:

$$z_{cc} = d - \frac{\lambda x}{2} \quad (\text{fórmula 51})$$

Substituindo as fórmulas 46 e 51 na fórmula 50, tem-se:

$$\alpha_c \eta_c f_{cd} b_w \lambda x \left(d - \frac{\lambda x}{2} \right) = M_d \quad (\text{fórmula 52})$$

$$\frac{\lambda}{2d} x^2 - x + \frac{M_d}{\alpha_c \eta_c f_{cd} b_w \lambda d} = 0 \quad (\text{fórmula 53})$$

Ou seja, uma equação do segundo grau, cuja raiz de interesse é dada por:

$$x = \frac{d}{\lambda} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2M_d}{\alpha_c \eta_c f_{cd} b_w d^2}} \right) \quad (\text{fórmula 54})$$

Portanto, enfim, o conjunto das fórmulas 49 e 54 permite calcular o valor necessário de A_s para resistir a um dado M_d .

4.4.5 Armadura mínima e máxima

Segundo a ABNT NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2023, p. 131):

“A ruptura frágil das seções transversais, quando da formação da primeira fissura, deve ser evitada considerando-se, para o cálculo das armaduras, um momento mínimo dado pelo valor correspondente ao que produziria a ruptura da seção de concreto simples [...]”.

Deste modo, visando a melhorar o comportamento dútil de lajes, assim como controlar a formação de fissuras, a Norma define valores mínimos para as armaduras passivas, conforme apresentado no quadro 7, onde ρ_{\min} é a taxa geométrica mínima de armadura, que não deve, sob circunstância alguma, ficar abaixo de 0,15%, e é calculada segundo (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2023, p. 131):

$$\rho_{\min} = A_{s,\min}/A_c \quad (\text{fórmula 55})$$

onde $A_{s,\min}$ é a área da seção transversal da armadura mínima e A_c é a área bruta de concreto da seção transversal do elemento, sendo que $A_{s,\min}$ deve ser dimensionada para um momento fletor de cálculo mínimo $M_{d,\min}$, dado por:

$$M_{d,\min} = 0,8W_0 f_{ctk,sup} \quad (\text{fórmula 56})$$

onde W_0 é o módulo de resistência da seção transversal bruta de concreto, relativo à fibra mais tracionada:

$$W_0 = I_c/y_t \quad (\text{fórmula 57})$$

Sendo que:

I_c = momento de inércia da seção transversal bruta de concreto do elemento;

y_t = distância do centro de gravidade da seção transversal bruta de concreto do elemento à fibra mais tracionada.

Quadro 7 – Armaduras passivas mínimas em lajes de concreto armado

Armadura	Elementos estruturais sem armaduras ativas	Elementos estruturais com armadura ativa aderente	Elementos estruturais com armadura ativa não aderente
Armaduras negativas	$\rho_s \geq \rho_{\min}$	$\rho_s \geq \rho_{\min} - \rho_p \geq 0,67 \rho_{\min}$	$\rho_s \geq \rho_{\min} - 0,5 \rho_p \geq 0,67 \rho_{\min}$ (ver 19.3.3.2)
Armaduras negativas de bordas sem continuidade	$\rho_s \geq 0,67 \rho_{\min}$		
Armaduras positivas de lajes armadas nas duas direções	$\rho_s \geq 0,67 \rho_{\min}$	$\rho_s \geq 0,67 \rho_{\min} - \rho_p \geq 0,5 \rho_{\min}$	$\rho_s \geq \rho_{\min} - 0,5 \rho_p \geq 0,5 \rho_{\min}$
Armadura positiva (principal) de lajes armadas em uma direção	$\rho_s \geq \rho_{\min}$	$\rho_s \geq \rho_{\min} - \rho_p \geq 0,5 \rho_{\min}$	$\rho_s \geq \rho_{\min} - 0,5 \rho_p \geq 0,5 \rho_{\min}$
Armadura positiva (secundária) de lajes armadas em uma direção	$A_s/s \geq 20\%$ da armadura principal $A_s/s \geq 0,9 \text{ cm}^2/\text{m}$ $\rho_s \geq 0,5 \rho_{\min}$		-
onde $\rho_s = A_s/b_w h$ e $\rho_p = A_p/b_w h$. NOTA Os valores de ρ_{\min} são definidos em 17.3.5.2.1.			

(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2023, p. 160)

A Norma também define um limite máximo para as armaduras, tal que a área de aço da seção transversal da armadura de tração A_s somada à área da armadura de compressão A_s' , quando houver, calculadas na região fora da zona de emendas, não pode ser maior que 4% de A_c (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2023, p. 133).

4.4.6 Barras e fios de aço

Após determinada a área de armadura necessária para atender o dimensionamento da laje, essa deve ser convertida em barras ou fios de uso comercial, classificados pela ABNT NBR 7480 da seguinte forma (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2022, p. 2-3):

- a) Barras: são produzidas por laminação a quente de aço da categoria CA-25 ou CA-50, sem nenhum processo de deformação mecânica, de acordo com as características apresentadas no quadro 8;
- b) Fios: são produzidos a partir de fio-máquina por trefilação ou laminação a frio de aço da categoria CA-60, de acordo com as características apresentadas no quadro 9.

Quadro 8 – Características das barras de aço para as armaduras de estruturas de concreto armado

Diâmetro nominal mm		Massa e tolerância por unidade de comprimento		Valores nominais	
Série ^a	Barras	Massa nominal ^b kg/m	Máxima variação permitida para massa nominal	Área da seção mm ²	Perímetro mm
Fina	6,3	0,245	± 6%	31,2	19,8
	8,0	0,395	± 6%	50,3	25,1
Média	10,0	0,617	± 6%	78,5	31,4
	12,5	0,963	± 6%	122,7	39,3
Grossa	16,0	1,578	± 5%	201,1	50,3
	20,0	2,466	± 5%	314,2	62,8
Extra grossa	22,0	2,984	± 4%	380,1	69,1
	25,0	3,853	± 4%	490,9	78,5
	32,0	6,313	± 4%	804,2	100,5
	40,0	9,865	± 4%	1256,6	125,7

^a Faixa de diâmetros de barras de aço destinados a armaduras para concreto armado.

^b A densidade linear de massa (em quilogramas por metro) é obtida pelo produto da área da seção nominal em metros quadrados por 7 850 kg/m³.

(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2022, p. 12)

Quadro 9 – Características dos fios de aço para as armaduras de estruturas de concreto armado

Diâmetro nominal ^a mm		Massa e tolerância por unidade de comprimento		Valores nominais	
Série ^b	Fios	Massa nominal ^c kg/m	Máxima variação permitida para massa nominal	Área da seção mm ²	Perímetro mm
Fina	3,4	0,071	± 6%	9,1	10,7
	3,8	0,089	± 6%	11,3	11,9
	4,2	0,109	± 6%	13,9	13,2
Média	4,6	0,130	± 6%	16,6	14,5
	5,0	0,154	± 6%	19,6	15,7
	5,5	0,187	± 6%	23,8	17,3
	6,0	0,222	± 6%	28,3	18,8
Grossa	6,4	0,253	± 6%	32,2	20,1
	7,0	0,302	± 6%	38,5	22,0
	8,0	0,395	± 6%	50,3	25,1
	9,5	0,558	± 6%	70,9	29,8
	10,0	0,617	± 6%	78,5	31,4

^a Faixa de diâmetros de fios de aço destinados a armaduras para concreto armado.
^b A densidade linear de massa (em quilogramas por metro) é obtida pelo produto da área da seção nominal em metros quadrados por 7 850 kg/m³.

(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2022, p. 13)

4.4.7 Prescrições gerais

A ABNT NBR 6118 estabelece algumas considerações gerais a serem levadas em conta quando do detalhamento das armaduras de lajes de concreto armado (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2023, p. 172). Destas, tendo em vista o contexto deste trabalho, cabe ressaltar:

- a) a disposição das armaduras deve ser planejada de modo que se possa garantir o seu posicionamento durante a concretagem;
- b) o diâmetro de qualquer barra que componha a armadura de flexão Φ não pode ser maior que $h/8$;
- c) o espaçamento máximo permitido entre as barras da armadura principal de flexão $s_{m\acute{a}x}$ é igual ao menor valor entre 2 h e 20 cm, exceto para as barras com $\Phi \geq 20$ mm, onde $s_{m\acute{a}x} = 15 \Phi$;
- d) para a armadura secundária de flexão, $s_{m\acute{a}x} = 33$ cm.

4.4.8 Comprimento de ancoragem

A Norma determina que “Todas as barras das armaduras devem ser ancoradas de forma que as forças a que estejam submetidas sejam integralmente transmitidas ao concreto [...]” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2023, p. 35). Uma das formas de promover essa transmissão é por meio da aderência entre a armadura e o concreto.

Assim, a resistência de aderência de cálculo entre a armadura passiva e o concreto f_{bd} é definida da seguinte forma:

$$f_{bd} = \eta_1 \eta_2 \eta_3 f_{ctd} \quad (\text{fórmula 58})$$

Sendo:

η_1 = coeficiente para cálculo da tensão de aderência da armadura passiva, relacionado à categoria do aço da armadura conforme o quadro 10;

η_2 = coeficiente para cálculo da tensão de aderência da armadura passiva, tal que:

$$\eta_2 = 1,0 \text{ para situações de boa aderência} \quad (\text{fórmula 59})$$

$$\eta_2 = 0,7 \text{ para situações de má aderência} \quad (\text{fórmula 60})$$

η_3 = coeficiente para cálculo da tensão de aderência da armadura passiva, tal que:

$$\eta_3 = 1,0 \text{ para } \Phi < 32 \text{ mm} \quad (\text{fórmula 61})$$

$$\eta_3 = (132 - \phi)/100 \text{ para } \Phi \geq 32 \text{ mm} \quad (\text{fórmula 62})$$

onde Φ deve ser expresso em milímetros (mm).

Quadro 10 – Relação entre a categoria do aço e o coeficiente para cálculo da tensão de aderência da armadura passiva η_1

Categoria do aço	η_1
CA-25	1,00
CA-50	2,25
CA-60	1,00

(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2023, p. 29)

O comprimento de ancoragem básico l_b é dado por:

$$l_b = \frac{\phi f_{yd}}{4f_{bd}} \geq 25\phi \quad (\text{fórmula 63})$$

O comprimento de ancoragem necessário $l_{b,nec}$:

$$l_{b,nec} = l_b \frac{A_{s,calc}}{A_{s,ef}} \geq l_{b,mín} \quad (\text{fórmula 64})$$

Onde:

$A_{s,calc}$ = área de aço calculada para a ancoragem;

$A_{s,ef}$ = área de aço efetivamente empregada na ancoragem;

$l_{b,mín}$ = maior valor entre $0,3 l_b$, 10Φ e 100 mm.

4.5 DISPENSA DA ARMADURA TRANSVERSAL

É permitido projetar lajes sem estribos para resistir ao esforço cortante, contanto que a força cortante resistente de cálculo V_{Rd1} seja suficiente para resistir à força cortante solicitante de cálculo V_{sd} , ou seja (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2023, p. 160):

$$V_{sd} \leq V_{Rd} \quad (\text{fórmula 65})$$

Onde:

$$V_{Rd1} = [\tau_{Rd}k(1,2 + 40\rho_1) + 0,15\sigma_{cp}]b_wd \quad (\text{fórmula 66})$$

$$\tau_{Rd} = 0,25f_{ctd} \quad (\text{fórmula 67})$$

$$f_{ctd} = f_{ctk,inf}/\gamma_c \quad (\text{fórmula 68})$$

$$\rho_1 = A_{s1}/b_wd \leq 0,02 \quad (\text{fórmula 69})$$

$$\sigma_{cp} = N_{sd}/A_c \quad (\text{fórmula 70})$$

$$k = |1,6 - d| \leq |1| \quad (\text{fórmula 71})$$

Sendo:

d = altura útil da seção transversal da laje e deve ser expressa em metros (m);

τ_{Rd} = tensão resistente de cálculo do concreto ao cisalhamento, cujo valor deve ser limitado ao correspondente a $f_{ck} = 60$ MPa (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2023, p. 161);

A_{s1} = área da seção transversal da armadura de tração;

N_{sd} = força longitudinal na seção devido ao carregamento, de modo que a compressão deve ser tomada com sinal positivo e a Norma permite, para efeito de cálculo, considerar a massa específica do concreto armado igual a 2500 kg/m^3 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2023, p. 22).

Cabe mencionar que a utilização da teoria de Rankine para calcular as ações do solo sobre a estrutura implica em sempre obter empuxos do solo horizontais, significando que tais forças não possuem parcela vertical. A consequência disto é que não ocorre acréscimo sobre a força longitudinal na estrutura devido ao empuxo do solo. Essa consideração é favorável à segurança, haja visto que aumentar a força longitudinal causaria o aumento de V_{Rd1} .

5 FERRAMENTA COMPUTACIONAL

O objetivo deste capítulo é apresentar a ferramenta computacional criada para dimensionar e detalhar paredes-diafragma de concreto armado moldadas *in loco*. Para tanto, são abordados os seguintes tópicos:

- a) linguagem de programação empregada no desenvolvimento da ferramenta;
- b) forma de entrada de dados;
- c) módulos que compõe a ferramenta;
- d) saída gerada pela ferramenta;
- e) testes de validação da ferramenta.

5.1 LINGUAGEM DE PROGRAMAÇÃO

O conjunto de códigos-fonte que constituem a ferramenta computacional estão escritos na linguagem de programação *Python*, criada por Guido van Rossum e lançada em 1991. *Python* é uma linguagem de alto nível, interpretada, versátil e que possui vasta variedade de recursos de fácil implementação desenvolvidos por terceiros (PYTHON INSTITUTE, 2024).

