

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DE INFRAESTRUTURA

ALBERTO JOÃO MARCATTO FILHO

DIMENSIONAMENTO DE UM FLUTUANTE DE CONCRETO ARMADO ATRAVÉS  
DE UM SOFTWARE DE ANÁLISE PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Joinville

2022

ALBERTO JOÃO MARCATTO FILHO

DIMENSIONAMENTO DE UM FLUTUANTE DE CONCRETO ARMADO ATRAVÉS  
DE UM SOFTWARE DE ANÁLISE PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Trabalho apresentado como requisito para obtenção do título de bacharel no Curso de Graduação em Engenharia Civil de Infraestrutura do Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientadora: Dra. Anelize Borges Monteiro

Joinville

2022

ALBERTO JOÃO MARCATTO FILHO

DIMENSIONAMENTO DE UM FLUTUANTE DE CONCRETO ARMADO ATRAVÉS  
DE UM SOFTWARE DE ANÁLISE PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil de Infraestrutura, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 02 de dezembro de 2022.

**Banca Examinadora:**

---

Dra. Anelize Borges Monteiro  
Orientadora/Presidente

---

Dr. Julian Asdrubal Buriticá Garcia  
Membro

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

---

Dra. Valéria Bennack  
Membro

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho a minha família e professores, pelo apoio em todos os momentos difíceis dessa jornada, onde sempre estiveram ao meu lado para me ajudar.

## **AGRADECIMENTOS**

Dedico em primeiro lugar minha família, meu pai Alberto João Marcatto, minha mãe Carine Eliza Picoli Marcatto, e a meu irmão, João Victor Picoli Marcatto, por todo apoio, dedicação e conhecimento que sempre me deram.

A minha orientadora, Professora Anelize Borges Monteiro, por todo conhecimento e paciência necessária para a execução deste trabalho.

A todos os professores que passaram na minha vida acadêmica por transmitiram seus conhecimentos e aprendizados para mim.

Aos demais colegas e amigos da UFSC que fizeram estes anos de graduação mais felizes.

Meu avô Marcio Mauro Marcatto por ser o primeiro engenheiro civil da família e ainda estar presente transmitindo seu conhecimento as próximas gerações.

Por fim, agradeço a empresa Construtora AJM e todos seus integrantes por me passarem grandes conhecimentos sobre vida profissional e pela ideia de deste trabalho.

## RESUMO

Estruturas de concreto armado são amplamente utilizadas nas mais diferentes estruturas, e diversas metodologias de projeto são desenvolvidas para calcular tais estruturas corretamente. Nesse contexto, o presente trabalho aborda fundamentos gerais da análise e dimensionamento estrutural de flutuantes de concreto armado. Inicialmente explana-se sobre os conceitos básicos relativos ao tema estudado através de revisão bibliográfica e são expostas as teorias fundamentais sobre os elementos de concreto armado, as formas de aplicação das forças atuantes e a metodologia de cálculo para o dimensionamento estrutural. Como foco principal, este estudo baseou-se na metodologia de cálculo pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) e critérios estabelecidos pela Associação Brasileira de Normas Técnicas pelas normas NBR 6118 (2014) e NBR 9782 (1987). Posteriormente, foi possível realizar o estudo de caso do projeto de um flutuante de concreto armado executado na cidade de Paranaguá-PR. Foram realizadas análises e comparações entre o projeto executado e o projeto desenvolvido com base na metodologia descrita neste trabalho. Para isso, foi estudado e utilizado o *software* de análise estrutural *SAP2000*, baseado no Método dos Elementos Finitos, sendo possível comparar entre as soluções adotadas para o projeto estrutural executado e do modelo proposto para o flutuante. A partir dos resultados obtidos, infere-se que o procedimento de dimensionamento de flutuantes descrita neste trabalho pode ser uma alternativa adequada e mais eficiente e econômica, pois resultou em um dimensionamento mais detalhado e com uma menor quantidade de aço.

**Palavras-chave:** Flutuante de concreto armado. Método dos Elementos Finitos. Dimensionamento.

## ABSTRACT

Reinforced concrete structures are widely used in many different types of structures, and in many project methodologies are developed to calculate those structures correctly. In this context, this work approaches general fundamentals of analysis and structural scaling of floating reinforced concrete. Initially it's explained about the basic concepts related to the studies theme through bibliographic reviews and the fundamental theories about the elements of reinforced concrete are showed, the ways of structural application. As a main focus, this study based itself in the methodology of calculus by Finite Element Method (FEM) and criteria established by Associação Brasileira de Normas Técnicas pelas normas NBR 6118 (2014) and NBR 9782 (1987). Subsequently, it was possible to do a case study of the project of a buoyant of reinforced concrete executed in the city of Paranaguá-PR. Analysis and comparison with the executed project and the project developed based in the methodology detailed in the assignment. For that it was studied and utilized a software of structural analysis based in the Finite Element Method *SAP2000*, being possible to compare the adopted solutions for the executed structural project and the proposed template for the buoyant. From the obtained results, it is concluded the procedure of scaling of buoyants described in this assignment may be a more adequate alternative and more efficient e economic, because it generated a more detailed scaling and with a lower quantity of steel.

**Keywords:** Reinforced concrete floating. Finite Element Method. Sizing.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> -Elementos estruturais .....	24
<b>Figura 2</b> - Laje armada em uma direção .....	25
<b>Figura 3</b> - Laje armada em duas direções .....	26
<b>Figura 4</b> - Engaste perfeito de Laje em balanço em viga.....	27
<b>Figura 5</b> - Engaste elástico devido a momentos fletores negativos diferentes .....	27
.....	
<b>Figura 6</b> - Representação geométrica de um flutuante .....	34
<b>Figura 7</b> - Defesa tipo D .....	35
<b>Figura 8</b> - Tipos de reservatórios .....	36
<b>Figura 9</b> - Efeito da subpressão .....	37
<b>Figura 10</b> - Pontos de engaste no flutuante .....	38
<b>Figura 11</b> - Distribuição de malha de uma estrutura .....	39
<b>Figura 12</b> - Localização do trapiche .....	41
<b>Figura 13</b> - Arranjo geral do flutuante .....	42
<b>Figura 14</b> - Vista isométrica de um dos flutuantes (cm).....	43
<b>Figura 15</b> - Corte horizontal do flutuante proposto.....	44
<b>Figura 16</b> - Carregamentos do flutuante (corte em plano XZ).....	44
<b>Figura 17</b> - Carregamentos do flutuante (corte em plano XY) .....	45
<b>Figura 18</b> - Nível da água e carregamentos do flutuante (corte em plano XZ) .....	45
.....	
<b>Figura 19</b> - Direção de eixos de coordenadas .....	50
<b>Figura 20</b> - Modelagem inicial do flutuante .....	51
<b>Figura 21</b> - Engastes do flutuante indicados em verde .....	52
<b>Figura 22</b> - Esforços na laje superior .....	52
<b>Figura 23</b> - Esforços na parede .....	53
<b>Figura 24</b> - Esforços na laje inferior .....	53
<b>Figura 25</b> – Deslocamento no eixo Z na laje superior.....	55
<b>Figura 26</b> - Deformada da laje superior .....	55
<b>Figura 27</b> - Deslocamento em Y na parede .....	56
<b>Figura 28</b> - Deslocamento em Z na laje inferior .....	56

<b>Figura 29</b> - Deformada em Z na laje inferior .....	57
<b>Figura 30</b> - Momentos M11 na laje superior .....	57
<b>Figura 31</b> - Momentos M22 na laje superior .....	58
<b>Figura 32</b> - Momentos M11 na laje inferior .....	58
<b>Figura 33</b> - Momentos M22 na laje inferior .....	59
<b>Figura 34</b> - Momentos M11 na parede .....	59
<b>Figura 35</b> - Momentos M33 na parede .....	60
<b>Figura 36</b> - Área de armadura negativa na direção X da laje superior .....	62
<b>Figura 37</b> - Área de armadura negativa na direção Y da laje superior .....	62
<b>Figura 38</b> - Área de armadura positiva na direção X da laje superior .....	63
<b>Figura 39</b> - Área de armadura positiva na direção Y da laje superior .....	63
<b>Figura 40</b> - Área de armadura positiva na direção X da laje inferior .....	64
<b>Figura 41</b> - Área de armadura positiva na direção Y da laje inferior .....	64
<b>Figura 42</b> - Área de armadura negativa na direção X da laje inferior .....	65
<b>Figura 43</b> - Área de armadura negativa na direção Y da laje inferior .....	65
<b>Figura 44</b> - Área de armadura positiva na direção X da parede .....	66
<b>Figura 45</b> - Área de armadura positiva na direção Z da parede .....	66
<b>Figura 46</b> - Área de armadura negativa na direção X da parede .....	67
<b>Figura 47</b> - Área de armadura negativa na direção Z da parede .....	67
<b>Figura 48</b> – Planta painel de tela tipo Q 785 .....	70
<b>Figura 49</b> - Planta laje superior do projeto executado .....	71
<b>Figura 50</b> - Planta laje superior do método em estudo .....	71
<b>Figura 51</b> - Planta laje inferior projeto executado .....	72
<b>Figura 52</b> - Projeto estrutural da laje inferior do método em estudo .....	73
<b>Figura 53</b> - Projeto estrutural da parede do projeto modelo .....	73
<b>Figura 54</b> - Projeto estrutural da parede pelo método em estudo .....	74

## LISTA DE TABELAS E QUADROS

<b>Quadro 1</b> - Classes de agressividade ambiental – CAA.....	28
<b>Quadro 2</b> - Classe de agressividade e qualidade de concreto.....	29
<b>Quadro 3</b> - Classe de agressividade ambiental.....	30
<b>Quadro 4</b> - Requisitos para o concreto.....	31
<b>Tabela 1</b> - Coeficientes de $\gamma_g$ para ações permanentes .....	33
<b>Tabela 2</b> – Coeficientes $\gamma_e$ parciais para ações variáveis.....	33
<b>Tabela 3</b> - Carregamentos .....	47
<b>Tabela 4</b> - Propriedades do concreto e do aço que compõe o flutuante .....	49
<b>Tabela 5</b> - Nós principais de modelagem .....	50
<b>Tabela 6</b> - Momentos fletores máximos .....	60
<b>Tabela 7</b> - Momentos máximos majorados .....	61
<b>Tabela 8</b> - Detalhamento estrutural exigido pelo SAP2000.....	68
<b>Tabela 9</b> - Área de armadura utilizada .....	69
<b>Tabela 10</b> - Variação de aço CA-50 entre os projetos.....	74

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CA – Concreto Armado

CAA – Classe De Agressividade Ambiental

CP – Concreto Protendido

EPS - Poliestireno Expandido

ELU - Estado Limite Último

MEF - Método dos Elementos Finitos

## LISTA DE SÍMBOLOS

- $a$  – aceleração
- $a/c$  – relação água e cimento
- $A_{s,p x}$  - armadura positiva principal da direção X
- $A_{s,p y}$  - armadura positiva principal da direção Y
- $A_{s,n x}$  - armadura negativa na direção X
- $A_{s,n y}$  - armadura negativa na direção Y
- $A_{s,p z}$  - armadura positiva principal da direção Z
- $A_{s,n z}$  - armadura negativa na direção Z
- $A_{s,min}$  - armadura mínima
- $b_w$  – espessura do elemento
- $cm$  – centímetros
- $c$  – cobrimento da armadura
- $c_{nom}$  - cobrimento nominal
- $c_{min}$  – cobrimento mínimo
- $D_c$  –tolerância de execução
- $d$  – altura útil
- $d$  – densidade
- $d_{máx}$  – diâmetro máximo
- $E_{cs}$  - módulo de elasticidade do concreto
- $E$  – força de empuxo
- $F_d$  – ações de calculo
- $F_k$  - coeficientes de valores característicos
- $f_d$  - resistência ao escoamento do aço
- $f_u$  - resistência ao escoamento de ruptura do aço
- $f_{ck}$  – resistência característica à compressão
- $g$  – aceleração Gravitacional
- $h_L$  - altura submersa
- $h_l$  – altura acima do nível da água
- $h$  - altura do elemento
- $kg$  – quilograma

$l$  – comprimento do elemento

$l_x$  - menor vão de uma laje

$l_y$  – maior vão de uma laje

$L_s$  – laje superior

$L_i$  – laje inferior

$m$  – metro

$mm$  – milímetros

$m$  – massa

$N$  – Newton

$P_a$  – parede

$Pa$  – Pascal

$P$  – força peso

$V_c$  – volume de concreto

$V_{sub}$  – volume submerso

$V$  – volume

$\alpha$  - coeficiente de expansão térmica

$\gamma$  - peso específico

$\gamma_a$  - peso específico da água

$\gamma_\varepsilon$  - ações variáveis

$\gamma_f$  – coeficiente de segurança

$\gamma_g$  - ações permanentes

$\emptyset$  – diâmetro

$\emptyset_l$  – diâmetro da barra de armadura

$\mu$  - coeficiente de Poisson

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
1.1.1.	OBJETIVOS .....	17
1.1.2.	OBJETIVO GERAL .....	17
1.1.3.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	17
1.1.4.	JUSTIFICATIVA .....	17
1.1.5.	METODOLOGIA.....	18
1.1.6.	ORGANIZAÇÃO DO TEXTO.....	19
<b>2.</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>20</b>
2.1.1.	CONCRETO ARMADO .....	20
2.1.2.	ELEMENTOS ESTRUTURAIS.....	22
2.2.	LAJES .....	24
2.3.	DURABILIDADE DA ESTRUTURA.....	28
2.3.1.	AGRESSIVIDADE DO MEIO.....	28
2.3.2.	QUALIDADE DO CONCRETO.....	29
2.3.3.	ESPESSURA DE COBRIMENTO DA ARMADURA .....	29
2.3.4.	CONDIÇÕES ESPECIAIS DE EXPOSIÇÃO .....	31
2.4.	AÇÕES ATUANTES EM UMA ESTRUTURA .....	32
2.4.1.	AÇÕES ATUANTES EM UM FLUTUANTE DE CONCRETO ARMADO	33
2.4.2.	PESO PRÓPRIO.....	34
2.4.1.	CARGAS ACIDENTAIS.....	35
2.4.2.	EMPUXO DA ÁGUA.....	35
2.5.	MOMENTOS FLETORES GERADOS PELAS AÇÕES ATUANTES EM UM FLUTUANTE DE CONCRETO ARMADO .....	37
2.5.1.	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS (MEF).....	38
2.5.2.	SAP2000 .....	39
<b>3.</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>41</b>
3.1.	FLUTUANTE MODELO.....	41
3.2.	CARGAS ATUANTES .....	44
3.2.1.	PESO PRÓPRIO.....	45
3.3.	APLICAÇÃO DO SOFTWARE SAP2000 .....	48

3.3.1.	PRÉ-PROCESSAMENTO.....	48
3.3.2.	MODELAGEM INICIAL .....	49
3.3.3.	CONDIÇÕES DE CONTORNO.....	51
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>54</b>
4.1.	PÓS-PROCESSAMENTO.....	54
4.1.1.	DEFORMAÇÕES E DESLOCAMENTOS NO FLUTUANTE .....	54
4.1.2.	MOMENTOS FLETORES GERADOS NO FLUTUANTE .....	57
4.1.3.	DETALHAMENTO DE ARMADURAS DO FLUTUANTE.....	61
<b>5.</b>	<b>ANÁLISE DE DADOS.....</b>	<b>70</b>
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>76</b>
7.1.1.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	77
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>78</b>
	<b>ANEXO A – TABELA DE ARMADURA .....</b>	<b>81</b>

## 1. INTRODUÇÃO

No cenário econômico brasileiro, o aquecimento do setor náutico e o crescimento da produção atingiram patamares tais que as infraestruturas de navegação, por onde há a exportação desses produtos, têm operado no seu limite máximo. Em consequência, o Governo Federal vem investindo na área, com a construção de novas infraestruturas e reformas de antigas, como na cidade de Paranaguá, que em 2022 teve R\$ 2,3 Bilhões para realização de obras como dragagens, reformas de píer, trapiches e as manutenções em geral, como a sinalização náutica e defensas para atracação (Amanhã, 2022).

Nesse contexto, os flutuantes, em específico, são estruturas de madeira ou concreto, executados, em geral, em conjunto com os trapiches, principalmente, para o apoio portuário e embarque e desembarque em embarcações de pequeno porte. (PIERGLASS, 2022)

Com os investimentos governamentais e a ampla concorrência de mercado, na construção civil, os projetos são executados para suprir as necessidades do cliente ao menor custo possível. Nesse sentido, os flutuantes de concreto são dimensionados conforme a experiência de cada projetista e não há uma norma brasileira específica que rege os parâmetros construtivos e estruturais.

Com o intuito de descrever as etapas que envolvem o dimensionamento de flutuantes, neste trabalho é proposta uma análise estrutural de um flutuante previsto para o trapiche do Rocio, próximo ao porto de Paranaguá, viabilizado pela APPA (Administração dos Portos de Paranaguá e Antonina), utilizando um programa computacional baseado no Método dos Elementos Finitos, algumas regras de projeto de reservatórios enterrados, descritas por Vasconcelos (1998), cujos carregamentos e esforços gerados se assemelham aos gerados em um flutuante e a norma ABNT NBR 6188 (2014) de Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Com os resultados obtidos na análise estrutural é feito o dimensionamento de um flutuante e, para verificar a viabilidade da análise e do dimensionamento propostos, é realizada uma comparação com o projeto que de fato foi executado.

### **1.1.1. OBJETIVOS**

Para desenvolver a proposta de análise estrutural e dimensionamento de corpos flutuantes, propõem-se neste trabalho os seguintes objetivos:

### **1.1.2. OBJETIVO GERAL**

Dimensionar um flutuante de concreto armado utilizando um *software* baseado no Método dos Elementos Finitos. Para isso, descrevem-se os seguintes objetivos específicos:

### **1.1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Detalhar os esforços gerados no flutuante através do levantamento das cargas permanentes e variáveis atuantes no mesmo;
- Analisar os principais momentos fletores e esforços cortantes gerados na estrutura, bem como as tensões normais e de cisalhamento geradas pelo *software* SAP2000;
- Dimensionar as armaduras de flexão do flutuante de concreto armado com base nos procedimentos descritos na norma NBR 6118 (2014), com base nos resultados obtidos com o SAP2000;
- Verificar se o dimensionamento proposto deste trabalho é viável;
- Comparar o dimensionamento proposto ao dimensionamento apresentado no projeto de flutuante que foi executado;
- Sugerir com base nos resultados e comparações efetuadas um dimensionamento para flutuantes de concreto armado com a metodologia proposta.

### **1.1.4. JUSTIFICATIVA**

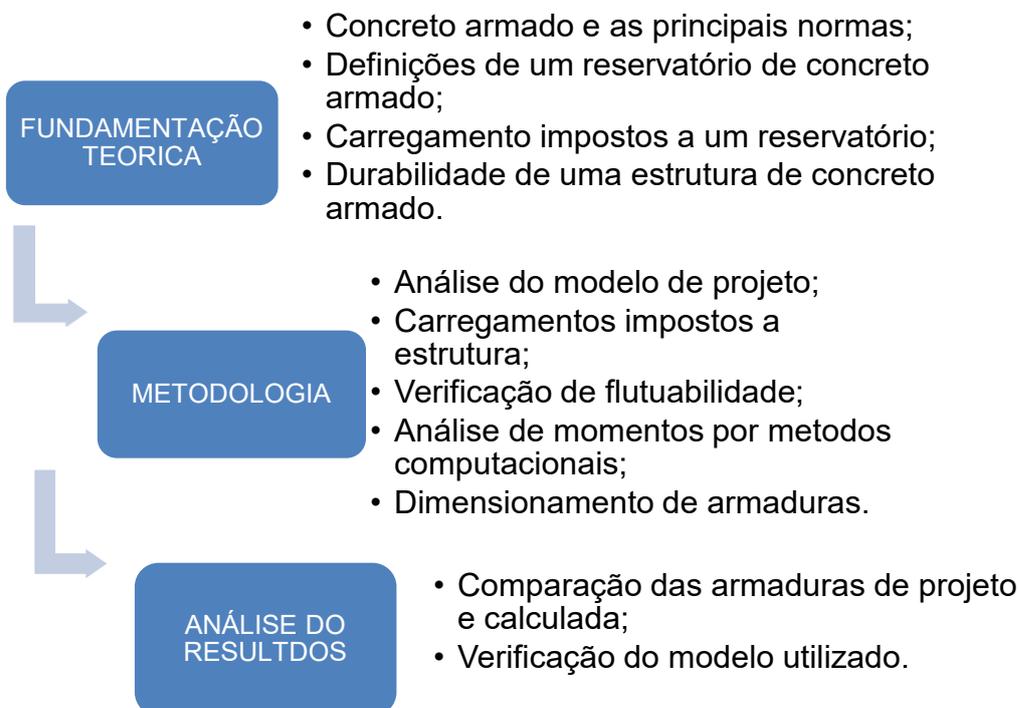
Atualmente com a inflação e aumento de preço de produtos como o aço e o concreto, é necessário estudar e propor soluções e técnicas mais sofisticadas e econômicas, capazes de reduzir o volume de consumo desses

materiais, e também que proporcionem velocidade de produção, reduzindo o tempo gasto e o custo final da obra.