A escolha pela linguagem se deu principalmente em função do pacote de módulos distribuído pela empresa TQS – “[...] empresa brasileira, fundada em 1986 por engenheiros civis, que cria, desenvolve e comercializa *softwares* para a elaboração de projetos de estruturas e fundações de edificações” (TQS, 2024) – para a criação de arquivos DWG TQS com objetos de “cotagem associativa” e “ferros inteligentes” de forma programática.

5.2 ENTRADA DE DADOS

A entrada de dados é feita através de arquivos do tipo JSON (*JavaScript Object Notation* ou, em tradução livre, “Notação de Objetos JavaScript”), um formato de texto legível para humanos amplamente utilizado no meio da computação para representar estruturas de dados complexas compostas por conjuntos de pares chave/valor (JSON, 2024).

Os arquivos fornecidos à ferramenta são:

- a) “*perfil_esc.json*”;
- b) “*perfil_con.json*”;
- c) “*parede.json*”.

Os dois primeiros, “*perfil_esc.json*” e “*perfil_con.json*”, descrevem o solo em cada lado da parede-diafragma – o lado da escavação e o da contenção, respectivamente. A estrutura desses arquivos é apresentada na figura 10, onde a chave “*_camadas*” contém uma lista de objetos que definem as características de cada camada do solo, sejam:

- a) “*z_i*” a profundidade inicial da camada, expressa em metros (m);
- b) “*gama_nat*” e “*gama_sat*” os pesos específicos natural e saturado do solo, respectivamente, expressos em quilonewtons por metro cúbico (kN/m³);
- c) “*fi*” o ângulo de atrito interno efetivo do solo, expresso em graus (°);
- d) “*c*” a coesão efetiva do solo, expressa em quilopascals (kPa).

Figura 10 – Exemplo do conteúdo dos arquivos “*perfil_esc.json*” e “*perfil_con.json*”

```
{
  "_camadas": [
    {
      "z_i": 0,
      "gama_nat": 17,
      "fi": 20,
      "c": 10
    },
    {
      "z_i": 2.5,
      "gama_nat": 19,
      "gama_sat": 21,
      "fi": 30
    }
  ],
  "na": 4,
  "q": 10
}
```

(fonte: elaborado pelo autor)

A chave “*na*” se refere à profundidade do nível d’água no solo e deve ser expressa em metros (m), se houver. Por fim, a chave “*q*” quantifica a sobrecarga uniformemente distribuída sobre a superfície do terreno e deve ser expressa em quilopascals (kPa).

O arquivo “*parede.json*” contém os dados pertinentes ao dimensionamento estrutural da parede-diafragma, conforme a figura 11, sendo:

- a) “*caa*” a classe de agressividade ambiental;
- b) “*crc*” a classe de resistência do concreto;
- c) “*c*” o cobrimento, expresso em milímetros (mm);
- d) “*h*” a espessura da parede-diafragma, expressa em centímetros (cm);
- e) “*l_b*” a largura da parede-diafragma, expressa em centímetros (cm).

Figura 11 – Exemplo do conteúdo do arquivo “*parede.json*”

```
{
    "caa": 2,
    "crc": 40,
    "c": 40,
    "h": 30,
    "l_b": 900
}
```

(fonte: elaborado pelo autor)

As informações compreendidas nesses arquivos definem a natureza do problema em questão e dão o ponto de partida para solucioná-lo. Posteriormente, essas informações serão consumidas pelos módulos da ferramenta, os quais são apresentados no próximo tópico.

5.3 MÓDULOS

Módulo é o nome dado a um arquivo de código-fonte contendo definições e instruções *Python*. É considerado uma boa prática dividir um programa em módulos à medida em que este cresce a fim de mantê-lo organizado em partes reutilizáveis, simplificando a sua gestão e manutenção.

Deste modo, a ferramenta desenvolvida neste trabalho foi dividida nos módulos:

- a) “*solo*”;
- b) “*processamento*”;
- c) “*esforços*”;
- d) “*concreto*”;
- e) “*armadura*”;
- f) “*detalhamento*”.

O módulo “*solo*” carrega os dados dos arquivos “*perfil_esc.json*” e “*perfil_con.json*” para construir a imagem do solo em cada lado da estrutura e calcular os coeficientes de empuxo, as tensões e os empuxos em cada camada de solo.

Essas funcionalidades são então empregadas pelo módulo “*processamento*” para determinar o comprimento de ficha mínimo necessário para equilibrar a parede-diafragma, juntamente à posição correspondente do eixo de rotação desta. Isto é feito através do cálculo iterativo de empuxos do solo para diversas posições do eixo de rotação, para diversos comprimentos de ficha, começando com um comprimento de ficha nulo e incrementando-o de centímetro em centímetro, até encontrar uma combinação de valores para as duas variáveis que solucione o sistema de equações de equilíbrio de forças horizontais e momentos atuantes sobre a estrutura.

Após isto, a distribuição de tensões horizontais do solo ao longo da parede-diafragma passa a ser conhecida e, assim, o módulo “*esforços*” utiliza-se dessas informações para determinar as funções que descrevem tal distribuição, as quais são integradas em relação ao eixo longitudinal da estrutura a fim de obter as respectivas funções do esforço cortante, que, por sua vez, são integradas novamente para obter as funções do momento fletor. Com isto, é possível calcular as distribuições dos esforços mencionados ao longo da estrutura, onde são buscados os valores máximos e mínimos, a serem utilizados a seguir.

Havendo determinado os esforços máximos e mínimos, o módulo “*concreto*” usa os dados contidos no arquivo “*parede.json*” para, em conjunto com o módulo “*armadura*”, dimensionar as armaduras da parede-diafragma. Esta etapa do processo gera como saída um conjunto de armaduras positiva e negativa, principais e secundárias, definidas em termos de barras de aço de uso comercial, com os respectivos espaçamentos e comprimentos de ancoragem.

Enfim, o módulo “*detalhamento*” constrói uma representação gráfica da solução determinada num arquivo DWG TQS. As características deste arquivo são discutidas em maiores detalhes no tópico seguinte.

5.4 SAÍDA

O produto final gerado a partir da utilização da ferramenta é um arquivo DWG TQS. Este tipo de arquivo armazena os dados de elementos gráficos que compõe um desenho – neste caso, o detalhamento da estrutura (vide Apêndice D).

Neste desenho, são exibidas as vistas frontal e lateral da parede-diafragma em corte. O elemento é situado em relação ao solo, havendo uma cota de nível na superfície do terreno de cada lado. Os comprimentos dos trechos da parede-diafragma acima e abaixo do nível da escavação, assim como as suas dimensões externas – altura, largura e espessura –, são indicados por objetos de “cotagem associativa”.

As armaduras são representadas por objetos de “ferro inteligente”. Estes, além de descreverem graficamente o formato e a disposição das armaduras, contêm várias propriedades relevantes destas, tais como: o número de identificação, o diâmetro nominal da barra, o comprimento total da barra, o espaçamento entre barras e a quantidade total de barras.

Um duplo-clique sobre um “ferro inteligente” abrirá a janela de “edição de ferros” apresentada na figura 12, onde as propriedades mencionadas, e outras mais, estão organizadas por tema em abas, e podem ser conferidas ou modificadas conforme a necessidade do usuário.

Figura 12 – Janela de “edição de ferros”

Edição de ferros

Gerais | Formato | Linhas | Faixas | Curvatura | Ganchos

Ferro

Posição N 1

Quantidade 126

Multiplicador 1

Bitola 10 mm

Espaçamento 8 cm

Por nervura Não Sim

Identificar c/Nerv Não Sim

Mostrar

	Não	Sim		Não	Sim
Quantidade	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	Espaçamento	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
Posição	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	Comprimento	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
Bitola	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	Realinhar	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Outros

Observação

Cotar ponta 0 1 2

Posição repetida Não Sim

Cobrimento 2.5 cm

Altura de texto 0.2 cm

Altura de texto (faixa) 0 cm

Pilares

Lance 0

Quebra de linha

0 1 2 3 4

Alinhamento

<= Centro =>

Número da posição - identifica unicamente este ferro
Posição em uso por outro ferro

OK Cancelar

(fonte: elaborado pelo autor)

5.5 VALIDAÇÃO

Durante a etapa de desenvolvimento da ferramenta, foram realizados testes para verificar se o funcionamento da ferramenta e os resultados gerados por ela estavam adequados. Esses testes são descritos a seguir.

A ferramenta apresentou um funcionamento adequado quando foram fornecidos valores não numéricos através dos arquivos JSON, emitindo uma notificação de erro e interrompendo o processamento sem gerar nenhuma saída. O mesmo comportamento foi observado quando a ferramenta encontrou o valor zero em qualquer uma das chaves do arquivo “*parede.json*”.

Nos casos em que os valores de entrada das chaves “*caa*” ou “*crc*” do arquivo “*parede.json*” não corresponderam aos valores apresentados nos quadros 2 e 3, ou quando as chaves “*crc*” ou “*c*” do mesmo arquivo não respeitaram as exigências mínimas estabelecidas nos quadros 4 e 5, a ferramenta emitiu uma notificação de erro e interrompeu o processamento sem gerar nenhuma saída.

No módulo “*solo*”, os atributos correspondentes às chaves “*gama_nat*”, “*gama_sat*”, “*fi*”, “*c*” e “*q*” dos arquivos “*perfil_esc.json*” e “*perfil_con.json*” possuem valores padrão zero, enquanto o atributo correspondente à chave “*na*”, nulo. Assim, no cenário de qualquer uma dessas não constar nos arquivos JSON, a ferramenta apresentou um funcionamento adequado, assumindo os valores padrão para as chaves ausentes.

Quanto à hipótese de serem passados valores exorbitantes na entrada, contanto que não sejam interceptados pelas verificações anteriores, a ferramenta irá executar o processamento com base nos valores fornecidos, podendo incidir em algum erro durante os cálculos que impossibilite o dimensionamento. Se isto acontecer, a ferramenta irá emitir uma notificação de erro e encerrar o processamento sem gerar nenhuma saída.

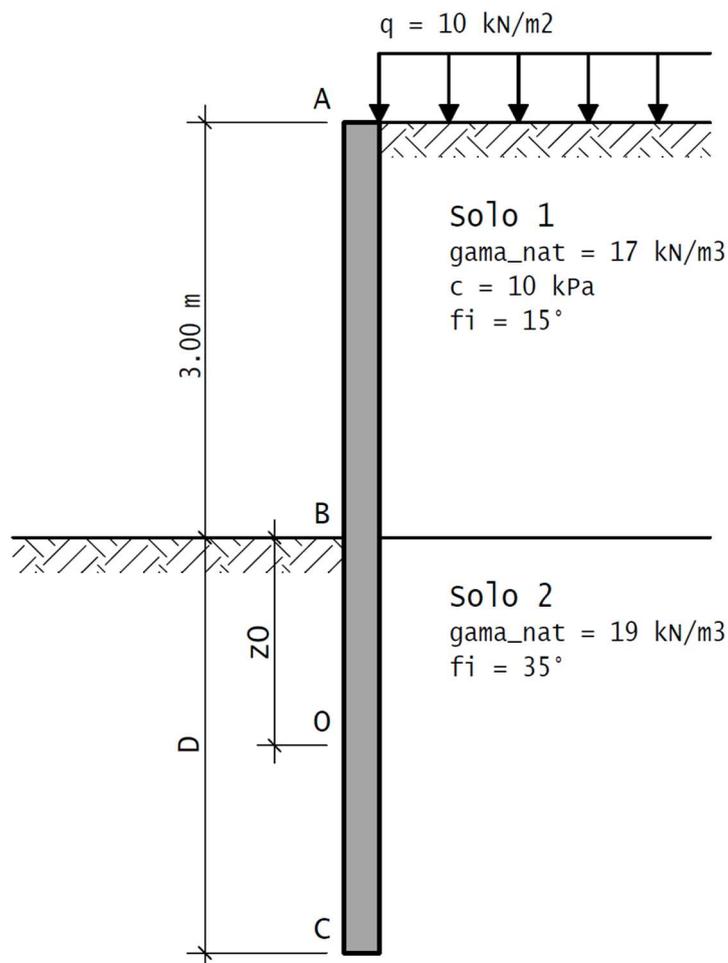
Por fim, a confiabilidade da ferramenta foi testada comparando o resultado obtido através dela à solução encontrada no exemplo de cálculo demonstrado no capítulo seguinte. A memória de cálculo, os quadros e diagramas de esforços, e o detalhamento obtidos através da ferramenta para este exemplo são apresentados nos Apêndices A até D.

6 EXEMPLO DE CÁLCULO

Neste capítulo, será demonstrada a aplicação dos métodos de cálculo discutidos anteriormente no processo de dimensionamento de uma parede-diafragma projetada para resistir aos empuxos do solo representado na figura 13.

As propriedades físicas de interesse de cada camada deste solo são apresentadas no quadro 11, sendo que os coeficientes de empuxo ativo K_a e passivo K_p são calculados de acordo com as fórmulas 3 e 5.

Figura 13 – Esquema do solo do exemplo de cálculo



(fonte: elaborado pelo autor)

Quadro 11 – Propriedades físicas do solo

Camada	γ_{nat} (kN/m ³)	c' (kPa)	Φ' (°)	K_a	K_p
1	17	10	15	0,5888	1,6984
2	19	0	35	0,2710	3,6902

(fonte: elaborado pelo autor)

6.1 DIMENSIONAMENTO GEOTÉCNICO

Inicialmente, é feito o dimensionamento geotécnico da parede-diafragma, cujo propósito é determinar o menor comprimento de ficha D necessário para estabilizar a estrutura, juntamente à profundidade z_0 do eixo de rotação desta, medida a partir do nível da escavação.

Para tanto, calculam-se as tensões efetivas vertical σ'_v e horizontal σ'_h provenientes do solo de cada lado da estrutura, em cada um dos pontos sensíveis – a saber, A, B, O e C. Essas tensões são definidas conforme as fórmulas 1, 2 e 4 e os resultados obtidos constam no quadro 12, onde z_0 e D devem ser expressos em metros (m).

Quadro 12 – Tensões efetivas vertical σ'_v e horizontal σ'_h do solo

Ponto	Escavação		Contenção	
	σ'_v (kPa)	σ'_h (kPa)	σ'_v (kPa)	σ'_h (kPa)
A	0	0	10	0
B	0	0	61	20,57
				16,53
O	$19z_0$	$70,11z_0$	$61 + 19z_0$	$16,53 + 5,15z_0$
		$5,15z_0$		$225,10 + 70,11z_0$
C	$19D$	$5,15D$	$61 + 19D$	$225,10 + 70,11D$

(fonte: elaborado pelo autor)

Conhecendo-se as tensões horizontais do solo, é possível definir o empuxo do solo em cada trecho delimitado por dois pontos consecutivos. Esses empuxos, por sua vez, uma vez definidos, permitem então definir os correspondentes momentos em relação a um ponto qualquer.

O quadro 13 expõe os empuxos E obtidos com base na fórmula 10; o quadro 14, os momentos M em relação ao ponto O obtidos com base na fórmula 19. Novamente z_0 e D devem ser expressos em metros (m).

Quadro 13 – Empuxos E do solo

Trecho	Escavação	Contenção
	E (kN/m)	E (kN/m)
de A até B	0	30,85
de B até O	$35,06z_0^2$	$2,57z_0^2 + 16,53z_0$
de O até C	$2,57(z_0 + D)(D - z_0)$	$[35,06(z_0 + D) + 225,10](D - z_0)$

(fonte: elaborado pelo autor)

Quadro 14 – Momentos M do solo em relação ao ponto O

Trecho	Escavação	Contenção
	M (kNm/m)	M (kNm/m)
de A até B	0	$30,85(1 + z_0)$
de B até O	$11,69z_0^3$	$0,86z_0^3 + 8,27z_0^2$
de O até C	$[1,72(D - z_0) + 2,57z_0](D - z_0)^2$	$[23,37(D - z_0) + 35,06z_0 + 112,55](D - z_0)^2$

(fonte: elaborado pelo autor)

Os empuxos resultantes do solo, E_{esc} para o lado da escavação e E_{con} para o lado da contenção, assim como os momentos resultantes do solo em relação ao ponto O, M_p para os momentos estabilizantes e M_a para os momentos desestabilizantes são dados segundo:

$$E_{esc} = E_{esc,BO} + E_{esc,OC} \quad (\text{fórmula 72})$$

$$E_{con} = E_{con,AB} + E_{con,BO} + E_{con,OC} \quad (\text{fórmula 73})$$

$$M_p = M_{con,OC} + M_{esc,BO} \quad (\text{fórmula 74})$$

$$M_a = M_{con,AB} + M_{con,BO} + M_{esc,OC} \quad (\text{fórmula 75})$$

De modo que os índices “esc” e “con” se referem às ações do solo do lado da escavação e da contenção, respectivamente, enquanto “AB”, “BO” e “OC” indicam os pontos de extremidade dos trechos relacionados às ações. Assim, a condição de equilíbrio estático no ELU é descrita pelas duas fórmulas a seguir:

$$\gamma_f E_{esc} - \gamma_f E_{con} = 0 \quad (\text{fórmula 76})$$

$$\gamma_f M_p - \gamma_f M_a = 0 \quad (\text{fórmula 77})$$

Onde γ_f é o coeficiente de ponderação das ações na combinação última normal, que vale 1 para as ações favoráveis à segurança, E_{esc} e M_p , e 1,4 para as desfavoráveis, E_{con} e M_a , logo:

$$E_{esc} - 1,4E_{con} = 0 \quad (\text{fórmula 78})$$

$$M_p - 1,4M_a = 0 \quad (\text{fórmula 79})$$

Enfim, a combinação dos valores de z_0 e D que soluciona o sistema de equações definido pelas fórmulas 78 e 79 é determinada de maneira iterativa. No caso deste exemplo, esses valores são 2,84 m e 3,09 m, respectivamente.

Os quadros 15, 16 e 17 apresentam os valores das tensões, empuxos e momentos dos quadros 12, 13 e 14 calculados para a solução encontrada.

Quadro 15 – Tensões efetivas vertical σ'_v e horizontal σ'_h do solo para a solução encontrada

Ponto	Escavação		Contenção	
	σ'_v (kPa)	σ'_h (kPa)	σ'_v (kPa)	σ'_h (kPa)
A	0	0	10	0
B	0	0	61	20,57
				16,53
O	54,04	199,40	115,04	31,17
		14,64		424,51
C	58,71	15,91	119,71	441,75

(fonte: elaborado pelo autor)

Quadro 16 – Empuxos E do solo para a solução encontrada

Trecho	Escavação	Contenção
	E (kN/m)	E (kN/m)
de A até B	0	30,85
de B até O	283,56	67,84
de O até C	3,76	106,53

(fonte: elaborado pelo autor)

Quadro 17 – Momentos M do solo em relação ao ponto O para a solução encontrada

Trecho	Escavação	Contenção
	M (kNm/m)	M (kNm/m)
de A até B	0	118,61
de B até O	268,82	86,59
de O até C	0,47	13,19

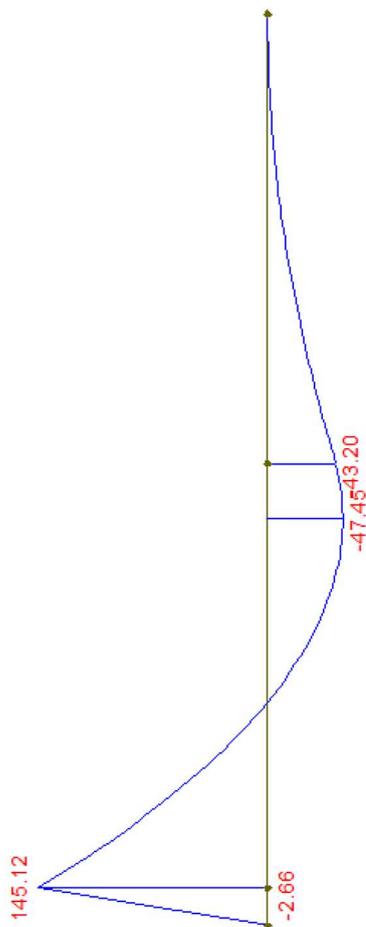
(fonte: elaborado pelo autor)

6.2 DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL

Uma vez determinada a distribuição de tensões horizontais ao longo da parede-diafragma, é possível determinar as distribuições dos esforços solicitantes – cortante V_{sd} e momento fletor M_{sd} – atuantes na estrutura. Neste exemplo, isto é feito com o auxílio do Ftool, “[...] um programa [computacional] para a análise estrutural de pórticos planos” (FTOOL, 2024) criado pelo professor Luiz Fernando Martha do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio (Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro).

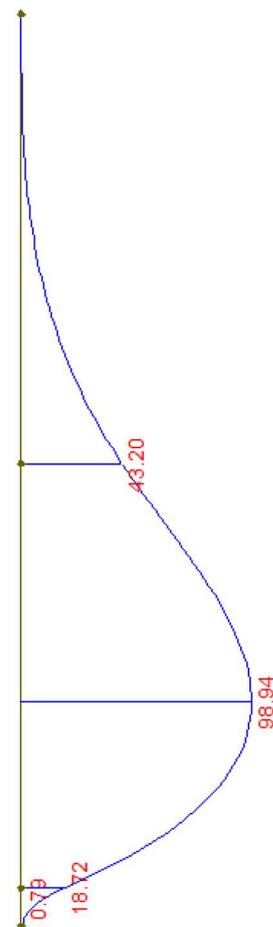
As figuras 14 e 15 apresentam os diagramas de esforço cortante e momento fletor, nesta ordem, gerados pelo Ftool com base nas tensões horizontais calculadas anteriormente.

Figura 14 – Diagrama de esforço cortante V_{sd} da parede-diafragma gerado pelo Ftool



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 15 – Diagrama de momento fletor M_{sd} da parede-diafragma gerado pelo Ftool



(fonte: elaborado pelo autor)

Em especial, é de interesse para o fim de dimensionamento estrutural saber os valores máximos e mínimos que ocorrem na estrutura para cada tipo de esforço. Deste modo, são estabelecidos:

- a) $V_{Sd,máx} = 145,12 \text{ kN/m}$;
- b) $V_{Sd,mín} = 0$;
- c) $M_{Sd,máx} = 98,94 \text{ kNm/m}$;
- d) $M_{Sd,mín} = 0$.

Para o desenvolvimento deste exemplo, serão considerados os seguintes parâmetros iniciais:

- a) classe de agressividade ambiental = II;
- b) classe de resistência do concreto = C30;
- c) cobrimento $c = 25 \text{ mm}$;
- d) espessura da parede-diafragma $h = 30 \text{ cm}$;
- e) barras de aço CA-50 com diâmetro nominal $\Phi = 10 \text{ mm}$ nas armaduras.

Antes de iniciar o dimensionamento estrutural de fato, é necessário verificar se a classe de resistência do concreto e o valor de c adotados atendem as exigências impostas pela ABNT NBR 6118:2023, apresentadas nos quadros 4 e 5.

Considerando a classe de agressividade ambiental II, o concreto deve ser pelo menos da classe de resistência C25, enquanto o cobrimento nominal c_{nom} para elementos estruturais em contato com o solo é de 30 mm. Portanto, a classe de resistência escolhida atende o critério da Norma, mas c aparenta não o fazer.

Entretanto, quando a classe de resistência do concreto é superior à classe mínima estabelecida, como neste caso, é permitido reduzir c_{nom} em até 5 mm. Ou seja, c_{nom} pode ser tomado igual a 25 mm e, deste modo, o valor de c passa a ser viável.

Passadas as primeiras verificações, calculam-se as propriedades geométricas referentes à seção transversal bruta de concreto do elemento listadas abaixo:

- a) área $A_c = 3 \times 10^3 \text{ cm}^2/\text{m}$;
- b) momento de inércia $I_c = 2,25 \times 10^5 \text{ cm}^4/\text{m}$;
- c) distância do centro de gravidade à fibra mais tracionada $y_t = 15 \text{ cm}$;
- d) módulo resistente de flexão $W_0 = 1,5 \times 10^4 \text{ cm}^3/\text{m}$.

No concreto, tem-se as propriedades a seguir, dadas em função da resistência característica à compressão do concreto f_{ck} :

- a) coeficiente $\lambda = 0,8$;
- b) coeficiente $\alpha_c = 0,85$;
- c) coeficiente $\eta_c = 1$;
- d) resistência de cálculo à compressão do concreto $f_{cd} = 21,43$ MPa;
- e) resistência média à tração do concreto $f_{ct,m} = 2,90$ MPa;
- f) resistência característica superior do concreto à tração $f_{ctk,sup} = 3,77$ MPa;
- g) resistência característica inferior do concreto à tração $f_{ctk,inf} = 2,03$ MPa;
- h) resistência de cálculo à tração do concreto $f_{ctd} = 1,45$ MPa.

Com isto, é possível determinar o momento fletor de cálculo mínimo $M_{d,min}$, que será utilizado para dimensionar a armadura mínima de tração. Calculando-o conforme a fórmula 56, obtém-se $M_{d,min} = 45,18$ kNm/m.

Quanto às armaduras, tem-se as seguintes propriedades, calculadas a partir da categoria do aço e de Φ :

- a) coeficiente $\eta_1 = 2,25$;
- b) coeficiente $\eta_2 = 1$;
- c) coeficiente $\eta_3 = 1$;
- d) resistência de cálculo de escoamento do aço $f_{yd} = 434,78$ MPa;
- e) resistência de aderência de cálculo $f_{bd} = 3,26$ MPa;
- f) comprimento de ancoragem básico $l_b = 33,34$ cm;
- g) comprimento de ancoragem mínimo $l_{b,min} = 10$ cm;
- h) altura útil $d = 27$ cm.

Dado que as características primordiais das barras da armadura de tração – categoria do aço e Φ – já estão definidas, dimensioná-la implica em calcular quanto deve ser o espaçamento s entre as barras para atender a área de aço A_s necessária na seção transversal do elemento para resistir a um determinado momento fletor. Além disso, o dimensionamento determina o comprimento de ancoragem $l_{b,nec}$ que as barras precisam ter para transmitirem ao concreto toda a força a que forem submetidas.

Esse procedimento se dá através das seguintes etapas:

- a) calcular $x_{m\acute{a}x}$;
- b) calcular $A_{s,m\acute{i}n,\rho}$;
- c) calcular $s_{m\acute{a}x}$ segundo 5.2-c e d;
- d) assumir M_d igual ao maior valor entre M_{Sd} e $M_{d,m\acute{i}n}$;
- e) calcular x ;
- f) verificar se $x \leq x_{m\acute{a}x}$ – se não for, redimensionar a seção transversal;
- g) calcular A_s ;
- h) verificar se $A_s \geq A_{s,m\acute{i}n,\rho}$ – se não for, assumir $A_s = A_{s,m\acute{i}n,\rho}$;
- i) calcular s ;
- j) verificar se $s \leq s_{m\acute{a}x}$ – se não for, assumir $s = s_{m\acute{a}x}$;
- k) calcular $A_{s,ef}$;
- l) calcular $l_{b,nec}$.

Sendo:

$x_{m\acute{a}x}$ = profundidade da linha neutra máxima permitida;

$A_{s,m\acute{i}n,\rho}$ = área da seção transversal da armadura proporcional à taxa geométrica mínima;

$s_{m\acute{a}x}$ = espaçamento máximo permitido entre barras da armadura;

M_d = momento fletor de cálculo empregado para calcular x ;

$M_{Sd} = M_{Sd,m\acute{a}x}$ para a armadura principal positiva ou $M_{Sd,m\acute{i}n}$ para a negativa;

$A_{s,ef}$ = área efetiva da seção transversal da armadura.