Neste trabalho busca-se verificar as diferenças e similaridades do detalhamento estrutural de um corpo flutuante de concreto armado comparando o obtido com o projeto executado e analisar se a proposta desenvolvida pode gerar um bom rendimento econômico e estrutural para o projeto.

### 1.1.5. METODOLOGIA

A fim de melhor apresentar o atual trabalho, constrói-se um fluxograma esquemático dos passos realizados no estudo:



### 1.1.6. ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

O texto deste Trabalho de Conclusão de Curso contém seis capítulos, descritos resumidamente a seguir.

Este Capítulo 1 contempla o tema estudado e sua contextualização, além de apresentar os objetivos gerais e específicos propostos, a justificativa e esquematiza o desenvolvimento da metodologia utilizada.

O Capítulo 2 sintetiza os principais conceitos normativos relativos às estruturas de concreto armado, juntamente com a descrição das ações a que são submetidas e especificam-se as lajes de concreto armado, cujas características de dimensionamento são similares aos dos flutuantes aqui estudados. Apresenta-se também o programa de elementos finitos utilizado nas análises e por fim a metodologia de desenvolvimento do trabalho que envolve a fundamentação teórica construída neste capítulo.

O Capítulo 3 apresenta o flutuante de concreto armado que será analisado e todos os parâmetros e procedimentos de modelagem para as análises numéricas, além da determinação das cargas atuantes no elemento estrutural estudado.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos na análise estrutural realizada com o *software* SAP2000, especialmente os momentos fletores, fundamentais para o dimensionamento das armaduras do flutuante, também apresentado neste capítulo.

O Capítulo 5 trata da análise do dimensionamento proposto e, para verificar a sua viabilidade, é realizada uma comparação com o projeto estrutural do flutuante que de fato foi executado próximo ao Porto de Paranaguá.

Por fim, no Capítulo 6 são relatadas as conclusões advindas da realização deste trabalho e as perspectivas de trabalhos futuros oriundos do mesmo.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são descritas algumas teorias renomadas para o dimensionamento de estruturas de concreto armado e as formas de análise dos carregamentos em um flutuante de concreto armado. Descreve-se brevemente o Método dos Elementos Finitos, que está implementado no *software* de análise estrutural SAP2000, utilizado neste trabalho para a obtenção de momentos fletores, esforços cortantes, tensões normais e de cisalhamento. Com base nos resultados obtidos nessas análises e nos procedimentos descritos na norma ABNT NBR 6118 (2014), será proposto o dimensionamento de um flutuante de concreto armado.

### 2.1.1. Concreto armado

De maneira geral define-se que um bom material a ser utilizado em uma estrutura é aquele que apresenta boas características de resistência e durabilidade. Entre os principais materiais utilizados para a estrutura de uma obra estão: aço, madeira, concreto simples, concreto armado e alvenaria estrutural. Neste trabalho o concreto armado compõe o material da estrutura dos flutuantes analisados.

Por definição, o concreto simples é uma mistura em proporção adequada de: aglomerantes, agregados, água e, frequentemente, aditivos e adições. Os aglomerantes unem os fragmentos de outros materiais, em geral é usado cimento Portland, que é um aglomerante hidráulico (SEFFF, 2019).

Os agregados são partículas minerais, aumentando a estabilidade volumétrica do material, podendo ser miúdo, como as areias e grãos, como as britas. Os aditivos são adicionados em pequena quantidade para beneficiar algumas propriedades, como modificadores de viscosidade, incorporadores de ar e superplastificantes. As adições são incorporadas ao concreto para se obter melhores propriedades, como por exemplo a sílica, a cinza volante e o metacaulim (SEFFF, 2019).

O benefício da utilização do concreto simples é sua alta resistência à compressão, o que faz sua utilização em elementos estruturais submetidos principalmente a compressões ser recomendada. Em elementos estruturais solicitados tanto à compressão quanto à tração, como vigas e lajes, concreto simples não pode ser aplicado, justamente por possuir baixa resistência à tração.

Para solucionar essa deficiência, são utilizadas as armaduras de aço especialmente nas regiões tracionadas dos elementos estruturais, e assim os esforços de tração são absorvidos pelas armaduras graças aos mecanismos de transferências de esforços entre o concreto e o aço, e forma-se o concreto armado (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2014).

Nos projetos de estruturas de concreto armado devem ser utilizados os aços classificados pela ABNT NBR 7480, com os valores característicos da resistência de escoamento nas categorias CA-25, CA-50 e CA-60. Os diâmetros e seções transversais nominais devem ser os estabelecidos nesta mesma norma.

Dentre os principais materiais utilizados para a constituição de uma estrutura, alguns aspectos positivos do uso do concreto armado foram listados por Bastos (2019):

- Custo: os componentes do concreto e, principalmente, o aço devem ser quantificados, além da mão de obra e os equipamentos para produzi-lo;
- Adaptabilidade: às estruturas de concreto armado possuem alta adaptabilidade ao meio e as formas da estrutura de projeto por poder ser moldado em seu estado fresco;
- Resistência ao fogo: o concreto armado tem certa resistência ao fogo comparada aos outros materiais utilizados como a madeira;
- Resistência aos choques e vibrações: a massa e a rigidez do concreto armado provocam uma diminuição das vibrações;
- Conservação: com qualidade de projeto e execução as estruturas de concreto armado podem apresentar elevadas resistências às intempéries, aos agentes agressivos e às ações atuantes;
- Impermeabilidade: quando bem executado, o concreto apresenta muito boa impermeabilidade;

Entretanto, também há aspectos negativos relacionados às estruturas de concreto armado, de acordo com Bastos (2019) são:

- Baixa resistência à tração: o concreto apresenta uma baixa resistência à tração, porém, em conjunto com aço, o concreto armado aumenta essa resistência à tração;
- Formas e escoramentos: o concreto armado necessita de um material de descarte para ser utilizado como molde e escoramento até que o concreto endureça e alcance sua resistência característica à compressão. O uso dessas formas e escoramentos aumenta o custo e tempo de finalização da obra;
- Baixa resistência do concreto por unidade de volume: o concreto apresenta baixa resistência comparativamente ao aço estrutural, e elevada massa específica ( $2450 \text{ kg/m}^3$ ), o que resulta na necessidade de estruturas com elevados volumes e pesos próprios muito elevados;
- Alteração de volume com o tempo: o concreto pode fissurar sob alterações de volume provocadas pela retração e pela fluência.

Levantadas as principais características do concreto armado, o item a seguir apresenta as definições de elementos estruturais constituídos por esse material, enfatizando-se as lajes, visto que o dimensionamento do flutuante será baseado nestes elementos.

### **2.1.2. Elementos Estruturais**

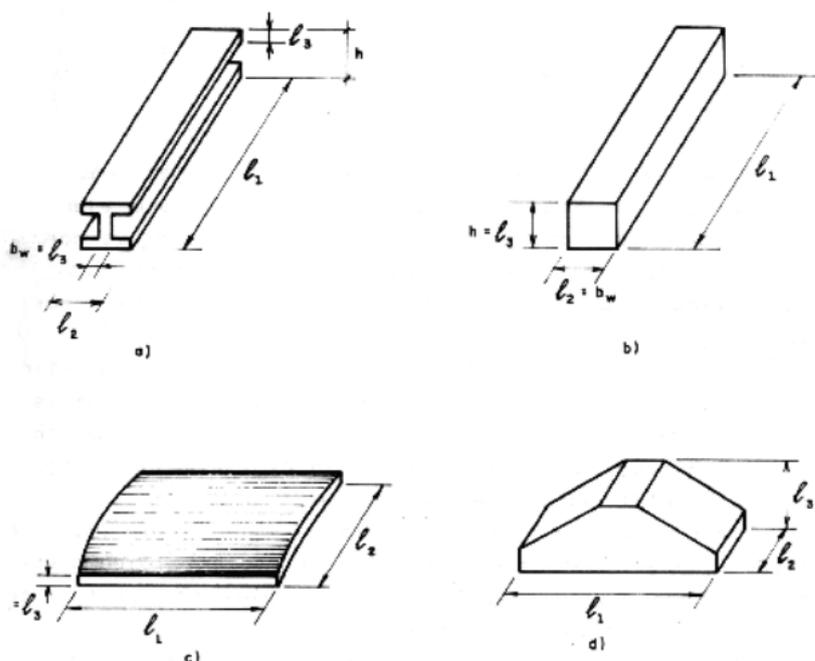
Em virtude da complexidade das obras executadas, a construção de estruturas requer o emprego de diferentes formas de elementos estruturais, as quais devem ser combinadas adequadamente, formando um conjunto que resista às solicitações propostas.

Para a idealização do arranjo estrutural é necessário compreender a função e comportamento de cada uma das partes da estrutura. As classificações dos elementos estruturais podem seguir como base o critério geométrico, através de três dimensões características: o comprimento, a altura e a espessura.

Vlassov (1962) indica uma classificação dos elementos estruturais fundamentais, baseado em um critério geométrico, podendo ser associado ao comportamento do elemento em função de sua posição na estrutura. Seguindo esse critério geométrico dos elementos estruturais, obtém-se a seguinte classificação:

- a) Elementos lineares de seção delgada - são os elementos que têm a espessura ( $b_w$ ) muito menor que a altura ( $h$ ) da seção transversal e, esta muito menor que o comprimento ( $l_2$ ). São caracterizados como elementos de barras, conforme a Figura 1(a);
- b) Elementos lineares de seção não delgadas - são os elementos que têm a espessura ( $b_w$ ) da mesma ordem de grandeza da altura ( $h$ ) da seção transversal e, estas bem menores que o comprimento ( $l_1$ ). As barras são elementos característicos para esta definição, de acordo com a Figura 1(b);
- c) Elementos bidimensionais - são os elementos estruturais que têm as suas dimensões em planta ( $l_1$  e  $l_2$ ) da mesma ordem de grandeza e muito maiores que a terceira dimensão que é a espessura ( $h$ ), como mostrado na Figura 1(c). São denominados elementos estruturais de superfície;
- d) Elementos tridimensionais - são os elementos estruturais que têm as suas dimensões ( $l_1$ ,  $l_2$  e  $l_3$ ) de mesma ordem de grandeza, conforme a Figura 1(d). É utilizada esta geometria para sapatas de fundações.

**Figura 1** -Elementos estruturais



Fonte: Fusco (1976)

A classificação apresentada está completa do ponto de vista geométrico, mas não se estabelece o comportamento dos elementos estruturais. Isso pode ser visualizado nos elementos lineares de seção não delgada, em que vigas e pilares, fazem parte desta classificação geométrica, porém, diferem com relação às ações que a eles são aplicados, tendo um comportamento estrutural diferente. As vigas geralmente são submetidas a momentos fletores que causam sua flexão, gerando tensões de tração e de compressão em sua seção transversal. Já os pilares, de maneira geral, são submetidos a forças normais de compressão, que geram tensões de compressão em sua seção transversal.

Dentre os elementos bidimensionais (Figura 1(c)), têm-se as lajes, que são submetidas a carregamentos distribuídos perpendiculares ao seu plano. Esses elementos são submetidos a momentos fletores em duas direções ( $x$  e  $y$ ), e apresentam regiões tracionadas e comprimidas. O próximo item sintetiza as principais características dos elementos de laje.

## 2.2. Lajes

Lajes são elementos planos, segundo Fusco (1976), bidimensionais, onde as dimensões de comprimento e largura são da mesma ordem de

grandeza e muito maiores que a espessura. A principal função das lajes é receber ações normais ao plano, que são os carregamentos atuantes no pavimento, provenientes do uso da construção (pessoas, móveis e equipamentos).

Neste trabalho é estudado o caso de lajes maciças, que conforme Bastos (2019) é um elemento em que toda espessura é composta por concreto armado ou protendido, contendo armaduras longitudinais de flexão e eventualmente armaduras transversais, e apoiada em vigas ou paredes.

As lajes maciças podem ser classificadas conforme sua geometria, tipo de vínculos nos apoios e direção. Quanto à direção, as lajes podem ser armadas em uma (Figura 2) ou duas direções (ou armadas em cruz) (Figura 3).

As lajes armadas em uma direção devem respeitar a relação entre os vãos, sendo menor que dois, conforme a Equação 1 a seguir:

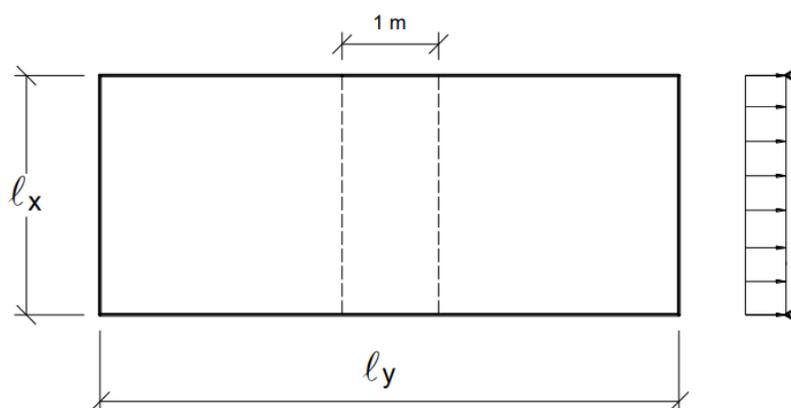
$$\frac{l_x}{l_y} > 2 \quad (1)$$

Com:

$l_x$ - menor vão;

$l_y$ - maior vão.

**Figura 2 - Laje armada em uma direção**



**Fonte:** Bastos (2019)

As lajes armadas em duas direções (ou em cruz) caracterizam-se por transmitir suas reações em todas as vigas que a contornam, quando a relação entre o maior e o menor vão é igual ou menor que dois, conforme a Equação 2 a seguir:

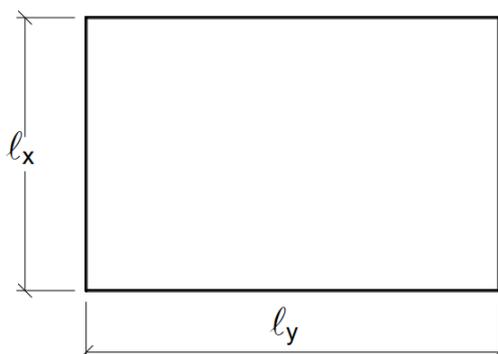
$$\frac{l_x}{l_y} \leq 2 \quad (2)$$

Com:

$l_x$ - menor vão;

$l_y$ - maior vão.

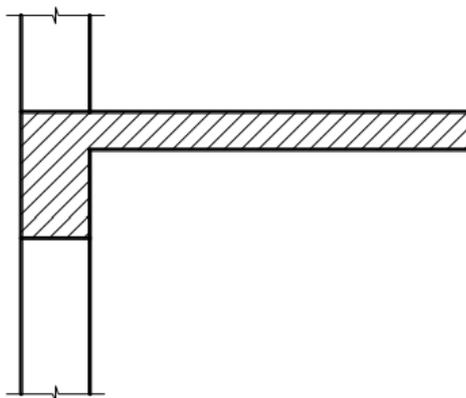
**Figura 3** - Laje armada em duas direções



**Fonte:** Bastos (2019)

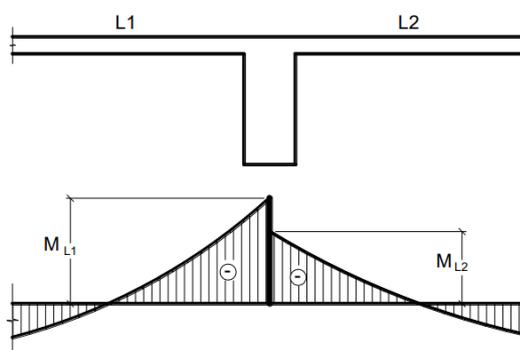
Conforme Bastos (2019), os vínculos nas bordas das lajes são: apoio simples, engaste perfeito e engaste elástico. O apoio simples surge nas bordas onde não existe continuidade de laje com outras lajes vizinhas, como o apoio em uma parede de alvenaria ou viga de concreto. O engaste perfeito é considerado em bordas onde há continuidade entre lajes vizinhas, como em lajes em balanço e varandas, de acordo com a Figura 4. Quando houver apoio intermediário de lajes contínuas surgem momentos fletores negativos, e essa ponderação entre os diferentes momentos fletores conduz ao engastamento elástico, conforme indicado na Figura 5.

**Figura 4** - Engaste perfeito de Laje em balanço em viga



Fonte: Bastos (2019)

**Figura 5** - Engaste elástico devido a momentos fletores negativos diferentes



Fonte: Bastos (2019)

As lajes maciças podem ser de concreto armado ou protendido e tem como principal vantagem a fácil adaptação por diferentes formatos e ser pouco suscetível à ocorrência de patologias, pois nesse caso o concreto se torna um bloco único e se contrai uniformemente (Bastos, 2019).

As lajes maciças podem ser de concreto armado ou protendido e têm como principal vantagem a fácil adaptação a diferentes formatos e ser pouco suscetível à ocorrência de patologias, pois nesse caso o concreto se torna um bloco único e se contrai/dilata uniformemente. A desvantagem da utilização deste tipo de laje é o custo, pois utiliza mais insumos em relação às lajes nervuradas (os vazios entre as nervuras são obtidos pela colocação de moldes e uma fina camada de concreto é executada por cima), por exemplo. (Bastos, 2019)

O dimensionamento à flexão nas lajes devem respeitar as áreas de armaduras mínimas exigidos pela NBR 6118 (2014), já os cobrimentos mínimos

são calculados conforme as condições de exposição do elemento descritos no item 2.4 a seguir.

### 2.3. Durabilidade da estrutura

Segundo a NBR 6118 (2014), para uma estrutura de concreto garantir uma boa durabilidade e qualidade, alguns requisitos mínimos devem ser cumpridos: a capacidade de resistência, gerando um fator de segurança para a estrutura, o desempenho dos serviços, para estrutura se manter utilizável durante sua vida útil de projeto e a durabilidade, que consiste na resistência a influências ambientais previstas em projeto. A seguir destacam-se os principais itens relacionados à durabilidade estrutural, de acordo com a NBR 6118 (2014).

#### 2.3.1. Agressividade do meio

A NBR 6118 (2014) classifica a agressividade ambiental de acordo com as condições de exposição no local da obra, relacionada às ações físicas e químicas. É considerada a agressividade do meio, pois as armaduras de aço ficam sujeitas às agressões do meio quando a estrutura não está protegida corretamente pelo concreto, podendo haver a corrosão das armaduras prejudicando a estrutura. A norma estabelece uma qualidade de concreto e cobertura mínimo segundo a Quadro 1.

**Quadro 1** - Classes de agressividade ambiental – CAA

<b>Classe agressividade ambiental</b>	<b>Agressividade</b>	<b>Classificação geral</b>	<b>Risco de deterioração da estrutura</b>
<b>I</b>	Fraca	Rural / Submersa	Insignificante
<b>II</b>	Moderada	Urbana	Pequeno
<b>III</b>	Forte	Marinha / Industrial	Grande
<b>IV</b>	Muito forte	Industrial / Respingos de maré	Elevado

**Fonte:** Adaptado de NBR 6118 (2014), tabela 6.1.

### 2.3.2. Qualidade do concreto

Segundo a NBR 6118 (2014), a durabilidade de uma estrutura é relacionada com a qualidade do concreto e a espessura de cobrimento da armadura. Os parâmetros mínimos que devem ser estabelecidos são apresentados na Quadro 2.

**Quadro 2-** Classe de agressividade e qualidade de concreto

Concreto	Tipo	CLASSE			
		I	II	III	IV
Relação a/c	CA	<0,65	<=0,60	<=0,55	<=0,45
	CP	<=0,60	<=0,55	<=,50	<=0,45
Classe de concreto	CA	<=C20	<=C25	<=C30	<=C40
	CP	<=C25	<=C30	<=C35	<=C40

Fonte: Adaptado de NBR 6118 (2014), tabela 7.1.

### 2.3.3. Espessura de cobrimento da armadura

O cobrimento da armadura é a espessura de concreto entre a armadura e a face externa. O concreto, além de contribuir com a estrutura com sua elevada capacidade resistente à compressão, é utilizado também como elemento de proteção às armaduras contra agentes corrosivos. Desse modo, quanto maior o cobrimento de concreto, mais protegida estão as barras de aço.

A NBR 6118 (2014) estabelece os cobrimentos mínimos a serem cumpridos para determinada classe de agressividade ambiental, conforme a Quadro 3.