O quadro 18 expõe o resultado final do dimensionamento das armaduras de flexão da parede-diafragma em questão.

Quadro 18 – Características das armaduras com barras de aço CA-50 com $\Phi = 10$ mm

Armadura		s (cm)	$l_{b,nec}$ (cm)	$A_{s,ef}$ (cm ² /m)	A_s (cm ² /m)
positiva	principal	8	14	9,81	8,78
	secundária				
negativa	principal	17	29	4,62	4,50
	secundária				

(fonte: elaborado pelo autor)

O próximo e último passo no dimensionamento da parede-diafragma é verificar a necessidade de armadura transversal. O critério desta verificação está estabelecido na fórmula 65, a qual compara a força cortante resistente de cálculo V_{Rd1} , dada pela fórmula 66, ao esforço cortante solicitante de cálculo V_{Sd} , tal que se V_{Rd1} for suficiente para resistir a V_{Sd} , a parede-diafragma pode prescindir de armadura transversal.

Empregando as fórmulas 67 a 71, calculam-se:

- a) resistência de cálculo do concreto ao cisalhamento $\tau_{rd} = 0,36$ MPa;
- b) coeficiente $k = 1,33$;
- c) taxa geométrica de armadura de flexão $\rho_1 = 0,36\%$;
- d) tensão normal devido ao carregamento $\sigma_{cp} = 0,15$ MPa;

Deste modo, tem-se $V_{Rd1} = 179,82$ kN/m. Como neste exemplo $V_{Sd} = 145,12$ kN/m, a estrutura passa na verificação e, portanto, pode ser executada sem armadura transversal.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo do trabalho – desenvolver uma ferramenta computacional capaz de dimensionar e detalhar paredes-diafragma de concreto armado moldadas *in loco* – foi alcançado. A ferramenta, desenvolvida na linguagem de programação *Python*, gera um arquivo DWG TQS representativo da solução encontrada para os dados do problema fornecidos pelo usuário através de arquivos JSON.

O funcionamento da ferramenta é apresentado em capítulo próprio neste trabalho, assim como os métodos empregados por esta para dimensionar as paredes-diafragma. Além disso, um exemplo de cálculo é desenvolvido a fim de elucidar o processo desempenhado pela ferramenta e comparar os resultados obtidos assim àqueles obtidos utilizando a ferramenta, atestando a validade desta.

Porém, apesar da ferramenta possuir verificações de segurança que impedem a entrada de dados inválidos, o usuário não está isento da responsabilidade de atentar-se aos resultados produzidos pela ferramenta, conferindo se são coerentes. Neste sentido, é recomendado ao usuário a leitura deste trabalho e também das referências.

Concluindo, todavia, ainda há margem para aperfeiçoar a ferramenta em trabalhos futuros. Considera-se que as principais melhorias a serem desenvolvidas são:

- a) implementar uma interface gráfica para a entrada de dados do problema que contenha uma pré-visualização da configuração do solo correspondente aos dados fornecidos pelo usuário;
- b) expandir as possibilidades de cálculo contempladas pela ferramenta para além das paredes-diafragma em balanço, incluindo, por exemplo, o caso das paredes-diafragma atirantadas.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto. Rio de Janeiro, 2023.

_____. **NBR 7480**: aço destinado às armaduras para estruturas de concreto armado – requisitos. Rio de Janeiro, 2022.

_____. **NBR 8681**: ações e segurança nas estruturas – procedimento. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 8953**: concreto para fins estruturais – classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015.

BARROS, P. L. A. **Obras de contenção**: manual técnico. Maccaferri do Brasil, 2017.

BASTOS, P. F. **Flexão normal simples – vigas**. Bauru: UNESP, 2023. Disponível em <<https://www.pfbastost.com.br/pbastos/concreto1/FlexaoSimples.pdf>>. Acesso em 08/06/2024.

CONTE, E.; TRONCONE, A. **Simplified analysis of cantilever diaphragm walls in cohesive soils**. Cosenza, 2018.

DEEP FOUNDATIONS INSTITUTE. **Industry practice standards and DFI practice guidelines for structural slurry walls**. Hawthorne, 2005.

FERREIRA, M. **8º curso de engenharia aplicada às obras de fundações e contenções**. São Paulo, 2018.

FTOOL. **Visão geral e história do Ftool**. Disponível em <<https://www.ftool.com.br/Ftool/site/about>>. Acesso em 25/07/2024.

GERSOVICH, D. M. S. **Estruturas de contenção**: empuxos de terra. Rio de Janeiro: FEUERJ, 2010.

HOSSAIN, A. S. M. F. **Geotechnical engineering III**. Dhaka: AUST, 2012.

JSON. **Introdução ao JSON**. Disponível em <<https://www.json.org/json-pt.html>>. Acesso em 20/07/2024.

KUMAR, N.; DEY, A. **Rotational stability of rigid cantilever sheet pile walls**. Guwahati, 2013.

MADABHUSHI, S. P. G.; CHANDRASEKARAN, V. S. **Rotation of cantilever sheet pile walls**. 2005.

MARZIONNA, J. D.; MAFFEI, C. E. M.; FERREIRA, A. A.; CAPUTO, A. N. Análise, projeto e execução de escavações e contenções. In: HACHICH, W.; FALCONI, F. F.; SAES, J. L.; FROTA, R. G. Q.; CARVALHO, C. S.; NIYAMA, S. (Ed.). **Fundações**: teoria e prática. 2. ed. São Paulo: Pini, 1998. p. 537-578.

PYTHON INSTITUTE. **Python® – the language of today and tomorrow**. Disponível em <<https://pythoninstitute.org/about-python>>. Acesso em 20/07/2024.

PULLER, M. **Deep excavations**: a practical manual. 2. ed. Reston: Thomas Telford, 2003.

RANZINI, S. M. T.; NEGRO JR, A. Obras de Contenções: tipos, métodos construtivos, dificuldades executivas. In: HACHICH, W.; FALCONI, F. F.; SAES, J. L.; FROTA, R. G. Q.; CARVALHO, C. S.; NIYAMA, S. (Ed.). **Fundações**: teoria e prática. 2. ed. São Paulo: Pini, 1998. p. 497-515.

SAES, J. L.; STUCCHI, F. R.; MILITITSKY, J. Concepção de obras de contenção. In: HACHICH, W.; FALCONI, F. F.; SAES, J. L.; FROTA, R. G. Q.; CARVALHO, C. S.; NIYAMA, S. (Ed.). **Fundações**: teoria e prática. 2. ed. São Paulo: Pini, 1998. p. 517-536.

TQS. **Quem somos**. Disponível em <<https://www.tqs.com.br/tqsabout/company>>. Acesso em 20/07/2024.

APÊNDICE A – Memória de cálculo da parede-diafragma do exemplo

```

solo: - - - - - Parâmetros de entrada - - - - -
solo: - - - Escavação - - -
solo: Sobrecarga (q) = 0.00 kPa
solo: Profundidade do nível d'água (NA) = None
solo: Camada 1
solo: Profundidade do ponto inicial (zi) = 3.00 m
solo: Peso específico natural ( $\gamma_{nat}$ ) = 19.00 kN * m-3
solo: Peso específico saturado ( $\gamma_{sat}$ ) = 00.00 kN * m-3
solo: Ângulo de atrito interno efetivo ( $\phi'$ ) = 35°
solo: Coesão efetiva ( $c'$ ) = 0.00 kPa
solo: - - - Contenção - - -
solo: Sobrecarga (q) = 10.00 kPa
solo: Profundidade do nível d'água (NA) = None
solo: Camada 1
solo: Profundidade do ponto inicial (zi) = 0.00 m
solo: Peso específico natural ( $\gamma_{nat}$ ) = 17.00 kN * m-3
solo: Peso específico saturado ( $\gamma_{sat}$ ) = 00.00 kN * m-3
solo: Ângulo de atrito interno efetivo ( $\phi'$ ) = 15°
solo: Coesão efetiva ( $c'$ ) = 10.00 kPa
solo: Camada 2
solo: Profundidade do ponto inicial (zi) = 3.00 m
solo: Peso específico natural ( $\gamma_{nat}$ ) = 19.00 kN * m-3
solo: Peso específico saturado ( $\gamma_{sat}$ ) = 00.00 kN * m-3
solo: Ângulo de atrito interno efetivo ( $\phi'$ ) = 35°
solo: Coesão efetiva ( $c'$ ) = 0.00 kPa

processamento: - - - - - Ações do solo - - - - -
processamento: - - - Escavação - - -
processamento: Camada 1
processamento: Calculando as tensões efetivas do solo no ponto inicial (zi
= 0.00 m)...
processamento: Calculando a tensão vertical efetiva do solo ( $\sigma_v'$ )...
processamento:  $\sigma_v' = 0.00$  kPa
processamento: Calculando a tensão horizontal efetiva do solo ( $\sigma_h'$ )...
processamento:  $\sigma_h' = 0.00$  kPa
processamento: Calculando as tensões efetivas do solo no ponto final (zf =
3.00 m)...
processamento: Calculando a tensão vertical efetiva do solo ( $\sigma_v'$ )...
processamento:  $\sigma_v' = 0.00$  kPa
processamento: Calculando a tensão horizontal efetiva do solo ( $\sigma_h'$ )...
processamento:  $\sigma_h' = 0.00$  kPa

```

processamento: Calculando o empuxo (E)...

processamento: $E = 0.00 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$

processamento: Calculando a profundidade do ponto de aplicação do empuxo (z_E)...

processamento: $z_E = \text{None}$

processamento: Calculando o momento em relação ao eixo de rotação da parede-diafragma (M)...

processamento: $M = 0.00 \text{ kN} \cdot \text{m} \cdot \text{m}^{-1}$

processamento: Camada 2

processamento: Calculando as tensões efetivas do solo no ponto inicial ($z_i = 3.00 \text{ m}$)...

processamento: Calculando a tensão vertical efetiva do solo (σ_v')...

processamento: $\sigma_v' = 0.00 \text{ kPa}$

processamento: Calculando a tensão horizontal efetiva do solo (σ_h')...

processamento: $\sigma_h' = 0.00 \text{ kPa}$

processamento: Calculando as tensões efetivas do solo no ponto final ($z_f = 5.84 \text{ m}$)...

processamento: Calculando a tensão vertical efetiva do solo (σ_v')...

processamento: $\sigma_v' = 54.04 \text{ kPa}$

processamento: Calculando a tensão horizontal efetiva do solo (σ_h')...

processamento: $\sigma_h' = 199.40 \text{ kPa}$

processamento: Calculando o empuxo (E)...

processamento: $E = 283.56 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$

processamento: Calculando a profundidade do ponto de aplicação do empuxo (z_E)...

processamento: $z_E = 4.90 \text{ m}$

processamento: Calculando o momento em relação ao eixo de rotação da parede-diafragma (M)...

processamento: $M = 268.82 \text{ kN} \cdot \text{m} \cdot \text{m}^{-1}$

processamento: Camada 3

processamento: Calculando as tensões efetivas do solo no ponto inicial ($z_i = 5.84 \text{ m}$)...

processamento: Calculando a tensão vertical efetiva do solo (σ_v')...

processamento: $\sigma_v' = 54.04 \text{ kPa}$

processamento: Calculando a tensão horizontal efetiva do solo (σ_h')...

processamento: $\sigma_h' = 14.64 \text{ kPa}$

processamento: Calculando as tensões efetivas do solo no ponto final ($z_f = 6.09 \text{ m}$)...

processamento: Calculando a tensão vertical efetiva do solo (σ_v')...

processamento: $\sigma_v' = 58.71 \text{ kPa}$

processamento: Calculando a tensão horizontal efetiva do solo (σ_h')...

processamento: $\sigma_h' = 15.91$ kPa
processamento: Calculando o empuxo (E) ...
processamento: $E = 3.76$ kN * m⁻¹
processamento: Calculando a profundidade do ponto de aplicação do empuxo (zE) ...
processamento: $zE = 5.97$ m
processamento: Calculando o momento em relação ao eixo de rotação da parede-diafragma (M) ...
processamento: $M = 0.47$ kN * m * m⁻¹
processamento: - - - Contenção - - -
processamento: Camada 1
processamento: Calculando as tensões efetivas do solo no ponto inicial ($z_i = 0.00$ m) ...
processamento: Calculando a tensão vertical efetiva do solo (σ_v') ...
processamento: $\sigma_v' = 10.00$ kPa
processamento: Calculando a tensão horizontal efetiva do solo (σ_h') ...
processamento: $\sigma_h' = 0.00$ kPa
processamento: Calculando as tensões efetivas do solo no ponto final ($z_f = 3.00$ m) ...
processamento: Calculando a tensão vertical efetiva do solo (σ_v') ...
processamento: $\sigma_v' = 61.00$ kPa
processamento: Calculando a tensão horizontal efetiva do solo (σ_h') ...
processamento: $\sigma_h' = 20.57$ kPa
processamento: Calculando o empuxo (E) ...
processamento: $E = 30.85$ kN * m⁻¹
processamento: Calculando a profundidade do ponto de aplicação do empuxo (zE) ...
processamento: $zE = 2.00$ m
processamento: Calculando o momento em relação ao eixo de rotação da parede-diafragma (M) ...
processamento: $M = 118.61$ kN * m * m⁻¹
processamento: Camada 2
processamento: Calculando as tensões efetivas do solo no ponto inicial ($z_i = 3.00$ m) ...
processamento: Calculando a tensão vertical efetiva do solo (σ_v') ...
processamento: $\sigma_v' = 61.00$ kPa
processamento: Calculando a tensão horizontal efetiva do solo (σ_h') ...
processamento: $\sigma_h' = 16.53$ kPa
processamento: Calculando as tensões efetivas do solo no ponto final ($z_f = 5.84$ m) ...
processamento: Calculando a tensão vertical efetiva do solo (σ_v') ...

processamento: $\sigma_v' = 115.04$ kPa
 processamento: Calculando a tensão horizontal efetiva do solo (σ_h')...
 processamento: $\sigma_h' = 31.17$ kPa
 processamento: Calculando o empuxo (E)...
 processamento: $E = 67.84$ kN * m⁻¹
 processamento: Calculando a profundidade do ponto de aplicação do empuxo (zE)...
 processamento: zE = 4.57 m
 processamento: Calculando o momento em relação ao eixo de rotação da parede-diafragma (M)...
 processamento: $M = 86.59$ kN * m * m⁻¹
 processamento: Camada 3
 processamento: Calculando as tensões efetivas do solo no ponto inicial (zi = 5.84 m)...
 processamento: Calculando a tensão vertical efetiva do solo (σ_v')...
 processamento: $\sigma_v' = 115.04$ kPa
 processamento: Calculando a tensão horizontal efetiva do solo (σ_h')...
 processamento: $\sigma_h' = 424.51$ kPa
 processamento: Calculando as tensões do solo no ponto final (zf = 6.09 m)...
 processamento: Calculando a tensão vertical efetiva do solo (σ_v')...
 processamento: $\sigma_v' = 119.71$ kPa
 processamento: Calculando a tensão horizontal efetiva do solo (σ_h')...
 processamento: $\sigma_h' = 441.75$ kPa
 processamento: Calculando o empuxo (E)...
 processamento: $E = 106.53$ kN * m⁻¹
 processamento: Calculando a profundidade do ponto de aplicação do empuxo (zE)...
 processamento: zE = 5.97 m
 processamento: Calculando o momento em relação ao eixo de rotação da parede-diafragma (M)...
 processamento: $M = 13.19$ kN * m * m⁻¹

esforcos: - - - - - Parâmetros de entrada - - - - -
 esforcos: - - - Escavação - - -
 esforcos: Barra 1
 esforcos: Profundidade do nó inicial (zi) = 0.00 m
 esforcos: Carga distribuída no nó inicial (qi) = 0.00 kPa
 esforcos: Profundidade do nó final (zf) = 3.00 m
 esforcos: Carga distribuída no nó final (qf) = 0.00 kPa
 esforcos: Barra 2

esforços: Profundidade do nó inicial (z_i) = 3.00 m
 esforços: Carga distribuída no nó inicial (q_i) = 0.00 kPa
 esforços: Profundidade do nó final (z_f) = 5.84 m
 esforços: Carga distribuída no nó final (q_f) = 199.40 kPa
 esforços: Barra 3
 esforços: Profundidade do nó inicial (z_i) = 5.84 m
 esforços: Carga distribuída no nó inicial (q_i) = 14.64 kPa
 esforços: Profundidade do nó final (z_f) = 6.09 m
 esforços: Carga distribuída no nó final (q_f) = 15.91 kPa
 esforços: - - - Contenção - - -
 esforços: Barra 1
 esforços: Profundidade do nó inicial (z_i) = 0.00 m
 esforços: Carga distribuída no nó inicial (q_i) = 0.00 kPa
 esforços: Profundidade do nó final (z_f) = 3.00 m
 esforços: Carga distribuída no nó final (q_f) = 28.80 kPa
 esforços: Barra 2
 esforços: Profundidade do nó inicial (z_i) = 3.00 m
 esforços: Carga distribuída no nó inicial (q_i) = 23.14 kPa
 esforços: Profundidade do nó final (z_f) = 5.84 m
 esforços: Carga distribuída no nó final (q_f) = 43.64 kPa
 esforços: Barra 3
 esforços: Profundidade do nó inicial (z_i) = 5.84 m
 esforços: Carga distribuída no nó inicial (q_i) = 594.31 kPa
 esforços: Profundidade do nó final (z_f) = 6.09 m
 esforços: Carga distribuída no nó final (q_f) = 618.45 kPa
 esforços: - - - - - Esforços solicitantes máximos e mínimos - - - - -
 esforços: Calculando o esforço cortante solicitante máximo ao longo da
 parede-diafragma (V_{sd} máx)...
 esforços: V_{sd} máx = 146.32 kN * m⁻¹
 esforços: Calculando o esforço cortante solicitante mínimo ao longo da
 parede-diafragma (V_{sd} mín)...
 esforços: V_{sd} mín = 47.45 kN * m⁻¹
 esforços: Calculando o momento fletor solicitante máximo ao longo da
 parede-diafragma (M_{sd} máx)...
 esforços: M_{sd} máx = 98.99 kN * m * m⁻¹
 esforços: Calculando o momento fletor solicitante mínimo ao longo da
 parede-diafragma (M_{sd} mín)...
 esforços: M_{sd} mín = 0.00 kN * m * m⁻¹

 concreto: - - - - - Parâmetros de entrada - - - - -
 concreto: Classe de agressividade ambiental (CAA) = II

concreto: Classe de resistência do concreto (CRC) = C30

concreto: Cobrimento (c) = 25 mm

concreto: Espessura do elemento (h) = 30 cm

concreto: - - - - - Verificações iniciais - - - - -

concreto: Verificando CRC conforme a ABNT NBR 6118:2023 (Tabela 7.1)...

concreto: Obtendo a classe de resistência mínima do concreto (CRC mín) conforme a ABNT NBR 6118:2023 (Tabela 7.1)...

concreto: CRC mín = C25

concreto: CRC passou na verificação

concreto: Verificando c conforme a ABNT NBR 6118:2023 (Tabela 7.2)...

concreto: Obtendo o cobrimento nominal (cnom) conforme a ABNT NBR 6118:2023 (Tabela 7.2)...

concreto: Para concretos de classe de resistência superior à mínima exigida, cnom pode ser reduzido em até 5 mm

concreto: cnom = 25 mm

concreto: c passou na verificação

concreto: - - - - - Parâmetros associados ao concreto - - - - -

concreto: - - - Resistência à compressão - - -

concreto: Obtendo a resistência característica à compressão do concreto (fck) conforme a ABNT NBR 8953:2015 (Tabela 1)...

concreto: fck = 30 MPa

concreto: Calculando a resistência de cálculo à compressão do concreto no estado-limite último (fcd) conforme a ABNT NBR 6118:2023 (Tabela 12.1)...

concreto: fcd = 21.43 MPa

concreto: Calculando o coeficiente λ conforme a ABNT NBR 6118:2023 (17.2.2-e)...

concreto: $\lambda = 0.80$

concreto: Calculando o coeficiente α_c conforme a ABNT NBR 6118:2023 (17.2.2-e)...

concreto: $\alpha_c = 0.85$

concreto: Calculando o coeficiente η_c conforme a ABNT NBR 6118:2023 (8.2.10.1)...

concreto: $\eta_c = 1.00$

concreto: Calculando a tensão constante no diagrama retangular de compressão equivalente (σ_c) conforme a ABNT NBR 6118:2023 (17.2.2-e)...

concreto: $\sigma_c = 18.21$ MPa

concreto: - - - Resistência à tração - - -

concreto: Calculando a resistência média à tração do concreto (fct,m) conforme a ABNT NBR 6118:2023 (8.2.5)...

concreto: $f_{ct,m} = 2.90$ MPa

concreto: Calculando a resistência característica inferior do concreto à tração ($f_{ctk,inf}$) conforme a ABNT NBR 6118:2023 (8.2.5)...

concreto: $f_{ctk,inf} = 2.03$ MPa

concreto: Calculando a resistência característica superior do concreto à tração ($f_{ctk,sup}$) conforme a ABNT NBR 6118:2023 (8.2.5)...

concreto: $f_{ctk,sup} = 3.77$ MPa

concreto: Calculando a resistência de cálculo à tração do concreto no estado-limite último (f_{ctd}) conforme a ABNT NBR 6118:2023 (19.4.1)...

concreto: $f_{ctd} = 1.45$ MPa

concreto: - - - Resistência ao cisalhamento - - -

concreto: Calculando a resistência de cálculo do concreto ao cisalhamento (τ_{rd}) conforme a ABNT NBR 6118:2023 (19.4.1)...

concreto: $\tau_{rd} = 0.36$ MPa

concreto: - - - - - Parâmetros associados ao elemento de concreto armado -
- - - - -

concreto: Calculando o coeficiente γ_n conforme a ABNT NBR 6118:2023 (Tabela 13.2)...

concreto: $\gamma_n = 1.00$

concreto: - - - Geometria - - -

concreto: Calculando a área da seção transversal bruta de concreto do elemento (A_c)...

concreto: $A_c = 3000.00$ cm² * m⁻¹

concreto: Calculando o momento de inércia da seção transversal bruta de concreto do elemento (I_c)...

concreto: $I_c = 225000.00$ cm⁴ * m⁻¹

concreto: Calculando a distância do centro de gravidade da seção transversal bruta de concreto do elemento à fibra mais tracionada (y_t)...

concreto: $y_t = 15.0$ cm

concreto: Calculando o módulo de resistência da seção transversal bruta de concreto do elemento, relativo à fibra mais tracionada (W_0)...

concreto: $W_0 = 15000.00$ cm³ * m⁻¹

concreto: - - - Armadura - - -

concreto: Calculando o diâmetro máximo das barras da armadura de flexão ($\phi_{\text{máx}}$) conforme a ABNT NBR 6118:2023 (20.1)...

concreto: $\phi_{\text{máx}} = 32.0$ mm

concreto: Obtendo a razão x/d máxima (x/d máx) conforme a ABNT NBR 6118:2023 (14.6.4.3)...

concreto: x/d máx = 0.45

concreto: Calculando a armadura mínima de tração correspondente à taxa geométrica de 0.15% (As mín 0.15) conforme a ABNT NBR 6118:2023 (17.3.5.2.1)...

concreto: As mín 0.15 = $4.50 \text{ cm}^2 * \text{m}^{-1}$

concreto: Calculando o momento fletor de cálculo mínimo (Md mín) conforme a ABNT NBR 6118:2023 (17.3.5.2.1)...

concreto: Md mín = $45.18 \text{ kN} * \text{m} * \text{m}^{-1}$

armadura: - - - - - Parâmetros de entrada - - - - -

armadura: Categoria do aço (CA) = CA-50

armadura: Diâmetro nominal (ϕ) = 10.0 mm

armadura: - - - - - Verificação inicial - - - - -

armadura: Verificando ϕ conforme a ABNT NBR 6118:2023 (20.1)...

armadura: ϕ passou na verificação

armadura: - - - - - Parâmetros associados à armadura - - - - -

armadura: Calculando a altura útil da seção transversal do elemento (d)...

armadura: d = 27.00 cm

armadura: - - - Resistência à tração - - -

armadura: Obtendo a resistência característica de escoamento do aço (f_{yk}) conforme a ABNT NBR 7480:2022 (Tabela B.3)...

armadura: $f_{yk} = 500 \text{ MPa}$

armadura: Calculando a resistência de cálculo de escoamento do aço no estado-limite último (f_{yd}) conforme a ABNT NBR 6118:2023 (Tabela 12.1)...

armadura: $f_{yd} = 434.78 \text{ MPa}$

armadura: - - - Ancoragem - - -

armadura: Obtendo o coeficiente η_1 conforme a ABNT NBR 6118:2023 (Tabela 8.2)...

armadura: $\eta_1 = 2.25$

armadura: Obtendo o coeficiente η_2 conforme a ABNT NBR 6118:2023 (9.3.2.1)...

armadura: $\eta_2 = 1.00$

armadura: Calculando o coeficiente η_3 conforme a ABNT NBR 6118:2023 (9.3.2.1)...

armadura: $\eta_3 = 1.00$

armadura: Calculando a resistência de aderência de cálculo (f_{bd}) conforme a ABNT NBR 6118:2023 (9.3.2.1)...

armadura: $f_{bd} = 3.26 \text{ MPa}$

armadura: Calculando o comprimento de ancoragem básico das barras da armadura (l_b) conforme a ABNT NBR 6118:2023 (9.4.2.4)...

armadura: $l_b = 33.36$ cm

armadura: Calculando o comprimento de ancoragem mínimo para as barras da armadura (l_b mín) conforme a ABNT NBR 6118:2023 (9.4.2.5)...

armadura: l_b mín = 11 cm

armadura: - - - Espaçamento - - -

armadura: Calculando o espaçamento máximo entre as barras da armadura principal de flexão (s máx) conforme a ABNT NBR 6118:2023 (20.1)...

armadura: s máx = 20 cm

armadura: Calculando o espaçamento mínimo entre as barras da armadura de flexão (s mín) conforme a ABNT NBR 6118:2023 (18.3.2.2)...

armadura: s mín = 2 cm

armadura: - - - - - Armadura de tração mínima - - - - -

armadura: Dimensionando a armadura mínima para o momento fletor de cálculo mínimo (M_d mín) de 45.18 kN * m * m⁻¹

armadura: Calculando a profundidade da linha neutra na seção transversal do elemento (x)...

armadura: $x = 1.17$ cm

armadura: Verificando a razão x/d conforme a ABNT NBR 6118:2023 (14.6.4.3)...

armadura: x/d passou na verificação

armadura: Calculando a área da seção transversal da armadura de tração mínima (A_s mín) conforme a ABNT NBR 6118:2023 (17.3.5.2.1)...

armadura: A_s mín = 3.92 cm² * m⁻¹

armadura: - - - - - Armadura positiva principal - - - - -

armadura: Dimensionando a armadura positiva principal para o momento fletor solicitante de cálculo máximo (M_{sd} máx) de 98.99 kN * m * m⁻¹

armadura: Calculando a profundidade da linha neutra na seção transversal do elemento (x)...

armadura: $x = 2.62$ cm

armadura: Verificando a razão x/d conforme a ABNT NBR 6118:2023 (14.6.4.3)...

armadura: x/d passou na verificação

armadura: Calculando a área da seção transversal da armadura de tração (A_s)...

armadura: $A_s = 8.77$ cm² * m⁻¹

armadura: Verificando A_s conforme a ABNT NBR 6118:2023 (Tabela 19.1)...