**Quadro 3 - Classe de agressividade ambiental**

Tipo de estrutura	Elemento	CAA			
		I	II	III	I
		Cobrimento nominal			
Concreto armado	Laje	20	Concreto armado	Laje	20
	Viga/ Pilar	25	30	Viga/ Pilar	25
	Elementos em contato com solo	30		40	Elementos em contato com solo
Concreto protendido	Laje	25	Concreto protendido	Laje	25
	Viga/ Pilar	30	35	Viga/ Pilar	30

Fonte: Adaptado de NBR 6118 (2014), tabela 7.2.

Para assegurar o cobrimento mínimo exigido pela norma, o cobrimento nominal deve ser considerado no projeto e na execução, sendo o cobrimento mínimo somado com a tolerância de execução.

$$c_{nom} = c_{min} + D_c \quad (3)$$

Onde:

$c_{nom}$  – Cobrimento nominal

$c_{min}$  – Cobrimento mínimo

$D_c$  – Tolerância de execução

Considera-se  $D_c \geq 10 \text{ mm}$  para obras em geral e  $D_c \geq 5 \text{ mm}$  para obras onde se tem um elevado controle de execução, onde a controles rigorosos das medidas, porém deve ser especificada em projeto essa tolerância, que dependerá da qualidade da execução.

A NBR 6118 (2014) também estabelece que, ao se determinar os cobrimentos nominais para as barras de aço, devem-se respeitar os seguintes limites, conforme as Equações 4 a 6.

$$c_{nom} \geq \varnothing \text{ barra} \quad (4)$$

$$c_{nom} \geq \varnothing \text{ feixe} = \varnothing n = \varnothing n^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

$$c_{nom} \geq 0,5\phi \text{ bainha} \quad (6)$$

Outra especificação da norma é que o agregado graúdo do concreto não pode ter a dimensão máxima característica ( $d_{m\acute{a}x}$ ) maior que 20% da espessura nominal do cobrimento, sendo então  $d_{m\acute{a}x} \leq 1,2 c_{nom}$ .

### 2.3.4. Condições especiais de exposição

Segundo a NBR 12655 (2015), o valor mínimo para resistência característica, o  $f_{ck}$  e a máxima relação água/cimento, quando a estrutura fica exposta às condições especiais. Referindo-se aos flutuantes é necessária a utilização de um concreto com baixa permeabilidade à água. Os requisitos mínimos de durabilidade são expostos na Quadro 4.

**Quadro 4** -Requisitos para o concreto

<b>Condições de exposição</b>	<b>Máxima relação água/cimento, em massa, para concreto com agregado normal.</b>	<b>Mínimo valor de <math>f_{ck}</math> (para concreto com agregado normal ou leve) MPa.</b>
Condições em que é necessário um concreto de baixa permeabilidade à água, por exemplo, em caixa d'água.	0,5	35
Exposição a processos de congelamento e descongelamento em condições de umidade ou a agentes químicos de degelo.	0,45	40
Exposição a cloretos provenientes de agentes químicos de degelo, sais, água salgada, água do mar, ou respingos ou borrifação desses agentes.	0,45	40

Fonte: adaptado de NBR 12655 (2015)

As estruturas, compostas por elementos estruturais como a laje (descrita no item 2.3), e a parede são submetidas a ações impostas ao longo de sua vida útil. De maneira geral, essas ações são categorizadas como permanentes, variáveis e excepcionais, e suas principais características estão sintetizadas no próximo item, assim como a combinação dessas ações.

#### **2.4. Ações atuantes em uma estrutura**

As ações nas estruturas devem ser estimadas com segurança e precisão para que o dimensionamento dos elementos estruturais possa evitar o desperdício e, principalmente, seu Estado Limite Último (ELU), no qual pode ocorrer a ruptura ou deformação plástica. Para padronizar os projetos são estabelecidas as normas da ABNT, específicas para os tipos e finalidades dos materiais utilizados. Segundo a NBR 8681 (2003), para o estabelecimento das regras de combinação das ações, estas são classificadas segundo sua variabilidade no tempo em três categorias:

- a) Ações permanentes;
- b) Ações variáveis;
- c) Ações excepcionais.

Segundo a norma NBR 8681 (2003), as ações mais comuns são as permanentes, que atuam de forma contínua em toda vida útil da estrutura, constituídas pelo peso próprio da estrutura, da instalação e do revestimento. Já, as ações acidentais atuam sobre a estrutura em função de seu uso e não são uniformes ou contínuas; em projeto, deve-se prever algumas ocasiões onde as probabilidades de ocorrência e duração da ação são muito baixas comparadas às demais. Por fim, as ações excepcionais são caracterizadas por possuírem grande magnitude, mas com pequena chance de ocorrência e com curta duração. A NBR 8681 (2003) descreve esse tipo de ação como sendo decorrente de causas tais como explosões, choques de veículos, incêndios, enchentes ou sismos excepcionais.

Para ser dimensionado um elemento estrutural, a NBR 8681 (2003) considera que as ações de uma estrutura devem ser combinadas da forma que apresentam a situação mais desfavorável para a estrutura, chamada de Estado Limite Último (ELU).

As ações de cálculo ( $F_d$ ) são obtidas multiplicando-se os coeficientes de valores característicos ( $F_k$ ) pelos coeficientes de segurança ( $\gamma_f$ ). Para identificar o tipo de ação considerada, o coeficiente ( $\gamma_f$ ) é representado por:

- a)  $\gamma_g$  - representa as ações permanentes;
- b)  $\gamma_\varepsilon$  - representa as ações variáveis.

As tabelas abaixo representam os valores dos coeficientes de segurança, conforme recomendação da norma NBR 8681 (2003).

**Tabela 1** - Coeficientes de  $\gamma_g$  para ações permanentes

Carregamentos	Efeitos desfavoráveis	Efeitos favoráveis
Normais	1,4	0,9
Especiais ou de construção	1,3	0,9
Excepcionais	1,2	0,9

Fonte: NBR 8681 (2003)

**Tabela 2** – Coeficientes  $\gamma_\varepsilon$  parciais para ações variáveis.

Carregamentos	Efeitos desfavoráveis	Efeitos favoráveis
Normais	1,4	1,2
Especiais ou de construção	1,2	1,0
Excepcionais	1,0	0,0

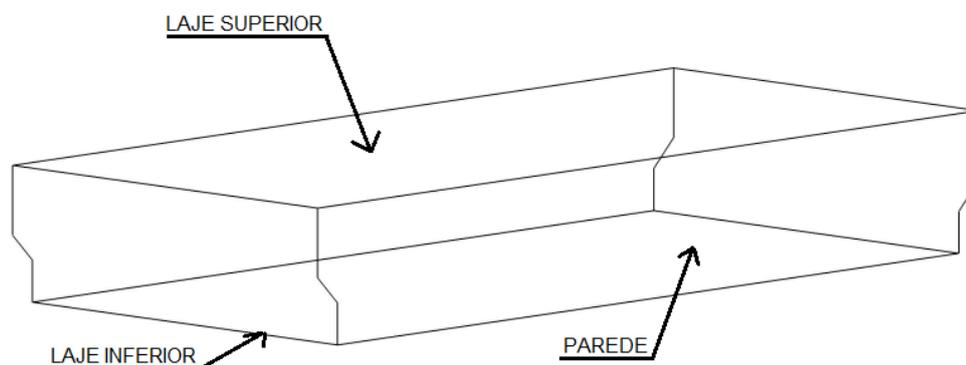
Fonte: NBR 8681 (2003)

Para o dimensionamento do flutuante, consideram-se o coeficiente de majoração da ação permanente normal desfavorável  $\gamma_g = 1,4$  e o coeficiente de majoração da ação variável normal desfavorável  $\gamma_\varepsilon = 1,4$ .

#### 2.4.1. Ações atuantes em um flutuante de concreto armado

Neste trabalho tem-se, dentre os principais objetivos, determinar os esforços atuantes e dimensionar a estrutura de um flutuante de concreto armado, que apresenta um formato de um prisma retangular, constituindo-se de uma laje inferior, uma laje superior e quatro paredes, conforme o exemplo apresentado na Figura 6.

**Figura 6** - Representação geométrica de um flutuante



**Fonte:** Autor (2022)

As ações às quais o flutuante é submetido são: peso próprio do flutuante, empuxo da água e ações acidentais e de impacto, como a colisão de uma embarcação na estrutura.

Dentre as ações citadas, a única que apresenta diferenças em relação às estruturas usuais de concreto armado é o empuxo da água, porém assemelha-se a um reservatório enterrado, que sofre carregamento de empuxo do solo e subpressão da água.

A seguir são detalhados os carregamentos considerados para um flutuante de concreto armado: peso próprio, cargas acidentais e o empuxo da água.

#### **2.4.2. Peso próprio**

Conforme NBR 6120 (2019), o peso próprio de todos os elementos da estrutura constitui a carga permanente. Para fins de cálculo o peso específico aparente para uma estrutura de concreto armado é de  $25 \text{ kN/m}^3$ , sendo esse valor multiplicado pela espessura dos elementos que compõem a estrutura (laje superior, laje inferior e as paredes, conforme indicado na Figura 6), resultando em uma carga distribuída aplicada por metro quadrado.

### 2.4.1. Cargas acidentais

As cargas acidentais, segundo a NBR 6120 (2019), são todas aquelas que podem atuar sobre a estrutura em função do seu uso, como as pessoas, móveis, materiais e veículos.

Como a estrutura analisada não é uma estrutura usual, além dos carregamentos de uso, como as pessoas, é previsto o choque de embarcações na estrutura durante a atracação, portanto este impacto é reduzido em virtude do flutuante conter defensas, como visto na Figura 7.

Além da carga de impacto a ser considerada, é previsto na NBR 9782 (1987) que para sobrecargas acidentais em estruturas flutuantes deve ser considerado um valor de  $10 \text{ kN/m}^2$ .

**Figura 7 - Defesa tipo D**



Fonte: Nanjing (2022)

### 2.4.2. Empuxo da água

As ações de empuxo da água no flutuante são consideradas atuantes nas direções vertical e horizontal. O empuxo vertical imposto pela água é atuante exclusivamente na laje inferior do flutuante, e pode ser calculado pela Segunda Lei de Newton, de acordo com o princípio de Arquimedes, em que a

força de empuxo sobre um corpo tem magnitude igual ao peso do fluido deslocado devido a imersão do corpo (HELERBROCK, 2022). Assim, o empuxo vertical é calculado segundo a Equação 7:

$$P - E = ma \quad (7)$$

em que,

P é a força peso;

E é a força de empuxo;

m é a massa ;

a é aceleração.

Como o corpo está em repouso podemos simplificar, chegando-se na Equação 8:

$$E = P \quad (8)$$

Onde,

$$E = d \cdot g \cdot V_{sub} \quad (9)$$

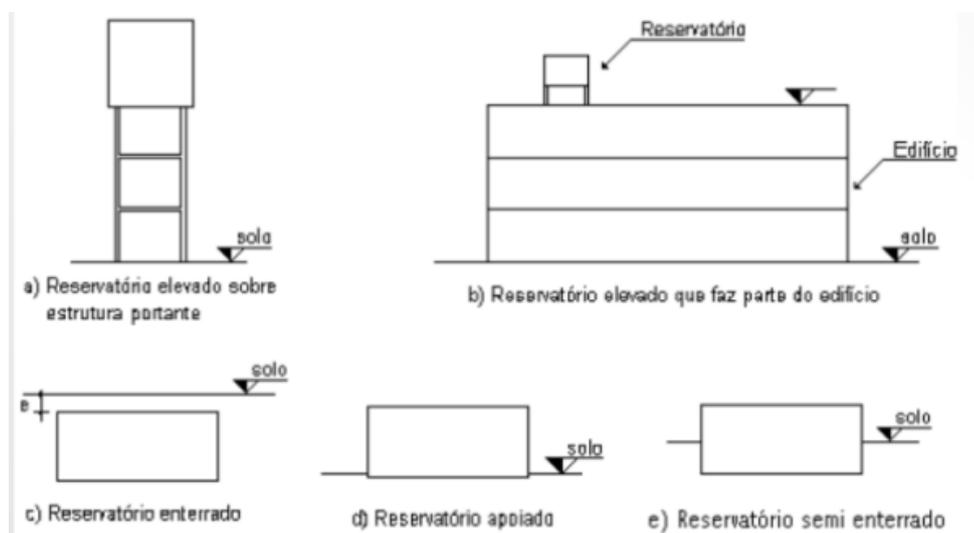
$d$  é a densidade do fluido,  $kg/m^3$ ;

$g$  é a aceleração gravitacional,  $9,81 m/s^2$ ;

$V_{sub}$  é o volume de fluido deslocado,  $m^3$ .

Já o empuxo lateral que a água impõe sobre o flutuante ocorre da mesma forma no reservatório paralelepípedico enterrado vazio, conforme a Figura 8 (e).

**Figura 8 - Tipos de reservatórios**



Fonte: Teixeira (1993)

A magnitude da maior força aplicada horizontalmente é igual à do empuxo vertical, conforme visto na Figura 9, e pode ser calculada segundo Vasconcelos (1998) pela Equação 10 a seguir:

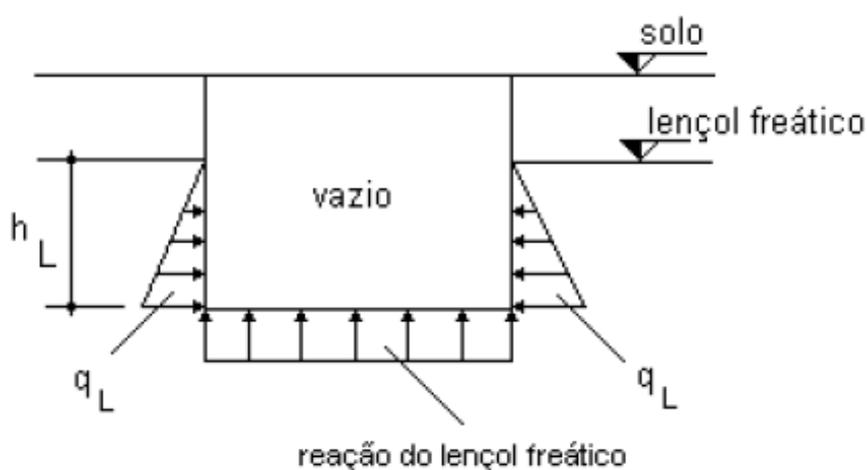
$$q_L = h_L \cdot \gamma_a = 10 \frac{kN}{m^3} \cdot h_L \quad (10)$$

em que,

$h_L$  É a altura submersa;

$\gamma_a$  é o peso específico da água.

**Figura 9 - Efeito da subpressão**



Fonte: Vasconcelos (1998)

Definidas as principais ações atuantes em um flutuante de concreto armado, é possível determinar os esforços solicitantes atuantes. O item 2.7 apresenta a determinação dos momentos fletores gerados em um flutuante de concreto armado, em virtude das ações nele atuantes.

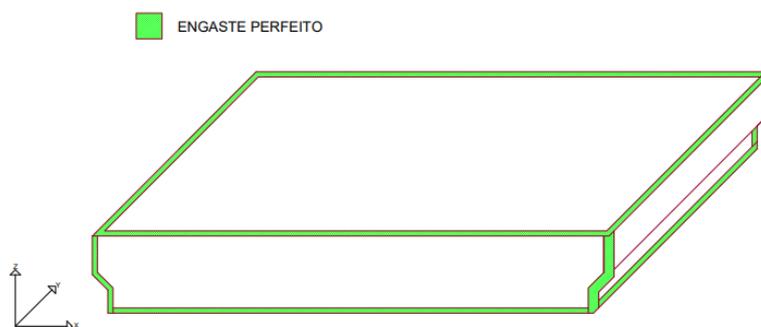
### **2.5. Momentos fletores gerados pelas ações atuantes em um flutuante de concreto armado**

A estrutura de um reservatório, assim como um flutuante, é, principalmente, carregada com esforços de tração e flexão (flexo-tração). Porém, usualmente, o dimensionamento é simplificado considerando somente a flexão, cujos momentos fletores atuantes são determinados com base em cálculos e teorias disponíveis na literatura.

De maneira simplificada, para detalhar os esforços solicitantes no flutuante, consideram-se as lajes superiores e inferiores engastadas nas

paredes, estando estas paredes engastadas nos quatro bordos, conforme na Figura 10.

**Figura 10** - Pontos de engaste no flutuante



**Fonte:** Autor (2022)

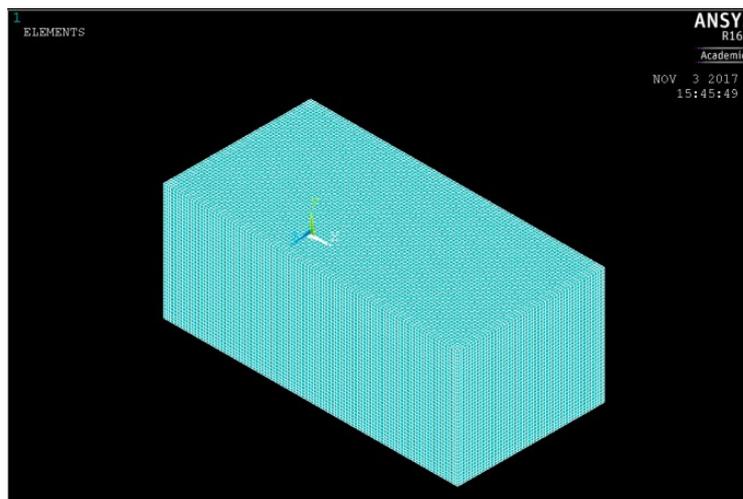
As determinações mais convencionais dos momentos fletores são feitas com base em tabelas pré-determinando os maiores momentos fletores de cada elemento de Bares. Portanto, para estruturas não convencionais a determinação de esforços cortantes e momentos fletores se tornam muito complexas, conseqüentemente a utilização de *softwares* são mais utilizadas.

A seguir, sintetizam-se alguns conceitos relativos ao Método dos Elementos Finitos (MEF) e ao *software* de análise estrutural SAP2000, baseado no MEF, que é utilizado neste trabalho.

### **2.5.1. Método dos Elementos Finitos (MEF)**

Segundo Souza (2012), o Método dos Elementos Finitos é uma das técnicas mais completas para a análise dos esforços das estruturas. Neste método, a estrutura real é substituída por uma estrutura equivalente, composta por elementos retangulares e triangulares discretos que formam uma malha e são conectados por nós (Figura 11). A precisão dos resultados obtidos por meio desse método depende do refinamento da malha e do seu tipo.

**Figura 11** - Distribuição de malha de uma estrutura



Fonte: Colaço (2022)

Este método possui como vantagem a permissão de aplicação de cargas e condições de contorno de qualquer situação, por isto é amplamente utilizado em *softwares* para a análise estrutural (SÁNCHEZ, 2001). De acordo com Marzo (2010), o conceito para este método é de que toda a função contínua, seja temperatura, pressão ou deslocamento, pode ser representada por um modelo formado por variadas funções contínuas definidas sobre um número finito de subdomínios, que recebem o nome de elementos finitos.

Existem disponíveis vários *softwares* de análise estrutural baseados em MEF, tais como o Ansys, Abaqus e SAP2000. Este último é utilizado neste trabalho e o item a seguir (2.7.2) apresenta alguns de seus principais aspectos.

### **2.5.2. SAP2000**

O programa SAP2000 faz parte de um grupo de análise estrutural da *Computers and Structures, Inc.* que utilizam a mesma plataforma de conhecimento, denominada, *CsiKnowledge*. Este *software* possui uma biblioteca de elementos finitos constituída pelos elementos mais comuns na modelagem de estruturas, possibilitando, assim, uma análise realista de um modelo do estudo (FREITAS, 2018).

Segundo os desenvolvedores do SAP2000:

[...] O SAP2000 realiza análises lineares estáticas e análises independentes para uma sequência de carregamentos (multi-step). É possível ter diferentes casos de carga aplicados sequencialmente numa estrutura, como, por exemplo, cargas móveis, ações da sobrecarga e ondas. As análises dinâmicas do SAP2000 incluem o cálculo de modos de vibração através do Ritz ou Eigen vectors, análise de espectro de resposta e “time-history”, tanto para comportamento linear como não linear [...] (MULTIPLUS, 2022)

Como visto, o SAP2000 é um programa que utiliza a análise de elementos finitos para visualizar os resultados de esforços gerados pela combinação das forças e carregamentos envolvidos. Os modelos podem ser criados, desde os mais simples até os com maior complexidade. Segundo Multiplus (2022), o *software* é amplamente utilizado em análises para dimensionamento de estruturas de concreto e aço, com setores amplos de aplicação, como estruturas “*offshore*”, pontes, edifícios e estruturas, em geral.

### 3. METODOLOGIA

Neste capítulo será apresentada a metodologia utilizada para obter os resultados do dimensionamento de um flutuante de concreto armado, conforme o propósito do estudo, baseadas em normas da ABNT, como NBR 6118 (2014), NBR 6120 (2019) e NBR 9782 (1987) e considerações de Vasconcelos (1998). Para que o dimensionamento fosse feito, primeiramente foi necessário a definição no *software* SAP2000 das características geométricas do flutuante, materiais constituintes, condições de contorno e cargas aplicadas, entre outros, e assim obtidos os esforços solicitantes gerados, em especial os momentos fletores, necessários para o cálculo das armaduras.