armadura: A_s passou na verificação

armadura: Verificando A_s conforme a ABNT NBR 6118:2023 (17.3.5.2.1)...

armadura: A_s passou na verificação

armadura: Calculando o espaçamento entre as barras da armadura (s)...

armadura: $s = 8 \text{ cm}$

armadura: Verificando s conforme a ABNT NBR 6118:2023 (20.1)...

armadura: s passou na verificação

armadura: Verificando s conforme a ABNT NBR 6118:2023 (18.3.2.2)...

armadura: s passou na verificação

armadura: Calculando a área efetiva da seção transversal da armadura de flexão ($A_s \text{ ef}$)...

armadura: $A_s \text{ ef} = 9.81 \text{ cm}^2 * \text{m}^{-1}$

armadura: Calculando o comprimento de ancoragem necessário para as barras da armadura (lb nec) conforme a ABNT NBR 6118:2023 (9.4.2.5)...

armadura: lb nec = 14 cm

armadura: Verificando lb nec conforme a ABNT NBR 6118:2023 (9.4.2.5)...

armadura: lb nec passou na verificação

armadura: - - - - - Armadura negativa principal - - - - -

armadura: Dimensionando a armadura negativa principal para o momento fletor solicitante de cálculo mínimo ($M_{sd} \text{ mín}$) de 00.00 kN * m * m^{-1}

armadura: Calculando a profundidade da linha neutra na seção transversal do elemento (x)...

armadura: $x = 0.00 \text{ cm}$

armadura: Verificando a razão x/d conforme a ABNT NBR 6118:2023 (14.6.4.3)...

armadura: x/d passou na verificação

armadura: Calculando a área da seção transversal da armadura de tração (A_s)...

armadura: $A_s = 0.00 \text{ cm}^2 * \text{m}^{-1}$

armadura: Verificando A_s conforme a ABNT NBR 6118:2023 (Tabela 19.1)...

armadura: $A_s (0.00 \text{ cm}^2 * \text{m}^{-1}) < A_s \text{ mín} (3.92 \text{ cm}^2 * \text{m}^{-1})$, adotando $A_s \text{ mín}$...

armadura: Verificando A_s conforme a ABNT NBR 6118:2023 (17.3.5.2.1)...

armadura: $A_s (3.92 \text{ cm}^2 * \text{m}^{-1}) < A_s \text{ mín} 0.15 (4.50 \text{ cm}^2 * \text{m}^{-1})$, adotando $A_s \text{ mín} 0.15$...

armadura: Calculando o espaçamento entre as barras da armadura (s)...

armadura: $s = 17 \text{ cm}$

armadura: Verificando s conforme a ABNT NBR 6118:2023 (20.1)...

armadura: s passou na verificação

armadura: Verificando s conforme a ABNT NBR 6118:2023 (18.3.2.2)...

armadura: s passou na verificação

armadura: Calculando a área efetiva da seção transversal da armadura de flexão ($A_s \text{ ef}$)...

armadura: $A_s ef = 4.62 \text{ cm}^2 * \text{m}^{-1}$

armadura: Calculando o comprimento de ancoragem necessário para as barras da armadura (lb nec) conforme a ABNT NBR 6118:2023 (9.4.2.5)...

armadura: lb nec = 29 cm

armadura: Verificando lb nec conforme a ABNT NBR 6118:2023 (9.4.2.5)...

armadura: lb nec passou na verificação

armadura: - - - - - Armadura positiva secundária - - - - -

armadura: Calculando a área da seção transversal da armadura de flexão positiva secundária mínima ($A_s \text{ mín pos } 2$) conforme a ABNT NBR 6118:2023 (Tabela 19.1)...

armadura: $A_s \text{ mín pos } 2 = 1.96 \text{ cm}^2 * \text{m}^{-1}$

armadura: Verificando A_s conforme a ABNT NBR 6118:2023 (17.3.5.2.1)...

armadura: $A_s (1.96 \text{ cm}^2 * \text{m}^{-1}) < A_s \text{ mín } 0.15 (4.50 \text{ cm}^2 * \text{m}^{-1})$, adotando $A_s \text{ mín } 0.15$...

armadura: Calculando o espaçamento entre as barras da armadura (s)...

armadura: $s = 17 \text{ cm}$

armadura: Verificando s conforme a ABNT NBR 6118:2023 (20.1)...

armadura: s passou na verificação

armadura: Verificando s conforme a ABNT NBR 6118:2023 (18.3.2.2)...

armadura: s passou na verificação

armadura: Calculando a área efetiva da seção transversal da armadura de flexão ($A_s ef$)...

armadura: $A_s ef = 4.62 \text{ cm}^2 * \text{m}^{-1}$

armadura: Calculando o comprimento de ancoragem necessário para as barras da armadura (lb nec) conforme a ABNT NBR 6118:2023 (9.4.2.5)...

armadura: lb nec = 29 cm

armadura: Verificando lb nec conforme a ABNT NBR 6118:2023 (9.4.2.5)...

armadura: lb nec passou na verificação

armadura: - - - - - Armadura negativa secundária - - - - -

armadura: Calculando a área da seção transversal da armadura de flexão negativa secundária mínima ($A_s \text{ mín neg } 2$) conforme a ABNT NBR 6118:2023 (Tabela 19.1; 20.1)...

armadura: $A_s \text{ mín neg } 2 = 3.92 \text{ cm}^2 * \text{m}^{-1}$

armadura: Verificando A_s conforme a ABNT NBR 6118:2023 (17.3.5.2.1)...

armadura: $A_s (3.92 \text{ cm}^2 * \text{m}^{-1}) < A_s \text{ mín } 0.15 (4.50 \text{ cm}^2 * \text{m}^{-1})$, adotando $A_s \text{ mín } 0.15$...

armadura: Calculando o espaçamento entre as barras da armadura (s)...

armadura: $s = 17 \text{ cm}$

armadura: Verificando s conforme a ABNT NBR 6118:2023 (20.1)...

armadura: s passou na verificação

armadura: Verificando s conforme a ABNT NBR 6118:2023 (18.3.2.2)...

armadura: s passou na verificação

armadura: Calculando a área efetiva da seção transversal da armadura de flexão ($A_s\text{ ef}$)...

armadura: $A_s\text{ ef} = 4.62\text{ cm}^2 * \text{m}^{-1}$

armadura: Calculando o comprimento de ancoragem necessário para as barras da armadura ($l_b\text{ nec}$) conforme a ABNT NBR 6118:2023 (9.4.2.5)...

armadura: $l_b\text{ nec} = 29\text{ cm}$

armadura: Verificando $l_b\text{ nec}$ conforme a ABNT NBR 6118:2023 (9.4.2.5)...

armadura: $l_b\text{ nec}$ passou na verificação

armadura: - - - - - Verificação da armadura transversal - - - - -

armadura: Verificando a necessidade da armadura transversal para o esforço cortante solicitante de cálculo máximo ($V_{sd}\text{ máx}$) de $146.32\text{ kN} * \text{m}^{-1}$

armadura: Calculando o coeficiente k conforme a ABNT NBR 6118:2023 (19.4.1)...

armadura: $k = 1.33$

armadura: Calculando a taxa geométrica de armadura de tração do elemento (ρ) conforme a ABNT NBR 6118:2023 (19.4.1)...

armadura: $\rho = 0.36\%$

armadura: Calculando a tensão normal atuante no elemento (σ_{cp}) conforme a ABNT NBR 6118:2023 (19.4.1)...

armadura: $\sigma_{cp} = 0.15\text{ MPa}$

armadura: Calculando a força cortante resistente de cálculo do elemento (V_{rd}) conforme a ABNT NBR 6118:2023 (19.4.1)...

armadura: $V_{rd} = 181.08\text{ kN}$

armadura: Verificando $V_{sd}\text{ máx}$ conforme a ABNT NBR 6118:2023 (19.4.1)...

armadura: $V_{sd}\text{ máx}$ passou na verificação

armadura: Verificando a necessidade da armadura transversal para o esforço cortante solicitante de cálculo mínimo ($V_{sd}\text{ mín}$) de $47.45\text{ kN} * \text{m}^{-1}$

armadura: Calculando o coeficiente k conforme a ABNT NBR 6118:2023 (19.4.1)...

armadura: $k = 1.33$

armadura: Calculando a taxa geométrica de armadura de tração do elemento (ρ) conforme a ABNT NBR 6118:2023 (19.4.1)...

armadura: $\rho = 0.17\%$

armadura: Calculando a tensão normal atuante no elemento (σ_{cp}) conforme a ABNT NBR 6118:2023 (19.4.1)...

armadura: $\sigma_{cp} = 0.15\text{ MPa}$

armadura: Calculando a força cortante resistente de cálculo do elemento (Vrd) conforme a ABNT NBR 6118:2023 (19.4.1)...

armadura: $V_{rd} = 171.08 \text{ kN}$

armadura: Verificando V_{sd} mín conforme a ABNT NBR 6118:2023 (19.4.1)...

armadura: V_{sd} mín passou na verificação

APÊNDICE B – Quadros de esforços da parede-diafragma do exemplo

z (m)	Vsd (kN/m)	Msd (kNm/m)
0.00	0.00	0.00
0.01	-0.00	0.00
0.02	-0.00	0.00
0.03	-0.00	0.00
0.04	-0.01	0.00
0.05	-0.01	0.00
0.06	-0.02	0.00
0.07	-0.02	0.00
0.08	-0.03	0.00
0.09	-0.04	0.00
0.10	-0.05	0.00
0.11	-0.06	0.00
0.12	-0.07	0.00
0.13	-0.08	0.00
0.14	-0.09	0.00
0.15	-0.11	0.01
0.16	-0.12	0.01
0.17	-0.14	0.01
0.18	-0.16	0.01
0.19	-0.17	0.01
0.20	-0.19	0.01
0.21	-0.21	0.01
0.22	-0.23	0.02
0.23	-0.25	0.02
0.24	-0.28	0.02

z (m)	Vsd (kN/m)	Msd (kNm/m)
0.25	-0.30	0.02
0.26	-0.32	0.03
0.27	-0.35	0.03
0.28	-0.38	0.04
0.29	-0.40	0.04
0.30	-0.43	0.04
0.31	-0.46	0.05
0.32	-0.49	0.05
0.33	-0.52	0.06
0.34	-0.55	0.06
0.35	-0.59	0.07
0.36	-0.62	0.07
0.37	-0.66	0.08
0.38	-0.69	0.09
0.39	-0.73	0.09
0.40	-0.77	0.10
0.41	-0.81	0.11
0.42	-0.85	0.12
0.43	-0.89	0.13
0.44	-0.93	0.14
0.45	-0.97	0.15
0.46	-1.02	0.16
0.47	-1.06	0.17
0.48	-1.11	0.18
0.49	-1.15	0.19

z (m)	Vsd (kN/m)	Msd (kNm/m)
0.50	-1.20	0.20
0.51	-1.25	0.21
0.52	-1.30	0.22
0.53	-1.35	0.24
0.54	-1.40	0.25
0.55	-1.45	0.27
0.56	-1.51	0.28
0.57	-1.56	0.30
0.58	-1.61	0.31
0.59	-1.67	0.33
0.60	-1.73	0.35
0.61	-1.79	0.36
0.62	-1.84	0.38
0.63	-1.90	0.40
0.64	-1.97	0.42
0.65	-2.03	0.44
0.66	-2.09	0.46
0.67	-2.15	0.48
0.68	-2.22	0.50
0.69	-2.29	0.53
0.70	-2.35	0.55
0.71	-2.42	0.57
0.72	-2.49	0.60
0.73	-2.56	0.62
0.74	-2.63	0.65

z (m)	Vsd (kN/m)	Msd (kNm/m)
0.75	-2.70	0.67
0.76	-2.77	0.70
0.77	-2.85	0.73
0.78	-2.92	0.76
0.79	-3.00	0.79
0.80	-3.07	0.82
0.81	-3.15	0.85
0.82	-3.23	0.88
0.83	-3.31	0.91
0.84	-3.39	0.95
0.85	-3.47	0.98
0.86	-3.55	1.02
0.87	-3.63	1.05
0.88	-3.72	1.09
0.89	-3.80	1.13
0.90	-3.89	1.17
0.91	-3.97	1.21
0.92	-4.06	1.25
0.93	-4.15	1.29
0.94	-4.24	1.33
0.95	-4.33	1.37
0.96	-4.42	1.42
0.97	-4.52	1.46
0.98	-4.61	1.51
0.99	-4.70	1.55

z (m)	Vsd (kN/m)	Msd (kNm/m)
1.00	-4.80	1.60
1.01	-4.90	1.65
1.02	-4.99	1.70
1.03	-5.09	1.75
1.04	-5.19	1.80
1.05	-5.29	1.85
1.06	-5.39	1.91
1.07	-5.50	1.96
1.08	-5.60	2.02
1.09	-5.70	2.07
1.10	-5.81	2.13
1.11	-5.91	2.19
1.12	-6.02	2.25
1.13	-6.13	2.31
1.14	-6.24	2.37
1.15	-6.35	2.43
1.16	-6.46	2.50
1.17	-6.57	2.56
1.18	-6.68	2.63
1.19	-6.80	2.70
1.20	-6.91	2.76
1.21	-7.03	2.83
1.22	-7.14	2.91
1.23	-7.26	2.98
1.24	-7.38	3.05

z (m)	Vsd (kN/m)	Msd (kNm/m)
1.25	-7.50	3.12
1.26	-7.62	3.20
1.27	-7.74	3.28
1.28	-7.86	3.36
1.29	-7.99	3.43
1.30	-8.11	3.51
1.31	-8.24	3.60
1.32	-8.36	3.68
1.33	-8.49	3.76
1.34	-8.62	3.85
1.35	-8.75	3.94
1.36	-8.88	4.02
1.37	-9.01	4.11
1.38	-9.14	4.20
1.39	-9.27	4.30
1.40	-9.41	4.39
1.41	-9.54	4.48
1.42	-9.68	4.58
1.43	-9.81	4.68
1.44	-9.95	4.78
1.45	-10.09	4.88
1.46	-10.23	4.98
1.47	-10.37	5.08
1.48	-10.51	5.19
1.49	-10.66	5.29