Após o cálculo das armaduras pela metodologia aqui proposta, utilizando as mesmas propriedades e dimensões do flutuante modelo, executado em uma obra localizada em Paranaguá (PR), é comparado o detalhamento e as áreas de armaduras utilizadas em cada projeto.

#### 3.1. Flutuante modelo

O protótipo criado neste trabalho teve como base um projeto de um flutuante de um trapiche para cidade de Paranaguá, conforme a Figura 12, cuja finalidade é o embarque e desembarque de barcos pesqueiros e turísticos. Por questões de sigilo, a empresa que projetou esta obra será denominada como Empresa X.

**Figura 12** - Localização do trapiche



**Fonte:** Empresa X (2022)



**Figura 14** - Vista isométrica de um dos flutuantes (cm)



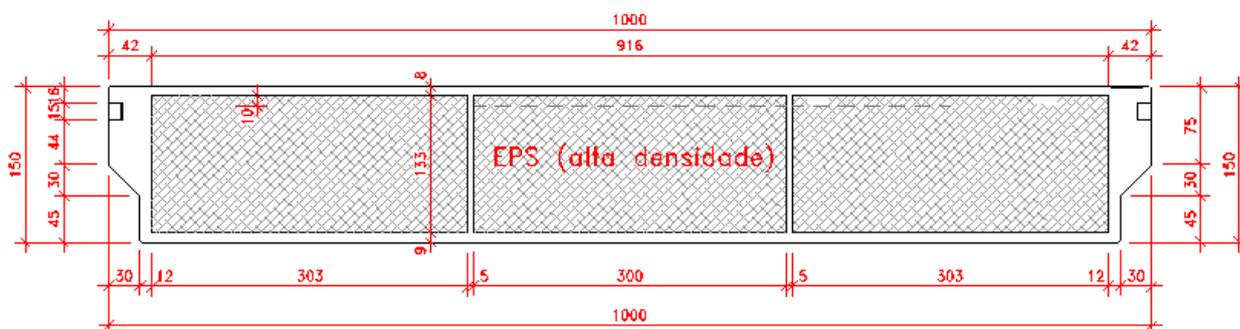
**Fonte:** Autor (2022)

A solução apresentada pela Empresa X (2022), para cada flutuante representa os seguintes critérios:

- Comprimento: 10m;
- Largura: 4.5m;
- Altura: 1.5m;
- Volume total:  $65.68 m^3$ ;
- Volume de concreto:  $14,75m^3$ .

O projeto estrutural proposto pela Empresa X (2022) apresenta um volume de concreto de  $14,75m^3$ . O projeto é executado utilizando um sistema de câmeras internas para evitar proliferação da possível invasão de água no interior e melhor estabilidade estrutural, porém para melhor flutuação e diminuição desta possível entrada de água é realizado o preenchimento da área interna com EPS (poliestireno expandido) de alta densidade. O corte horizontal do flutuante é apresentado na Figura 15.

**Figura 15 - Corte horizontal do flutuante proposto**



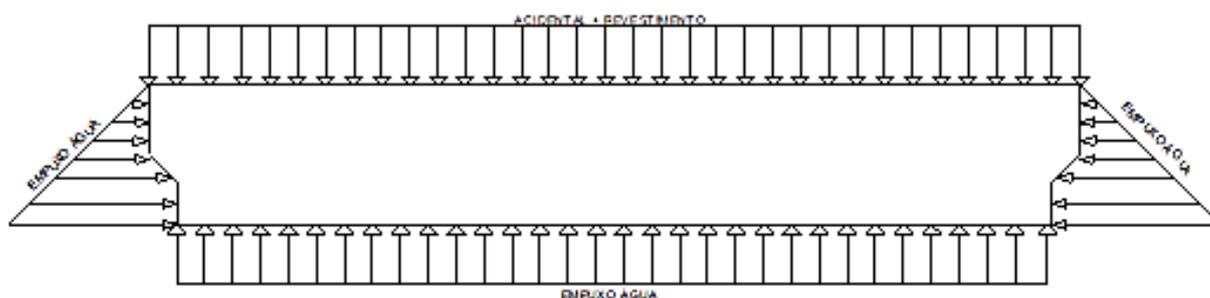
Fonte: Empresa X (2022)

### 3.2. Cargas atuantes

Para a análise estrutural é fundamental definir corretamente a intensidade e direção das cargas atuantes no sistema. Para isso foram obedecidas as prescrições das normas da ABNT NBR 6120 (2019) e NBR 9782 (1987).

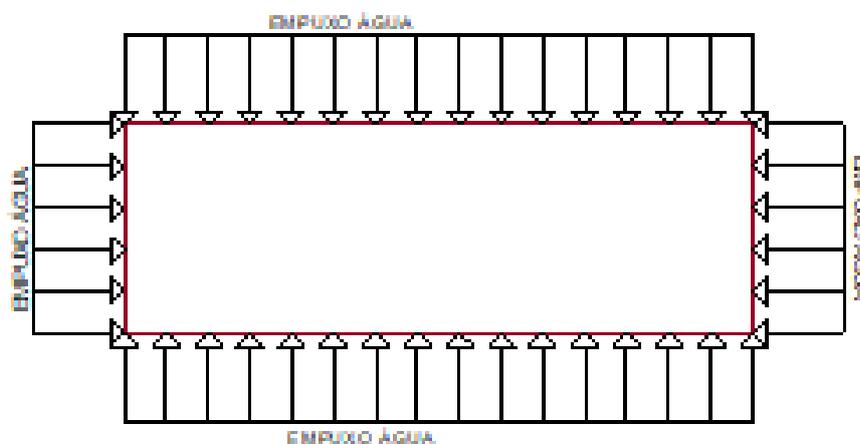
Como visto no item 2.6, um flutuante é exposto aos seguintes carregamentos: peso próprio das estruturas, cargas acidentais e empuxo da água. Os esforços são representados nas figuras a seguir para todos os elementos que compõem o flutuante: Figura 16 - laje superior, inferior e paredes, Figura 17 - paredes e Figura 18 – laje superior, inferior e paredes com ação da água.

**Figura 16 - Carregamentos do flutuante (corte em plano XZ)**



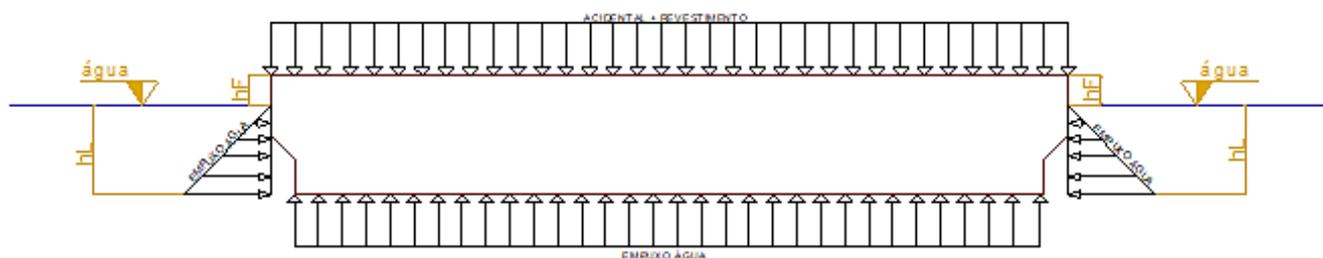
Fonte: Autor (2022)

**Figura 17 - Carregamentos do flutuante (corte em plano XY)**



Fonte: Autor (2022)

**Figura 18 - Nível da água e carregamentos do flutuante (corte em plano XZ)**



Fonte: Autor (2022)

### 3.2.1. Peso próprio

Como o dimensionamento é feito pelo SAP2000, durante a modelagem é concedido o peso específico dos materiais, portanto a força peso da estrutura já é calculada automaticamente.

### 3.2.2. Empuxo

Como supracitado, o empuxo é calculado conforme a Segunda Lei de Newton e o Princípio de Arquimedes, onde as forças de peso é exatamente igual a força de empuxo (HELERBROCK, 2022).

A carga peso ( $P$ ) da estrutura é calculada para um peso específico do concreto de  $25 \text{ kN/m}^3$ , visto na Equação 11:

$$P = 25 \cdot V_c \quad (11)$$

Onde:

$V_c$  é o volume de concreto

$$P = 25 \cdot \text{Volume de concreto} = 25 \cdot 11,45 = 286,25 \text{ kN} \quad (18)$$

O carregamento do empuxo ( $E$ ) varia com a altura submersa do corpo flutuante, para isso é calculado a altura do flutuante em relação ao nível d'água ( $h_f$ ), conforme a Equação 9:

$$E = g \cdot V_{\text{sub}} \cdot d$$

em que:

$g$  : força gravitacional =  $9,81 \text{ m/s}^2$ ;

$V_{\text{sub}}$ : volume submerso;

$d$ : densidade da água ( $1000 \text{ kg/m}^3$ ).

Por equivalências de forças, conforme Equação 8:

$$E = P = g \cdot V_{\text{sub}} \cdot d$$

Em que o peso ( $P$ ) do flutuante é calculado pelo volume de concreto somado ao peso do EPS utilizado, conforme a equação a seguir:

$$P = 14,75 \cdot 25 + 8,70 = 377,45 \text{ kN}$$

Igualando as equações, tem-se:

$$377,45 \text{ kN} = g \cdot V \cdot d = 9,81 \cdot 1 \cdot V_{\text{sub}}$$

$$V_{\text{sub}} = 38,47 \text{ m}^3$$

Correspondendo as alturas abaixo e acima da água de:

$$h_l = 0,60 \text{ m};$$

$$h_f = 0,90 \text{ m}.$$

Analisando a componente vertical de empuxo, observa-se que é gerada uma força por metro quadrado na laje inferior, conforme o Princípio de Arquimedes da Equação 9:

$$E = g \cdot V_{\text{sub}} \cdot d = 9,81 \cdot 38,47 \cdot 1 = 377,45 \text{ kN}$$

em que a laje inferior tem uma área de  $41,85 \text{ m}^2$ , contudo a força por metro quadrado de empuxo vertical que esta laje é submetida é de  $9,02 \text{ kN/m}^2$ .

Já o carregamento horizontal de empuxo nas paredes do reservatório é descrito pela equação a seguir:

$$Eh = -10,02 \cdot z + 9,02 \text{ (kN/m}^2\text{)}$$

Em que  $z$  é a cota ( $0 \leq z \leq 0,90$ ), pelo carregamento se perfazer somente na área molhada.

### 3.2.3. Carregamento acidental

Neste trabalho foram determinadas as sobrecargas de  $10 \text{ kN/m}^2$  e um carregamento acidental de impacto de  $5 \text{ kN/m}^2$ , como indica a NBR 9782 (1987).

O revestimento da estrutura é constituído por madeira e assim foi considerado um carregamento de  $1 \text{ kN/m}^2$ , conforme a NBR 6120 (2019).

### 3.2.4. Carregamento total

Como citado anteriormente, a laje superior recebe os carregamentos do seu peso próprio, já calculados pelo SAP2000, de revestimento e do acidental. Já a laje inferior é carregada pela carga de empuxo vertical. Por fim, as paredes são carregadas com o empuxo horizontal e pela carga de impacto na área que contém as defensas, conforme a Tabela 3.

**Tabela 3 - Carregamentos**

<b>Carregamentos</b>	
Permanente	$377,45 \text{ kN}$
Sobrecargas	$10 \text{ kN/m}^2$
Acidental de impacto	$5 \text{ kN/m}^2$
Revestimento	$1 \text{ kN/m}^2$
Empuxo vertical	$9,02 \text{ kN/m}^2$
Empuxo horizontal	$Eh = -10,02 \cdot z + 9,02$

Fonte: Autor (2022)

Com todas as informações sobre carregamentos atuantes, materiais constituintes, geometria, condições de contorno, etc. relativas ao flutuante foi possível aplicá-las ao *software* SAP2000 para a análise estrutural e levantamento de esforços solicitantes, tensões e deformações presentes na estrutura.

### **3.3. Aplicação do *software* SAP2000**

A análise no SAP2000 basicamente é composta por duas etapas:

- Pré-processamento: etapa onde há a parametrização dos materiais, das geometrias e dos esforços que compõem o flutuante; e
- Pós-processamento: etapa na qual são obtidos e apresentados graficamente os esforços solicitantes, tensões, deformações e deslocamentos gerados em função dos carregamentos aplicados nos elementos que compõem o flutuante.

Nos itens a seguir, as etapas de pré e pós-processamento são detalhadas para a estrutura tratada neste trabalho.

#### **3.3.1. Pré-processamento**

Os parâmetros dos materiais constituintes do flutuante (concreto e aço) são os mesmos que foram adotados no projeto da Empresa X, para que se tenha consistência ao se comparar os resultados aqui obtidos com os de projeto. As propriedades do concreto e do aço estão relacionadas na Tabela 8, em que  $E_{cs}$  é o módulo de elasticidade,  $\mu$  é o coeficiente de Poisson,  $\gamma$  representa o peso específico,  $\alpha$  é o coeficiente de expansão térmica,  $f_{ck}$  é a resistência característica à compressão do concreto,  $f_d$  é a resistência ao escoamento do aço e  $f_u$  é a resistência de ruptura.

**Tabela 4** - Propriedades do concreto e do aço que compõe o flutuante

	<b>Concreto</b>	<b>Aço CA-50</b>
$f_{ck}$ (MPa)	45,0	–
$E_{cs}$ (MPa)	9579,30	$2,10 \times 10^5$
$\mu$	0,20	–
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	25,0	78,5
$\alpha$	$1,20 \times 10^{-5}$	$1,20 \times 10^{-5}$
$f_d$ (kN/m <sup>2</sup> )	–	500000
$f_u$ (kN/m <sup>2</sup> )	–	550000

**Fonte:** Autor (2022)

Os parâmetros do aço utilizados foram os do aço CA-50 e para o concreto foram utilizados parâmetros do concreto armado de  $f_{ck} = 45$  MPa. O módulo de elasticidade do concreto é calculado segundo a NBR 6118:2014:

$$E_{cs} = 0,85 \cdot 5600 \cdot f_{ck}^{0,5} \quad (11)$$

Como citado anteriormente, o projeto executado possui três elementos de placa principais: a laje superior ( $L_s$ ), a laje inferior ( $L_i$ ) e a parede ( $P_a$ ).

### 3.3.2. Modelagem inicial

A modelagem de elementos finitos apresenta um dimensionamento baseado em um desenho isométrico feito a partir de uma malha com coordenadas x, y e z (com escala em metros). As posições dos nós principais no eixo de coordenadas para a modelagem do elemento são mostradas na Tabela 10 a seguir e na Figura 19 tem-se a origem do eixo de coordenadas.

**Tabela 5** - Nós principais de modelagem

X	Y	Z
0	0	1,5
0	0	0,75
0,3	0	0,45
0,3	0	0
0,7	0	0
0,7	0	0,45
10	0	0,75
10	0	1,5
9,7	4,5	0
9,7	4,5	0,75
10	4,5	1,5
0,3	4,5	0
0,3	4,5	0,45
0	4,5	0,75
0	4,5	1,5

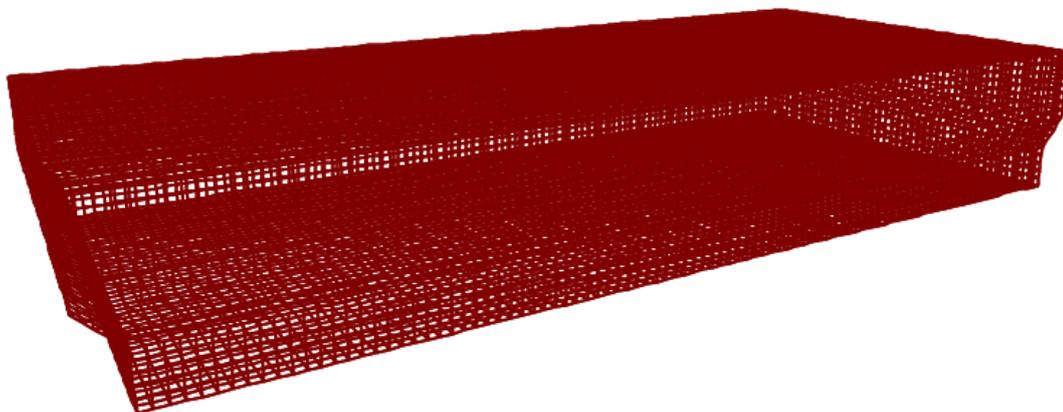
Fonte: Autor (2022)

**Figura 19** - Direção de eixos de coordenadas

Fonte: Autor (2022)

Com as propriedades dos materiais, espessura dos elementos, grelhas e os nós previamente definidos, o *software* gerou a discretização do flutuante em uma malha de elementos finitos. Tais elementos podem ter diversos tamanhos, sendo mais ou menos refinados de acordo com a acurácia e convergência que se deseja na análise. Neste trabalho foi definida uma malha tridimensional, com elementos de casca com dimensões de 10 cm, conforme apresenta a Figura 20.

**Figura 20** - Modelagem inicial do flutuante

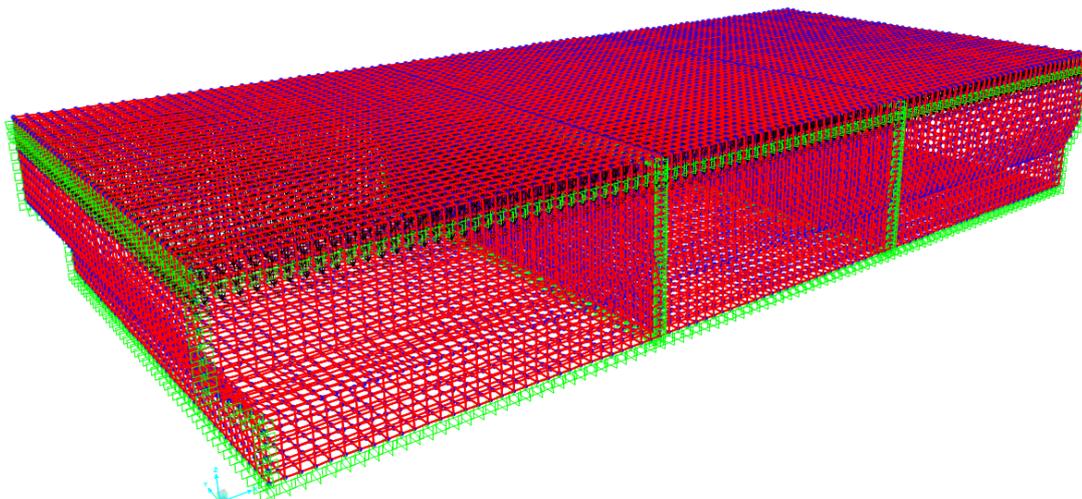


Fonte: Autor (2022)

### **3.3.3. Condições de contorno**

Segundo Hibbeler (2005) para definir as condições de contorno de um corpo os elementos devem ser verificados de forma isolada, traçando os pontos de apoio e identificando as intensidades e direções das forças atuantes. No flutuante as condições de contorno são verificadas em cada elemento de forma individual, ajustando-se aos carregamentos impostos e seus engastes: Figura 21 – engastes, Figura 22 – esforços na laje superior, Figura 23 - esforços na parede e Figura 24 - esforços na laje inferior.