z (m)	Vsd (kN/m)	Msd (kNm/m)
1.50	-10.80	5.40
1.51	-10.94	5.51
1.52	-11.09	5.62
1.53	-11.24	5.73
1.54	-11.38	5.84
1.55	-11.53	5.96
1.56	-11.68	6.07
1.57	-11.83	6.19
1.58	-11.98	6.31
1.59	-12.13	6.43
1.60	-12.29	6.55
1.61	-12.44	6.68
1.62	-12.60	6.80
1.63	-12.75	6.93
1.64	-12.91	7.06
1.65	-13.07	7.19
1.66	-13.23	7.32
1.67	-13.39	7.45
1.68	-13.55	7.59
1.69	-13.71	7.72
1.70	-13.87	7.86
1.71	-14.03	8.00
1.72	-14.20	8.14
1.73	-14.36	8.28
1.74	-14.53	8.43

z (m)	Vsd (kN/m)	Msd (kNm/m)
1.75	-14.70	8.57
1.76	-14.87	8.72
1.77	-15.04	8.87
1.78	-15.21	9.02
1.79	-15.38	9.18
1.80	-15.55	9.33
1.81	-15.72	9.49
1.82	-15.90	9.64
1.83	-16.07	9.80
1.84	-16.25	9.97
1.85	-16.43	10.13
1.86	-16.60	10.29
1.87	-16.78	10.46
1.88	-16.96	10.63
1.89	-17.14	10.80
1.90	-17.33	10.97
1.91	-17.51	11.15
1.92	-17.69	11.32
1.93	-17.88	11.50
1.94	-18.06	11.68
1.95	-18.25	11.86
1.96	-18.44	12.05
1.97	-18.63	12.23
1.98	-18.82	12.42
1.99	-19.01	12.61

z (m)	Vsd (kN/m)	Msd (kNm/m)
2.00	-19.20	12.80
2.01	-19.39	12.99
2.02	-19.58	13.19
2.03	-19.78	13.38
2.04	-19.97	13.58
2.05	-20.17	13.78
2.06	-20.37	13.99
2.07	-20.57	14.19
2.08	-20.76	14.40
2.09	-20.97	14.61
2.10	-21.17	14.82
2.11	-21.37	15.03
2.12	-21.57	15.24
2.13	-21.78	15.46
2.14	-21.98	15.68
2.15	-22.19	15.90
2.16	-22.39	16.12
2.17	-22.60	16.35
2.18	-22.81	16.57
2.19	-23.02	16.80
2.20	-23.23	17.04
2.21	-23.44	17.27
2.22	-23.65	17.50
2.23	-23.87	17.74
2.24	-24.08	17.98

z (m)	Vsd (kN/m)	Msd (kNm/m)
2.25	-24.30	18.22
2.26	-24.51	18.47
2.27	-24.73	18.71
2.28	-24.95	18.96
2.29	-25.17	19.21
2.30	-25.39	19.47
2.31	-25.61	19.72
2.32	-25.83	19.98
2.33	-26.06	20.24
2.34	-26.28	20.50
2.35	-26.51	20.76
2.36	-26.73	21.03
2.37	-26.96	21.30
2.38	-27.19	21.57
2.39	-27.42	21.84
2.40	-27.65	22.12
2.41	-27.88	22.39
2.42	-28.11	22.67
2.43	-28.34	22.96
2.44	-28.57	23.24
2.45	-28.81	23.53
2.46	-29.05	23.82
2.47	-29.28	24.11
2.48	-29.52	24.40
2.49	-29.76	24.70

z (m)	Vsd (kN/m)	Msd (kNm/m)
2.50	-30.00	25.00
2.51	-30.24	25.30
2.52	-30.48	25.60
2.53	-30.72	25.91
2.54	-30.97	26.22
2.55	-31.21	26.53
2.56	-31.45	26.84
2.57	-31.70	27.16
2.58	-31.95	27.48
2.59	-32.20	27.80
2.60	-32.45	28.12
2.61	-32.70	28.44
2.62	-32.95	28.77
2.63	-33.20	29.10
2.64	-33.45	29.44
2.65	-33.71	29.77
2.66	-33.96	30.11
2.67	-34.22	30.45
2.68	-34.47	30.80
2.69	-34.73	31.14
2.70	-34.99	31.49
2.71	-35.25	31.84
2.72	-35.51	32.20
2.73	-35.77	32.55
2.74	-36.03	32.91

z (m)	Vsd (kN/m)	Msd (kNm/m)
2.75	-36.30	33.27
2.76	-36.56	33.64
2.77	-36.83	34.00
2.78	-37.09	34.37
2.79	-37.36	34.75
2.80	-37.63	35.12
2.81	-37.90	35.50
2.82	-38.17	35.88
2.83	-38.44	36.26
2.84	-38.71	36.65
2.85	-38.98	37.04
2.86	-39.26	37.43
2.87	-39.53	37.82
2.88	-39.81	38.22
2.89	-40.09	38.62
2.90	-40.36	39.02
2.91	-40.64	39.42
2.92	-40.92	39.83
2.93	-41.20	40.24
2.94	-41.49	40.66
2.95	-41.77	41.07
2.96	-42.05	41.49
2.97	-42.34	41.91
2.98	-42.62	42.34
2.99	-42.91	42.77

z (m)	Vsd (kN/m)	Msd (kNm/m)
3.00	-43.20	43.20
3.01	-43.42	43.63
3.02	-43.65	44.06
3.03	-43.86	44.50
3.04	-44.07	44.94
3.05	-44.27	45.38
3.06	-44.47	45.83
3.07	-44.66	46.27
3.08	-44.85	46.72
3.09	-45.02	47.17
3.10	-45.20	47.62
3.11	-45.36	48.07
3.12	-45.52	48.53
3.13	-45.67	48.98
3.14	-45.82	49.44
3.15	-45.96	49.90
3.16	-46.09	50.36
3.17	-46.22	50.82
3.18	-46.34	51.29
3.19	-46.46	51.75
3.20	-46.57	52.21
3.21	-46.67	52.68
3.22	-46.77	53.15
3.23	-46.86	53.62
3.24	-46.94	54.09

z (m)	Vsd (kN/m)	Msd (kNm/m)
3.25	-47.02	54.55
3.26	-47.09	55.03
3.27	-47.15	55.50
3.28	-47.21	55.97
3.29	-47.26	56.44
3.30	-47.31	56.91
3.31	-47.35	57.39
3.32	-47.38	57.86
3.33	-47.41	58.33
3.34	-47.43	58.81
3.35	-47.44	59.28
3.36	-47.45	59.76
3.37	-47.45	60.23
3.38	-47.45	60.71
3.39	-47.44	61.18
3.40	-47.42	61.66
3.41	-47.40	62.13
3.42	-47.37	62.60
3.43	-47.33	63.08
3.44	-47.29	63.55
3.45	-47.24	64.02
3.46	-47.19	64.49
3.47	-47.13	64.97
3.48	-47.06	65.44
3.49	-46.98	65.91

z (m)	Vsd (kN/m)	Msd (kNm/m)
3.50	-46.90	66.38
3.51	-46.82	66.85
3.52	-46.73	67.31
3.53	-46.63	67.78
3.54	-46.52	68.25
3.55	-46.41	68.71
3.56	-46.29	69.17
3.57	-46.17	69.64
3.58	-46.04	70.10
3.59	-45.90	70.56
3.60	-45.76	71.02
3.61	-45.61	71.47
3.62	-45.45	71.93
3.63	-45.29	72.38
3.64	-45.12	72.83
3.65	-44.95	73.28
3.66	-44.77	73.73
3.67	-44.58	74.18
3.68	-44.39	74.62
3.69	-44.19	75.07
3.70	-43.98	75.51
3.71	-43.77	75.95
3.72	-43.55	76.38
3.73	-43.33	76.82
3.74	-43.10	77.25

z (m)	Vsd (kN/m)	Msd (kNm/m)
3.75	-42.86	77.68
3.76	-42.62	78.11
3.77	-42.37	78.53
3.78	-42.11	78.95
3.79	-41.85	79.37
3.80	-41.58	79.79
3.81	-41.31	80.21
3.82	-41.02	80.62
3.83	-40.74	81.03
3.84	-40.44	81.43
3.85	-40.14	81.83
3.86	-39.84	82.23
3.87	-39.52	82.63
3.88	-39.21	83.03
3.89	-38.88	83.42
3.90	-38.55	83.80
3.91	-38.21	84.19
3.92	-37.87	84.57
3.93	-37.52	84.94
3.94	-37.16	85.32
3.95	-36.80	85.69
3.96	-36.43	86.05
3.97	-36.05	86.42
3.98	-35.67	86.77
3.99	-35.28	87.13

z (m)	Vsd (kN/m)	Msd (kNm/m)
4.00	-34.89	87.48
4.01	-34.49	87.83
4.02	-34.08	88.17
4.03	-33.67	88.51
4.04	-33.25	88.84
4.05	-32.82	89.17
4.06	-32.39	89.50
4.07	-31.95	89.82
4.08	-31.50	90.14
4.09	-31.05	90.45
4.10	-30.60	90.76
4.11	-30.13	91.06
4.12	-29.66	91.36
4.13	-29.19	91.66
4.14	-28.70	91.95
4.15	-28.21	92.23
4.16	-27.72	92.51
4.17	-27.22	92.78
4.18	-26.71	93.05
4.19	-26.20	93.32
4.20	-25.68	93.58
4.21	-25.15	93.83
4.22	-24.62	94.08
4.23	-24.08	94.32
4.24	-23.53	94.56

z (m)	Vsd (kN/m)	Msd (kNm/m)
4.25	-22.98	94.80
4.26	-22.42	95.02
4.27	-21.86	95.24
4.28	-21.29	95.46
4.29	-20.71	95.67
4.30	-20.13	95.87
4.31	-19.54	96.07
4.32	-18.94	96.26
4.33	-18.34	96.45
4.34	-17.73	96.63
4.35	-17.12	96.81
4.36	-16.50	96.97
4.37	-15.87	97.14
4.38	-15.23	97.29
4.39	-14.60	97.44
4.40	-13.95	97.58
4.41	-13.30	97.72
4.42	-12.64	97.85
4.43	-11.97	97.97
4.44	-11.30	98.09
4.45	-10.62	98.20
4.46	-9.94	98.30
4.47	-9.25	98.40
4.48	-8.55	98.49
4.49	-7.85	98.57

z (m)	Vsd (kN/m)	Msd (kNm/m)
4.50	-7.14	98.64
4.51	-6.43	98.71
4.52	-5.71	98.77
4.53	-4.98	98.82
4.54	-4.24	98.87
4.55	-3.50	98.91
4.56	-2.76	98.94
4.57	-2.00	98.96
4.58	-1.24	98.98
4.59	-0.48	98.99
4.60	0.29	98.99
4.61	1.07	98.98
4.62	1.86	98.97
4.63	2.65	98.95
4.64	3.44	98.92
4.65	4.25	98.88
4.66	5.06	98.83
4.67	5.87	98.78
4.68	6.70	98.71
4.69	7.52	98.64
4.70	8.36	98.56
4.71	9.20	98.47
4.72	10.05	98.38
4.73	10.90	98.27
4.74	11.76	98.16

z (m)	Vsd (kN/m)	Msd (kNm/m)
4.75	12.63	98.04
4.76	13.50	97.91
4.77	14.38	97.77
4.78	15.26	97.62
4.79	16.16	97.46
4.80	17.05	97.30
4.81	17.96	97.12
4.82	18.87	96.94
4.83	19.78	96.74
4.84	20.71	96.54
4.85	21.64	96.33
4.86	22.57	96.11
4.87	23.51	95.88
4.88	24.46	95.64
4.89	25.42	95.39
4.90	26.38	95.13
4.91	27.34	94.86
4.92	28.32	94.58
4.93	29.30	94.30
4.94	30.28	94.00
4.95	31.27	93.69
4.96	32.27	93.37
4.97	33.28	93.04
4.98	34.29	92.71
4.99	35.30	92.36

z (m)	Vsd (kN/m)	Msd (kNm/m)
5.00	36.33	92.00
5.01	37.36	91.63
5.02	38.39	91.25
5.03	39.44	90.86
5.04	40.49	90.46
5.05	41.54	90.05
5.06	42.60	89.63
5.07	43.67	89.20
5.08	44.74	88.76
5.09	45.82	88.31
5.10	46.91	87.84
5.11	48.00	87.37
5.12	49.10	86.88
5.13	50.21	86.39
5.14	51.32	85.88
5.15	52.44	85.36
5.16	53.56	84.83
5.17	54.69	84.29
5.18	55.83	83.74
5.19	56.97	83.17
5.20	58.12	82.60
5.21	59.28	82.01
5.22	60.44	81.41
5.23	61.61	80.80
5.24	62.78	80.18

z (m)	Vsd (kN/m)	Msd (kNm/m)
5.25	63.96	79.55
5.26	65.15	78.90
5.27	66.34	78.24
5.28	67.54	77.57
5.29	68.75	76.89
5.30	69.96	76.20
5.31	71.18	75.49
5.32	72.40	74.78
5.33	73.63	74.05
5.34	74.87	73.30
5.35	76.11	72.55
5.36	77.36	71.78
5.37	78.62	71.00
5.38	79.88	70.21
5.39	81.15	69.40
5.40	82.43	68.59
5.41	83.71	67.75
5.42	85.00	66.91
5.43	86.29	66.05
5.44	87.59	65.19
5.45	88.90	64.30
5.46	90.21	63.41
5.47	91.53	62.50
5.48	92.86	61.58
5.49	94.19	60.64

z (m)	Vsd (kN/m)	Msd (kNm/m)
5.50	95.53	59.69
5.51	96.87	58.73
5.52	98.22	57.76
5.53	99.58	56.77
5.54	100.94	55.76
5.55	102.31	54.75
5.56	103.69	53.72
5.57	105.07	52.67
5.58	106.46	51.62
5.59	107.85	50.54
5.60	109.25	49.46
5.61	110.66	48.36
5.62	112.07	47.25
5.63	113.49	46.12
5.64	114.92	44.98
5.65	116.35	43.82
5.66	117.79	42.65
5.67	119.23	41.46
5.68	120.69	40.26
5.69	122.14	39.05
5.70	123.61	37.82
5.71	125.08	36.58
5.72	126.55	35.32
5.73	128.04	34.05
5.74	129.53	32.76

z (m)	Vsd (kN/m)	Msd (kNm/m)
5.75	131.02	31.46
5.76	132.52	30.14
5.77	134.03	28.81
5.78	135.54	27.46
5.79	137.07	26.10
5.80	138.59	24.72
5.81	140.12	23.32
5.82	141.66	21.91
5.83	143.21	20.49
5.84	145.39	18.46
5.85	139.59	17.04
5.86	133.78	15.67
5.87	127.96	14.36
5.88	122.13	13.11
5.89	116.29	11.92
5.90	110.44	10.79
5.91	104.59	9.71
5.92	98.72	8.70
5.93	92.84	7.74
5.94	86.96	6.84
5.95	81.06	6.00
5.96	75.16	5.22
5.97	69.25	4.50
5.98	63.33	3.83
5.99	58.39	3.23

z (m)	Vsd (kN/m)	Msd (kNm/m)
6.00	51.45	2.69
6.01	45.50	2.20
6.02	39.54	1.78
6.03	33.58	1.41
6.04	27.60	1.10
6.05	21.61	0.86
6.06	15.61	0.67
6.07	9.61	0.55
6.08	3.59	0.48
6.09	-2.43	0.47