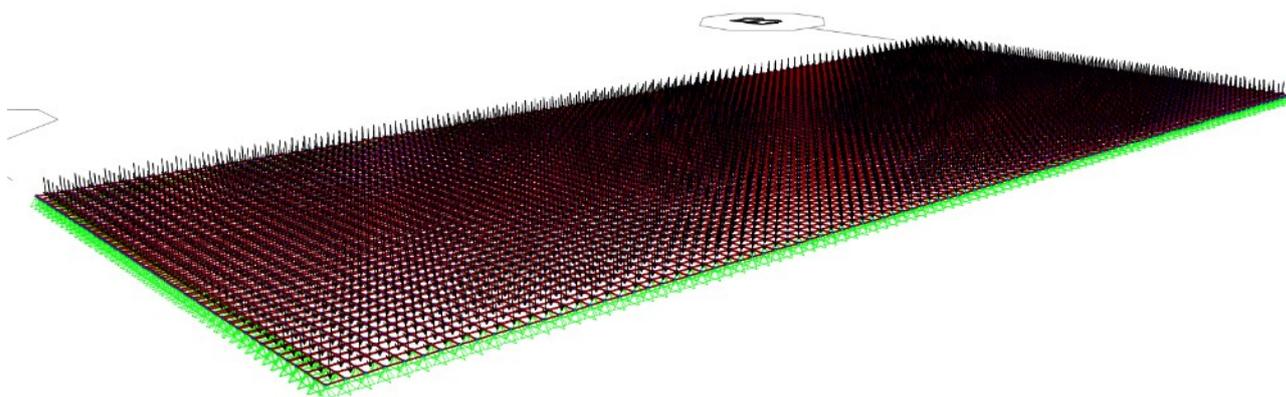
**Figura 21** - Engastes do flutuante indicados em verde



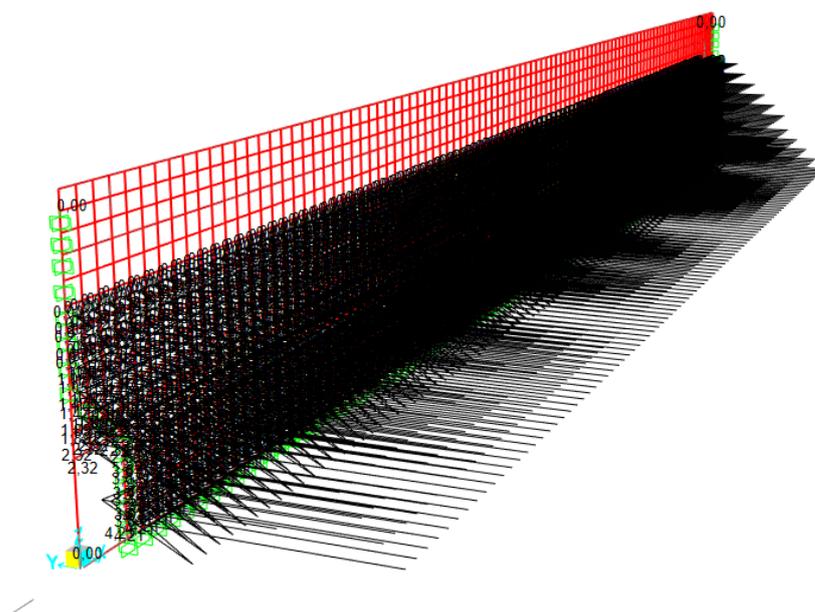
**Fonte:** Autor (2022)

Como visto na Figura 21, o engastamento perfeito é verificado entre a laje superior e paredes, laje inferior e paredes e entre as paredes do flutuante.

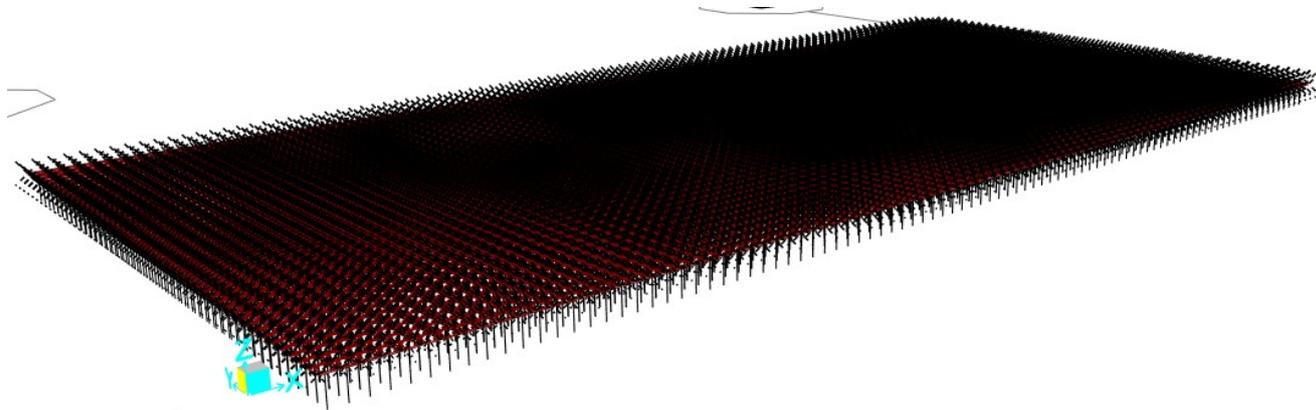
**Figura 22** - Esforços na laje superior



**Fonte:** Autor (2022)

**Figura 23 - Esforços na parede**

Fonte: Autor (2022)

**Figura 24 - Esforços na laje inferior**

Fonte: Autor (2022)

No item 3.2 foram apresentados os carregamentos impostos à estrutura e nas Figuras 22 a 24 ficam explícitas as direções de carregamento de empuxo da água e cargas acidentais.

## 4. RESULTADOS

Após a aplicação das condições de contorno no flutuante discretizado por elementos finitos, são realizadas as simulações numéricas. Como resultados principais, foram obtidos o esforço solicitante de momento fletor, as tensões, os deslocamentos e as deformações. Esses resultados são exibidos pelo *software* como imagens gráficas, em que há uma legenda em que cores são associadas à intensidade de cada resultado obtido. Os momentos fletores obtidos referem-se aos esforços gerados sem a majoração dos carregamentos aplicados e essa majoração, necessária ao dimensionamento das armaduras de flexão do flutuante, conforme descrito no item 2.6, é realizada pelo autor durante o desenvolvimento do dimensionamento.

Os próximos itens trazem as imagens gráficas dos seguintes resultados obtidos para o flutuante: deformações, deslocamentos e momentos fletores.

### 4.1. Pós-processamento

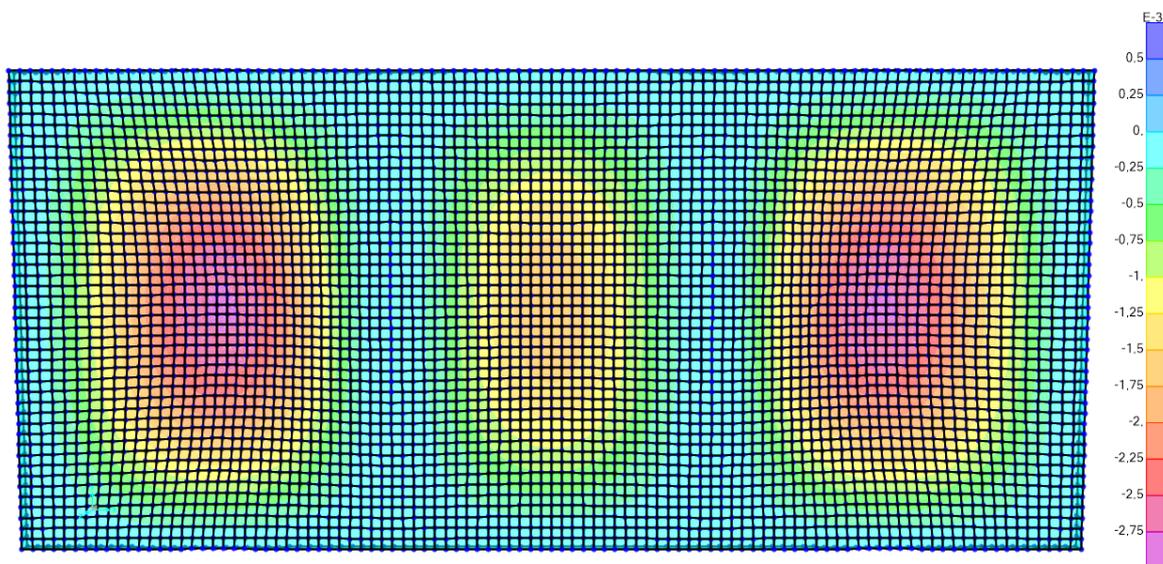
Após as definições dos materiais e parâmetros de modelagem referentes ao flutuante é possível processar a modelagem feita no *software* SAP2000, obtendo os resultados de deformações, momentos fletores e quantidades mínimas de armaduras para cada elemento.

#### 4.1.1. Deformações e deslocamentos no flutuante

É possível observar na Figura 25 as deformações geradas pelos carregamentos impostos a cada elemento que compõe o flutuante (carregamento do peso próprio, do revestimento, das cargas acidentais e do empuxo gerado pela água). Para melhor visualização, utiliza-se a escala  $\times 200$ .

As deformações acentuadas podem ser observadas em tonalidades mais fortes, como o vermelho para a compressão e azul para tração. Na Figura 25 é observado o fenômeno de flexão, ocorrendo a compressão na parte superior a linha neutra e tração na parte inferior a linha neutra da laje.

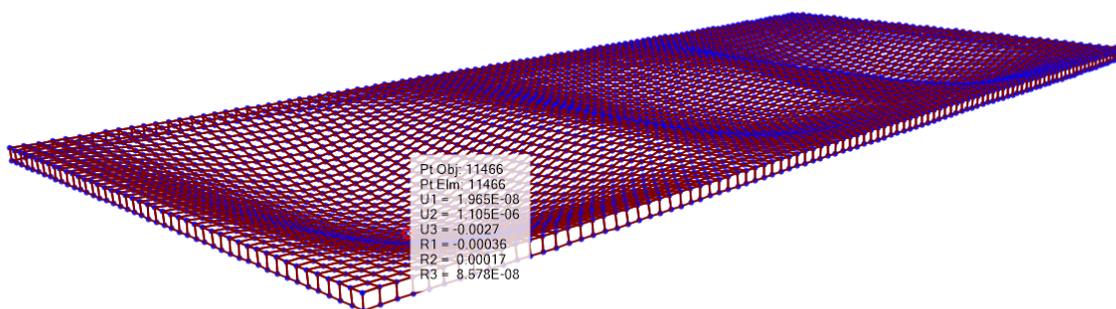
**Figura 25** – Deslocamento no eixo Z na laje superior



**Fonte:** Autor (2022)

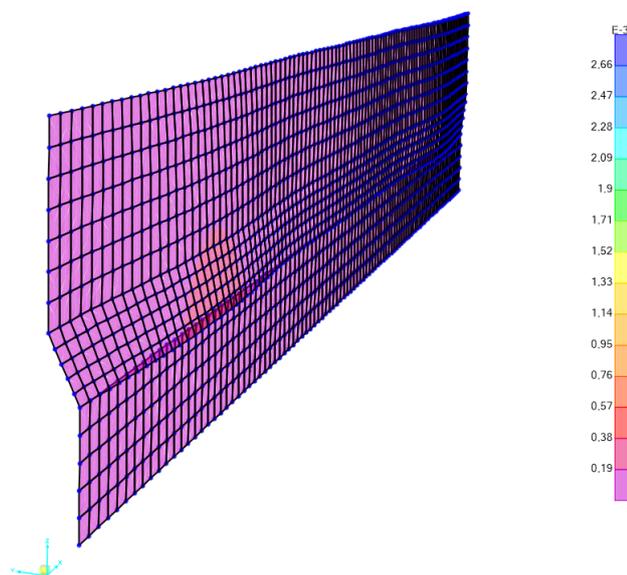
A Figura 26 mostra os deslocamentos da laje superior, indicando que a flexão devido aos carregamentos gera flechas na região centrais dessa laje.

**Figura 26** - Deformada da laje superior



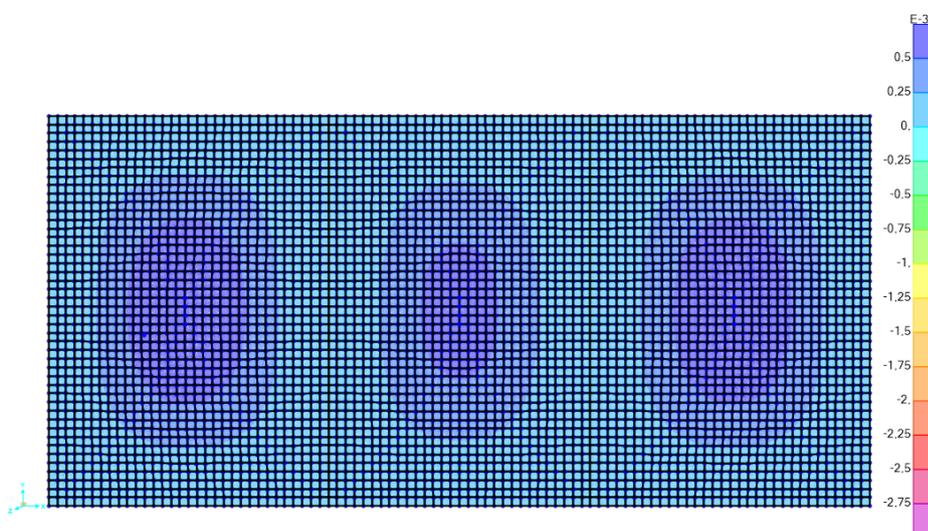
**Fonte:** Autor (2022)

Na Figura 27 são mostrados os deslocamentos (ou deformações) desenvolvidos na parede do flutuante. Observa-se que há tensões de tração em regiões da parede devido a laje superior e empuxo horizontal.

**Figura 27 - Deslocamento em Y na parede**

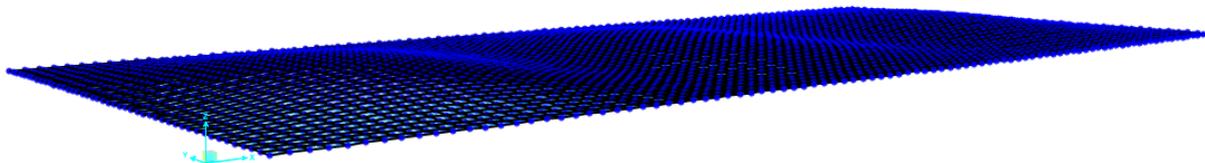
Fonte: Autor (2022)

Por fim, a Figura 28 apresenta os deslocamentos e a Figura 29 a deformada da laje inferior. Observa-se que a flexão devido aos carregamentos gera flechas na região tal dessa laje, onde o principal deslocamento é observado devido ao empuxo vertical, diferente da laje superior à flexão ocorre a compressão na parte inferior a linha neutra e tração na parte superior a linha neutra da laje.

**Figura 28 - Deslocamento em Z na laje inferior**

Fonte: Autor (2022)

**Figura 29** - Deformada em Z na laje inferior



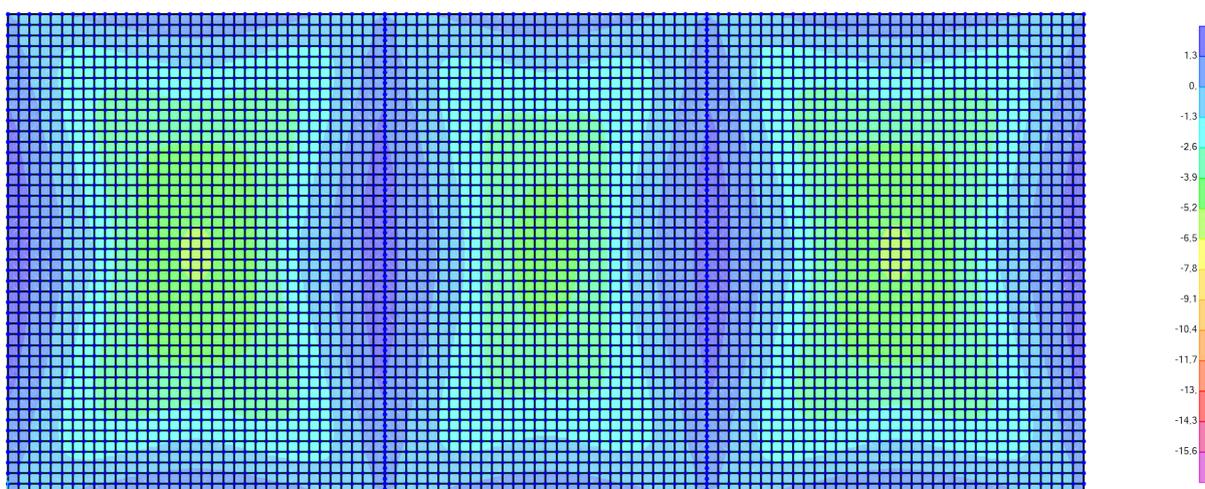
Fonte: Autor (2022)

#### 4.1.2. Momentos fletores gerados no flutuante

Os momentos fletores gerados pelos carregamentos impostos aos elementos que compõem o flutuante são representados por momentos gerados no eixo  $x$  ( $M_{11}$ ), momentos gerados no eixo  $y$  ( $M_{22}$ ), ambos referentes às lajes, e momentos gerados no eixo  $z$  ( $M_{33}$ ), referente à parede. A unidade de momento fletor gerada é  $kN.m$  e a escala de cores indica que os momentos positivos são os de cor azul e os momentos negativos são o de cor vermelha.

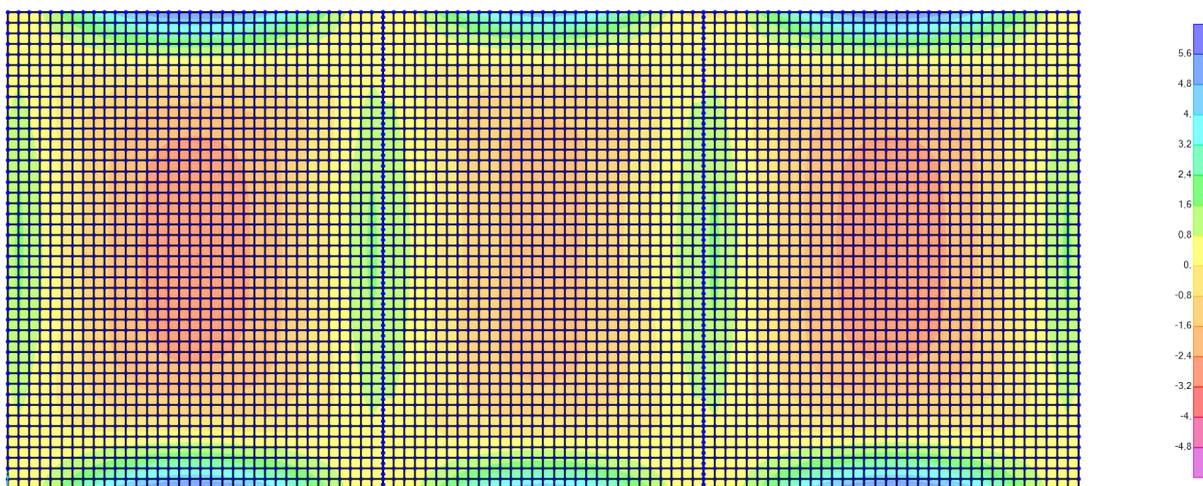
Da Figura 30 observa-se que os maiores momentos fletores gerados na laje superior no eixo  $x$  são as ordem de  $5,28 kN.m$ , indicado pela cor verde.

**Figura 30** - Momentos  $M_{11}$  na laje superior



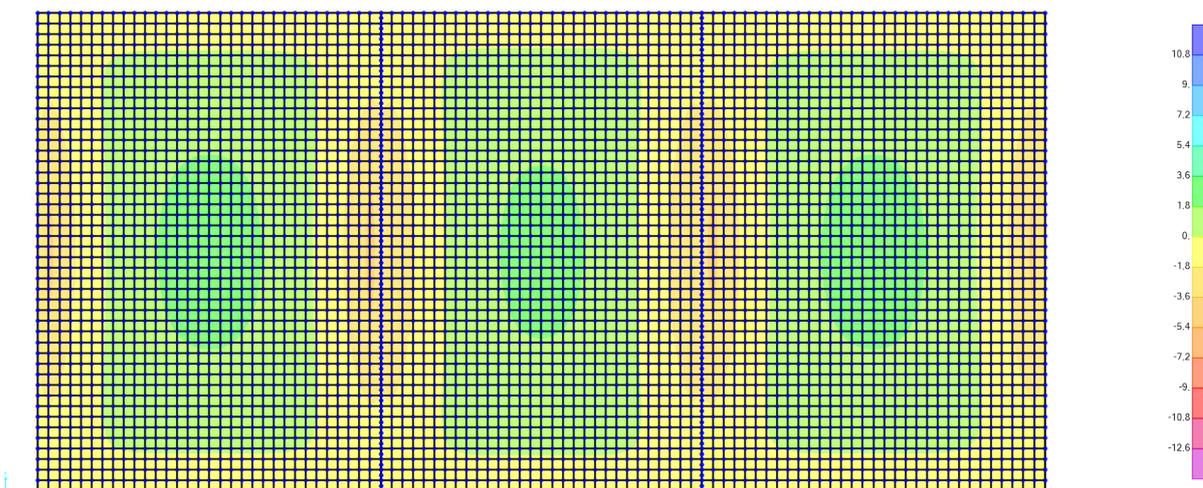
Fonte: Autor (2022)

A Figura 31 indica que os maiores momentos fletores na laje superior gerados no eixo  $y$  são as ordem de  $4,16 kN.m$ , indicado pela cor vermelha

**Figura 31 - Momentos M22 na laje superior**

Fonte: Autor (2022)

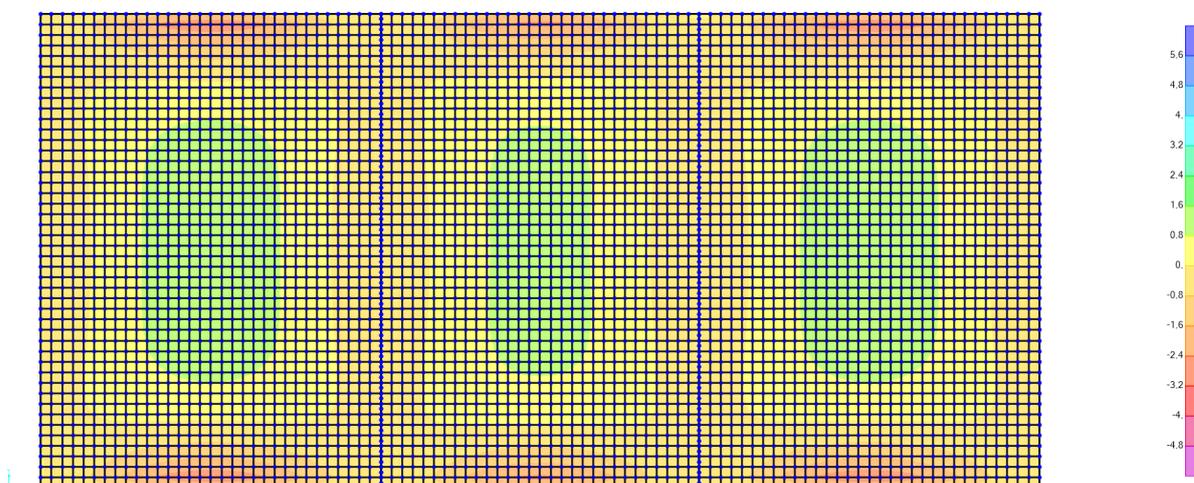
Na laje inferior, observa-se na Figura 32 observa-se a distribuição dos momentos fletores com maiores intensidades na região central da laje, com valor de  $2,9 \text{ kN.m}$ .

**Figura 32 - Momentos M11 na laje inferior**

Fonte: Autor (2022)

A Figura 33 apresenta a distribuição de momentos fletores no eixo  $y$  da laje inferior, sendo os maiores momentos fletores da ordem de  $2,35 \text{ kN.m}$  para momentos fletores positivos, além de ter mesma intensidade para os momentos fletores negativos na região de engaste com a parede.

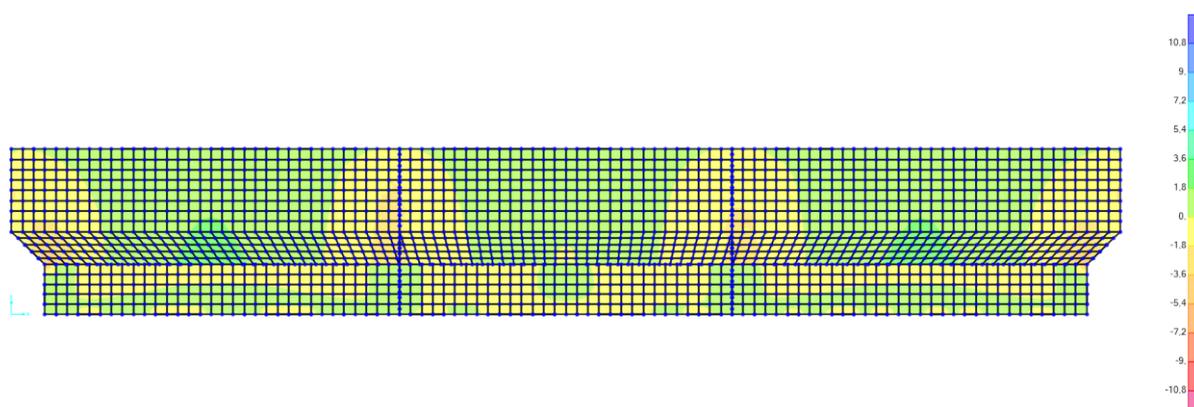
**Figura 33 - Momentos M22 na laje inferior**



Fonte: Autor (2022)

Na parede do flutuante apresenta-se na Figura 34 a distribuição dos momentos fletores no eixo  $x$ . Observa-se que o momento fletor mais intenso tem o valor de  $2,44 \text{ kN.m}$  na região central da parede e que nas regiões de engaste com a parede interna o momento é nulo.

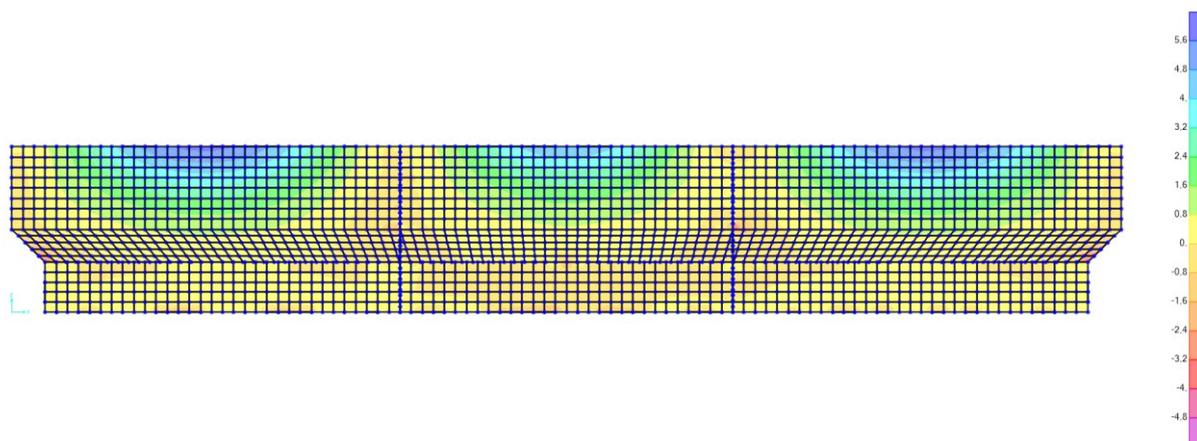
**Figura 34 - Momentos M11 na parede**



Fonte: Autor (2022)

A Figura 35 ilustra a distribuição dos momentos fletores no eixo  $z$  da parede do flutuante. Os momentos de maiores valores encontram-se na parte superior da parede,  $5,82 \text{ kN.m}$ , onde há o apoio das lajes, tal fenômeno ocorre devido ao carregamento da laje superior ser transmitido para as paredes do flutuante.

**Figura 35 - Momentos M33 na parede**



**Fonte:** Autor (2022)

Como visto nas Figuras 30 a 35, os momentos fletores máximos calculados pelo SAP2000 então de conforme com a Tabela 6 a seguir:

**Tabela 6 - Momentos fletores máximos**

<b>Elemento</b>	<b>Direção</b>	<b>Momentos (<math>kN \cdot m</math>)</b>
Laje superior	$x$	5,28
	$y$	4,16
Laje inferior	$x$	2,9
	$y$	2,35
Paredes	$x$	2,44
	$z$	5,82

**Fonte:** Autor (2022)

Majorando os momentos pelo coeficiente  $\gamma_{\varepsilon} = 1,4$ , conforme o item 2.5 obtêm-se os momentos fletores de cálculo apresentados na Tabela 7.

**Tabela 7- Momentos máximos majorados**

<b>Elemento</b>	<b>Direção</b>	<b>Momentos (<math>kN \cdot m</math>)</b>
Laje superior	$x$	7,39
	$y$	5,82
Laje inferior	$x$	4,06
	$y$	3,29
Paredes	$x$	3,42
	$z$	8,15

**Fonte:** Autor (2022)

O dimensionamento das armaduras dos elementos que constituem o flutuante é efetuado com base nos momentos fletores máximos de cálculo apresentados na Tabela 7. Assim, o próximo item traz as etapas de dimensionamentos das armaduras.

#### **4.1.3. Detalhamento de armaduras do flutuante**

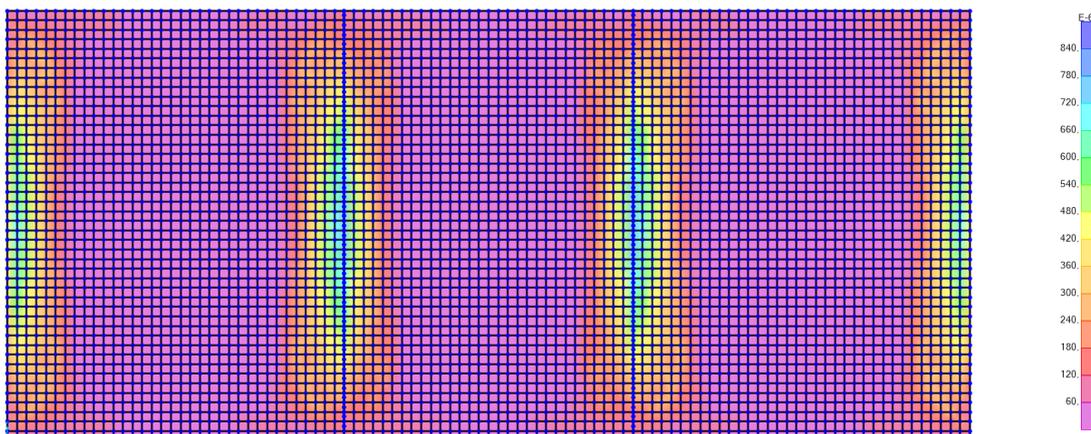
Neste trabalho as armaduras para as lajes e paredes de concreto armado que constituem o flutuante são calculadas com o *software* SAP2000, além de respeitar os parâmetros da NBR6118 (2014).

Primeiramente, classifica-se a classe de agressividade ambiental do local da obra, conforme o Quadro 1 do item 2.4.1. No caso do flutuante estudado, o ambiente marinho onde estará inserido ao longo de sua vida útil é classificado como de Classe de Agressividade Ambiental CAA IV, sendo muito forte e com risco de deterioração elevado.

Para a CAA IV o item 2.4.2 no Quadro 2 mostra que a relação água/cimento para concreto armado deve ser menor ou igual a 0,45 e no item 2.4.3 no Quadro 2 o cobrimento nominal mínimo para lajes deve ser de 45 *mm*, podendo ser diminuído em até 5 *mm* para concreto armado com  $f_{ck}$  acima do exigido conforme a Quadro 3 do item 2.4.4, que é  $f_{ck} = 40 \text{ MPa}$ , no caso será utilizado o cobrimento nominal de 40 *mm*, pois o concreto utilizado é de  $f_{ck} = 45 \text{ MPa}$ .

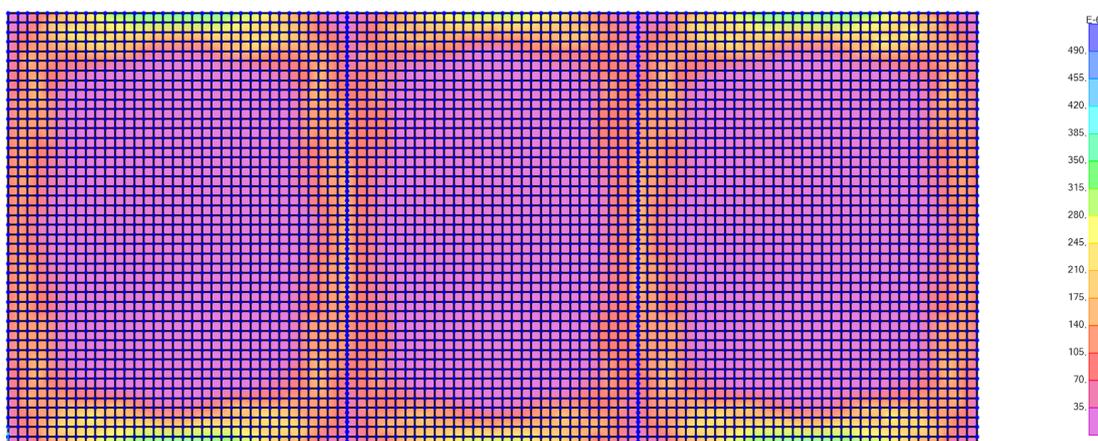
Com os parâmetros do concreto e aço definidos conforme a Tabela 4 e as alturas úteis já definidas, o *software* SAP2000 calcula as áreas necessárias de armaduras negativas e positivas para as duas principais direções de cada elemento, conforme as Figuras 36 a 47.

**Figura 36** - Área de armadura negativa na direção X da laje superior



Fonte: Autor (2022)

**Figura 37**- Área de armadura negativa na direção Y da laje superior

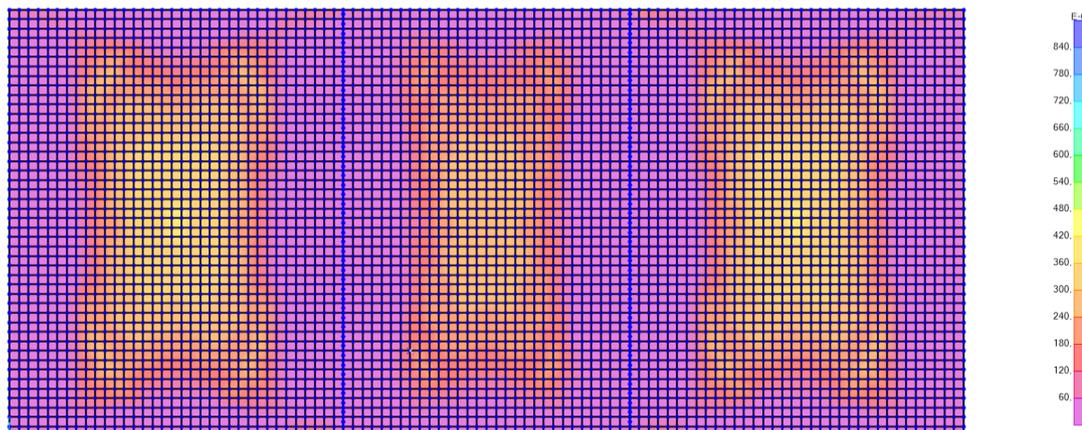


Fonte: Autor (2022)

Nas Figuras 36 e 37 é possível visualizar onde é preciso armar a laje superior para os momentos negativos, em que a armadura é posicionada na parte superior a laje com a função de fazer a ligação entre as lajes e paredes proporcionando rigidez e monoliticidade ao conjunto dos elementos estruturais.

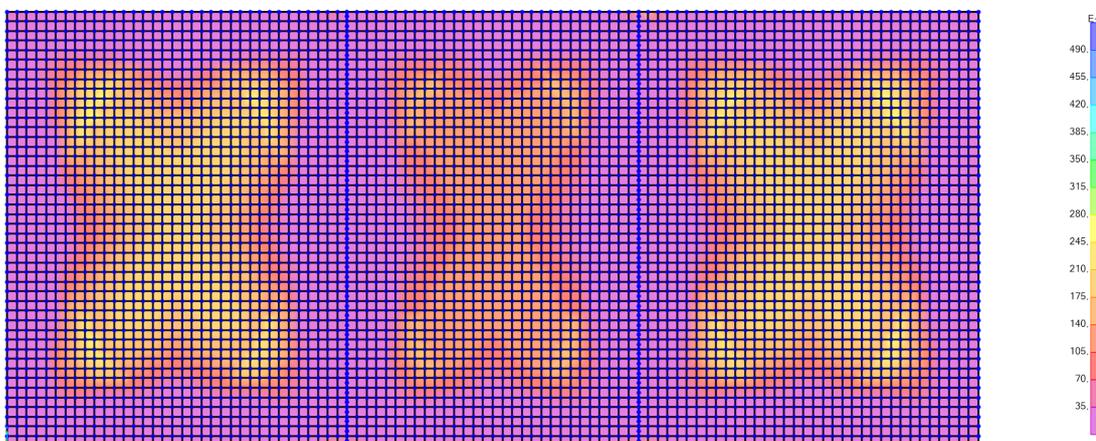
Para direção longitudinal (X) é necessária uma área mínima de aço de  $3,61 \text{ cm}^2/\text{m}$  nas ligações de lajes e paredes, já na direção transversal (Y)  $1,86 \text{ cm}^2/\text{m}$  nas ligações entre as paredes.

**Figura 38** - Área de armadura positiva na direção X da laje superior



Fonte: Autor (2022)

**Figura 39**- Área de armadura positiva na direção Y da laje superior

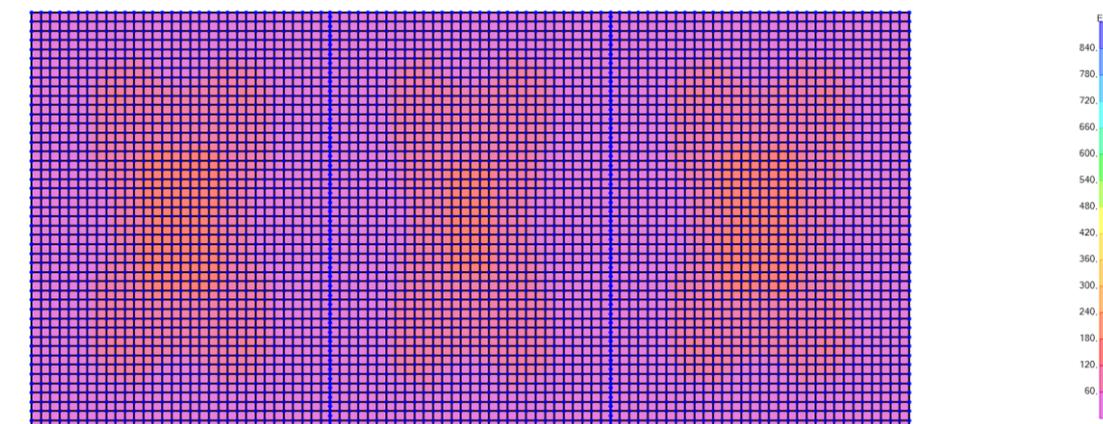


Fonte: Autor (2022)

A área da armadura principal da laje superior pode ser visualizada nas Figuras 38 e 39, que atuam suportando os momentos positivos. Tais armaduras se posicionam na parte inferior da laje garantindo a resistência à tração do elemento em relação aos esforços atuantes. A área mínima de aço necessária para suprir os esforços são: para direção longitudinal (X)  $7,08 \text{ cm}^2/\text{m}$  e para direção transversal (Y)  $3,33 \text{ cm}^2/\text{m}$ . É importante ressaltar que estes esforços

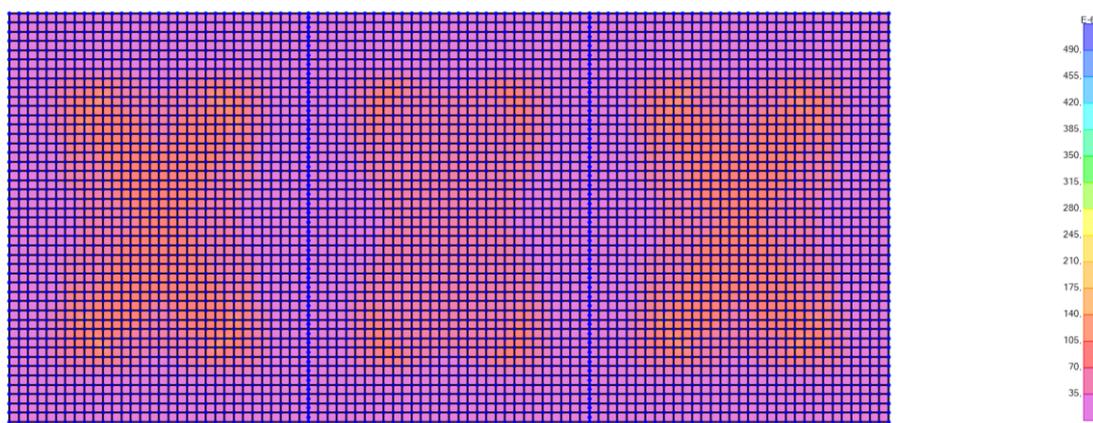
máximos são concentrados na parte central da laje e seus extremos são praticamente nulos.