APÊNDICE C – Diagramas de esforços da parede-diafragma do exemplo

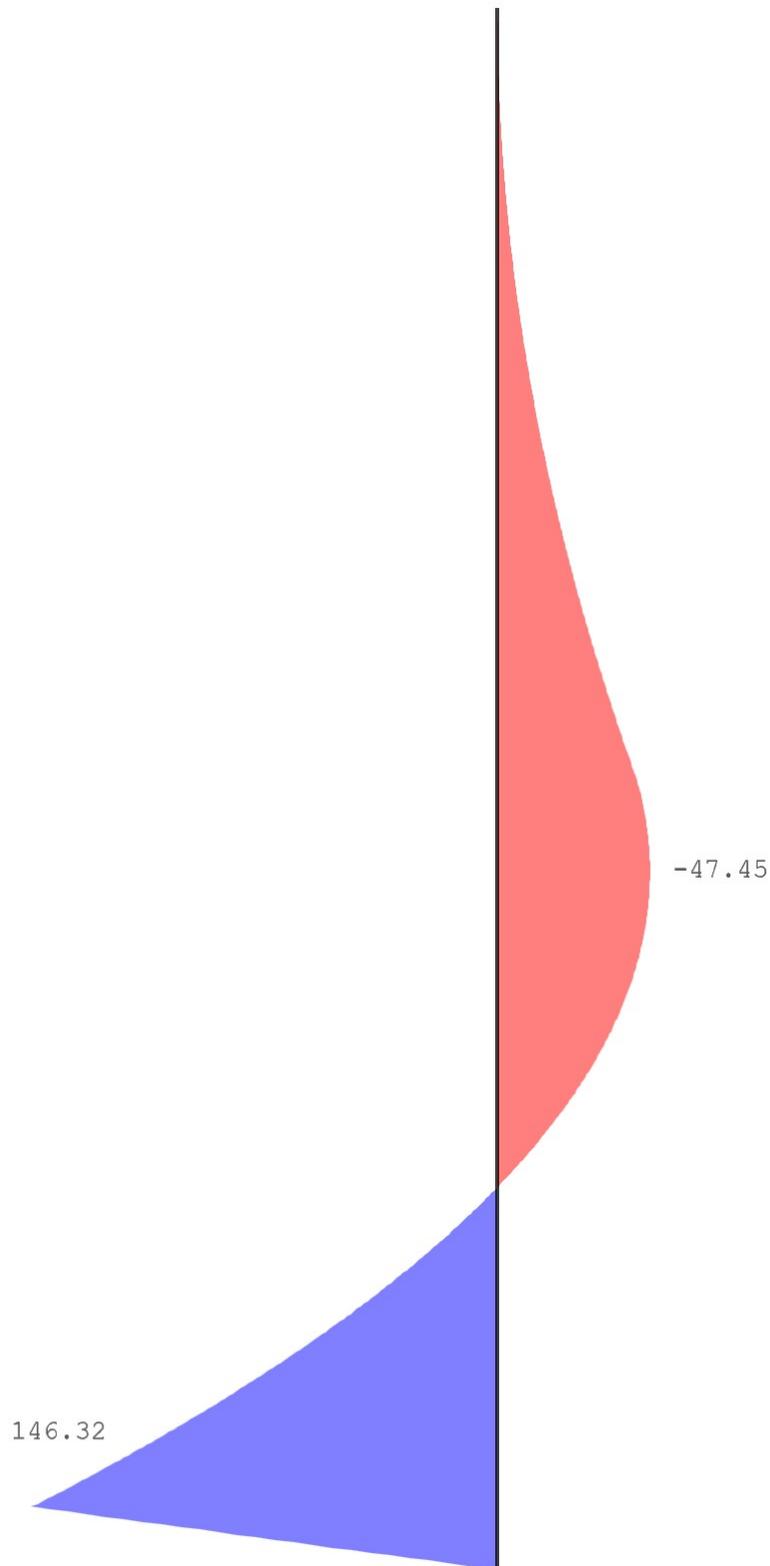
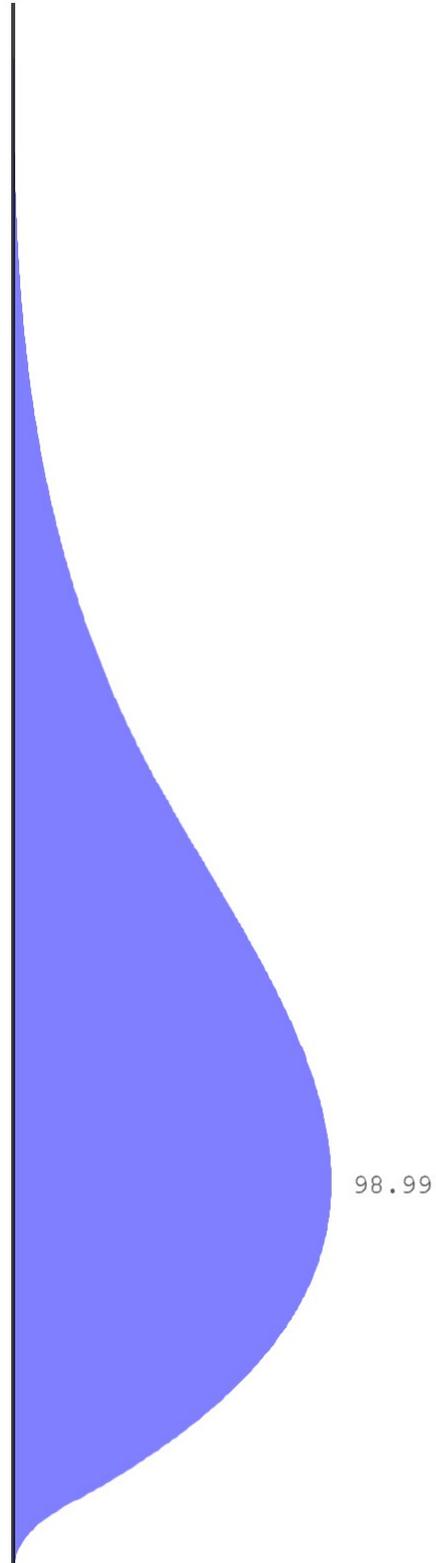
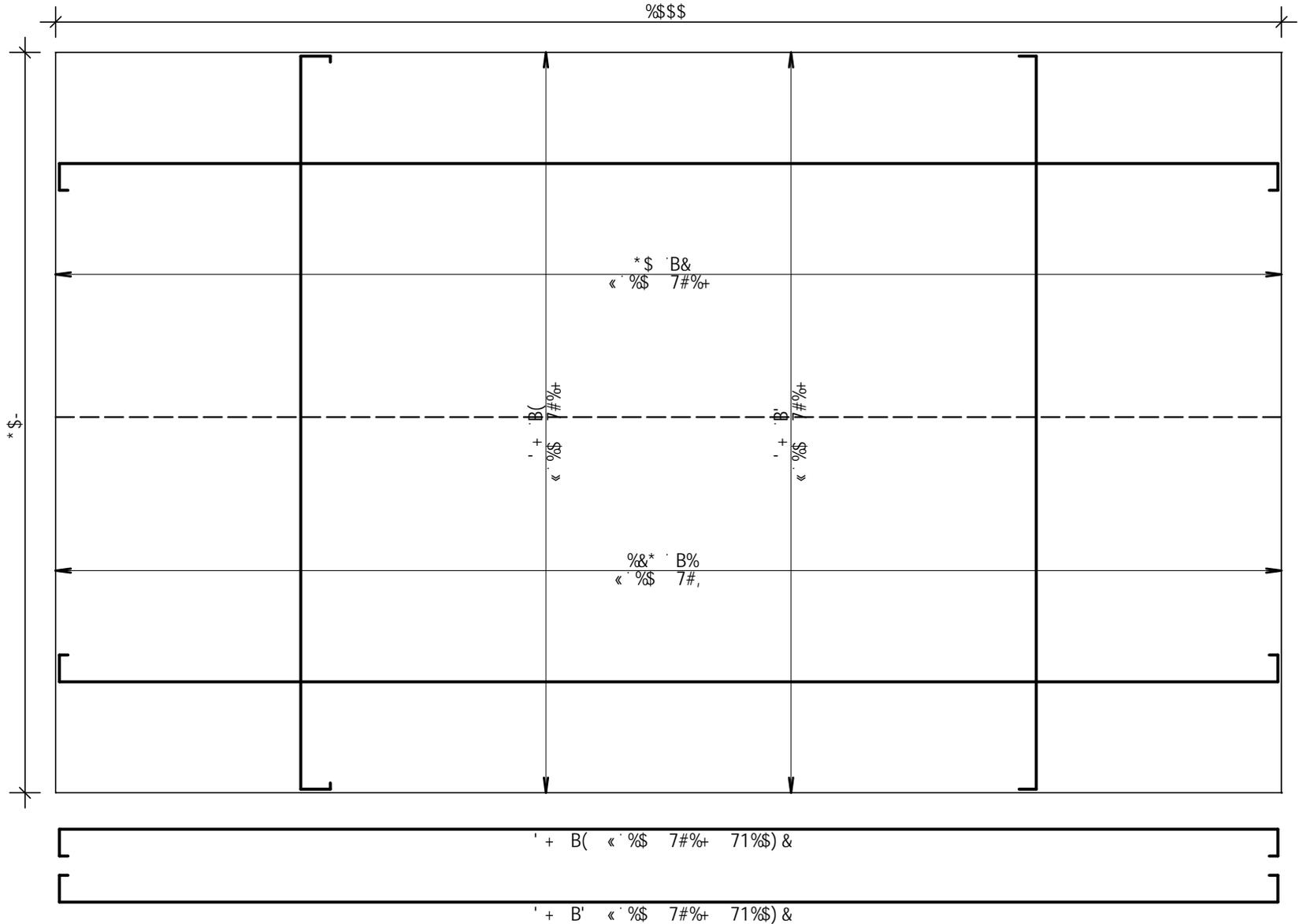
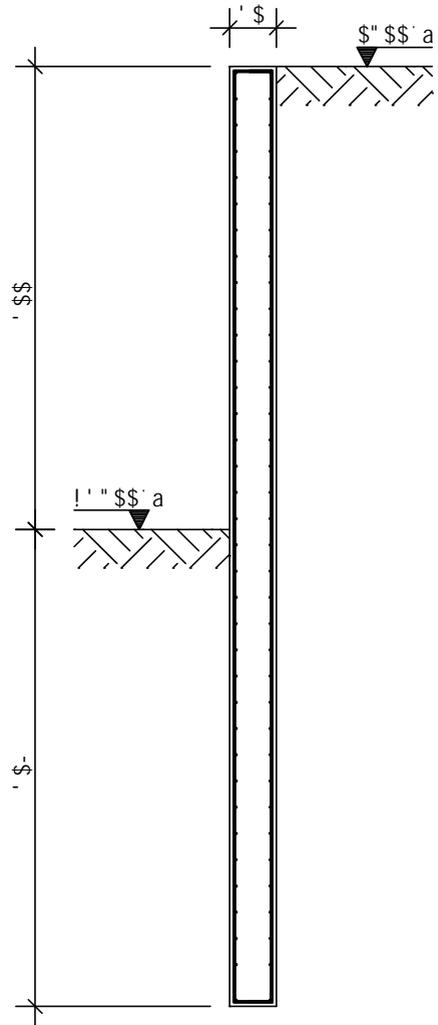
Diagrama de esforço cortante V_{sd} (kN/m)

Diagrama de momento fletor M_{sd} (kNm/m)



APÊNDICE D – Detalhamento da parede-diafragma do exemplo

D5F 989! 8=5: F 5; A5



Jc` "' Wc bWf Yhc. ' % " &+ ' a'

D98FC 89 C@=J9=F5: D@ XYgYb\c.l F.\$\$ D@H' &- #\$. #&&\$&(' \$-) - : \$\$