**Figura 40-** Área de armadura positiva na direção X da laje inferior



Fonte: Autor (2022)

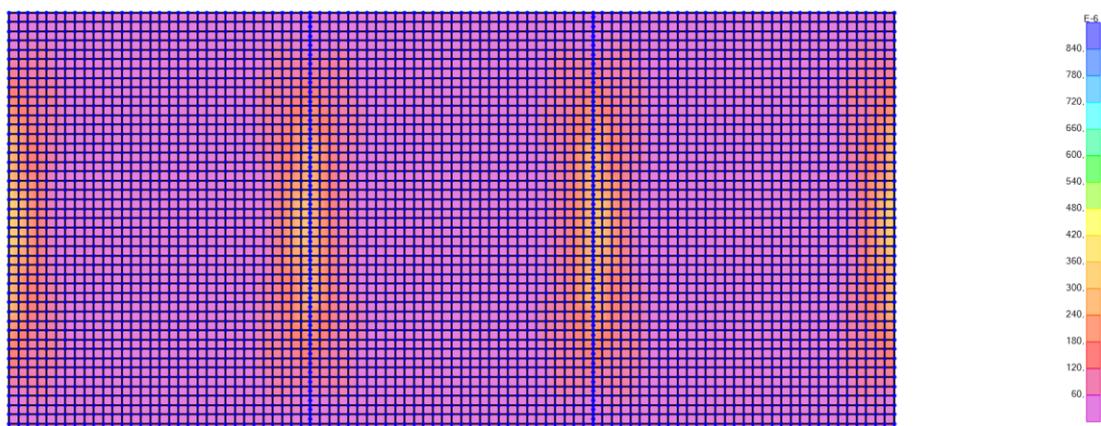
**Figura 41-** Área de armadura positiva na direção Y da laje inferior



Fonte: Autor (2022)

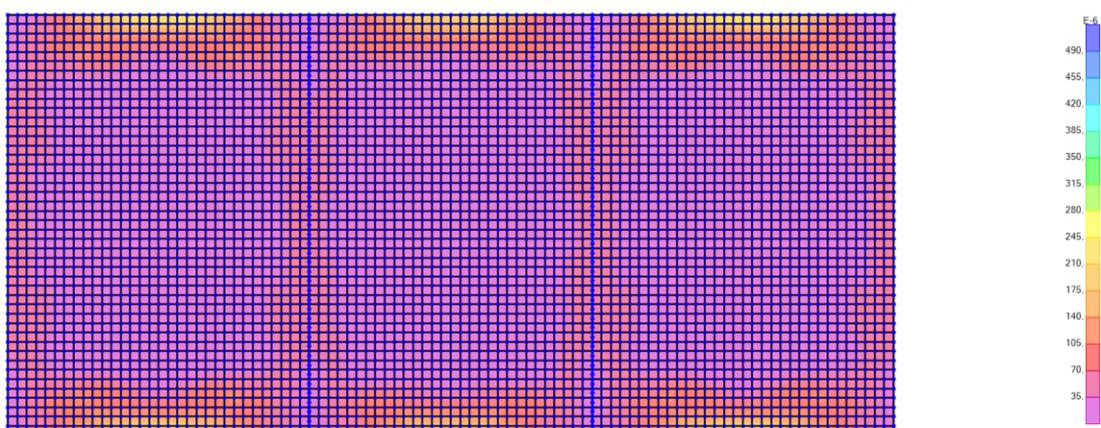
Para armação positiva e principal da laje inferior, resistindo aos esforços de tração impostos a este elemento, é necessária uma área de aço de  $2,85 \text{ cm}^2 / \text{m}$  para direção longitudinal (X) e  $2,02 \text{ cm}^2 / \text{m}$  para a direção transversal (Y). As Figuras 40 e 41 mostram onde, faz-se necessário a utilização destas armaduras.

**Figura 42-** Área de armadura negativa na direção X da laje inferior



**Fonte:** Autor (2022)

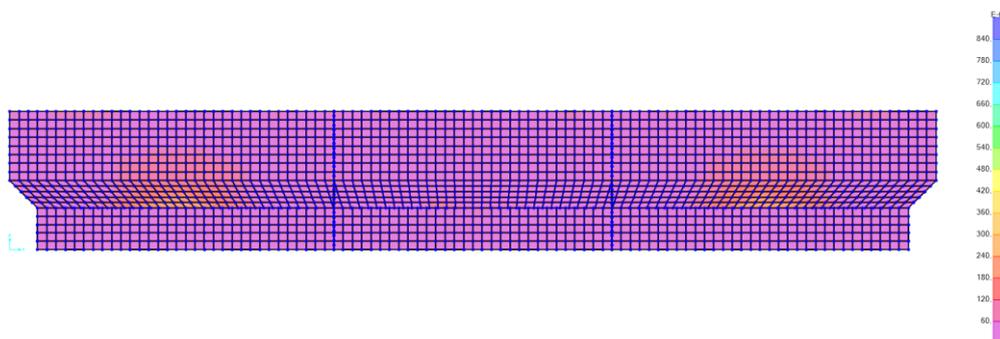
**Figura 43-** Área de armadura negativa na direção Y da laje inferior



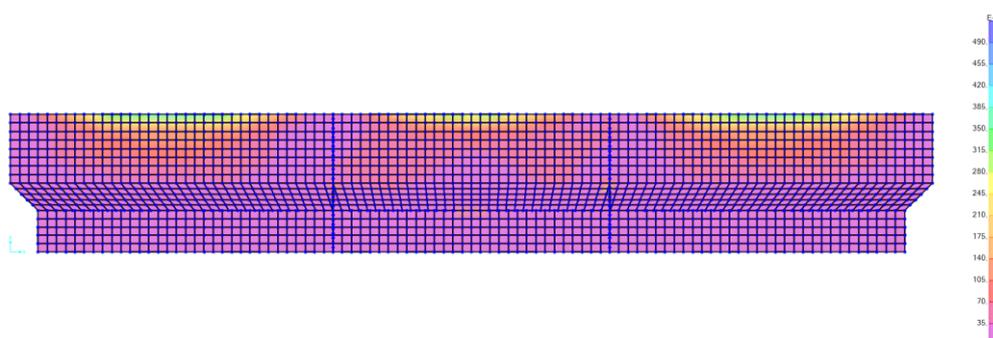
**Fonte:** Autor (2022)

Igualmente à laje superior, a laje inferior, conforme as Figuras 42 e 43, precisa suportar esforços de momentos negativos nas ligações entre lajes e paredes da estrutura, sendo necessária uma área de aço de  $1,4 \text{ cm}^2/\text{m}$  para direção longitudinal (X) e  $0,74 \text{ cm}^2/\text{m}$  para a direção transversal (Y). É importante ressaltar que estes esforços se perfazem exclusivamente em áreas de ligações entre os elementos.

Para as paredes do flutuante, as armaduras serão detalhadas nos principais eixos que os esforços precisam ser assegurados, longitudinalmente pelo eixo X e transversalmente pelo eixo Z.

**Figura 44-** Área de armadura positiva na direção X da parede

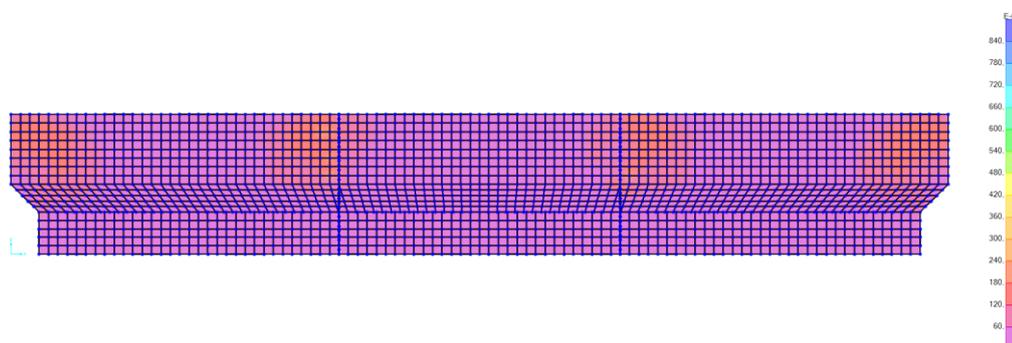
Fonte: Autor (2022)

**Figura 45-** Área de armadura positiva na direção Z da parede

Fonte: Autor (2022)

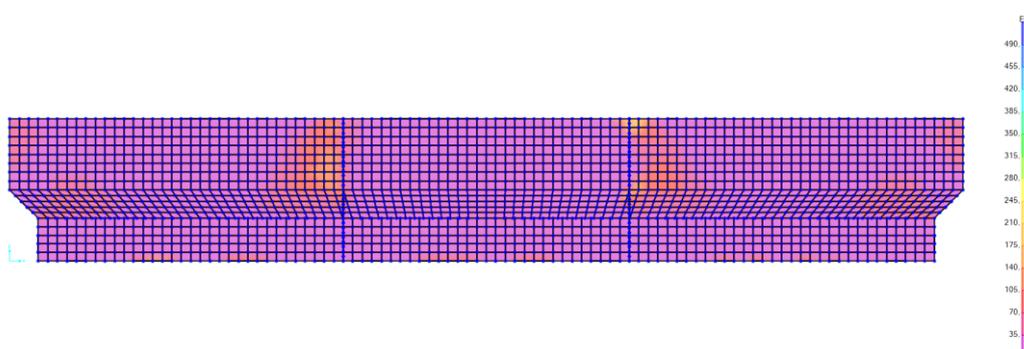
Conforme as Figuras 44 e 45, a armadura positiva e principal para as paredes do flutuante estão com maior influência na parte superior da parede pela incidência das cargas de atracação e compatibilização de momentos da laje superior. As áreas de aço necessárias para suprir os momentos fletores positivos na parede são de  $2,1 \text{ cm}^2/\text{m}$  para direção longitudinal (X) e  $3,6 \text{ cm}^2/\text{m}$  para direção transversal (Z).

**Figura 46-** Área de armadura negativa na direção X da parede



Fonte: Autor (2022)

**Figura 47-** Área de armadura negativa na direção Z da parede



Fonte: Autor (2022)

Por fim, as áreas de aço para os momentos negativos não são tão necessários para as paredes, visto nas Figuras 46 e 47, pelo fato de não apresentarem compatibilização de momentos muito elevados. As áreas de aço necessárias para resistir aos momentos fletores negativos na parede são de  $1,4 \text{ cm}^2/\text{m}$  para direção longitudinal (X) e  $1,7 \text{ cm}^2/\text{m}$  para direção transversal (Z).

Utilizando os gráficos gerados pelo SAP2000, das Figuras 36 a 47, é possível detalhar as armaduras do flutuante frente aos esforços de tração, conforme a Tabela 8:

**Tabela 8** - Detalhamento estrutural exigido pelo SAP2000

<b>Laje superior</b>			<b>Área de aço (<math>cm^2/m</math>)</b>
Armadura positiva	$A_{s,p_x}(X)$	40N1 Ø10mm c/10cm - 993cm	7,85
	$A_{s,p_y}(Y)$	70 N2 Ø8mm c/14cm - 443cm	3,59
Armadura negativa	$A_{s,n_x}(X)$	36N3 Ø8mm c/12,5cm -variável	4,021
	$A_{s,n_y}(Y)$	60N5 Ø6,3mm c/16cm - 105cm	1,95
<b>Laje inferior</b>			<b>Área de aço (<math>cm^2/m</math>)</b>
Armadura positiva	$A_{s,p_x}(X)$	45N6 Ø6,3mm c/10cm - 933cm	3,12
	$A_{s,p_y}(Y)$	66N7 Ø6,3mm c/14cm - 443cm	2,23
Armadura negativa	$A_{s,n_x}(X)$	23N8 Ø6,3mm c/20cm - variável	1,56
	$A_{s,n_y}(Y)$	47N10 Ø6,3mm c/20cm - 105cm	1,56
<b>Parede</b>			<b>Área de aço (<math>cm^2/m</math>)</b>
Armadura positiva	$A_{s,p_x}(X)$	11 N11 Ø6,3mm c/14cm - variável	2,123
	$A_{s,p_z}(Z)$	74 N12 Ø8,0mm c/12,5cm - 142cm	4,02
Armadura negativa	$A_{s,n_x}(X)$	8 N13 Ø6,3mm c/15cm - variável	2,08
	$A_{s,n_z}(Z)$	56 N15 Ø6,3mm c/15cm - 172cm	2,08

Fonte: Autor (2022)

Conforme a NBR 6118 (2014) as armaduras mínimas ( $A_{s,min}$ ) para lajes retangulares armadas em duas direções e  $f_{ck} = 45 MPa$  são calculadas conforme a Equação 13 a seguir:

$$A_{s,min} = 0,67 \cdot 0,259 \cdot b_w \cdot h \quad (13)$$

As armaduras mínimas calculadas são:

$$\text{Laje superior} - A_{s,min} = 1,39cm^2/m;$$

$$\text{Laje inferior} - A_{s,min} = 1,56cm^2/m;$$

$$\text{Parede} - A_{s,min} = 2,08cm^2/m.$$

Analisando as armaduras mínimas e calculadas pelo *software* SAP2000, o detalhamento utilizando a tabela de armaduras do Anexo A, têm-se a Tabela 9.

**Tabela 9 - Área de armadura utilizada**

<b>Laje superior</b>		
	Exigido pelo SAP2000	Utilizado no trabalho
$A_{s,p_x} (cm^2/m)$	7,08	7,85
$A_{s,p_y} (cm^2/m)$	3,33	3,59
$A_{s,n_x} (cm^2/m)$	3,61	4,021
$A_{s,n_y} (cm^2/m)$	1,86	1,95
<b>Laje inferior</b>		
	Exigido pelo SAP2000	Utilizado no trabalho
$A_{s,p_x} (cm^2/m)$	2,85	3,12
$A_{s,p_y} (cm^2/m)$	2,02	2,23
$A_{s,n_x} (cm^2/m)$	1,4	1,56
$A_{s,n_y} (cm^2/m)$	0,75	1,56
<b>Parede</b>		
	Exigido pelo SAP2000	Utilizado no trabalho
$A_{s,p_x} (cm^2/m)$	2,1	2,123
$A_{s,p_z} (cm^2/m)$	3,6	4,02
$A_{s,n_x} (cm^2/m)$	1,4	2,08
$A_{s,n_z} (cm^2/m)$	1,7	2,08

Fonte: Autor (2022)

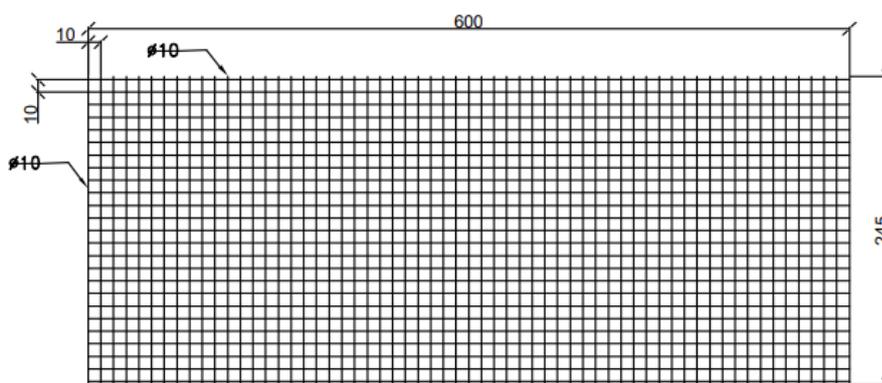
No próximo capítulo é feita a análise dos resultados obtidos, apresentando-se também o detalhamento das armaduras feito pela Empresa X.

## 5. ANÁLISE DE DADOS

Objetiva-se neste capítulo comparar o detalhamento estrutural das armaduras do flutuante calculadas pelo estudo realizado neste trabalho e o fornecido pela Empresa X. Optou-se por realizar uma comparação para cada elemento do flutuante. É importante ressaltar que o flutuante modelo, feito pela Empresa X, e o flutuante dimensionado através do SAP2000 utilizaram as mesmas dimensões, como espessuras, comprimentos e larguras, e parâmetros de materiais, como concreto com  $f_{ck} = 45 \text{ MPa}$  e aço CA-50.

A Empresa X optou por um detalhamento estrutural simplificado, utilizando painéis de telas de aço CA-50, do tipo Q 785, com espessamentos de largura x comprimento de  $10 \times 10 \text{ cm}$  e barras de aço de  $10 \text{ mm}$  de diâmetro ( $12,46 \text{ kg/m}^2$ ), conforme a Figura 48.

**Figura 48** – Planta painel de tela tipo Q 785

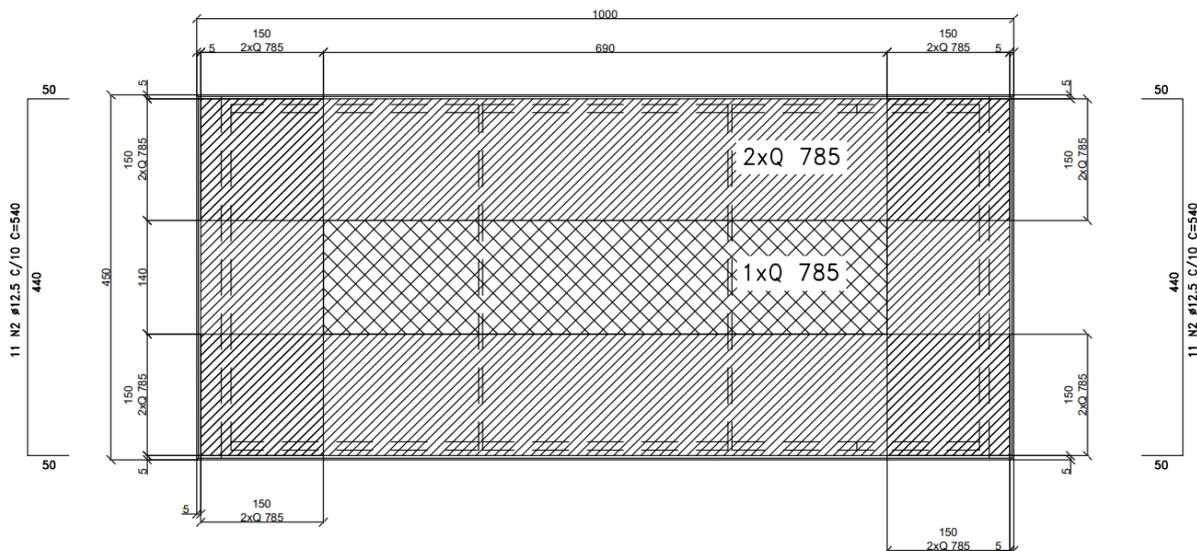


PLANTA – PAINEL DE TELA TIPO Q 785 ( $12,46 \text{ kg/m}^2$ )

**Fonte:** Empresa X (2022)

Para a laje superior a Empresa X, utilizou como armadura principal um painel de tela tipo Q 785 nas extremidades e no centro do flutuante foi utilizado um painel único, conforme a planta da Figura 49.

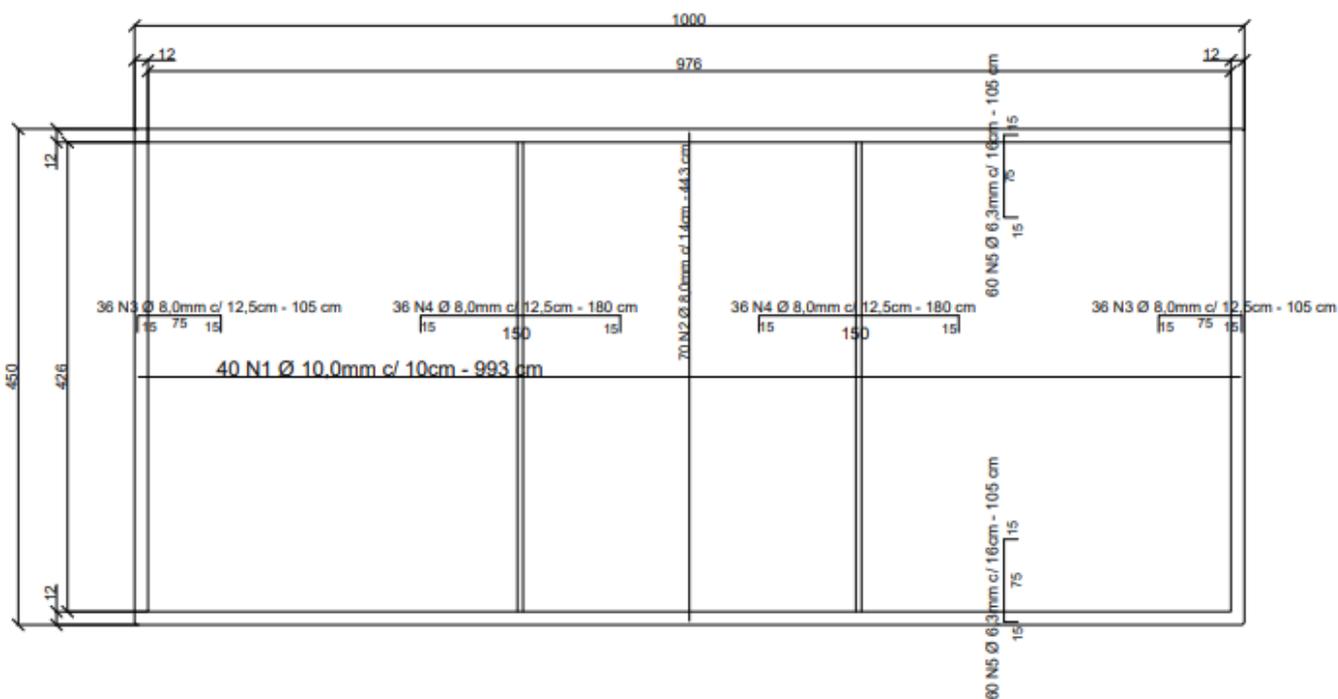
**Figura 49 - Planta laje superior do projeto executado**



Fonte: Empresa X (2022)

Pelas Figuras 30 e 31 é evidente que os maiores momentos fletores positivos estão situados no centro da laje, onde há menores quantidades de aço no projeto modelo. Para o projeto do método em estudo, foram utilizadas armações positivas e negativas conforme, a Figura 50.

**Figura 50 - Planta laje superior do método em estudo**

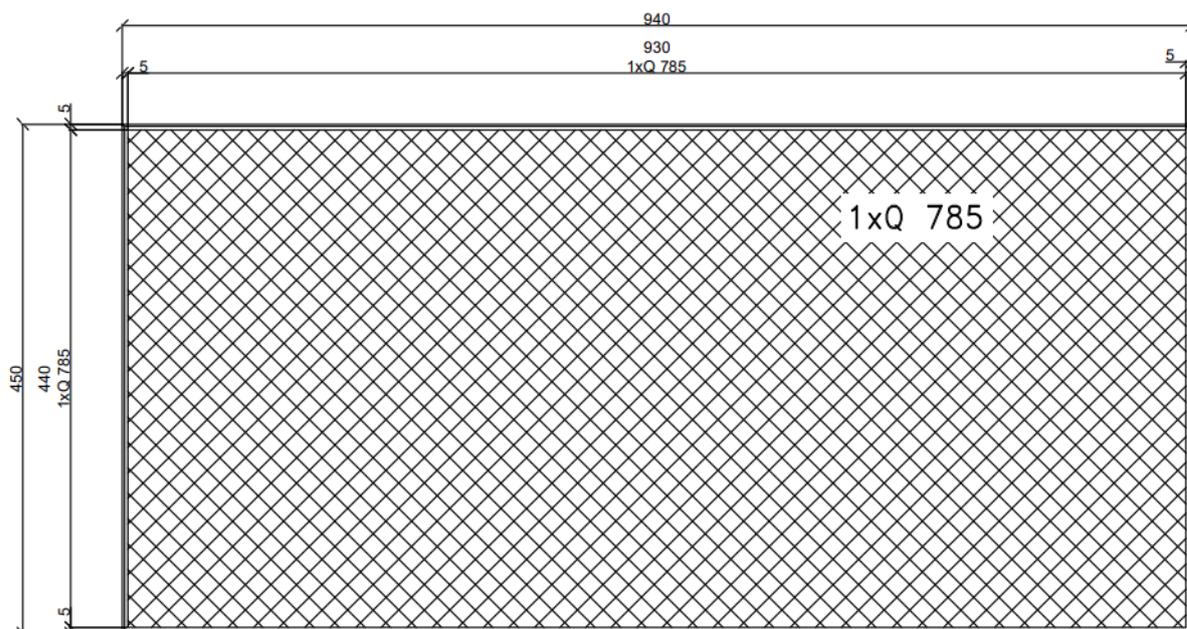


**PLANTA - LAJE SUPERIOR**

Fonte: Autor (2022)

Para a laje inferior, a Empresa X utilizou um painel de tela simples Q 785, conforme a Figura 51, Conforme as Figuras 32 e 33, os momentos fletores são menores que na laje superior.

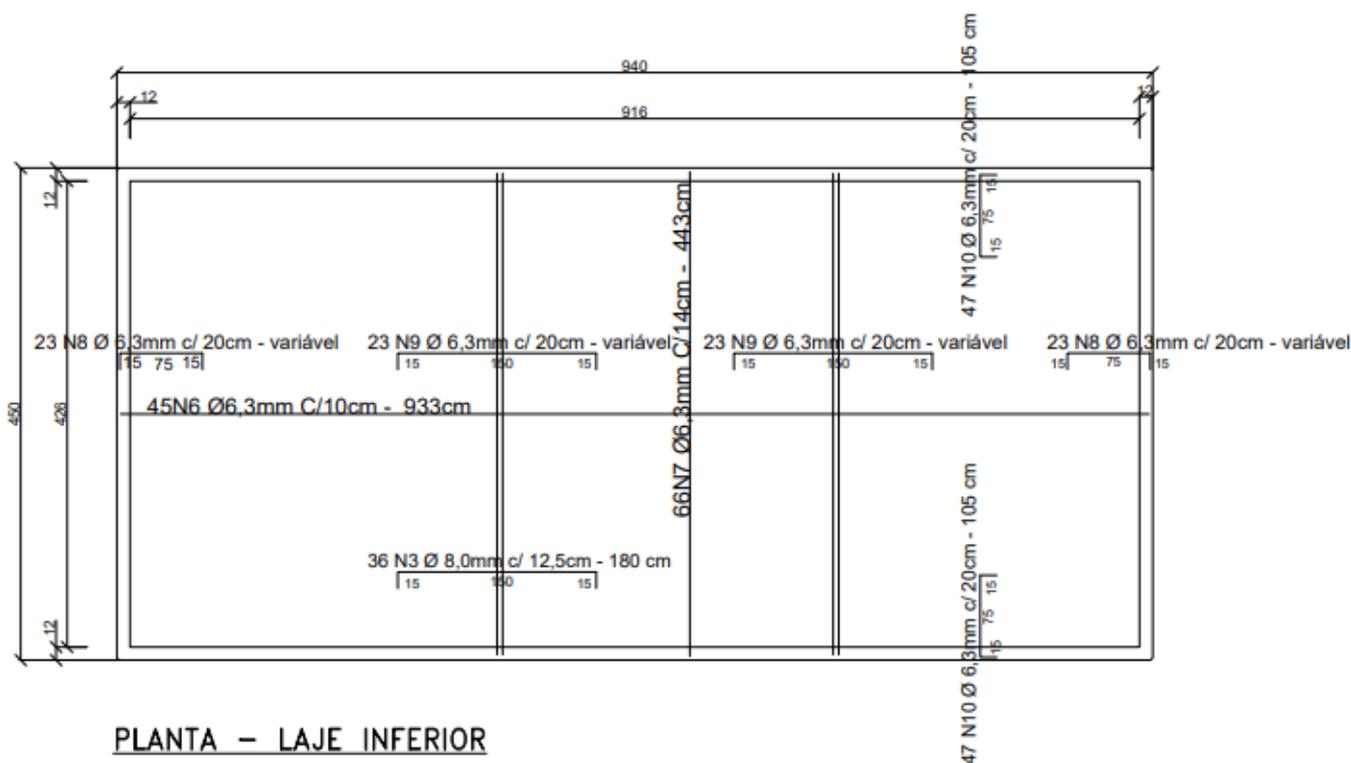
**Figura 51** - Planta laje inferior projeto executado



**Fonte:** Empresa X (2022)

Para o dimensionamento utilizando o SAP2000, o detalhamento é realizado com base nas Figuras 40 e 43, verificando-se as áreas de armaduras positivas e negativas necessárias para esta laje. Portanto, diferente do detalhamento feito pela Empresa X, o projeto desenvolvido neste trabalho utilizou as armaduras positivas acima da linha neutra da laje inferior. O detalhamento é verificado na Figura 52.

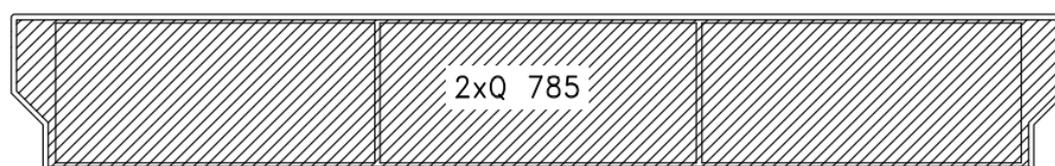
**Figura 52** - Projeto estrutural da laje inferior do método em estudo



Fonte: Autor (2022)

Por fim, as paredes são detalhadas pela Empresa X com painel duplo de tela Q 785, reforçando a parede inteira, como visto na Figura 53.

**Figura 53** - Projeto estrutural da parede do projeto modelo



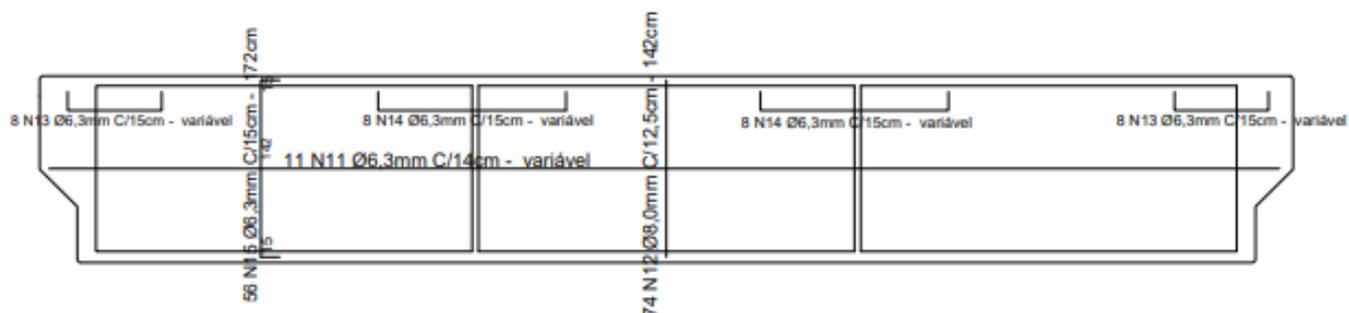
**PLANTA – PAREDE**

Fonte: Empresa X (2022)

Com um estudo mais detalhado, analisado pelos momentos fletores das Figuras 34 e 35 e as áreas de armaduras necessárias em cada parte do elemento visto nas Figuras 44 a 47, chega-se em um projeto estrutural para a parede conforme a Figura 54, em que é utilizada uma quantidade significativamente menor de aço para assegurar a resistência aos esforços de tração da parede, e reforço somente aos momentos fletores na região superior

da parede, além de garantir melhor a distribuição dos esforços entre os elementos.

**Figura 54** - Projeto estrutural da parede pelo método em estudo



### PLANTA – PAREDE

Fonte: Autor (2022)

Para realizar uma análise comparativa geral da variação da quantidade de aço CA-50 utilizada no dimensionamento realizado com o SAP2000 e no efetuado pela Empresa X, apresentam-se, para cada caso, na Tabela 10 a quantidade de aço em massa (kg), a variação e a diferença percentual, em relação à laje superior, laje inferior e parede.

**Tabela 10** - Variação de aço CA-50 entre os projetos

Total da massa do aço utilizado				
	SAP2000 (kg)	Empresa X (kg)	Variação (kg)	Variação (%)
Laje superior	616,92	774,05	157,13	20,29%
Laje inferior	230,79	498,99	268,2	53,74%
Parede	108,85	249,03	140,18	56,29%
<b>TOTAL</b>	<b>956,56</b>	<b>1522,07</b>	<b>565,51</b>	<b>37,15%</b>

Fonte: Autor (2022)

Verificando-se os resultados para cada elemento, a laje superior obteve a menor diferença, de aproximadamente 20%, sendo possível supor que isso ocorreu pelo fato de ser um elemento com carregamentos usuais, comuns a estruturas em geral. Já para a laje de inferior e as paredes foram observadas diferenças elevadas, de 53% e 56% respectivamente. Infere-se que essas diferenças possam ser explicadas pelo método simplificado de análise dos carregamentos feitos pela Empresa X, além de que o projeto do estudo fez o

reforço de armaduras somente nas regiões onde se fez necessário com os gráficos gerados pelo SAP2000.

Na análise realizada com o auxílio do SAP2000 foi possível representar de maneira mais precisa os carregamentos aplicados aos elementos estruturais que compõem o flutuante, contudo em relação à variação total da quantidade de aço, para o dimensionamento realizado com o SAP2000 obteve-se uma economia de 37% na quantidade em massa de aço.

## 6. CONCLUSÃO

O desenvolvimento deste trabalho proporcionou uma maior percepção referente à área estrutural, e notou-se que as teorias, normas e métodos de análises devem ser constantemente estudados, sendo primordial, mesmo com auxílios de *softwares*, a análise final de um engenheiro civil.

Esta pesquisa teve como objetivo realizar uma análise e dimensionamento estrutural de um flutuante de concreto armado através do *software* SAP2000, baseado no Método dos Elementos Finitos, e respeitando a norma NBR 6118 (2014), a qual se tornou uma boa opção para análise desta estrutura.

Comparando o dimensionamento realizado neste estudo com um projeto modelo, realizado pela Empresa X, é possível verificar que a quantidade de aço executado pela Empresa X foi maior, contudo a análise realizada pelo SAP2000 foi positiva, com uma economia de 37% em massa de aço.

Outro fator relevante é o fato de que a Empresa X optou por padronizar as armaduras de aço com telas eletro soldadas, o que facilita a montagem, porém distribui uniformemente a armadura mantendo uma taxa quase padrão de armadura, o que não condiz com a variação das tensões encontradas no método proposto, no qual se aplicou a armadura de forma a atender aos esforços em cada posição.

É importante ressaltar que o *software* SAP2000 apresenta resultados com qualidade e rapidez, porém demanda conhecimento considerável sobre o programa e deve sempre ser utilizado com atenção sobre as condições de contorno e as aplicações dos carregamentos que estão sendo adotadas para se obter um dimensionamento correto.

Por fim, conclui-se que o detalhamento de um flutuante de concreto armado, dimensionado pelos Métodos dos Elementos Finitos, utilizando o SAP2000, se torna consideravelmente mais eficiente e econômico que um dimensionamento manual e mais simples.

### 7.1.1. Sugestões para trabalhos futuros

- Realizar os cálculos manuais e comparar os momentos fletores em um flutuante;
- Realizar um detalhamento estrutural com flutuantes com outras dimensões, verificando a flutuabilidade (algo que resultaria diferentes carregamentos à estrutura);
- Comparar *softwares* que utilizam o Método dos Elementos Finitos como ANSYS e SAP2000 em análises de flutuantes de concreto armado;
- Utilização de vergalhões resistentes à corrosão, como, por exemplo, os compósitos de fibra, cujo recobrimento poderia ser reduzido consideravelmente, porém ainda sem normatização no Brasil.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto– Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120**: Ações para o cálculo de estruturas de edificações – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7480**: Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado – Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8681**: Ações e segurança nas estruturas – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9782**: Ações e em estruturas portuárias marítimas ou fluviais – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland Preparo, controle, recebimento e aceitação Procedimento. Rio de Janeiro, 2015.
- BASTOS, Prof. Dr. Paulo Sérgio dos Santos. **FUNDAMENTOS DO CONCRETO ARMADO**. Bauru/Sp: Unesp, 2019. 89 p.
- CARVALHO, Roberto Chust; FIGUEIREDO FILHO. **Concreto Armado**: segundo nbr6118:2014. 4. ed. São Paulo: Edufscar, 2014.
- CARDOSO JÚNIOR, Sander David. **ELABORAÇÃO DE UM PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA O CÁLCULO E DIMENSIONAMENTO DE LAJES MACIÇAS**. 2008. 113 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2008.
- COLAÇO, Talita Resmin. **ANÁLISE DO DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL DE RESERVATÓRIOS RETANGULARES EM CONCRETO ARMADO**. 2022. 135 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Unisc, Santa Cruz do Sul, 2017.
- FREITAS, Mariana Silva. **Análise dos deslocamentos e dos momentos fletores nas fundações e nos pilares de pontes retas ortogonais em concreto armado considerando a interação solo-estrutura**. 2018. 202 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018.

FUSCO, P.B. (1976). **Estruturas de concreto: fundamentos do projeto estrutural**. São Paulo, McGraw-Hill/Ed. da USP

FUSCO, Péricles Brasiliense. **Técnicas de Armar estruturas em concreto armado** São Paulo, PINI, 1995.

HELERBROCK, Rafael. **Empuxo; Brasil Escola**. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/fisica/empuxo.htm>. Acesso em 29 de setembro de 2022.

MARZO, Giuseppe Renato di. **Aplicação do método dos elementos finitos na análise de tensões induzidas em cabos umbilicais**. 2010. 106 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Departamento de Engenharia de Energia e Automações Elétricas, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

MONTEIRO, Prof. Anelize Borges. **Notas de aula da disciplina de Concreto Armado I – Estruturas de Concreto I**. Curso de graduação em Engenharia Civil de infraestrutura. Universidade Federal de Santa Catarina. Joinville, 2022.

MULTIPLUS (Brasil) (org.). **SAP2000**. Disponível em: <https://multiplus.com/software/sap2000/index.html>. Acesso em: 07 jun. 2022.

NANJING, **MARINE FENDER SYSTEM**. China. 47 páginas. 2022

PINHEIRO, L. M. *Concreto armado: tabelas e ábacos*. São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos – USP, Departamento de Engenharia de Engenharia de Estruturas, 1994.

PIERGLASS (São Paulo). **CAIS FLUTUANTE**. Disponível em: [pierglass.com.br/cais-flutuante#:~:text=O%20cais%20flutuante%20é%20uma,embarque%20e%20desembarque%20de%20pessoas..](http://pierglass.com.br/cais-flutuante#:~:text=O%20cais%20flutuante%20é%20uma,embarque%20e%20desembarque%20de%20pessoas..) Acesso em: 10 nov. 2022.

Revista Amanhã. **PORTOS DO PARANÁ DEVEM RECEBER R\$ 2,3 BILHÕES EM INVESTIMENTOS**. Paraná: 19 maio 2022. Disponível em: <https://amanha.com.br/categoria/infraestrutura/portos-do-parana-devem-receber-r-2-3-bilhoes-em-investimentos>. Acesso em: 04 out. 2022.

SANCHEZ, Cesar Antonio Aparicio. **Estudo de impacto usando elementos finitos e análise não-linear**. 2001. 143 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

SOUZA, Victor José Luiz de. **Contribuição ao projeto e dimensionamento da superestrutura de pontes rodoviárias em vigas mistas de aço e concreto.** 2012. 166 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós. Graduação em Construção Civil, Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2012.

TEIXEIRA, R.L. (1993). **Considerações para projeto de reservatórios paralelepípedicos.** São Carlos, EESC-USP.

VASCONCELOS, Zelma Lamaneres. **CRITÉRIOS PARA PROJETOS DE RESERVATÓRIOS PARALELEPIPÉDICOS ELEVADOS DE CONCRETO ARMADO.** 2022. 143 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

VLASSOV, B.Z. (1962). **Pieces longues en voiles minces.** Paris, Eyrolles.

## ANEXO A – Tabela de armadura

Tabela 1.4a							
ÁREA DA SEÇÃO DE BARRAS POR METRO DE LARGURA $a_s$ (cm <sup>2</sup> /m)							
s (cm)	DIÂMETRO NOMINAL (mm)						s (cm)
	5,0	6,3	8,0	10,0	12,5	16,0	
5,0	3,92	6,24	10,06	15,70	24,54	40,22	5,0
5,5	3,56	5,67	9,15	14,27	22,31	36,56	5,5
6,0	3,27	5,20	8,38	13,08	20,45	33,52	6,0
6,5	3,02	4,80	7,74	12,08	18,88	30,94	6,5
7,0	2,80	4,46	7,19	11,21	17,53	28,73	7,0
7,5	2,61	4,16	6,71	10,47	16,36	26,81	7,5
8,0	2,45	3,90	6,29	9,81	15,34	25,14	8,0
8,5	2,31	3,67	5,92	9,24	14,44	23,66	8,5
9,0	2,18	3,47	5,59	8,72	13,63	22,34	9,0
9,5	2,06	3,28	5,29	8,26	12,92	21,17	9,5
10,0	1,96	3,12	5,03	7,85	12,27	20,11	10,0
11,0	1,78	2,84	4,57	7,14	11,15	18,28	11,0
12,0	1,63	2,60	4,19	6,54	10,23	16,76	12,0
12,5	1,57	2,50	4,02	6,28	9,82	16,09	12,5
13,0	1,51	2,40	3,87	6,04	9,44	15,47	13,0
14,0	1,40	2,23	3,59	5,61	8,76	14,36	14,0
15,0	1,31	2,08	3,35	5,23	8,18	13,41	15,0
16,0	1,23	1,95	3,14	4,91	7,67	12,57	16,0
17,0	1,15	1,84	2,96	4,62	7,22	11,83	17,0
17,5	1,12	1,78	2,87	4,49	7,01	11,49	17,5
18,0	1,09	1,73	2,79	4,36	6,82	11,17	18,0
19,0	1,03	1,64	2,65	4,13	6,46	10,58	19,0
20,0	0,98	1,56	2,52	3,93	6,14	10,06	20,0
22,0	0,89	1,42	2,29	3,57	5,58	9,14	22,0
24,0	0,82	1,30	2,10	3,27	5,11	8,38	24,0
25,0	0,78	1,25	2,01	3,14	4,91	8,04	25,0
26,0	0,75	1,20	1,93	3,02	4,72	7,73	26,0
28,0	0,70	1,11	1,80	2,80	4,38	7,18	28,0
30,0	0,65	1,04	1,68	2,62	4,09	6,70	30,0
33,0	0,59	0,95	1,52	2,38	3,72	6,09	33,0

Elaborada por Alessandro L. Nascimento e Libânio M. Pinheiro.

De acordo com a NBR 7480:1996.